



ИнтерКарто. ИнтерГИС

**ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ**

**Материалы Международной конференции**

Апатиты (Мурманская область, Россия)

21–23 августа

Нур-Султан (Казахстан)

27 августа 2021

**Том 27**

Часть 3

<http://intercarto.msu.ru>



**ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**  
МГУ имени М.В. Ломоносова

Москва, 2021

ISSN 2414-9179 (Print)  
ISSN 2414-9209 (Online)  
УДК 911.2:528

*Организаторы конференции:*

*Международная картографическая ассоциация, Международная академия наук Евразии, Кольский научный центр РАН, Институт проблем промышленной экологии Севера (ИППЭС КНЦ РАН), Научно-исследовательский центр медико-биологических проблем адаптации человека в Арктике, Апатиты (НИЦ МБП КНЦ РАН), Мурманское отделение Русского географического общества, МГУ имени М.В. Ломоносова, Исследовательский центр КАРТФОНД, Российский Университет Дружбы народов (РУДН), Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Отделение наук о Земле РАН, Центр по исследованию окружающей среды им. Гельмгольца, Республиканское общественное объединение «QazaqGeography» (Казахстан)*

**ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития**

И 732 территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 3. 453 с.

Сборник включает материалы, представленные на Международную конференцию «ИнтерКарто. ИнтерГИС 27». В статьях рассматриваются теоретические и методические аспекты геоинформационного и картографического обеспечения экологических, экономических и социальных вопросов устойчивого развития, геоинформатики, картографии, создания атласов, дистанционного зондирования Земли. Также рассматриваются аспекты картографического и геоинформационного обеспечения решения вопросов общественного здоровья, сельского хозяйства и землепользования, туризма, природного и культурного наследия, исторической географии и географического образования. Сборник выпускается 1 раз в год, начиная с 1994 г.

Главный редактор: **В.С. Тихунов** (МГУ, советник рабочей группы «Картография для устойчивого развития» МКА)

Ответственные редактора: **М.В. Грибок** (МГУ), **О.Ю. Черешня** (МГУ)

Редакционная коллегия: **О.Е. Архипова** (Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону), **П.Я. Бакланов** (Тихоокеанский ин-т географии РАН, г. Владивосток), **А.Р. Батуев** (Ин-т географии СО РАН, г. Иркутск), **В.С. Белозёр** (Северо-Кавказский федеральный ун-т, г. Ставрополь), **С.Н. Бобылёв** (МГУ), **Ц. Вэйхун** (Нац. исслед. центр инженерии и геоматики, Китай), **Г. Гиенко** (Ун-т Аляски, США), **М. Говоров** (Университетский Колледж Маласпина, Канада), **Н. Гойко** (Ун-т Черногории), **С. Горин** (Ун-т Св. Кирилла и Мефодия, Македония), **Н. Караниколас** (Ун-т Аристотеля, Греция), **Т. Кольчугина** (Корпорация технологий устойчивого развития, США), **А.В. Кошкарёв** (Институт географии РАН), **Х. Кремерс** (советник рабочей группы «Картография для устойчивого развития» МКА, Германия), **А. Курбан** (Синьцзянский ин-т экологии и географии, Китай), **Х. Линь** (Китайский ун-т Гонконга), **Д.В. Лисицкий** (Сибирский государственный ун-т геосистем и технологий, г. Новосибирск), **И.К. Лурье** (МГУ), **Ф. Де Мейер** (Гентский ун-т, Бельгия), **М.В. Нырцов** (МГУ), **Г. Нямдава** (Министерство окружающей среды, зелёного развития и туризма, Монголия), **Ф. Ормелинг** (Ун-т Утрехта, Нидерланды), **Е.А. Паниди** (Санкт-Петербургский государственный ун-т), **А.Н. Панин** (МГУ), **А.В. Погорелов** (Кубанский государственный ун-т, г. Краснодар), **С.В. Пьянков** (Пермский государственный ун-т), **И.Н. Ротанова** (Алтайский государственный ун-т, г. Барнаул), **И.Д. Стрелецкая** (МГУ), **Н. Улугтекин** (Стамбульский технический ун-т, Турция), **Н.Н. Филатов** (Институт водных проблем Севера РАН, г. Петрозаводск), **М.-И. Фрейтас** (Гос. ун-т Сан-Паулу, Бразилия), **Р. Хусса** (Марокко), **А.Н. Чумаченко** (Саратовский государственный ун-т), **Н.А. Щитова** (Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь)

Образцы цитирования:

Ivanov A.B., Petrov A.B. Title of the article. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Faculty of Geography MSU, 2021. V. 27. Part 3. P. 110–120. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-110-120 (для цитирования на английском языке).

Иванов И.О., Петров И.О. Название статьи. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 3. С. 110–120. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-110-120 (для цитирования на русском языке).

Адрес редакции:

Лаборатория комплексного картографирования географического факультета МГУ  
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, комн. 2209, тел.: +7(495)939-23-54, e-mail: [intercarto@yandex.ru](mailto:intercarto@yandex.ru)  
Интернет-сайт: [intercarto.msu.ru](http://intercarto.msu.ru)



InterCarto. InterGIS

**GI SUPPORT OF SUSTAINABLE  
DEVELOPMENT OF TERRITORIES**

**Proceedings of the International conference**

Apatity (Murmansk region, Russia)

August 21–23

Nur-Sultan (Kazakhstan)

August 27, 2021

**Volume 27**

Part 3

<http://intercarto.msu.ru>



**ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**  
МГУ имени М.В. Ломоносова

Moscow, 2021

ISSN 2414-9179 (Print)  
ISSN 2414-9209 (Online)

*Organized by:*

*International Cartographic Association (ICA), International Eurasian Academy of Sciences, Institute of North Industrial Ecology Problems of the Kola Science Center of Russian Academy of Sciences, Research Center for Medical and Biological Problems of Human Adaptation in the Arctic of the Kola Science Center of Russian Academy of Sciences, Murmansk branch of the Russian Geographical Society, Moscow State University named after M.V. Lomonosov (MSU), KARTFOND Research Center, Peoples' friendship university of Russia (RUDN), Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Department of Earth Sciences of Russian Academy of Sciences, Helmholtz Centre for Environmental Research (UFZ), Republican Public Association "QazaqGeography" (Kazakhstan)*

**InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Faculty of Geography MSU, 2021. V. 27. Part 3. 453 p.**

The Proceedings include papers presented at the "InterCarto. InterGIS 27" International conference. The articles are reviewed theoretical and methodological aspects of geoinformation and cartographic support of ecological, economic and social aspects of sustainable development, geoinformatics, cartography, creation of the atlases, remote sensing of the Earth. Aspects of cartographic and geoinformation providing of issues of public health, agriculture and land use, tourism, natural and cultural heritage, historical geography and geographical education also are considered. The Proceedings have been published once per year since 1994.

Editor-in-Chief: **V. Tikunov** (MSU, Advisor to the Working Group "Cartography for Sustainable Development" ICA)

Executive Editors: **O. Chereshnya** (MSU), **M. Gribok** (MSU)

Editorial Board: **O. Arkhipova** (Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences (RAS), Rostov-on-Don), **P. Baklanov** (Pacific Institute of Geography RAS, Vladivostok), **A. Batuev** (Institute of Geography SB RAS, Irkutsk), **V. Belozyorov** (North-Caucasus Federal University, Stavropol), **S. Bobilyov** (MSU), **A. Chumachenko** (Saratov State University), **N. Filatov** (Institute of Water Problems of the North of RAS, Petrozavodsk), **M.I. Freitas** (UNESP São Paulo State University, Brazil), **G. Gienko** (University of Alaska, USA), **N. Gojko** (University of Montenegro), **S. Gorin** (St. Cyril and St. Methodius University, Macedonia), **M. Govorov** (Malaspina University College, Canada), **R. Houssa** (Morocco), **N. Karanikolas** (Aristotle University of Thessaloniki, Greece), **T. Kolchugina** (Sustainable Development Technology Corporation, USA), **A. Koshkarev** (Institute of Geography RAS, Moscow), **H. Kremers** (Advisor of ICA Working Group Cartography for Sustainability, Germany), **A. Kurban** (Xinjiang Institute of Ecology and Geography, China), **H. Lin** (Chinese University of Hong Kong), **D. Lisitsky** (Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk), **I. Lourie** (MSU), **Ph. De Maeyer** (Ghent University, Belgium), **G. Nyamdavaa** (Ministry of Environment, Green Development and Tourism, Mongolia), **M. Nyrtsov** (MSU), **F. Ormeling** (Utrecht University, Netherlands), **E. Panidi** (St. Peterburg State University), **A. Panin** (MSU), **A. Pogorelov** (Kuban State University, Krasnodar), **S. Pyankov** (Perm State University), **I. Rotanova** (Altai State University, Barnaul), **N. Shchitova** (North Caucasus Federal University, Stavropol), **I. Streletskaya** (MSU), **N. Ulugtekin** (Istanbul Technical University, Turkey), **C. Weihong** (National Engineering Research Center for Geomatics of China).

Please use the exact name of the Proceedings for citations.

Citation example:

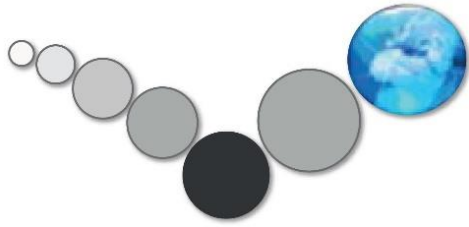
Ivanov A.B., Petrov A.B. Title of the article. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Faculty of Geography MSU, 2021. V. 27. Part 3. P. 110–120. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-110-120.

Editorial Office:

Integrated Mapping Laboratory, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University;  
119991, Russia, Moscow, Leninskie Gory, 1, of. 2209; tel.: +7(495)939-23-54; e-mail: [intercarto@yandex.ru](mailto:intercarto@yandex.ru)  
Website: [intercarto.msu.ru](http://intercarto.msu.ru)

© International Cartographic Association, 2021

© Authors, 2021



## ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ И КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ОКЕАНА

### GIS AND CARTOGRAPHIC SUPPORT FOR OCEAN RESEARCH

УДК 551.465

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-5-15

А.Н. Морозов<sup>1</sup>, Е.В. Маньковская<sup>2</sup>

#### СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ВОД В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ *LADCP*

##### АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты предварительного анализа данных по течениям, собранных в четырнадцать крупномасштабных экспедициях Морского гидрофизического института в 2016–2019 гг. в северо-восточной части Черного моря. Показано, что использование погружаемого акустического доплеровского профилометра течений (*LADCP*) значительно повышает информативность экспедиционных материалов, открывая новые возможности в экспериментальном исследовании динамики вод. По материалам экспедиций установлено, что в районе проведения измерений верхний слой сдвиговых бароклинных течений ограничен глубиной залегания изопикны со значением потенциальной плотности  $\sim 16,75 \text{ кг/м}^3$  ( $\sim 350 \text{ м}$ ). На этой глубине наблюдается переход изменчивости с глубиной частоты плавучести от степенной к экспоненциальной зависимости. Этой же глубиной ограничивается проникновение сезонных вариаций средней кинетической энергии в толщу вод. Наибольшие значения средней кинетической энергии наблюдаются в апреле-мае и ноябре-декабре, наименьшие – в июне-августе. Отношение максимальных значений энергии (весна, поздняя осень, зима) к ее минимальным значениям (лето) в верхнем слое составило  $\sim 3$ . Наиболее хорошо Основное черноморское течение выражено вблизи Крымского полуострова в весенний и зимний сезоны. Летом и осенью горизонтальное распределение скорости течения в слое глубин 30–80 м менее структурировано, что вызвано сезонной интенсификацией мезомасштабных процессов. На ряде станций профили скорости течения содержат фрагменты с хорошо выраженной гармонической изменчивостью компонент скорости течения с глубиной, которая может быть интерпретирована как проявление около инерционных внутренних волн. В большинстве случаев вращение вектора скорости течения с глубиной происходит по часовой стрелке, что определяет направление распространения около инерционных внутренних волн в толщу вод как основное. На примере одной из станций показан существенный вклад таких волн в значение вертикального сдвига скорости течения. Это обстоятельство позволяет предположить значительное влияние около инерционных внутренних волн на процессы вертикального турбулентного обмена в толще вод.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Черное море, циркуляция вод, кинетическая энергия, около инерционные внутренние волны, вертикальный сдвиг скорости.

<sup>1</sup> Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь, ул. Капитанская 2, 299011, Россия, e-mail: [anmorozov@mhi-ras.ru](mailto:anmorozov@mhi-ras.ru)

<sup>2</sup> Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь, ул. Капитанская 2, 299011, Россия, e-mail: [emankovskaya@mhi-ras.ru](mailto:emankovskaya@mhi-ras.ru)

Alexey N. Morozov<sup>1</sup>, Ekaterina V. Mankovskaya<sup>2</sup>

## MODERN STUDIES OF WATER DYNAMICS IN THE NORTH-WESTERN PART OF BLACK SEA FROM *LADCP* MEASUREMENTS

### ABSTRACT

In this work a result of preliminary analysis of current measurements collected in fourteen large-scale expeditions of the Marine Hydrophysical Institute in 2016-2019 in the north-eastern part of the Black Sea is presented. It is shown that the use of the Lowered Acoustic Doppler Current Profiler (*LADCP*) significantly increases the information content of the expedition materials, opening up new opportunities in the experimental study of water dynamics.

Based on the materials of the expeditions, it was found that the upper layer of shear baroclinic currents in the measurement area is limited by the isopycnic depth with a potential density of  $\sim 16.75 \text{ kg/m}^3$  ( $\sim 350 \text{ m}$ ). At this depth, the variability of the buoyancy frequency with the depth changes from a power-law to an exponential dependence. The same depth limits the penetration of seasonal variations of the average kinetic energy into the water column. The highest values of the average kinetic energy are observed in April-May and November-December, the lowest – in June-August. The ratio of the maximum energy values (summer) to its minimum values (spring, late autumn, winter) was  $\sim 3$ .

The Rim Black Sea Current is most pronounced near the Crimean Peninsula in the spring and winter seasons. In summer and autumn, the horizontal distribution of the current velocity in depths of 30–80 m is less structured, which is caused by the seasonal intensification of mesoscale processes.

At a number of stations, the current velocity profiles contain fragments with a well-defined harmonic variability of the current velocity components with depth, which can be interpreted as the manifestation of near-inertial internal waves. In most cases, the rotation of the current velocity vector with depth occurs clockwise, which determines the main direction of propagation of the inertial internal waves into the water column. The example of one of the stations shows the significant contribution of such waves to the value of shear. This fact suggests a significant influence of near-inertial internal waves on the processes of vertical turbulent exchange in the water column.

**KEYWORDS:** Black Sea, water circulation, kinetic energy, near-inertial internal waves, shear.

### ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальное исследование динамики вод остается одной из важных задач прикладной океанологии на протяжении многих десятилетий. В настоящее время для решения этой задачи успешно используются акустические доплеровские профилометры течений (*ADCP*) в различных приложениях. Будучи установленными на автономных, донных или стационарных станциях, они позволяют исследовать временную эволюцию вертикальной структуры поля скорости течения в точке постановки. Смонтированные на судне (*Vessel Mounted ADCP*) такие приборы используются для исследования пространственной изменчивости поля скорости течения в верхнем слое моря вдоль пути следования. Технология использования профилометров в качестве погружаемого зонда (*Lowered ADCP*) дает уникальную возможность измерять профили скорости течения с борта дрей-

<sup>1</sup> Marine Hydrophysical Institute RAS, 2 Kapitanskaya st., Sevastopol, 299011, Russia, e-mail: [anmorozov@mhi-ras.ru](mailto:anmorozov@mhi-ras.ru)

<sup>2</sup> Marine Hydrophysical Institute RAS, 2 Kapitanskaya st., Sevastopol, 299011, Russia, e-mail: [emankovskaya@mhi-ras.ru](mailto:emankovskaya@mhi-ras.ru)

фующего судна во всей толще вод моря, которая может значительно превышать рабочую дальность прибора. Первая *LADCP* станция была выполнена в 1989 г. [Firing, Gordon, 1990]. В последующие годы такая технология измерения профилей скорости течения стала стандартной при проведении экспедиционных работ и получила еще более широкое распространение после создания программного обеспечения обработки данных *LDEO* (*Lamont-Doherty Earth Observatory*) на основе метода инверсных решений [Visbeck, 2002].

В Морском гидрофизическом институте (МГИ) в практике экспедиционных работ *LADCP* используется с 2004 г. Кратко результаты использования прибора в северо-западной части Черного моря в 2014 г. приведены в работе [Morozov et al., 2017]. Начиная с 2016 г. институтом возобновлены регулярные крупномасштабные экспедиционные исследования в северо-восточном секторе моря. В настоящей работе представлены и обсуждаются результаты предварительного анализа материалов по измерению течений, собранных в современных экспедициях.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

За период с 2016 по 2019 гг. Морским гидрофизическим институтом выполнено четырнадцать крупномасштабных экспедиций в северо-восточной части Черного моря на борту научно-исследовательского судна «Профессор Водяницкий». Количество станций в каждой съемке составляет 100–150. Схема расположения станций приведена на рис. 1. В левой нижней части рисунка приведена нумерация и время проведения экспедиций.

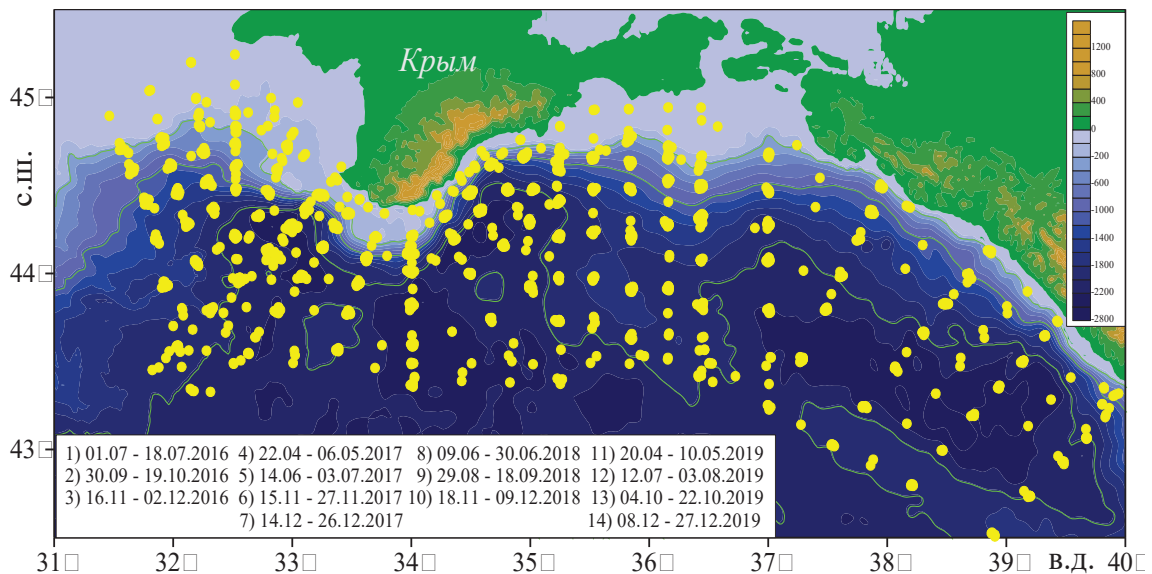


Рис. 1. Схема расположения станций в экспедициях МГИ 2016–2019 гг.

Fig. 1. Map of stations in cruises of Marine Hydrophysical Institute in 2016–2019

В экспедициях *CTD*-измерения выполнялись зондом *SBE911+*. Профили температуры, солёности и потенциальной плотности интерполировались на 1-метровую сетку по глубине. Для измерения скорости течения использовался *LADCP* на базе *WHM300* производства *RDI*. Параметры работы прибора устанавливались следующие: опция *LADCP* включена в режиме «высокое разрешение/короткая дистанция», дискретность по времени – 1 с, по глубине – 4 м. Последовательность выполнения измерений включала выдержку прибора у поверхности моря на глубине ~3 м в течение 5 минут, дальнейшее его погружение со скоростью 0,5 м/с до глубины зондирования,

выдержку на этом горизонте в течение 5 мин. и последующий подъем на поверхность со скоростью 0,5 м/с.

Схема измерения профиля скорости течения приведена на рис. 2. Упрощенно обработка данных заключается в следующем. Каждый цикл измерения рассчитывается локальный профиль сдвига скорости течения, по окончании зондирования воспроизводится профиль сдвига во всем слое, который интегрируется, и неопределенная постоянная определяется с использованием GPS-данных навигационной системы судна. На практике обработка LADCP-данных выполняется с помощью программы LDEO Software версии IX.12. Программа адаптирована для условий проведения измерений в Черном море, позволяет рассчитать вертикальные профили скорости течения на глубоководных станциях в слое от ~30 м до глубины выполнения зондирования. В верхнем слое моря и на мелководных станциях (глубины до ~70 м) профиль скорости течения рассчитывается по данным выдержки ADCP у борта судна с помощью специализированного программного обеспечения, учитывающего влияние корпуса судна на показания компаса прибора.

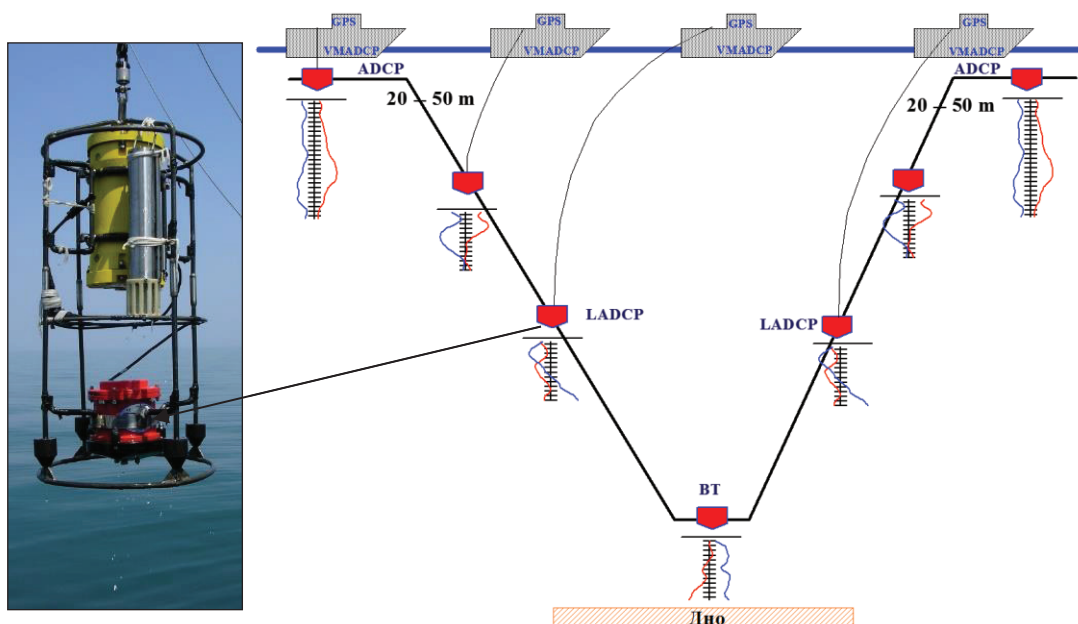


Рис. 2. Положение прибора в составе зонда и схема измерений LADCP с борта дрейфующего судна

Fig. 2. The instrument position inside the probe and the LADCP measurement scheme from the board of the drifting vessel

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3. приведены примеры профилей горизонтальных компонент скорости течения и потенциальной плотности, полученные на двух станциях в первой экспедиции (01.07–18.07.2016). Измеренные LADCP вертикальные профили скорости течения, как правило, характеризуются большей изрезанностью в отличие от плавно меняющихся с глубиной скоростей геострофических течений, по форме близких к изменению потенциальной плотности с глубиной. Это обстоятельство определяется тем, что существенный вклад в изменчивость скорости течения вносят агеострофические процессы, в частности внутренние волны. Благодаря этому CTD/LADCP-данные, полученные с мелкомасштабным разрешением, часто используются для расчета коэффициента вертикальной турбулентной диффузии [Naveira Garabato et al., 2004].



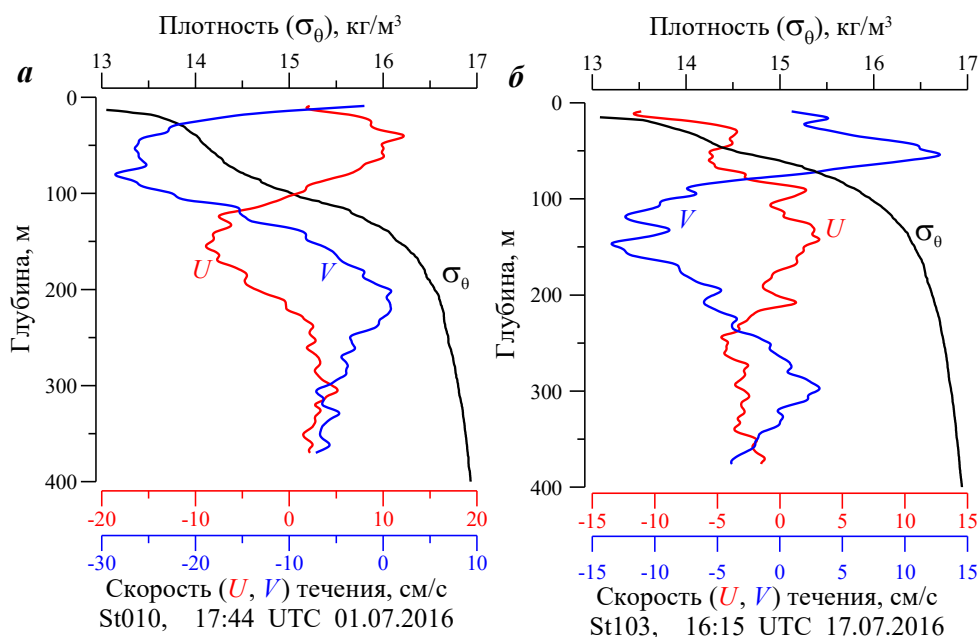


Рис. 3. Примеры профилей восточной ( $U$ ) и северной ( $V$ ) компонент скорости течения

Fig. 3. Examples of profiles of the eastern ( $U$ ) and northern ( $V$ ) components of the current velocity

Использование прибора в экспедициях позволяет получить представление о состоянии крупномасштабной циркуляции вод Черного моря и ее сезонной изменчивости. На рис. 4 в векторном виде представлены осредненные в слое глубин 30–80 м значения скорости течения, рассчитанные по материалам четырех экспедиций 2019 г. Основное черноморское течение наиболее хорошо выражено в весенний сезон вблизи Крымского полуострова. В летнее и осеннее время наблюдается ослабление крупномасштабной циклонической циркуляции и развитие мезомасштабных процессов (особенно в осенней экспедиции). В зимней экспедиции Основное черноморское течение наиболее хорошо выражено вблизи Крымского полуострова.

Приведенная изменчивость горизонтальной структуры поля скорости от экспедиции к экспедиции, на качественном уровне, согласуется с работой [Зацепин и др., 2010] в части сезонной изменчивости бассейновой циркуляции и мезомасштабной динамики вод Черного моря. Получить более детальное представление о горизонтальной структуре поля скорости течений на основе собранных данных затруднительно из-за значительного пространственного (среднее расстояние между станциями ~20 км) и временного (продолжительность экспедиции 2–4 недели) разнесения измерений. Для детального исследования горизонтальной структуры поля скорости течения в верхнем слое моря лучше всего подходят судовые ADCP. Результаты таких измерений в Черном море обсуждаются в работе [Oguz, Besiktepe, 1999].

В настоящее время измерения, проводимые на фиксированных полигонах, предназначаются для верификации численных моделей. Ожидать сопоставимости отдельных профилей скорости течения измеренных и полученных в результате численных экспериментов не приходится, поскольку мелкомасштабные процессы, которые присутствуют в данных измерений, в моделях могут быть параметризованы. Для задач сопоставления более пригодным может быть осредненное по полигону вертикальное распределение кинетической энергии.

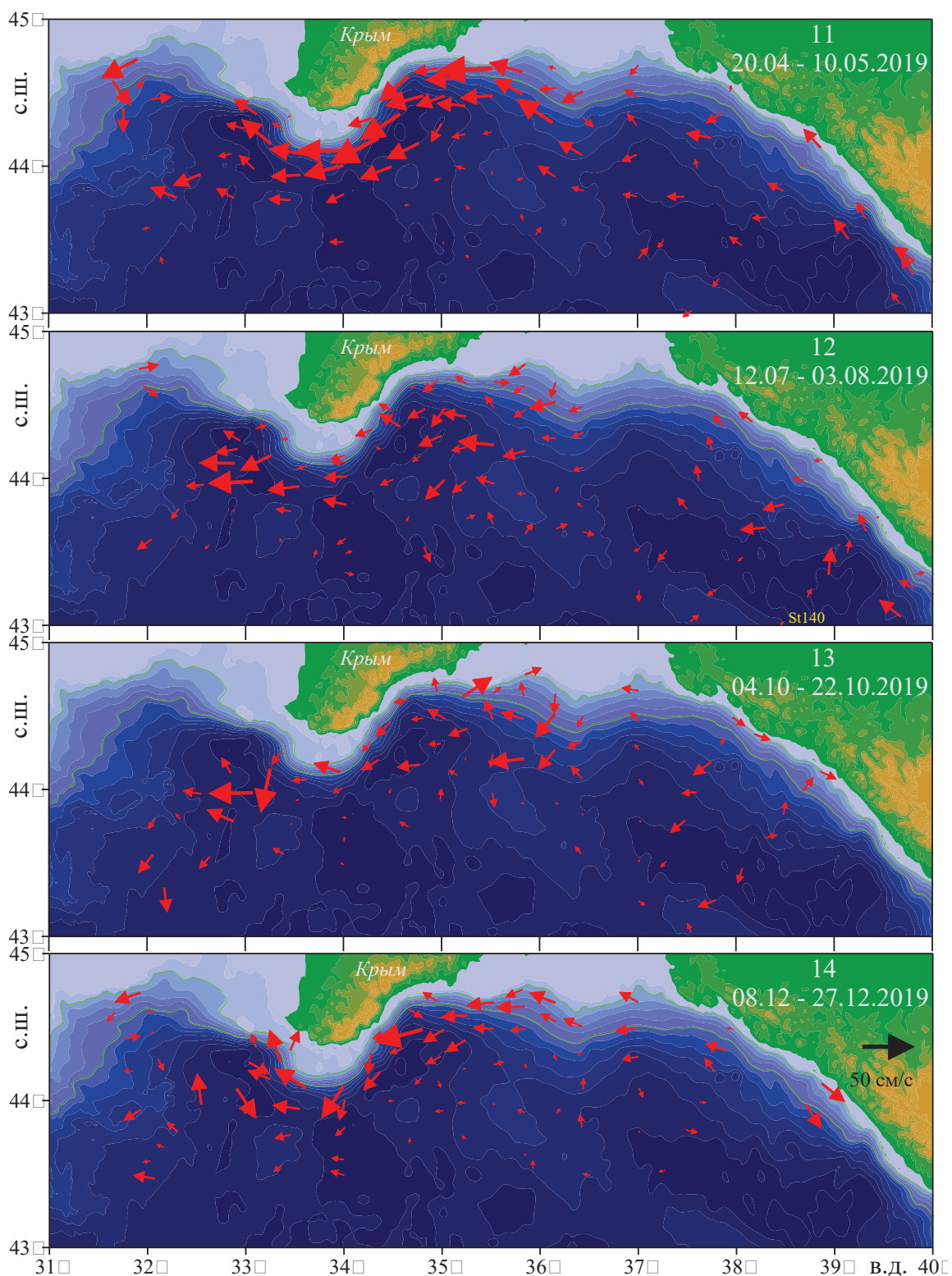


Рис. 4. Скорости течения, осредненные в слое 30–80 м для четырех экспедиций 2019 года (числовые маркеры в верхнем углу справа номера экспедиций)

Fig. 4. Current velocities averaged in 30–80 m layer for four expeditions in 2019 (numerical markers in the upper right corner are the expedition numbers)

В рамках предварительного анализа по всему ансамблю станций для каждой экспедиции было выполнено изопикническое осреднение кинетической энергии. На рис. 5 а приведены результаты такого осреднения для экспедиций, измерения в которых

выполнялись до глубин более 200 м. Экспедиции на рисунке представлены цветовой гаммой. Хорошо прослеживается уменьшение кинетической энергии в верхнем слое в летний период и ее возрастание в весенний и зимний периоды. Аппроксимирующие линейные зависимости, представленные на рисунке черным пунктиром, обращаются в ноль при значении потенциальной плотности  $16,75 \text{ кг/м}^3$ .

Вертикальная структура плотностной стратификации также имеет особенность при данном значении потенциальной плотности. На рис. 5 б приведены профили потенциальной плотности и частоты плавучести, полученные в первой экспедиции (01.07–18.07.2016). Пунктиром на рисунке представлены аппроксимирующие зависимости: степенная (1) и экспоненциальная (2). Первая зависимость  $N(z)=1100 \cdot z^{-1.1}$  хорошо аппроксимирует профиль в слое от локального максимума частоты плавучести в основном пикноклине до глубины залегания изопикны со значением потенциальной плотности  $16.75 \text{ кг/м}^3$ , аналогичная зависимость приводится в работе [Самодуров, 2016]. Вторая зависимость  $N(z)=2.9 \cdot \text{Exp}(-z/758)$  аппроксимирует профиль в слое ниже глубины залегания этой изопикны до 800 м. Отметим, что каноническая экспоненциальная зависимость частоты плавучести от глубины для океанических условий вдалеке от районов генерации внутренних волн представляется в следующем виде  $N(z)=3 \cdot \text{Exp}(-z/1300)$  [Garret, Munk, 1975]. Значительное различие в масштабах глубины (758 и 1300 м), возможно, является следствием различия глубины водоемов.

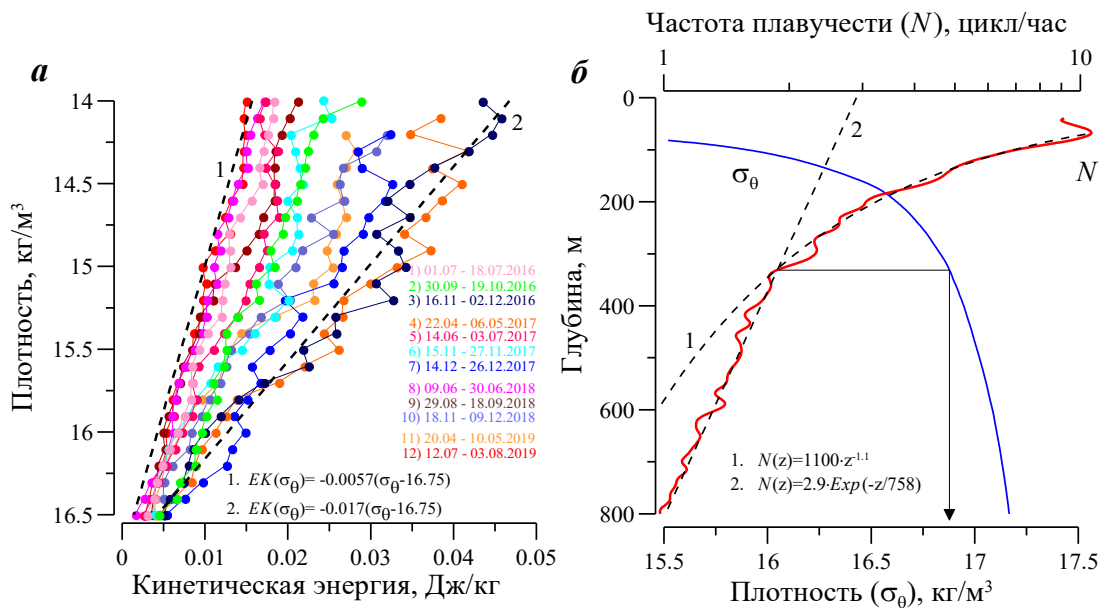


Рис. 5. Изопикнически осредненные по всему ансамблю станций профили кинетической энергии для каждой экспедиции (а) и профили потенциальной плотности и частоты плавучести для глубоководных станций экспедиции 1 (б)

Fig. 5. Kinetic energy profiles isopycnally averaged over the entire ensemble of stations for each expedition (a) and potential density and buoyancy frequency profiles for the deep-water stations of expedition 1 (b)

Хорошо известно, что внутренние волны оказывают доминирующее влияние на процессы вертикального турбулентного обмена. В Черном бесприливном море основным источником внутренних волн является ветер. Более 50 % энергии этих волн сконцентрировано вблизи локальной инерционной частоты. Вызванные ветром около инерционные внутренние волны распространяются в толщу вод, определяя большую

часть вертикального потока кинетической энергии, доступной для генерации турбулентности и вертикального перемешивания. Современные исследования спектральных характеристик вариаций скорости течения в Черном море, приведенные в работе [Клювиткин и др., 2019], показывают значимость инерционных колебаний как на 100-метровом горизонте, так и в глубинном слое на горизонте 1700 метров.

Измеренные профили скорости течения, в ряде случаев, содержат фрагменты с хорошо выраженным вращением вектора скорости течения с глубиной. Для примера на рис. 6 а приведен такой профиль, полученный на станции №140 (18:35 UTC 29.07.2019). В слое глубин 100–160 м наблюдается гармоническая изменчивость восточной и северной компонент скорости течения, соответствующая вращению вектора скорости с глубиной по часовой стрелке. Такое вращение вектора в северном полушарии означает распространение инерционной внутренней волны в толщу вод [Leman, Sanford, 1975]. Гармонические составляющие северной и восточной компонент скорости течения, представленные на рисунке пунктирными линиями, позволяют интерпретировать наблюдаемую изменчивость скорости течения с глубиной как около инерционную внутреннюю волну длиной ~60 м и амплитудой ~15 см/с, распространяющуюся вниз, на фоне относительно слабого течения со скоростью 1 – 2 см/с.

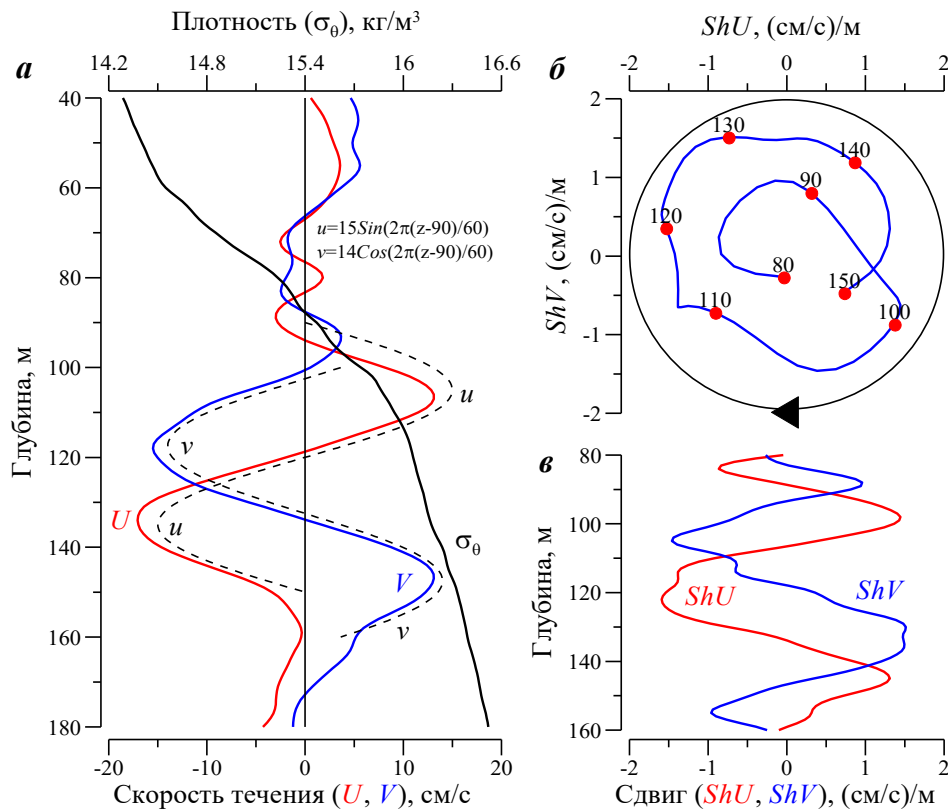


Рис. 6. Примеры профилей восточной ( $U$ ) и северной ( $V$ ) компонент скорости течения (а), годограф сдвига скорости (б) и фрагмент профиля компонент сдвига (в). Числовые маркеры на рис. 6 а – значения глубины

Fig. 6. Examples of the profiles of eastern ( $U$ ) and northern ( $V$ ) components of the current velocity (a), the shear hodograph (b), and the fragment of the profile of the shear components (c). The numerical markers in Fig. 6a are the depth values

Прямые измерения профилей скорости течения позволяют увидеть вертикальную структуру инерционных колебаний и интерпретировать их как проявление около инерционных внутренних волн на горизонте наблюдения. С целью показать значимость около инерционных внутренних волн в формировании значения сдвига скорости течения ( $ShU = \partial U / \partial z$ ,  $ShV = \partial V / \partial z$ ) на рис. 6 б приведен годограф (числовые маркеры – глубина), а на рис. 6 в – фрагмент профиля компонент вектора сдвига. Известно, что сдвиговая неустойчивость является основным механизмом генерации турбулентности. Наблюдения показывают, что значение сдвига во многом определяется около инерционными внутренними волнами. В конечном счете можно сказать, что около инерционные внутренние волны вносят значительный вклад в турбулентный вертикальный обмен в Черном море. Это направление требует более детального анализа имеющихся данных и/или проведения дополнительных измерений, направленных на исследование пространственной структуры около инерционных внутренних волн.

## ВЫВОДЫ

Результаты предварительного анализа данных по течениям, собранных в четырнадцати крупномасштабных экспедициях Морского гидрофизического института, выполненных в 2016–2019 гг. в северо-восточной части Черного моря, демонстрируют новые возможности экспериментального исследования динамики вод в широком диапазоне пространственно-временных масштабов с использованием погружаемого акустического доплеровского профилометра течений (*LADCP*).

На основе данных по течениям получены осредненные профили кинетической энергии для каждой экспедиции, которые могут быть использованы для верификации численных расчетов. Установлено, что в районе проведения измерений проникновение сезонных вариаций средней кинетической энергии в толщу вод ограничено глубиной залегания изопикны со значением потенциальной плотности  $\sim 16.75 \text{ кг/м}^3$  ( $\sim 350 \text{ м}$ ). На этой глубине наблюдается переход изменчивости с глубиной частоты плавучести от степенной к экспоненциальной зависимости.

В слое основного пикноклина выявлена почти линейная зависимость средней кинетической энергии от потенциальной плотности, ранее обнаруженная в северо-западном секторе моря и на бровке свала глубин вблизи г. Геленджик. В верхнем слое моря наибольшие значения средней кинетической энергии наблюдаются в апреле-мае и ноябре-декабре, наименьшие – в июне-августе. Отношение максимальных значений энергии (весна, поздняя осень, зима) к ее минимальным значениям (лето) составило  $\sim 3$ .

Наиболее хорошо основное черноморское течение выражено вблизи юго-восточной части Крымского полуострова в весенний и зимний сезоны. Летом и осенью горизонтальное распределение скорости течения в слое глубин 30–80 м менее структурировано, что вызвано сезонной интенсификацией мезомасштабных процессов из-за ослабления крупномасштабной циклонической циркуляции.

На ряде станций профили скорости течения содержат фрагменты с хорошо выраженной гармонической изменчивостью компонент скорости течения с глубиной, которые могут быть интерпретированы как проявление около инерционных внутренних волн. В большинстве случаев вращение вектора скорости течения с глубиной происходит по часовой стрелке, что определяет направление распространения около инерционных внутренних волн в толщу вод как основное и подтверждает их ветровое происхождение.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания по темам 0555-2021-0003 «Оперативная океанология» и 0555-2021-0005 «Прибрежные исследования»

## ACKNOWLEDGEMENTS

This work was carried out as part of a state assignments No 0555-2021-0003 "Operational Oceanology", No 0555-2021-0005 "Coastal Studies".

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Станичный С.В., Бурдюгов В.М.* Бассейновая циркуляция и мезомасштабная динамика Черного моря под ветровым воздействием. Современные проблемы динамики океана и атмосферы. Сборник статей, посвященный 100-летию со дня рождения проф. П.С. Линейкина. Москва: Гидрометцентр России, 2010. С. 347–368.
2. *Firing E., Gordon R.* Deep ocean acoustic Doppler current profiling. Proc. IEEE 4th Working Conf. on Current Measurements. MD, IEEE, 1990. P. 192–201.
3. *Garret C., Munk W.* Space-Time Scales of Internal Waves: A Progress Report. Journal of Geophysical Research, 1975. V. 80. No 3. P. 291–297.
4. *Klyuvitkin A.A., Ostrovskii A.G., Lisitzin A.P., Konovalov S.K.* The energy spectrum of the current velocity in deep layers of the Black Sea. Doklady Earth Sciences, 2019. V. 488. No 2. P. 1222–1226. DOI: 10.1134/S1028334X1910012X.
5. *Leman D.K., Sanford T.B.* Vertical Energy Propagation of Inertial Waves: A Vector Spectral Analysis of Velocity Profiles. Journal of Geophysical Research, 1975. V. 80. No 15. P. 1975–1978.
6. *Morozov A.N., Lemeshko E.M., Shutov S.A., Zima V.V., Deryushkin D.V.* Structure of the Black Sea currents based on the results of the LADCP observations in 2004–2014. Physical Oceanography, 2017. Iss. 1. P. 25–40. DOI: 10.22449/1573-160X-2017-1-25-40.
7. *Naveira Garabato A.C., Oliver K.I.C., Watson A.J., Messias M.-J.* Turbulent diapycnal mixing in the Nordic seas. Journal of Geophysical Research, 2004. V. 109. Iss. C12. C12010. 9 p. DOI: 10.1029/2004JC002411.
8. *Oguz T., Besiktepe S.* Observations on the Rim Current structure, CIW, formation and transport in the western Black Sea. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, V. 46. Iss. 10. P. 1733-1754. DOI: 10.1016/S0967-0637(99)00028-X.
9. *Samodurov A.S.* Complimentarity of different approaches for assessing vertical turbulent exchange intensity in natural stratified basins. Physical Oceanography, 2016. Iss. 6. P. 32–42. DOI: 10.22449/1573-160X-2016-6-32-42.
10. *Visbeck M.* Deep velocity profiling using Lowered Doppler Current Profilers: bottom track and inverse solutions. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002. V. 19. Iss. 5. P. 794-807. DOI: 10.1175/1520-0426(2002)019<0794: DVPULA>2.0.CO;2.

## REFERENCES

1. *Firing E., Gordon R.* Deep ocean acoustic Doppler current profiling. Proc. IEEE 4th Working Conf. on Current Measurements. MD, IEEE, 1990. P. 192–201.
2. *Garret C., Munk W.* Space-Time Scales of Internal Waves: A Progress Report. Journal of Geophysical Research, 1975. V. 80. No 3. P. 291–297.

3. *Klyuvitkin A.A., Ostrovskii A.G., Lisitzin A.P., Kononov S.K.* The energy spectrum of the current velocity in deep layers of the Black Sea. *Doklady Earth Sciences*, 2019. V. 488, No 2. P. 1222–1226. DOI: 10.1134/S1028334X1910012X.
4. *Leman D.K., Sanford T.B.* Vertical Energy Propagation of Inertial Waves: A Vector Spectral Analysis of Velocity Profiles. *Journal of Geophysical Research*, 1975. V. 80. No 15. P. 1975–1978.
5. *Morozov A.N., Lemeshko E.M., Shutov S.A., Zima V.V., Deryushkin D.V.* Structure of the Black Sea currents based on the results of the LADCP observations in 2004-2014. *Physical Oceanography*, 2017. Iss. 1. P. 25–40. DOI: 10.22449/1573-160X-2017-1-25-40.
6. *Naveira Garabato A.C., Oliver K.I.C., Watson A.J., Messias M.-J.* Turbulent diapycnal mixing in the Nordic seas. *Journal of Geophysical Research*, 2004. V. 109. Iss. C12. C12010. 9 p. DOI: 10.1029/2004JC002411.
7. *Oguz T., Besiktepe S.* Observations on the Rim Current structure, CIW, formation and transport in the western Black Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, V. 46. Iss. 10. P. 1733–1754. DOI: 10.1016/S0967-0637(99)00028-X.
8. *Samodurov A.S.* Complimentarity of different approaches for assessing vertical turbulent exchange intensity in natural stratified basins. *Physical Oceanography*, 2016. Iss. 6. P. 32–42. DOI: 10.22449/1573-160X-2016-6-32-42.
9. *Visbeck M.* Deep velocity profiling using Lowered Doppler Current Profilers: bottom track and inverse solutions. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002. V. 19. Iss. 5. P. 794-807. DOI: 10.1175/1520-0426(2002)019<0794: DVPULA>2.0.CO;2.
10. *Zatsepin A.G., Kremenetskiy V.V., Stanichny S.V., Burdyugov V.M.* Black Sea basin-scale circulation and mesoscale dynamics under wind forcing. *Modern problems of ocean and atmospheric dynamics. Collection of articles dedicated to the 100th anniversary of the birth of prof. P.S. Lineykina.* Moscow: Hydrometeorological Center of Russia, 2010. P. 347–368 (in Russian).

УДК: 551.466.2

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-16-31

Л.В. Харитонов<sup>1</sup>, Д.В. Алексеев<sup>2</sup>, В.В. Фомин<sup>3</sup>

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО РЕЖИМА БУХТЫ АЙ-ТОДОР

### АННОТАЦИЯ

Исследование волнового режима прибрежных акваторий имеет большое практическое значение для безопасности мореплавания, проектирования и эксплуатации объектов береговой инфраструктуры. В настоящей работе на основе математического моделирования определены статистические характеристики и пространственное распределение параметров ветрового волнения для района бухты Ай-Тодор, расположенной на Южном берегу Крыма в Черном море. Анализ параметров ветрового волнения за 1979–2017 гг. показал, что наибольшую повторяемость имеют волны с высотами 0,5 м, со средними периодами 3,0–3,5 с, приходящие от восточного направления; наиболее продолжительные штормовые ситуации образует волнение из сектора восток – юго-юго-запад в период с декабря по январь, среднее многолетнее значение длительности штилей составляет ~ 11 сут. Выполнены оценки экстремальных характеристик ветрового волнения (высот, периодов и длин волн) различной обеспеченности, возможных 1 раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет. Для шторма повторяемостью 1 раз в 25 лет средняя высота волн на подходе к бух. Ай-Тодор составляет 4,5 м, в системе этого шторма высота волн 1%-й обеспеченности достигает 9,6 м. Для ветра 4%-й режимной обеспеченности наиболее волноопасных направлений на основе модели SWAN и метода вложенных сеток произведены расчеты характеристик ветровых волн с высоким пространственным разрешением (~ 1,5 м). Проанализированы поля высот значительных волн, средних длин волн, придонных орбитальных скоростей и распределения зон интенсивности обрушения волн. Определено, что наиболее интенсивное волнение возникает при ветрах юго-восточного, восточного и южного направлений, максимальные придонные орбитальные скорости волновых течений достигают 2,5–3,5 м/с и прослеживаются вдоль берега на глубинах до 10 м. Модельные расчеты волновых течений по математической модели SWASH позволили выявить наличие в береговой зоне вблизи пляжа локального циклонического вихря, способствующего выносу взвешенного материала вдоль южной периферии вихря от пляжа в сторону моря.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ветровое волнение и течения, математическое моделирование, статистические характеристики, м. Ай-Тодор Крым, Черное море, SWAN, SWASH.

<sup>1</sup> Морской гидрофизический институт РАН, Капитанская, д. 2, 299011, Севастополь, Россия, *e-mail: l.kharitonova@mhi-ras.ru*

<sup>2</sup> Морской гидрофизический институт РАН, Капитанская, д. 2, 299011, Севастополь, Россия, *e-mail: d.alekseev@mhi-ras.ru*

<sup>3</sup> Морской гидрофизический институт РАН, Капитанская, д. 2, 299011, Севастополь, Россия, *e-mail: v.fomin@ukr.net*



Lyudmila V. Kharitonova<sup>1</sup>, Dmitrii V. Alekseev<sup>2</sup>, Vladimir V. Fomin<sup>3</sup>

## MATHEMATICAL SIMULATION OF THE AY-TODOR BAY WAVE REGIME

### ABSTRACT

Investigation of wave regime of coastal water areas is practically important for safe shipping, constructing and using of coastal infrastructure objects. At the present paper statistical characteristics and space distribution of parameters of wind waves in the Ay-Todor Bay region placed on the Crimea South Coast of the Black Sea are obtained on the basis of mathematical simulation. Analysis of the wind wave parameters for the year diapason of 1979–2017 has shown that waves running from the east and having 0.5 m heights and 3.0–3.5 s mean periods are the most repeatable. The most durable storms are formed by waves coming from East – South - South-West sector in the period from December to January. The multiannual calm duration is equal to 11 days. Estimation of extremal characteristics (height, period and length) of wind waves of different probability, which possible one time in a year, 5, 10, 25, 50 and 100 years are made. For the storm probable one time in 25 years the mean wave height near the boundary of the Ay-Todor Bay is equal to 4.5 m. For this storm the wave height of 1% probability reaches 9.6 m. For the directions of winds of 4% regime probability which causes the most dangerous waves calculations of wave characteristics with high space resolution (~ 1,5 m) are carried out by using of SWAN model and nested grid technology. Fields of significant wave height, mean wave length, bottom wave orbital velocities and space distribution of wave breaking zones are analyzed. It is found that most intensive waves are generated by wind having south-east, east and south directions. Maximal bottom orbital velocities of wave current reaches of 2.5–3.5 m/s and occurs along the coast till 10 m depth. Model calculation of wave currents by using of SWASH model allowed obtained presence in the coastal zone near beach of local cyclonic eddy, which transport suspended sediments along its south edge from beach towards the sea.

**KEYWORDS:** wind wave and current, mathematical simulation, statistical characteristics, the Ay-Todor Bay of Crimea, the Black Sea, SWAN, SWASH.

### ВВЕДЕНИЕ

Бухта Ай-Тодор расположена на Южном берегу Крымского побережья Черного моря между отрогами мыса Ай-Тодор – Аврориной скалой с юга и мысом Лимен-Бурун с северо-востока (рис. 1, *a*). На ее берегу построен пгт. Гаспра, относящийся к Городскому округу г. Ялта, и памятник архитектуры и истории Ласточкино гнездо. Акватория бухты с 1972 г. относится к особо охраняемой природной территории гидрологического профиля Памятника природы регионального значения «Прибрежный аквальный комплекс у мыса Ай-Тодор» площадью 120 га<sup>4</sup>.

Район исследования представляет собой типичное абразионное побережье Южного берега Крыма. Форму берега моделируют выдвинутые в море сбросово-сдвиговые массивы прочных верхнеюрских известняков, образовавших мысы благодаря устойчивости к размыву [Зенкович, 1958]. Южный борт бухты образован Аврориной скалой, имеющей

<sup>1</sup> Marine Hydrophysical Institute of RAS, 2 Kapitanskaya str., Sevastopol, 299011, Russian Federation, *e-mail*: [l.kharitonova@mhi-ras.ru](mailto:l.kharitonova@mhi-ras.ru)

<sup>2</sup> Marine Hydrophysical Institute of RAS, 2 Kapitanskaya str., Sevastopol, 299011, Russian Federation, *e-mail*: [d.alekseev@mhi-ras.ru](mailto:d.alekseev@mhi-ras.ru)

<sup>3</sup> Marine Hydrophysical Institute of RAS, 2 Kapitanskaya str., Sevastopol, 299011, Russian Federation, *e-mail*: [v.fomin@ukr.net](mailto:v.fomin@ukr.net)

<sup>4</sup> ООПТ России. Электронный ресурс: <http://www.oopt.aari.ru/> (дата обращения 29.04.2021).

высоту до 40 м. К морю мыс обрывается отвесными скалами, под водой породы продолжают опускаться под большим углом, образуя очень приглубый подводный склон. На расстоянии 8 м от уреза глубины достигают 6 м, уклон составляет 0,75. С северо-востока бухта ограждена мысом Лимен-Бурун высотой до 82 м. Скалы также обрывом спускаются к морю, однако, подводный склон здесь более пологий, чем у южного мыса, уклон принимает значения до 0,2. В вершине бухты расположен искусственный галечный пляж (длиной 80 м, шириной до 25 м) неполного профиля в комплексе с гидротехническими сооружениями – монолитным бетонным пирсом, теньевыми навесами с лодочной станцией и подсобными помещениями (рис. 1, б). В естественных условиях, до строительства гидротехнических сооружений, в бух. Ай-Тодор существовал карманный мелкогалечный пляж с глыбовыми навалами в основании (рис. 1, в). Подводный склон приглубый, уклон подводного берегового склона перед пляжем составляет 0,07.

В настоящее время в береговой зоне Крыма активно ведутся работы по реконструкции берегозащитных сооружений, а также по проектированию и строительству новой инфраструктуры для развития рекреационной деятельности. Для подобных работ необходимы сведения о режимно-климатических особенностях ветрового волнения прибрежной акватории Крыма с высоким пространственным разрешением, однако, региональных работ по исследованию волнового режима в рассматриваемом районе практически нет.

Для района акватории Черного моря вдоль южного берега Крыма сведения о ветро-волновом режиме имеются в справочных материалах<sup>1</sup> [Ефимов, Комаровская, 2009], где все море разбито на большие области с характерными характеристиками. Анализу данных на гидрометеорологических станциях посвящены работы [Репетин, 2003; Горячкин, Репетин, 2009]. Анализу волнового климата прибрежной зоны на основе результатов математического моделирования посвящена работа [Divinsky, Kosyan, 2018], однако ближайшие анализируемые точки расположены в районе м. Сарыч и г. Алушта (в 30 км от района исследований).

Целью работы – на основе результатов математического моделирования исследовать статистические характеристики и пространственную структуру ветрового волнения в районе бухты Ай-Тодор.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для расчета параметров ветрового волнения в прибрежной зоне бух. Ай-Тодор применялась численная спектрально-дискретная модель SWAN (Simulating Waves Nearshore)<sup>2</sup> [Booij et al., 1999]. Модель SWAN учитывает генерацию волн приземным ветром, рефракцию на неоднородностях рельефа дна, донное трение и обрушение волн на критических глубинах.

Первым этапом работы было получение статистических характеристик ветрового волнения в прибрежной зоне района исследований. Из-за отсутствия наблюдений статистическому анализу подвергались результаты модельных расчетов ветрового волнения для всего Черного моря, полученные с помощью модели SWAN за 1979–2017 гг. на неструктурированной сетке [Divinskii et al., 2019]. Валидация модели была проведена на основе данных измерений волнения на морской платформе в Каркинитском заливе Черного моря [Полонский и др., 2011]. В качестве входных данных использовались поля приземного

<sup>1</sup> Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземноморского морей. Под ред. Л.И. Лопатухина, А.В. Буханского, С.В. Иванова, Е.С. Чернышевой. СПб., Российский морской регистр судоходства, 2006. 334 с.

<sup>2</sup> SWAN Cycle III version 41.20, User Manual, Delft University of Technology. Netherlands, 2018. 121 p.

ветра ERA-Interim и ERA5 с пространственным разрешением  $0,25^{\circ 1}$ . Для оценки статистических характеристик волнения из расчетного массива выбрана ближайшая к прибрежной зоне бух. Ай-Тодор точка на изобате  $\sim 100$  м, для которой были сформированы временные ряды волновых параметров длиной 39 лет с дискретностью 1 ч. Далее для ссылки на этот массив параметров ветрового волнения в статье используется аббревиатура SWAN-ERA1.

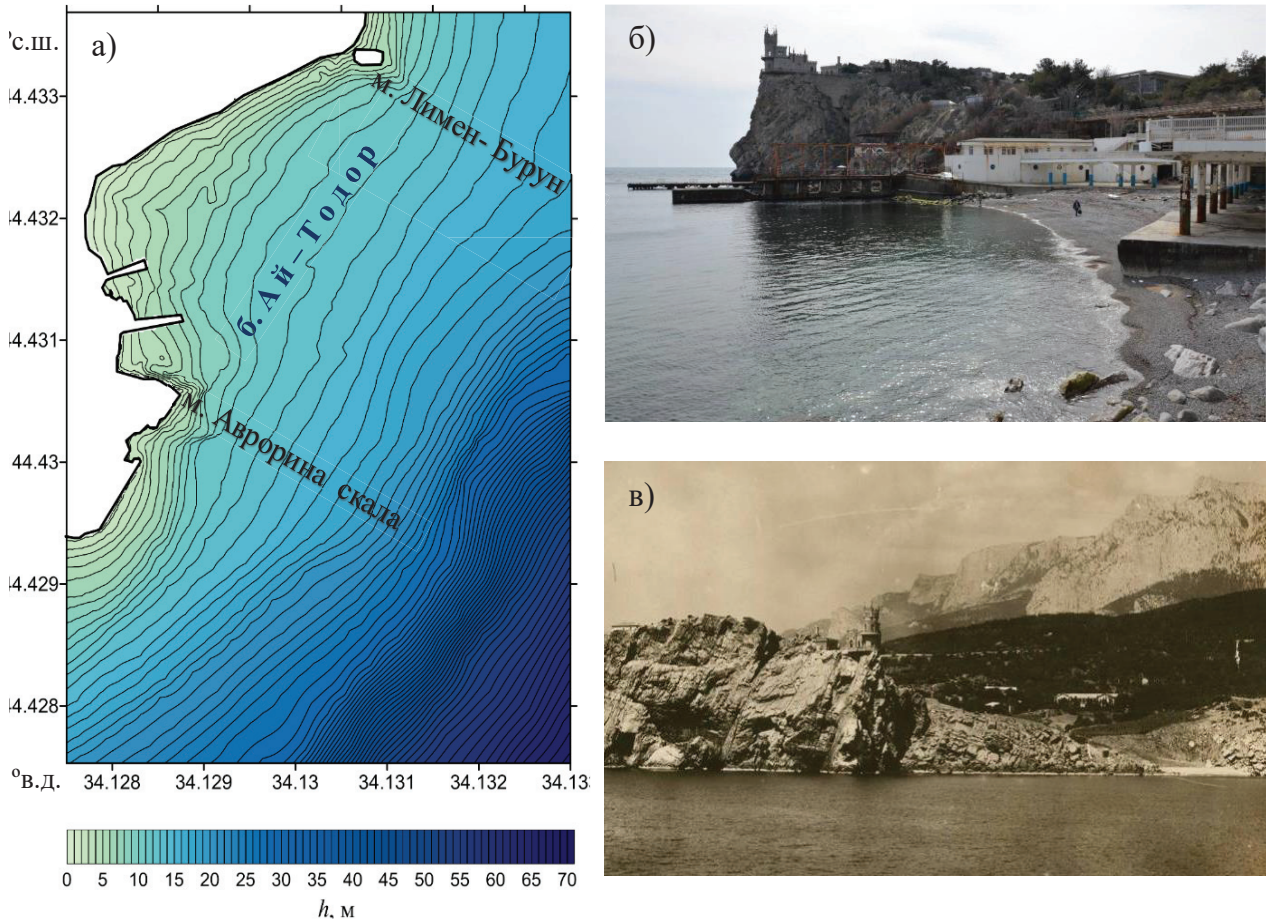


Рис. 1. Модельный рельеф дна (м) береговой зоны в районе бух. Ай-Тодор (а), пляж в бух. Ай-Тодор 22.03.2019 (б), побережье у бух. Ай-Тодор, снимок 1918 г. (в)

Fig. 1. Model bottom relief (m) of coastal zone in the Ay-Todor Bay region (a), beach in the Ay-Todor Bay on 22.03.2019 (b), coastal region of the Ay-Todor Bay in 1918 (c)

Для оценки экстремальных характеристик ветрового волнения применялся метод годовых максимумов, базирующийся на двухпараметрическом экстремальном распределении Гумбеля [Lopatoukhin et al., 2000]. Из массива волновых характеристик SWAN-ERA1 были выделены ряды годовых максимумов средних высот и средних периодов, и далее методом наименьших квадратов определены соответствующие параметры распределения Гумбеля. На основе полученных распределений были вычислены средние значения высот волн ( $\bar{h}$ ) и средние значения периодов волн ( $\bar{\tau}$ ), возможных 1 раз в заданное количество лет, на основе которых по распределению Глуховского [Крылов, 1966] были получены оценки высот и периодов волн различной обеспеченности.

<sup>1</sup> Advancing global NWP through international collaboration. Электронный ресурс: <http://www.apps.ecmwf.int/> (дата обращения 29.04.2021).

Моделирование ветрового волнения непосредственно в береговой зоне бух. Ай-Тодор проводилось с помощью модели SWAN и 5-шагового метода вложенных сеток. На первом шаге моделировались поля волнения во всем Черноморском бассейне на сетке с разрешением  $4,5 \text{ км} \times 4,5 \text{ км}$  ( $246 \times 160$  узлов). На втором шаге на сетке  $\sim 800 \text{ м} \times 1120 \text{ м}$  ( $234 \times 122$  узла) волнение рассчитывалось для области, включающей район южного берега Крыма. Расчеты на третьем и четвертом шагах выполнялись с разрешением  $\sim 95 \text{ м} \times 150 \text{ м}$  ( $500 \times 300$  узлов) и  $\sim 39 \text{ м} \times 56 \text{ м}$  ( $750 \times 300$  узлов), соответственно. На пятом шаге с разрешением  $\sim 1,2 \text{ м} \times 1,7 \text{ м}$  ( $400 \times 400$  узлов) рассчитывались поля волн непосредственно в береговой зоне бух. Ай-Тодор (рис. 1а). На втором, третьем, четвертом и пятом шагах параметры волн на жидких границах определялись интерполяцией модельных данных, полученных на предыдущих шагах. Угловое разрешение волновой модели составляло  $10^\circ$ . По частотной координате, изменяющейся от 0,02 до 2 Гц, использовалась неравномерная сетка, имеющая 31 узел. Для построения рельефа дна первых четырех областей проводилась оцифровка крупномасштабных навигационных карт Черного моря. Рельеф дна пятой области (рис. 1а) строился на основе данных батиметрической съемки.

В численных экспериментах рассматривалась ситуация, когда на поверхность Черного моря воздействует неменяющийся во времени и однородный по пространству ветер заданного направления. Величина скорости ветра задавалась на основе режимных данных для исследуемого района, полученных в результате статистической обработки данных реанализа. Большинство расчетов проведено для ветра 4%-й режимной обеспеченности (22 м/с) и наиболее волноопасных направлений.

Для расчета волновых течений в береговой зоне бух. Ай-Тодор использовалась численная гидродинамическая модель SWASH (Simulating WAVes till SHore)<sup>1</sup>. Модель позволяет проводить моделирование гидродинамических процессов в широком диапазоне пространственно-временных масштабов с учетом рефракции, дифракции и отражения волн. В модели также учитывается турбулентное перемешивание, донное трение, обрушение волн на критических глубинах, процессы затопления-осушения береговой зоны.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведены расчеты статистических характеристик ветрового волнения по данным массива волновых характеристик SWAN-ERA1 [Divinskii et al., 2019; Divinskii et al., 2020] в точке на изобате  $\sim 100 \text{ м}$  на траверзе бух. Ай-Тодор. Исходные временные ряды имеют следующие максимальные значения: высота значительных волн составляет 7,7 м; средний период – 11,4 с; энергия волн – 310 кВт/м.

На рис. 2а – 2в приведены графики повторяемости (%) высот значительных волн, средних периодов и среднего направления волнения. Как видно, с увеличением высоты волн их повторяемость уменьшается. Причем наибольшую повторяемость ( $\sim 20\%$ ) имеют волны с высотами 0,5 м.

Максимальную повторяемость (более  $\sim 14\%$ ) имеют волны со средними периодами 3,0–3,5 с. Наиболее часто (не менее 12%) волны приходят от трех направлений:  $90^\circ$  – восток;  $67,5^\circ$  – восток-северо-восток;  $225^\circ$  – юго-запад. Анализ совместной повторяемости высоты значительных волн ( $h_s$ ) и среднего направления волн ( $\bar{\theta}$ ) в прибрежной зоне показал, что наиболее интенсивное ветровое волнение ( $h_s \geq 5 \text{ м}$ ) в исследуемом районе соответствует четырем направлениям:  $90^\circ$  – восток;  $112,5^\circ$  – восток-юго-восток;  $180^\circ$  – юг;  $202,5^\circ$  – юго-юго-запад.

<sup>1</sup> SWASH. User Manual. The SWASH team. Delft University of Technology. Netherlands, 2012. V. 1.10A. 91 p.

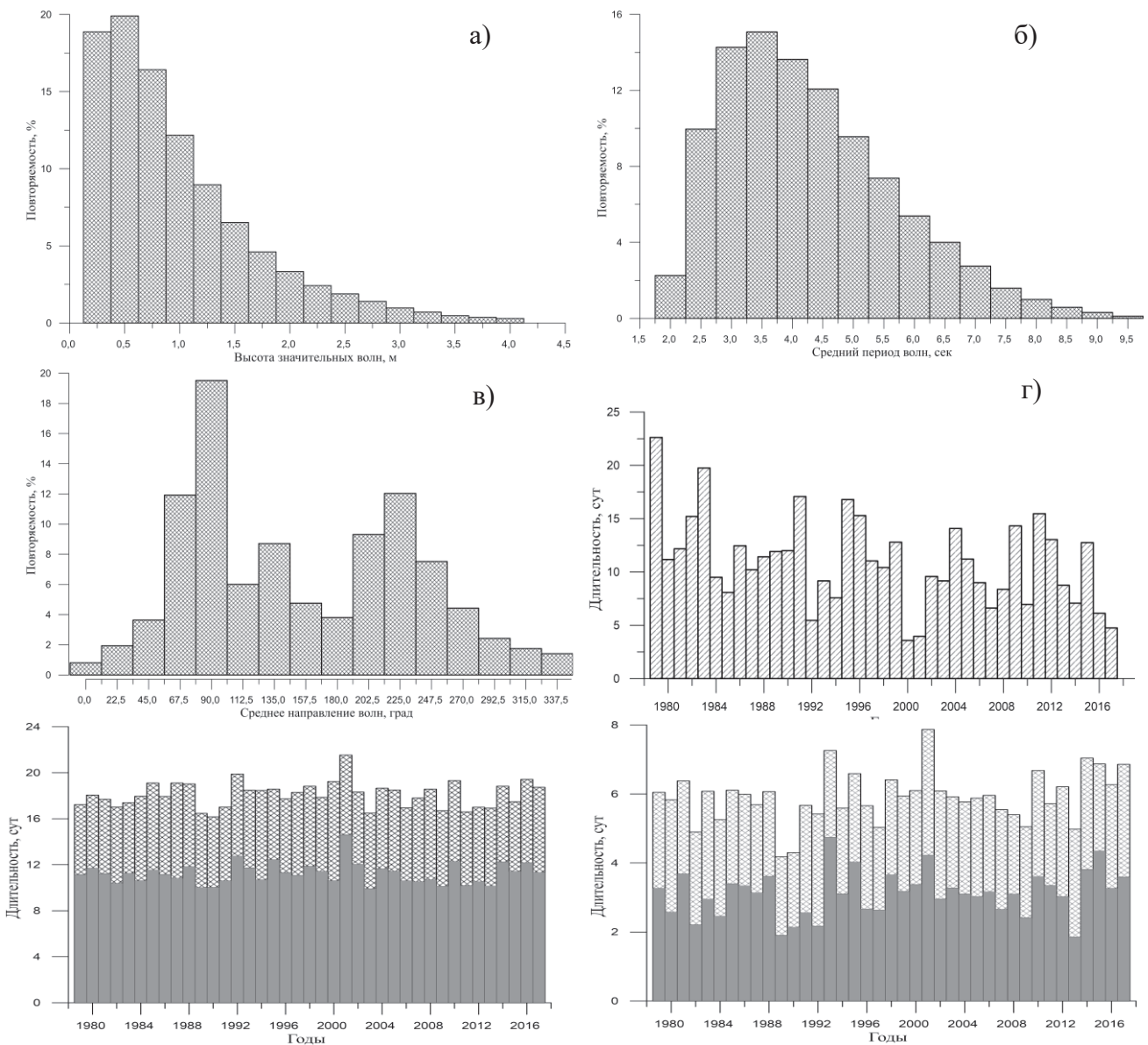


Рис. 2. Характеристики ветрового волнения на изобате ~ 100 м у бух. Ай-Тодор по данным SWAN-ERA1: повторяемость (%) высот значительных волн (а); повторяемость (%) средних периодов волн (б); повторяемость (%) среднего направления волнения (°) (в); распределение по годам длительности (сут) штилевых ситуаций ( $h_{3\%} \leq 0,25$  м) (г), штормовых ситуаций для  $h_{3\%} \geq 1,25$  м и  $h_{3\%} \geq 2$  м (серый цвет) (д) и для  $h_{3\%} \geq 3$  м и  $h_{3\%} \geq 4$  м (серый цвет) (е)

Fig. 2. Wind wave parameters on ~ 100 m isobath near the Ay-Todor Bay according to SWAN-ERA1 data: significant wave repeatability (%) (a); wave mean period repeatability (%) (b); wave mean direction repeatability (%) (c); distribution by years of durations (day) of calm situations ( $h_{3\%} \leq 0,25$  m) (d), of storms situations ( $h_{3\%} \geq 1,25$  m and  $h_{3\%} \geq 2$  m (grey color)) (e), of storms situations ( $h_{3\%} \geq 3$  m and  $h_{3\%} \geq 4$  m (grey color)) (f)

Для исследуемого района были также рассчитаны длительности штилевых и штормовых ситуаций. В соответствии с общепринятой практикой для оценок длительности использовались значения высот волн 3 %-й обеспеченности в системе шторма ( $h_{3\%}$ ).

На рис. 2г представлено распределение по годам длительности (сут) штилевых ситуаций ( $\leq 0,25$  м) в прибрежной зоне по данным SWAN-ERA1. Среднее многолетнее значение длительности штилей в исследуемом районе составляет  $\sim 11$  сут.

Длительность (сут) штормовых ситуаций различной интенсивности определялась следующими критериями:  $h_{3\%} \geq 1,25$  м;  $h_{3\%} \geq 2$  м;  $h_{3\%} \geq 3$  м;  $h_{3\%} \geq 4$  м;  $h_{3\%} \geq 5$  м;  $h_{3\%} \geq 6$  м. В таблице 1 приведена средняя длительность по месяцам штормовых ситуаций и средние многолетние значения. Как видно, наиболее продолжительные штормовые ситуации возникают в декабре – январе.

В таблице 2 приведены оценки высот, периодов и длин волн различной обеспеченности, возможных 1 раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет.

*Табл. 1. Средняя длительность (сут) по месяцам и средние многолетние штормовых ситуаций на изобате  $\sim 100$  м у бух. Ай-Тодор по данным SWAN-ERA1*

*Table 1. Mean duration (day) for each month and for many years of storms on isobaths  $\sim 100$  m in the Ay-Todor Bay according to SWAN-ERA1 data*

Месяцы	$h_{3\%} \geq 1,25$ м	$h_{3\%} \geq 2$ м	$h_{3\%} \geq 3$ м	$h_{3\%} \geq 4$ м	$h_{3\%} \geq 5$ м	$h_{3\%} \geq 6$ м
1	24,5	17,5	10,4	5,7	3,1	1,8
2	22,1	15,6	9,7	5,7	3,2	1,6
3	22,7	15,5	8,5	4,4	2,2	1,0
4	18,5	10,8	4,9	2,4	1,1	0,5
5	13,1	6,4	2,5	1,0	0,4	0,1
6	9,8	4,0	1,6	0,6	0,3	0,1
7	11,7	5,1	1,8	0,8	0,3	0,1
8	13,6	6,7	2,8	0,9	0,3	0,1
9	14,9	8,5	4,1	2,0	1,0	0,5
10	19,5	12,2	6,2	3,3	1,7	0,9
11	22,3	14,7	8,0	3,4	2,5	1,3
12	24,6	17,8	10,5	6,4	3,8	2,1
среднее многолетнее	18,1	11,3	5,9	3,1	1,7	0,8

Табл. 2. Средняя высота волн ( $\bar{h}$ ), средний период ( $\bar{\tau}$ ), средняя длина волн ( $\bar{\lambda}$ ) и высоты волн 50%, 13%, 3%, 1%-й обеспеченности (м), возможные 1 раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет на изобате ~ 100 м у бух. Ай-Тодор по данным SWAN-ERA1

Table 2. Mean wave height ( $\bar{h}$ ), mean period ( $\bar{\tau}$ ), mean wavelength ( $\bar{\lambda}$ ) and wave heights (m) having 50%, 13%, 3%, 1% probability, which possible one time in a year, 5, 10, 25, 50 and 100 years on isobaths ~ 100 m near the Ay-Todor Bay according to SWAN-ERA1 data

T, годы	$\bar{h}$ , м	$\bar{\tau}$ , с	$\bar{\lambda}$ , м	$h_{50\%}$ , м	$h_{13\%}$ , м	$h_{3\%}$ , м	$h_{1\%}$ , м
1	3,2	9,4	136	3,0	5,0	6,6	7,5
5	3,9	10,2	163	3,7	6,1	8,0	9,1
10	4,2	10,7	178	4,0	6,7	8,7	9,9
25	4,6	11,3	197	4,4	7,4	9,6	10,9
50	5,0	11,7	211	4,7	7,9	10,2	11,6
100	5,3	12,1	226	5,0	8,4	10,8	12,3

Следующим этапом работы было определение пространственной структуры ветрового волнения для наиболее волноопасных направлений. На рис. 3 показаны пространственные распределения высоты значительных волн ( $h_s$ ) и среднего направления волнения в бух. Ай-Тодор для разных направлений ветра. Волновые поля соответствуют скорости ветра 4%-й обеспеченности (22 м/с). Как показали расчеты, наиболее интенсивное волнение в исследуемом районе возникает при ветрах юго-восточного, восточного и южного направлений, что связано с максимальными разгонами ветра. Юго-восточный ветер генерирует волны с высотами 6,0–6,5 м. При ветрах северо-западного и северного направлений в бух. Ай-Тодор формируется зона волновой тени, в которой интенсивность волнения снижается до 1–2 м. Направление распространения волнения не совпадает с направлением ветра, что связано с рефракцией, которая разворачивает волны в сторону берега. При западном и юго-западном ветрах волнение отклоняется на север, при южном, юго-восточном и восточном ветрах – на северо-запад. Северо-восточный и северный ветры отклоняют волны на запад, а при северо-западном ветре волнение разворачивается в противоположном направлении. Вблизи пирсов наблюдается формирование теневых зон, располагающихся с подветренной стороны берегозащитных сооружений. С наветренной стороны пирсов подходящие волны имеют высоты 2–4 м, а в зоне тени происходит снижение интенсивности волнения до 0,2–1,0 м.

При юго-восточном, восточном и южном ветрах в открытом море генерируются волны с длинами 100–120 м (рис. 4). При подходе к берегу длины волн уменьшаются. Наименьшие длины волн генерируются при северном и северо-западном ветрах (до 30 м).

Далее был проведен анализ волновых характеристик, оказывающих прямое влияние на морфодинамические процессы в рассматриваемом районе. На мелководье волны проникают до дна и взвешивают донный материал. Обрушение волн сопровождается дополнительным перемешиванием вод, что также способствует переходу донных отложений во взвесь. Фактором, определяющим потери волновой энергии за счет донного трения, является максимальная амплитуда орбитальной скорости волнового движения у дна  $V_b$  (м/с). На рис. 5 видно, что максимальные придонные орбитальные скорости наблюдаются при юго-западном, южном, юго-восточном и восточном направлениях ветра. Усиление скоростей до 2,5–3,5 м/с прослеживается вдоль берега на глубинах до 10 м. В теневых зонах величины придонных орбитальных скоростей не превышают 1 м/с.

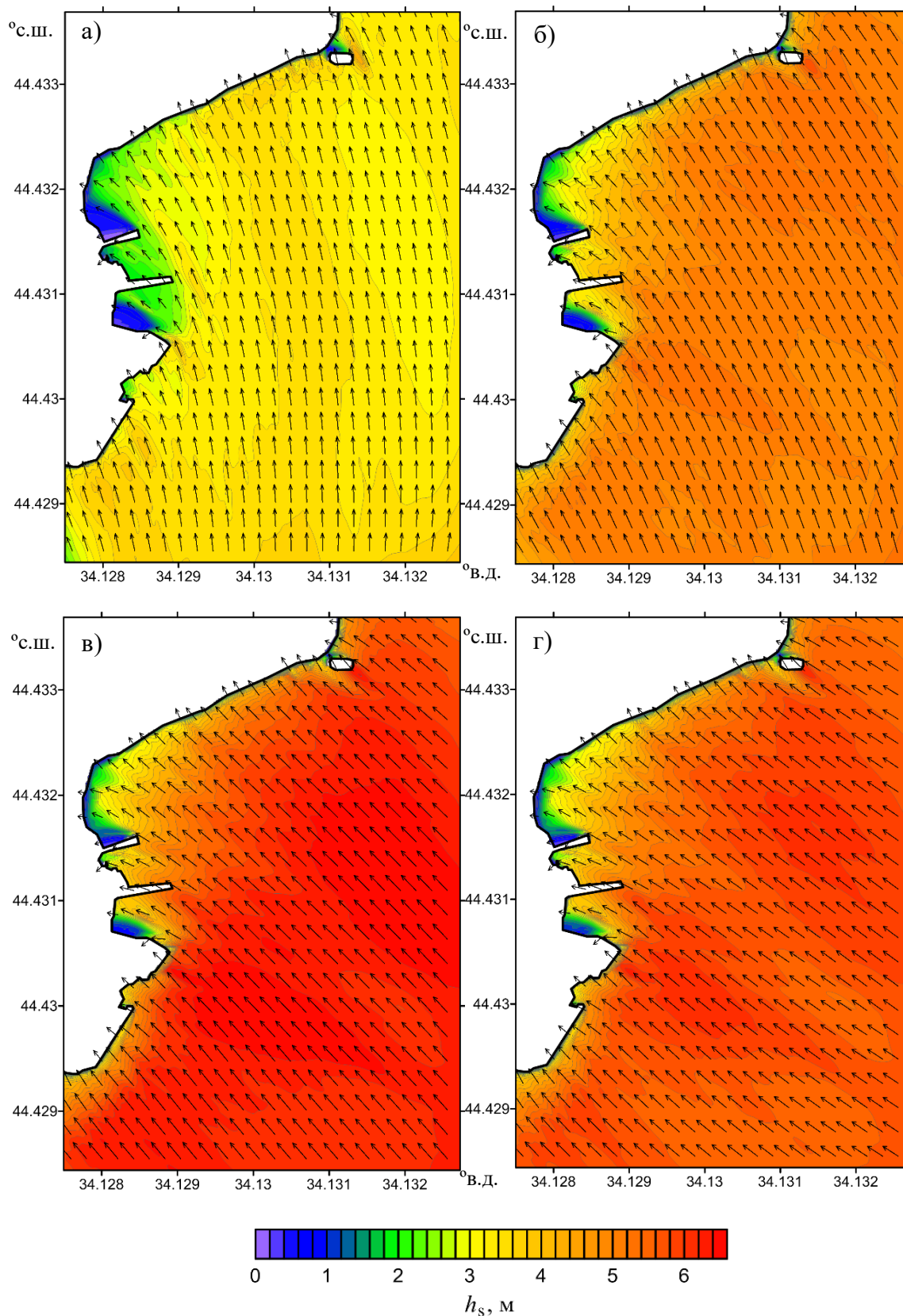


Рис. 3. Высота значительных волн (м) и среднее направление волнения в бух. Ай-Тодор при ветре 4%-й обеспеченности: а) юго-западном, б) южном, в) юго-восточном, г) восточном  
 Fig. 3. Significant wave height (m) and mean wave direction in the Ay-Todor Bay in case of wind having 4% probability and a) south-west, b) south, c) south-east, d) east direction



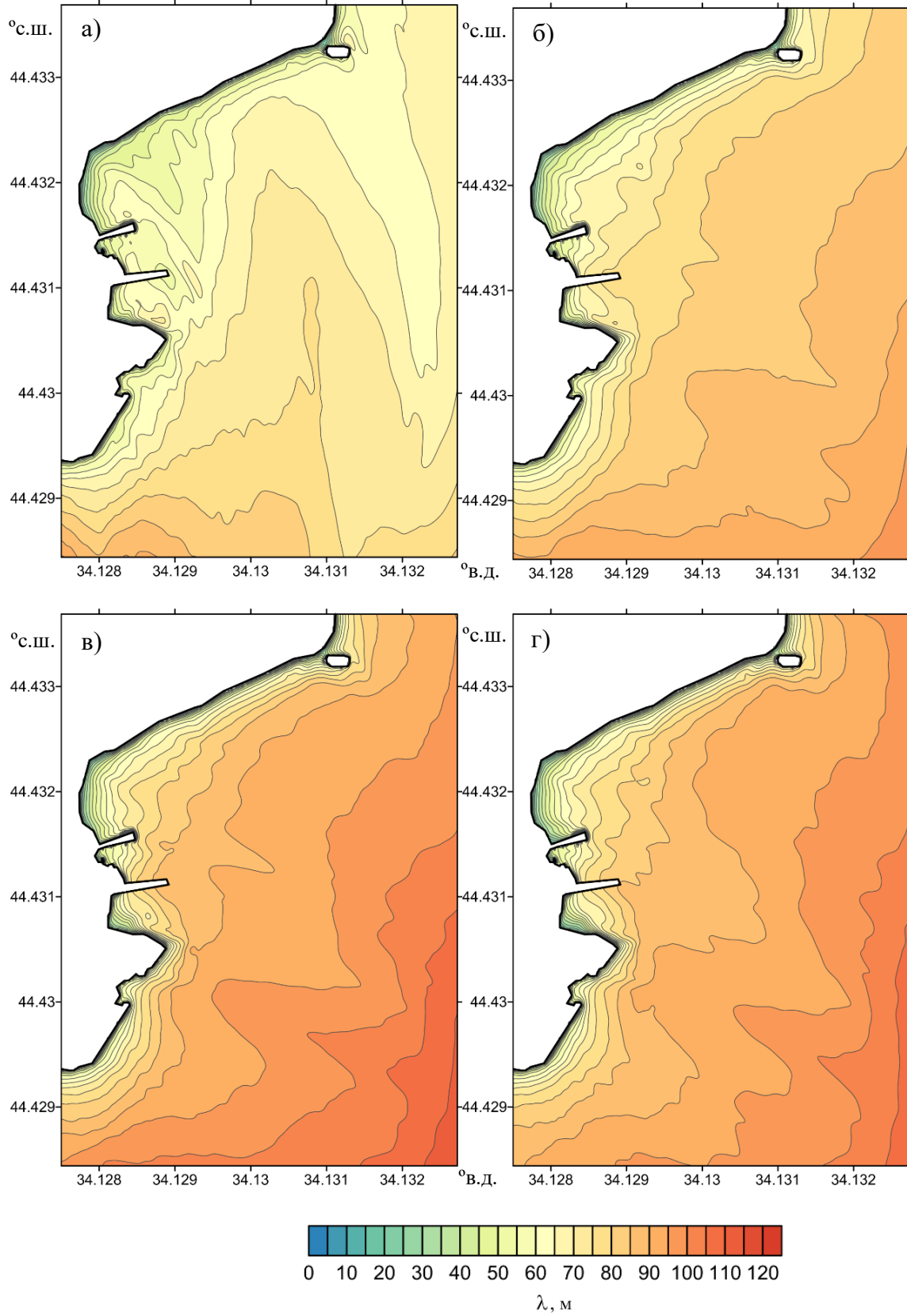
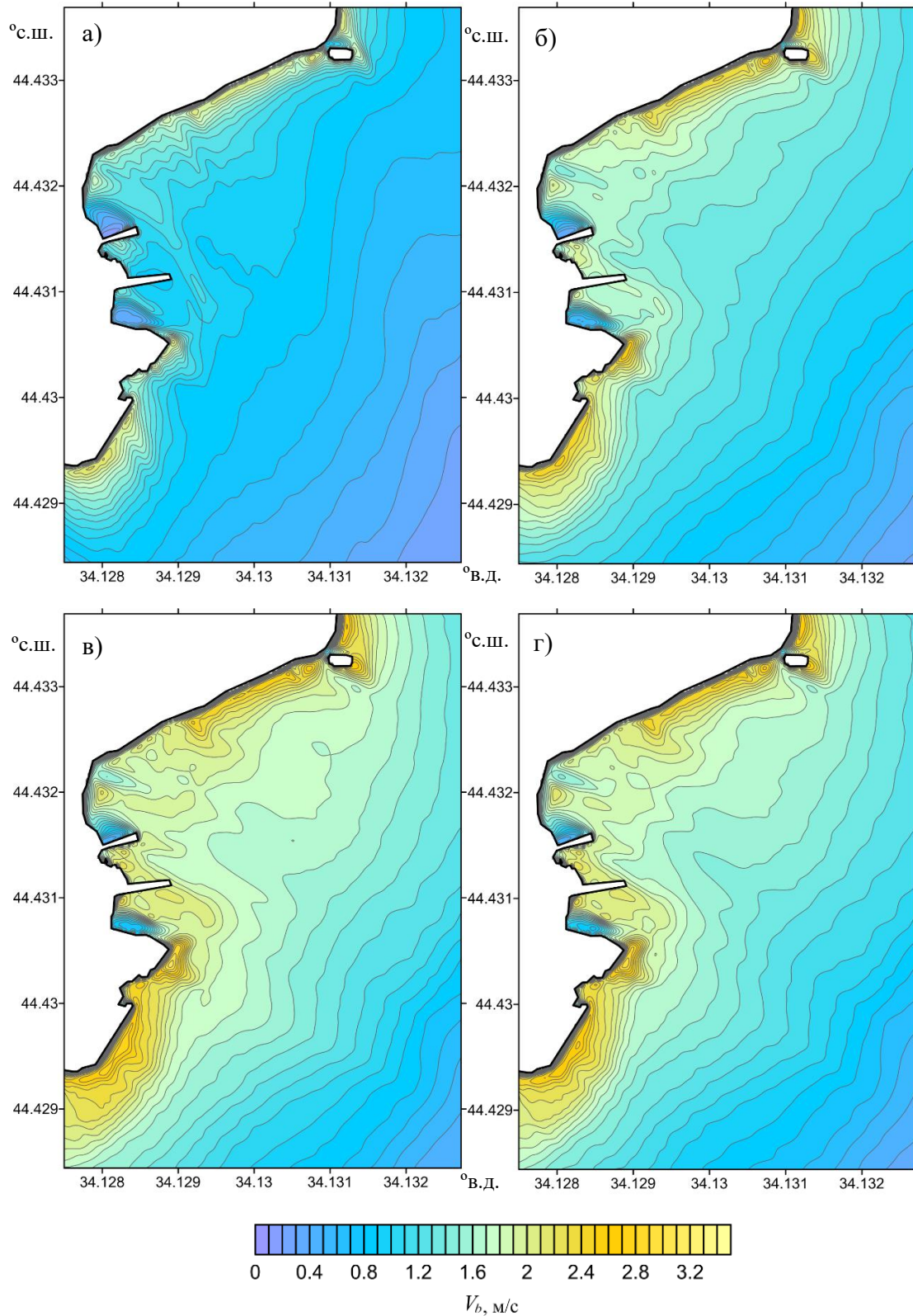


Рис. 4. Средняя длина волн (м) в бух. Ай-Тодор при ветре 4%-й обеспеченности:  
а) юго-западном, б) южном, в) юго-восточном, г) восточном

Fig. 4. Mean wavelength (m) in the Ay-Todor Bay in case of wind having 4% probability and a)  
south-west, b) south, c) south-east, d) east direction



*Рис. 5. Придонная орбитальная скорость (м/с) в бух. Ай-Тодор при ветре 4%-й обеспеченности: а) юго-западном, б) южном, в) юго-восточном, г) восточном*  
*Fig. 5. Orbital velocity in the bottom (m/s) in the Ay-Todor Bay in case of wind having 4% probability and a) south-west, b) south, c) south-east, d) east direction*

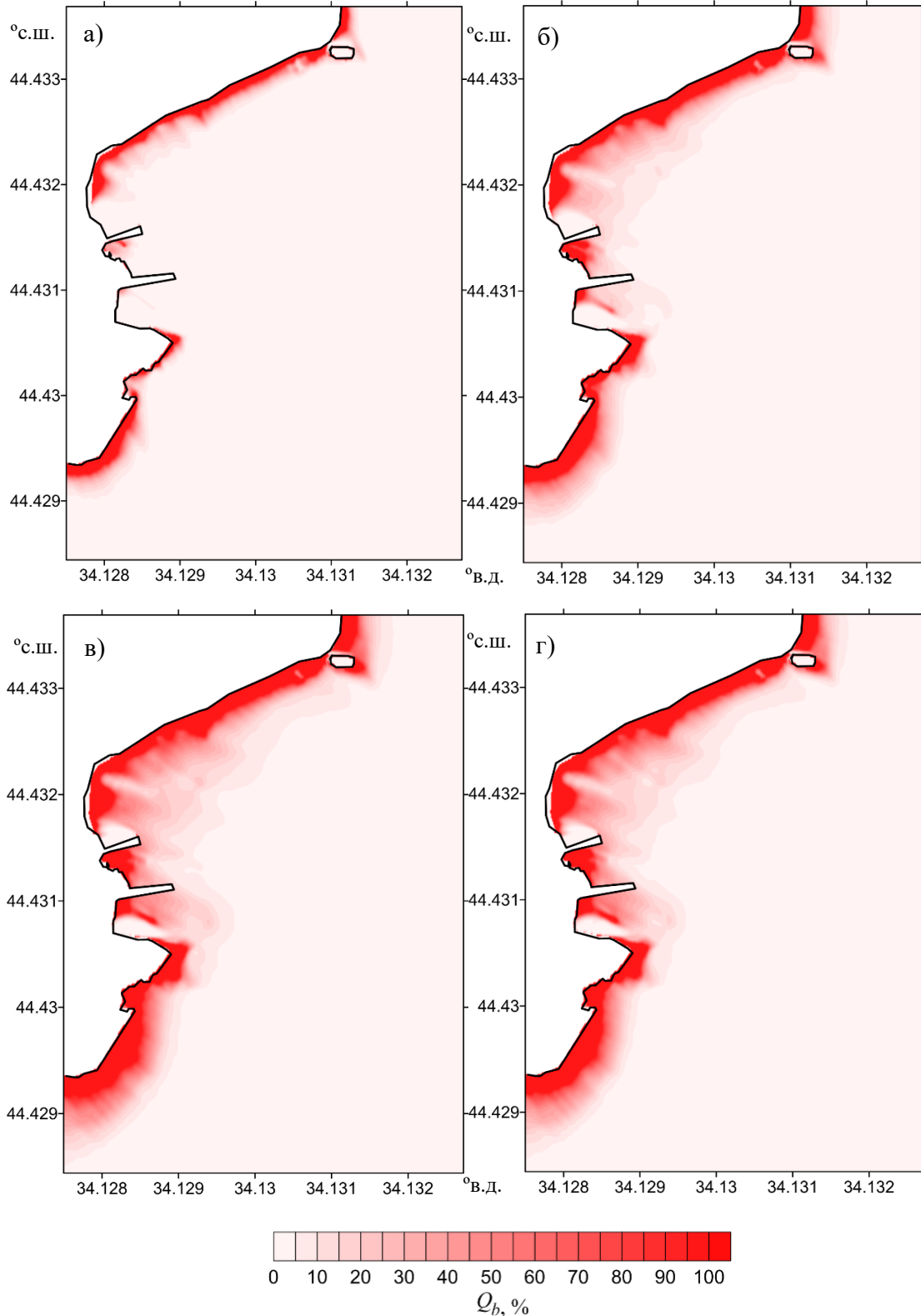


Рис. 6. Распределение зон интенсивности обрушения волн в бух. Ай-Тодор при ветре 4%-й обеспеченности: а) юго-западном, б) южном, в) юго-восточном, г) восточном

Fig. 6. Distribution of zones of wave breaking intensity in the Ay-Todor Bay in case of wind having 4% probability and a) south-west, b) south, c) south-east, d) east direction

О потерях волновой энергии за счет обрушения волн позволяет судить пространственное распределение зон обрушения. Количественным критерием обрушения является доля разрушающихся волн  $Q_b$  (%). Как показывает анализ зон обрушения волн в береговой зоне (рис. 6), величина  $Q_b$  возрастает с уменьшением глубины. При юго-восточном и восточном ветрах формируются наибольшие по площади зоны обрушения, что обусловлено максимальной интенсивностью волнения при этих направлениях ветра.

С использованием модели SWASH был выполнен численный эксперимент по расчету волновых течений в бух. Ай-Тодор, генерируемых набегающими волнами. На восточной границе расчетной области (рис. 7а) характеристики волнения задавались на основе спектра JONSWAP, включающего в качестве входных параметров высоту значительных волн  $h_s = 1,5$  м и пиковый период волн  $\tau_p = 10$  с. На южной и северной границах расчетной области задавалось условие излучения. Время действия волнения составляло 10 мин. Схема волновых течений при  $t = 10$  мин. для юго-восточного направления волнения приведена на рис. 7а. Изолиниями показано поле глубин (м).

Как видно, вблизи существующего пляжа формируется локальный циклонический вихрь, в котором течение направлено против часовой стрелки (границы вихря показаны на рис. 7а красными окружностями). Возникновение вихря обусловлено конфигурацией береговой линии и блокирующим влиянием монолитного пирса. Необходимо отметить, что такой характер волновых течений способствует выносу взвешенного материала на южной периферии циклона от пляжа в сторону моря. Эта особенность динамики прослеживается также на космических снимках, Типичный пример выноса взвешенных веществ показан на рис. 7б.

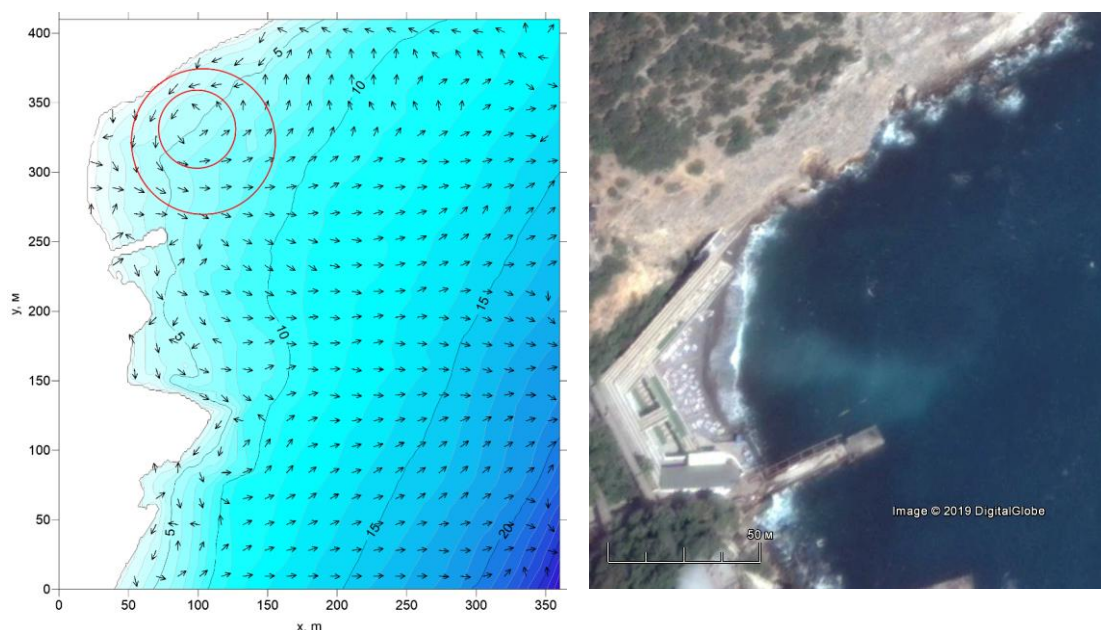


Рис. 7. Бухта Ай-Тодор: а) схема волновых течений при юго-восточном направлении волн (изолинии – поле глубин (м), стрелки – направления течений; красные окружности – локальный циклонический вихрь); б) космический снимок от 13.09.2016<sup>1</sup>

Fig. 7. The Ay-Todor Bay: a) wave currents chart in case of south-east wave direction (depth field (m) is depicted by isolines; direction of currents is depicted by arrows; red circle shows the local cyclonic eddy); b) satellite snapshot on 13.09.2016<sup>12</sup>

<sup>1</sup> Google Earth. Электронный ресурс: <http://www.google.com/intl/ru/earth/> (дата обращения 29.04.2021).

## ВЫВОДЫ

Проведено математическое моделирование ветрового волнения и течений, определены статистические характеристики и пространственное распределение параметров ветрового волнения для района бухты Ай-Тодор.

Установлено, что за период с 1979 по 2017 гг. наибольшую повторяемость имеют волны с высотами 0,5 м (~ 20 %), со средними периодами 3,0–3,5 с (более ~ 14 %), приходящие от восточного направления (19 %). Наиболее продолжительные штормовые ситуации образует волнение из сектора восток – юго-юго-запад в период с декабря по январь. Среднее многолетнее значение длительности штилей составляет ~ 11 сут. Получены оценки высот, периодов и длин волн различной обеспеченности, возможных 1 раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет. Для шторма повторяемостью 1 раз в 25 лет средняя высота волн на подходе к бух. Ай-Тодор составляет 4,5 м, в системе этого шторма высота волн 1 %-й обеспеченности достигает 9,6 м.

На основе модели SWAN и метода вложенных сеток выполнено математическое моделирование полей ветровых волн в акватории бух. Ай-Тодор с высоким пространственным разрешением (~ 1,5 м) для направлений ветра 4 %-й режимной обеспеченности. Как показали расчеты, наиболее интенсивное волнение возникает при ветрах юго-восточного, восточного и южного направлений, что связано с максимальными разгонами волн. При юго-восточном ветре генерируются волны с высотами более 6 м. Максимальные придонные орбитальные скорости волновых течений достигают 2,5–3,5 м/с и прослеживаются вдоль берега на глубинах до 10 м. В теневых зонах величины придонных орбитальных скоростей не превышают 1 м/с.

Модельные расчеты волновых течений по математической модели SWASH позволили выявить наличие в береговой зоне вблизи пляжа локального циклонического вихря, способствующего выносу взвешенного материала вдоль южной периферии вихря от пляжа в сторону моря. Этот эффект прослеживается на космических снимках и обусловлен конфигурацией береговой линии и распределением глубин в районе пляжа.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке государственного задания Морского гидрофизического института РАН, тема № 0555-2021-0005 шифр «Прибрежные исследования».

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by government task, theme No 0555-2021-0005 “Coastal Research” code.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горячкин Ю.Н., Репетин Л.Н.* Штормовой ветро-волновой режим у Черноморского побережья Крыма. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. Вып. 19. С. 56–69.
2. *Ефимов В.В., Комаровская О.И.* Атлас экстремального ветрового волнения Черного моря. Севастополь: МГИ НАНУ, 2009. 59 с.
3. *Зенкович В.П.* Берега Черного и Азовского морей. Москва: Географгиз, 1958. 374 с.
4. *Крылов Ю.М.* Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн. Ленинград: Гидрометеиздат, 1966. 255 с.

5. Полонский А.Б., Фомин В.В., Гармашов А.В. Характеристики ветрового волнения Черного моря. Доклады Национальной академии наук Украины. 2011. № 8. С. 108–112.
6. Репетин Л.Н., Белокопытов В.Н., Липченко М.М. Ветры и волнение в прибрежной зоне юго-западной части Крыма. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. Вып. 9. С. 13–28.
7. Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen L.H., A third-generation wave model for coastal regions. Model description and validation. Journal of Geophysical Research, 1999. 104(C4). P. 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>.
8. Divinskii, B., Fomin, V., Kosyan, R. and Lazorenko, D., 2019. Maximum Waves in the Black Sea. In: MEDCOAST Foundation, 2019. Proceedings of the Fourteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation MEDCOAST 2019 (Marmaris, Turkey, 22–26 October 2019). Mugla, 2019. Turkey: MEDCOAST Foundation. V. 2. P. 799–810.
9. Divinsky, B.V. and Kosyan, R.D., 2018. Wave Climate of the Coastal Zone of the Crimean Peninsula. Physical Oceanography, [e-journal]. V. 25(2). P. 93–101. DOI: 10.22449/1573-160X-2018-2-93-101.
10. Divinsky, B.V., Fomin, V.V., Kosyan, R.D. and Ratner, Y.D., 2020. Extreme Wind Waves in the Black Sea. Oceanologia, 62(1), P. 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.06.003>.
11. Lopatoukhin L.J., Rozhkov V.A., Ryabinin V.E., Swail V.R, Boukhanovsky A.V., Degtyarev A.B. Estimation of extreme wind wave heights. World Meteorological Organization. JCOMM Technical Report WMO/TD. No 1041. 2000.

#### REFERENCES

1. Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen L.H., A third-generation wave model for coastal regions. Model description and validation. Journal of Geophysical Research, 1999. V. 104 (4). P. 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>.
2. Divinskii, B., Fomin, V., Kosyan, R. and Lazorenko, D., 2019. Maximum Waves in the Black Sea. In: MEDCOAST Foundation, 2019. Proceedings of the Fourteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation MEDCOAST 2019 (Marmaris, Turkey, 22–26 October 2019). Mugla, 2019. Turkey: MEDCOAST Foundation. V. 2. P. 799–810.
3. Divinsky, B.V. and Kosyan, R.D., 2018. Wave Climate of the Coastal Zone of the Crimean Peninsula. Physical Oceanography, [e-journal]. V. 25(2). P. 93–101. DOI: 10.22449/1573-160X-2018-2-93-101.
4. Divinsky, B.V., Fomin, V.V., Kosyan, R.D. and Ratner, Y.D., 2020. Extreme Wind Waves in the Black Sea. Oceanologia, 62(1). P. 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.06.003>.
5. Efimov V.V., Komarovskaya O.I. Atlas of extreme wind waves of the Black Sea. Sevastopol: MGI NASU. 2009. 59 p. (in Russian).
6. Goryashkin, Yu.N. and Repetin, L.N. Storm Wind and Wave Regime Near the Black Sea Coast of Crimea. In: MHI, 2009. Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources. Sevastopol: MHI, 2009. Iss. 19. P. 56–69 (in Russian).
7. Krylov, Yu.M. Spectral Methods for Investigation and Calculation of Wind Waves. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1966. 258 p. (in Russian).

8. *Lopatoukhin L.J., Rozhkov V.A., Ryabinin V.E., Swail V.R., Boukhanovsky A.V., Degtyarev A.B.* Estimation of extreme wind wave heights. World Meteorological Organisation. JCOMM Technical Report WMO/TD. No 1041. 2000.
  9. *Polonsky, A.B., Fomin, V.V. and Garmashov, A.V.* Characteristics of Wind Waves of the Black Sea. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, (8). 2011. P. 108–112.
  10. *Repetin L.N., Belokopytov V.N., Lipchenko M.M.* Winds and waves in the coastal zone of the southwestern part of Crimea. Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources. Sevastopol: ECOSI-Hydrophysics, 2003. Issue 9. P. 13–28 (in Russian).
  11. *Zenkovich V.P.* Shores of the Black and Azov seas. Moscow, Geografiz: 1958. 374 p. (in Russian).
-

УДК: 551.468+465

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-32-41

Е.М. Лемешко<sup>1</sup>, М.В. Цыганова<sup>1</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РЕЧНОГО ПЛЮМА ДУНАЯ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

### АННОТАЦИЯ

Актуальность исследований прибрежной циркуляции, связанной с речным стоком, обусловлена антропогенной нагрузкой на экологическое состояние вод шельфа. Речные воды, попадая в море, образуют в районе устья мезомасштабные структуры, отличающиеся пониженной соленостью с высоким содержанием взвеси и растворенной органики. Такие структуры в современной литературе называют «плюмами». При свободном инерционном движении плюм принимает вид области округлой формы или «горба» (от англ. bulge), течение в которой имеет антициклонический характер. Целью данной работы является исследование распространения распресненных вод, образованных стоком реки, и закономерностей формирования гидрологической структуры вод, динамики стокового течения, образования термохалинных фронтов на шельфе на основе численного моделирования.

С помощью численного моделирования исследуется формирование и дальнейшее распространение речного плюма на шельфе без учета воздействия приливов. Использована трехмерная  $\sigma$ -координатная численная модель, адаптированная для шельфа и эстуариев. Расчеты проведены для прямоугольной области. Рассмотрено влияние изменения основных параметров стока, геометрии устья, уклона дна и ветра на развитие плюма и распространение вдольберегового плотностного течения. Полученные результаты моделирования для условий северо-западного шельфа Черного моря и стока Дуная согласуются с оценками характеристик плюма по данным архивных гидрологических наблюдений температуры и солености воды.

Результаты работы могут быть использованы при дальнейшем изучении гидрологических процессов в районе устьев рек, особенностей формирования и эволюции плюмов, оценки транспорта взвешенных веществ, биогенных элементов и микропластика в прибрежной зоне морей и океанов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** речной плюм, шельф, численное моделирование, Дунай, Черное море.

Evgeny M. Lemeshko<sup>2</sup>, Marina V. Tsyganova<sup>2</sup>

## INVESTIGATION OF DANUBE RIVER PLUME FORMATION AND PROPAGATION BASED ON NUMERICAL MODELING

### ABSTRACT

The relevance of the studied circulation caused by the water river runoff deals with the anthropological impact on the ecological state of the shelf. River waters, entering into the sea, form mesoscale structures in the delta's area, characterized by low salinity with a high level of

<sup>1</sup> Морской гидрофизический институт РАН, Капитанская, д. 2, 299011, Севастополь, Россия, e-mail: m.tsyganova@mhi-ras.ru

<sup>2</sup> Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, Kapitanskaya, 2, 299011, Sevastopol, Russia, e-mail: m.tsyganova@mhi-ras.ru



suspended matter and dissolved organic matter. Such structures are called "plume" in modern literature. In this case, the inertial motion of the plume is free to form a rounded area or "bulge" like anticyclonic circulation type of flow.

The purpose of this work is to investigate the propagation of freshened waters, formed by the river inflow, the formation of the waters hydrological structure regularities, dynamics of the buoyancy current, and thermohaline front formation on the base of numerical modeling.

Numerical modeling is used to study the formation of a river plume and downward propagation of buoyancy current on the shelf without taking into account the tides forcing. A three-dimensional  $\sigma$ -coordinate numerical model was used, adapted for the shelf and estuaries. The calculations were carried out for a rectangular box area.

The influence of changes in the main parameters of the runoff, the mouth geometry and wind forcing are considered to development of the plume and the alongshore propagation of buoyancy current. The obtained modeling results for the conditions of the Northwestern Black Sea shelf and the Danube discharge are consistent with the estimates of plume characteristics based on the archival hydrological observations data of water temperature and salinity.

The results of this work can be used for further study of hydrological processes in the region of river mouths, the peculiarities of the plumes formation and evolution, assessment of the suspended matter, biogenic elements and microplastics transport in the sea and ocean coastal zones.

**KEYWORDS:** river plume, shelf, numerical modelling, Danube Black Sea.

## ВВЕДЕНИЕ

На экологическое состояние вод шельфа морей и океанов значительное влияние оказывает пресноводный материковый сток. В первую очередь, с речными водами поступают биогенные вещества и продукты антропогенного загрязнения. Также распресненные воды существенно влияют на потоки плавучести, тепла и динамику в прибрежной зоне. Речные воды характеризуются высокой временной изменчивостью, а также резкими градиентами на границах. Поэтому исследование распространения речных плумов является сложной задачей и использование, например, только гидрологических зондирований или спутниковых данных недостаточно для изучения закономерностей распространения плумов и оценивания их пространственно-временных характеристик. Поэтому основное внимание в этой статье уделено численному моделированию для изучения речных плумов.

Динамика и изменчивость речных плумов являются ключевыми факторами для понимания механизмов распространения, трансформации и перераспределения материкового стока и речных составляющих в прибрежных морях и их влияния на континентальные шельфы [Fong, 2002; Hetland, 2005]. Типы речных плумов в мире характеризуются широким разнообразием структуры, морфологии и динамических характеристик, обусловленных большими различиями в региональных особенностях [Завьялов, 2020; Осадчиев, Коршенико, 2017; Осадчиев, Седаков, 2019; Horner-Devine, 2015].

Перенос пресной воды на шельфе определяется потенциальной энергией прибрежного течения у береговой зоны. Более интенсивные прибрежные течения те, которые имеют большую аномалию плавучести, они способны переносить больше пресной воды до 70 % от объема стока реки. Потенциальная энергия прибрежного течения и, следовательно, перенос пресной воды в основном зависят от числа Россби, связанного с речным стоком [Fong, 2002].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наличие обширного шельфа на северо-западе Черного моря и стока крупных рек - Днепра, Днестра и крупнейшей реки Европы, Дуная, делает его природным лабораторным объектом для изучения динамики плюмов и процесса распространения распресненных вод на шельфе. Отсутствие в Черном море приливов частично упрощает эту задачу. Разнообразие морфологических типов плюма [Horner-Devine, 2015], от дельты Дуная с четырьмя крупными рукавами до Днепро-Бугского лимана, как обширного эстуария, позволяет использовать многолетние архивные данные гидрологических наблюдений в этих районах для верификации широкого класса моделей речных плюмов.

На динамику вод на северо-западном шельфе Черного моря, в первую очередь, влияют значительный речной сток, интенсивный водообмен с открытым морем и ветер. Влияние этих факторов определяет такой режим вод на шельфе, когда в осенне-зимнее время вода перемешана от поверхности до дна, а в весенне-летнее из-за сильного прогрева образуется двухслойная стратификация [Блатов, 1992]. Поэтому изучению трансформации речных вод Дуная при впадении в море уделяется большое внимание. Определенный прогресс в изучении распространения плюма Дуная достигнут на основе анализа спутниковых оптических изображений, данных атмосферного реанализа и численного моделирования [Кубряков, 2017; Цыганова, 2016; Dinu, 2017; Meladinova, 2020]. В последнее время становится актуальным исследование переноса микропластика речными водами. В работе [Завьялов, 2020] сформулирована гипотеза о том, что плавающий пластиковый мусор в прибрежных водах океана в основном сосредоточен в речных плюмах, связанных с пресноводным материковым стоком, и его динамика в значительной степени определяется именно динамикой плюмов.

Распространение плюмов также имеет сезонный характер. Распресняющее действие стока рек способствует усилению общей стратификации и формированию фронтальной зоны, существующей в весеннее время и распространяющейся вдоль западного побережья Черного моря. Для летнего периода характерен слабый водообмен между верхним и нижним слоями водных масс, обновление нижнего слоя которых происходит исключительно за счет водообмена с открытой частью моря. В осенне-зимнее время перемешивание слоев происходит за счет конвективного перемешивания, ветрового воздействия и процессов вовлечения в придонном пограничном слое [Блатов, 1992]. Для режима стока воды Дуная характерны хорошо выраженное длительное и высокое весенне-летнее половодье и летне-осенняя межень. Весенне-летнее половодье наблюдается в марте-июне, летне-осенняя межень - в августе-сентябре [Михайлов, 2004].

Для проведения численных экспериментов в данной работе выбрана трехмерная сигма-координатная модель совместной динамики мелкого моря [Фомин, 2008, Tsyganova, 2020]. Параметры модели были подобраны таким образом, чтобы они соответствовали району впадения Дуная в Черное море. Модель была адаптирована для условий северо-западного шельфа Черного моря: координаты расчетной области: 28–31 °в.д. и 43–46 °с.ш., число узлов сетки по X = 119, число узлов сетки по Y = 167, шаг сетки 2 км, шаг по времени 2 мин., количество sigma-горизонтов 25. В качестве начальных значений использовалась соленость вод шельфа 18‰, а соленость втекающей речной воды в районе устья Дуная 6 ‰, температура воды в устье и вод шельфа, расходы реки задавались климатическими значениями [Tsyganova, 2020]

Распространение речных вод на шельфе локализовано в поверхностном слое и под действием силы Кориолиса поток отклоняется в антициклоническом направлении в Северном полушарии. В результате, формируется вдольбереговое течение, схема которого изображена на рис. 1, где  $L$  – ширина устьевой области;  $h_0$  – глубина устья;  $v_i = Q/h_0L$  –

постоянная скорость реки;  $Q$  – расход воды в реке;  $\rho_i$  – плотность воды в районе устья;  $\rho_0$  – плотность вод шельфа;  $r_s$  – радиус стоковой линзы [Yankovsky, 1997].

Для оценки расстояния распространения гидрофронта от устья реки, согласно [Yankovsky, 1997], применима следующая формула, :

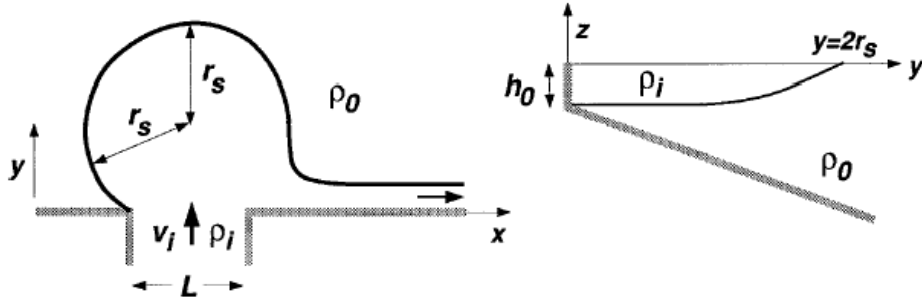


Рис. 1. Схема образования плюма и циркуляции вод в районе устья реки

Fig. 1. Diagram of plume formation and water circulation in the river mouth area

$$y = 2r_s = \frac{2(3g'h_0 + v_i^2)}{f(2g'h_0 + v_i^2)^{1/2}}, \quad (1)$$

где  $g' = g\Delta\rho / \rho_0 = g(\rho_0 - \rho_i) / \rho_0$ ,  $g$  - ускорение свободного падения, ширина устьевой области ( $L$ ), глубина устья -  $h_0$ ,  $v_i = Q / (h_0 \cdot L)$  - постоянная скорость течения реки,  $Q$  - расход воды в реке,  $\rho_i$  – плотность воды в районе устья,  $y = 2r_s$  – расстояние от берега до внешней границы плюма, то есть до мористой границы распространения распресненных вод в районе устья,  $\rho_0$  - плотность вод шельфа. Формулу (1) можно переписать в безразмерном виде:

$$y = 2r_s = R_{di} \frac{2(3 + F_i^2)}{(2 + F_i^2)^{1/2}}, \quad (2)$$

$R_{di} = (g'h_0)^{1/2} / f$  – бароклинный радиус деформации Россби для распресненных вод,  $F_i = v_i / (g'h_0)^{1/2}$  – число Фруда. Рассмотрим два предела в формуле (2). Первый случай – малого стока или большой разницы плотности вод шельфа и устья:  $v_i^2 \leq g'h_0$ ;  $F_i \leq 1$ , что дает  $y = 4.24R_{di}$ . Таким образом, стоковый гидрофронт распространяется в поверхностном слое как минимум на четыре радиуса Россби от берега. Второй предел в случае большого объема стока или малой разницы плотности вод шельфа и устья  $v_i^2 \geq g'h_0$ ;  $F_i \geq 1$ , что приводит к  $y = 2v_i / f$  [Yankovsky, 1997].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты численных экспериментов для прямоугольной области без влияния ветра показали, что формируется стоковое течение, которое распространяется вдоль берега от дельты Дуная на юг. Скорость распространения фронта плотностного вдольберегового течения можно оценить по следующей формуле [Yankovsky, 2004]:

$$c_p \approx c_w / (1 + c_w / c_\alpha), \quad (3)$$

где  $c_\alpha = \alpha g' / f$ ;  $c_w = \sqrt{g' h_b}$ , где  $h_b$  – глубина распресненного слоя. Для гидрологических условий северо-западного шельфа были выбраны следующие величины  $\Delta\rho = 3,5 \text{ кг м}^{-3}$ ;  $\rho_0 = 1014 \text{ кг м}^{-3}$ ;  $\alpha = 3 \cdot 10^{-3}$  – уклон шельфа;  $h_b = 15 \text{ м}$  (по изохалине 16‰); и скорость распространения  $c_p$  по формуле (3) составила  $0,4 \text{ м с}^{-1}$ . Тогда при расстоянии от устья до южной границы расчетной области 180 км (рис. 2) время добегания фронта вниз по течению составило 5,2 суток. Данная оценка получена без учета ветрового воздействия, которое значительно увеличивает или уменьшает скорость распространения речных вод в зависимости от направления ветра.

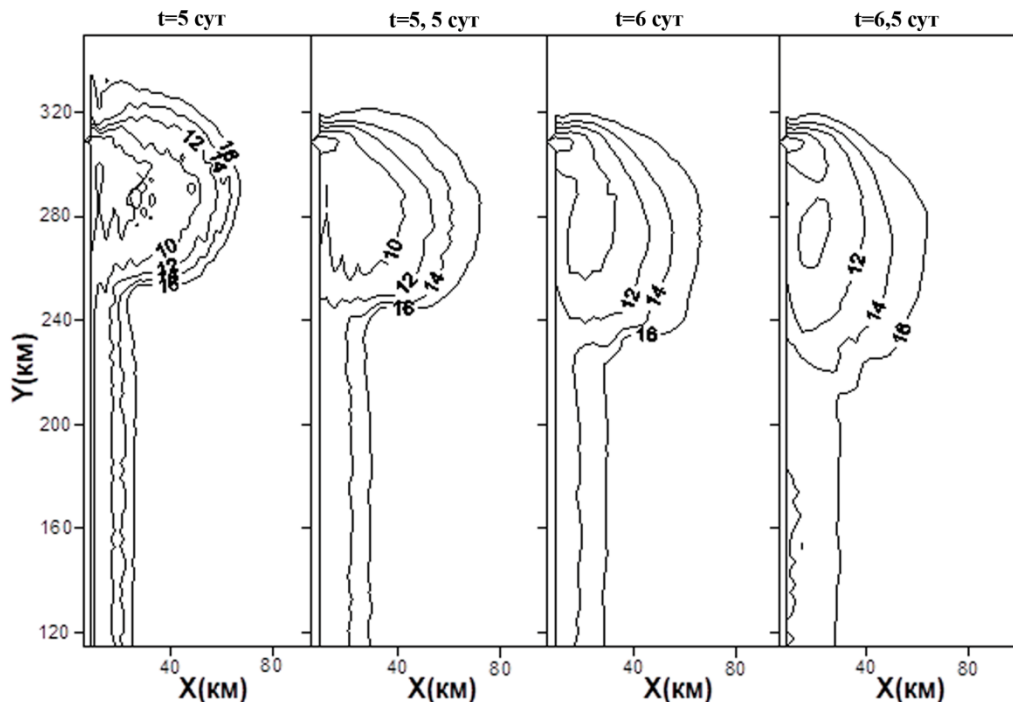


Рис. 2. Соленость на поверхности моря по данным моделирования

Fig. 2. Salinity at the sea surface according to modeling data

Приведенные параметры использовались для численного эксперимента. На рис. 2 приведена эволюция стокового гидрофронта непосредственно в районе дельты Дуная и вдольберегового течения, южная граница гидрофронта по изохалине 16‰ достигает границы расчетной области на пятые сутки, что соответствует приведенным выше оценкам, в последующие дни наблюдается эволюция ширины плюма и вдольберегового течения (рис. 2). Ширина плотностного течения  $W_p$  на пятый день составила 15 км (рис. 2), по формуле (4) с учетом (3) получаем оценку 11,5 км для тех же параметров, и 15 км для  $\Delta\rho = 8 \text{ кг м}^{-3}$ .

$$W_p = (c_w / f) \cdot (1 + c_w / c_\alpha) \quad (4)$$

$$h_b = \sqrt{2Qf / g'} \quad (5)$$

Расстояние от берега до внешней границы плюма в районе устья по данным моделирования составило 55 км от берега уже через 5 суток после начала стока воды в море. Через 6,5 суток градиент солености по нормали к берегу значительно уменьшается и

картина распределения солености на поверхности моря достигает квазистационарного состояния (рис. 2, а). Характерное расстояние до границы  $\sim 55\text{--}60$  км в целом соответствует климатическим значениям солености по архивным гидрологическим данным и согласуется с оценками по формулам (1–2).

Был проведен ряд численных экспериментов по изучению влияния ветра на распространение плюма. На рис. 3 показано, что при действии северного ветра  $10\text{ м с}^{-1}$  и при расходе реки  $Q = 7000\text{ км}^3\text{ с}^{-1}$  плюм смещается вдоль берега вниз по течению, и его ширина уменьшается со временем, достигая значения 24 км через 5 суток и 17 км через 6,5 суток (рис. 3, а).

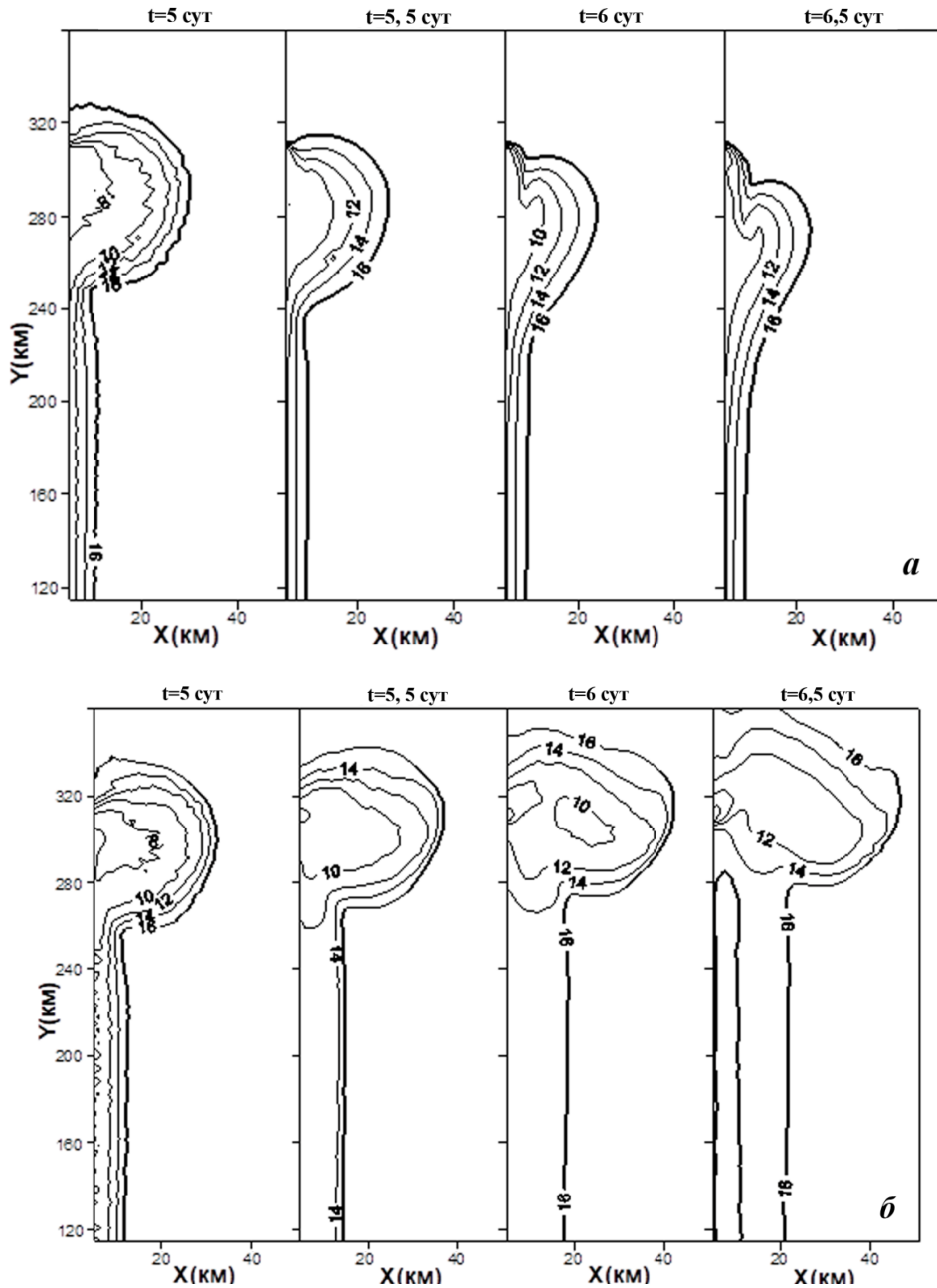


Рис. 3. Соленость на поверхности моря по данным моделирования при северном (а) и южном (б) ветре

Fig. 3. Salinity on the sea surface according to modeling data for southward (a) and northward (b) wind

Ветер усиливает перемешивание речных вод с морскими и уменьшает долю речного стока, вовлеченную в процесс рециркуляции в плюме в районе устья, увеличивая ее во вдольбереговом течении. Несмотря на то, что ширина течения также уменьшается по сравнению со случаем без ветра, достигая 5,5–6 км (рис. 3, а), скорости течения увеличиваются, компенсируя увеличение расхода. А при южном ветре (рис. 3, б), наоборот, размеры плюма увеличиваются за счет роста объема стока, поступающего в плюм в процесс рециркуляции, достигая значений 27 км на 5 сутки и 40 км через 6,5 суток. Таким образом, наблюдается нестационарный рост плюма со временем. Распространение вдольберегового течения на юг затрудняется, что приводит к увеличению его ширины до 8–14 км.

Также был проведен ряд численных экспериментов с учетом влияния уклона дна и действия ветра. На рисунке 4 приведена соленость по данным моделирования на зональном разрезе в районе устья Дуная для моментов времени 12 суток для случая отсутствия ветра, и ветра северного и южного направлений. Ширина плюма в случае отсутствия ветра составила 27 км, при действии северного ветра она уменьшилась до 24 км, а при действии южного ветра увеличилась до 30 км. Глубина плюма составила 4 м по изохалине 16 ‰. Результаты расчетов без ветра согласуются с оценками ширины плюма (1–2) и глубины его залегания (5). Для значений, характерных для октября, перепад плотности составил  $\Delta\rho = 4,5 \text{ кг м}^{-3}$ , что по формулам (1–2) дает ширину плюма 29 км и глубину его залегания 4,3 м (5), что согласуется с рисунком 4, а.

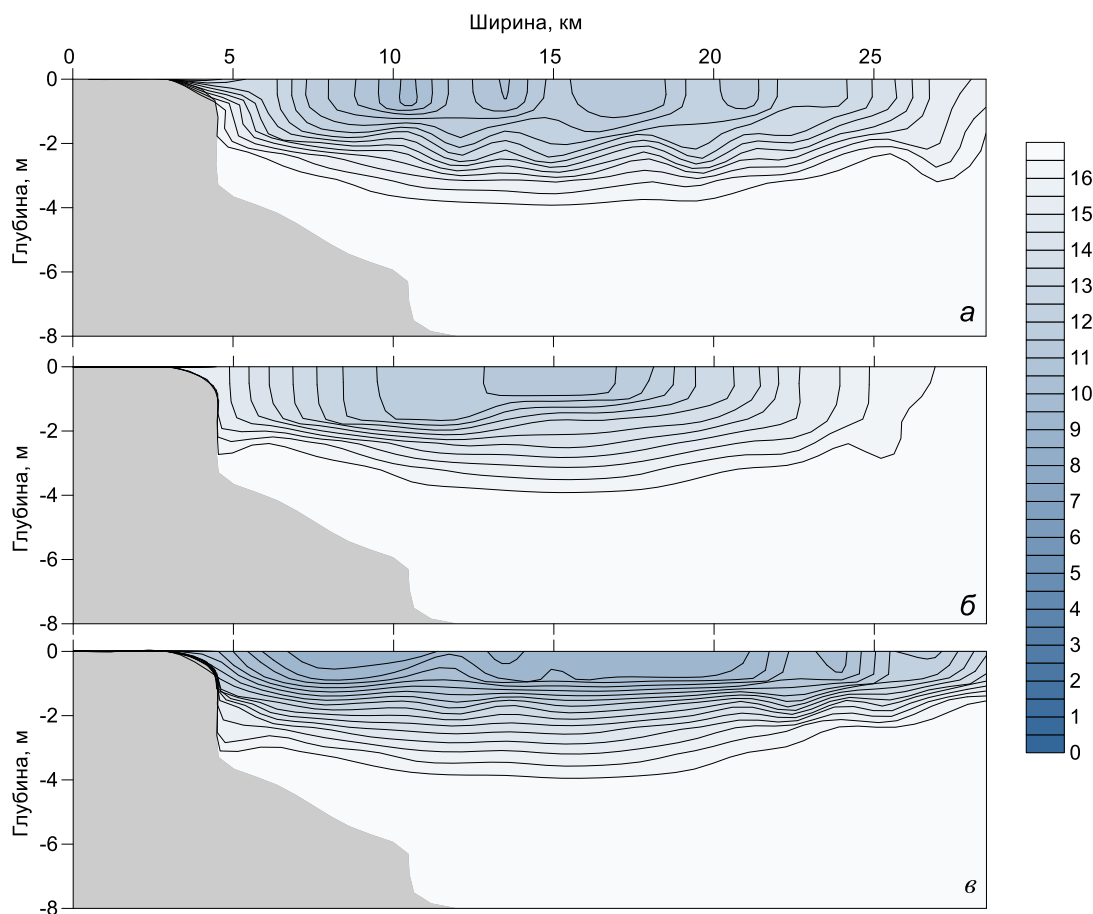


Рис. 4. Соленость по данным моделирования на зональном разрезе, соответствующему положению устья: а) без ветра; б) северный ветер; в) южный ветер

Fig. 4. Salinity according to modeling data on a zonal section corresponding to the position of the mouth: a) no wind; b) southward wind; c) northward wind

## ВЫВОДЫ

Таким образом, для северо-западного шельфа Черного моря адаптирована и протестирована трехмерная сигма-координатная численная модель для шельфа и эстуариев для расчета циркуляции в прибрежной зоне. Расчеты проведены для прямоугольной области, показано влияние ветра и уклона дна на процесс распространения распресненных вод вдоль побережья и на положение внешней границы гидрофронта. Результаты численного моделирования для гидрологических условий северо-западного шельфа Черного моря согласуются с оценками пространственно-временных масштабов плюма и скорости распространения плотностного течения, рассчитанных с учетом климатических значений температуры, солености и объема стока реки по формулам (1–5).

В итоге получены карты типичного пространственного положения распресненных вод на северо-западном шельфе, характеризующие динамику плюма и транспорт распресненных вод в зависимости от направления ветра. Результаты работы могут быть использованы при дальнейшем изучении гидрологических процессов в районе устьев рек, особенностей формирования и эволюции плюмов, оценки транспорта взвешенных веществ, биогенных элементов и микропластика в прибрежной зоне морей и океанов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного задания № 0555-2021-0005.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded within the framework of the state task No 0555-2021-0005.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Блатов А.С., Иванов В.А.* Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря. Киев: Наукова думка, 1992. 244 с.
2. *Завьялов П.О., Моллер мл. О.О., Ванг К.Х.* Связь между морским пластиковым мусором и речными плюмами: первые результаты проекта PLUMPLAS. Океанологические исследования, 2020. Т. 48. № 4. С. 32–44.
3. *Иванов В.А., Фомин В.В.* Математическое моделирование динамических процессов в зоне море-суша. Севастополь: НАН Украины МГИ, 2008. 363 с.
4. *Михайлов В.Н.* Гидрология дельты Дуная. Москва: ГЕОС, 2004. 448 с.
5. *Цыганова М.В., Лемешко Е.М., Рябцев Ю.Н.* Моделирование формирования гидрофронта в районе устья Дуная. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря, 2016. No 3. С. 26–31.
6. *Dinu I., Bajo M., Umgiesser G., Stănică A., (2017).* Romanian coastal dynamics during cold and warm seasons analyzed by means of a numerical model. Geo-Eco-Marina, 23. P. 71–101.
7. *Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G.* Interannual variability of Danube waters propagation in summer period of 1992–2015 and its influence on the Black Sea ecosystem) Journal of Marine Systems, 2018. V. 179. P. 10–30. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2017.11.001.
8. *Miladinova S., Stips A., Macias Moy D., Garcia-Gorriz E.* Pathways and mixing of the north western river waters in the Black Sea. Estuarine, Coastal and Shelf Science 236 (2020) 106630. P. 1–9.
9. *Fong D.A., Geyer W.R.* The alongshore transport of freshwater in a surface-trapped river plume. J. Phys. Oceanogr., 2002. V. 32. P. 957–972.

10. *Horner-Devine Alexander R., Hetland Robert D., MacDonald Daniel G.* Mixing and Transport in Coastal River Plumes. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2015. V. 47 (1). P. 569–594. DOI: 10.1146/annurev-fluid-010313-141408.
11. *Hetland R.D.*, 2005. Relating River Plume Structure to Vertical Mixing. *J. Phys. Oceanogr.*, 2005. V. 35. P. 1667–1688, DOI: 10.1175/JPO2774.1.
12. *Osadchiev A., Korshenko E.* Small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea under average climatic and flooding discharge conditions. *Ocean Science*, 2017. V. 13. No 3. P. 465–482. DOI: 10.5194/os-13-465-2017.
13. *Osadchiev A., Sedakov R.* Spreading dynamics of small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea observed by Landsat 8 and Sentinel 1-2. *Remote Sensing of Environment*, 2019. V. 221. P. 522–533. DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.043.
14. *Tsyganova M.V., Lemeshko E.M.* (2020) Dynamics of Riverine Water in the Black Sea Shelf Zone. In: *Olegovna C.* (eds) *Processes in GeoMedia. Volume I.* Springer Geology. Springer, Cham DOI: 10.1007/978-3-030-38177-6\_15.
15. *Yankovsky A.E., Lemeshko E.M., Ilyin Y.P.* The influence of shelfbreak forcing on the alongshelf penetration of the Danube buoyant water. *Black Sea. Continental Shelf Research*, 2004. V. 24. P. 1083–1098.
16. *Yankovsky A.E., Chapman D.C.* A simple theory for the fate of buoyant coastal discharges. *Journal of physical oceanography*, 1997. V. 27. P. 1386–1401.

## REFERENCES

1. *Blatov A.S., Ivanov V.A.* Hydrology and hydrodynamic of shelf zone of the Black Sea. Kiev: Naukova dumka, 1992. 244 p. (in Russian).
2. *Dinu I., Bajo M., Umgiesser G., Stănică A.* (2017). Romanian coastal dynamics during cold and warm seasons analyzed by means of a numerical model. *Geo-Eco-Marina*, 23. P. 71–101.
3. *Fong D.A., Geyer W.R.* The alongshore transport of freshwater in a surface-trapped river plume. *J. Phys. Oceanogr.*, 2002. V. 32. P. 957–972.
4. *Hetland R.D.*, 2005. Relating River Plume Structure to Vertical Mixing. *J. Phys. Oceanogr.*, 2005. V. 35. P. 1667–1688, DOI: 10.1175/JPO2774.1.
5. *Horner-Devine Alexander R., Hetland Robert D., MacDonald Daniel G.* Mixing and Transport in Coastal River Plumes. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2015. V. 47:1. P. 569–594. DOI: 10.1146/annurev-fluid-010313-141408.
6. *Ivanov V.A., Fomin V.V.*, Mathematical modeling of dynamic processes in the sea-land zone. Sevastopol: MHI UAS, 2008. 363 p. (in Russian).
7. *Mikhailov V.N.* Hydrology of Danube delta. Moscow: GEOS, 2004. 448 p. (in Russian).
8. *Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G.* Interannual variability of Danube waters propagation in summer period of 1992–2015 and its influence on the Black Sea ecosystem. *Journal of Marine Systems*, 2018. V. 179. P. 10–30. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2017.11.001.
9. *Miladinova S., Stips A., Macias Moy D., Garcia-Gorriz E.* Pathways and mixing of the north western river waters in the Black Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 236 (2020) 106630. P. 1–9.
10. *Osadchiev A., Korshenko E.* Small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea under average climatic and flooding discharge conditions. *Ocean Science*, 2017. V. 13. No 3. P. 465–482. DOI: 10.5194/os-13-465-2017.



11. *Osadchiev A., Sedakov R.* Spreading dynamics of small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea observed by Landsat 8 and Sentinel-2. *Remote Sensing of Environment*, 2019. V. 221. P. 522–533. DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.043.
  12. *Tsyganova M.V., Lemeshko E.M., Ryabcev Yu.N.* Modelling of hydrofront forming on the Danube mouth area. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, 2016. No 3. С. 26–31 (in Russian).
  13. *Tsyganova M.V., Lemeshko E.M.* (2020). Dynamics of Riverine Water in the Black Sea Shelf Zone. In: Olegovna C. (eds) *Processes in GeoMedia. Volume I.* Springer Geology. Springer, Cham DOI: 10.1007/978-3-030-38177-6\_15.
  14. *Zavialov P.O., Moller Jr. O.O., Wang X.H.* Relations between marine plastic litter and river plumes: first results of PLUMPLAS project *Journal of Oceanological Research*, 2020. V. 48. No 4. P. 32–44 (in Russian).
  15. *Yankovsky A., Lemeshko E., Ilyin Y.* The influence of shelfbreak forcing on the alongshelf penetration of the Danube buoyant water. *Black Sea. Continental Shelf Research*, 2004. V. 24. P. 1083–1098.
  16. *Yankovsky A., Chapman D.* A simple theory for the fate of buoyant coastal discharges. *Journal of physical oceanography*, 1997. V. 27. P. 1386–1401.
-

Yury N. Goryachkin<sup>1</sup>, Vyacheslav V. Dolotov<sup>2</sup>

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-42-48

## COMPUTER INTERACTIVE GIS "THE COASTAL ZONE OF THE SEVASTOPOL REGION OF CRIMEA"

### ABSTRACT

The information system based on the results of the study of the coastal zone of the Sevastopol region was developed in order to provide the available data to specialists who make decisions on the development of the region and the prevention of the destructive impact of the sea on land. The system presents materials obtained in the course of long-term monitoring, observations using space and aerial photography, including drones. It includes a detailed description of all sections of the coastline, the consequences of their transformation over a period of more than 100 years, assessment of the hydrometeorological and geomorphological conditions of the region, the results of ensuring coastal protection measures in certain areas and a detailed description of the coastal protected areas. Examples of the results of the cadastral assessment of recreational resources of beaches, developed earlier, are also given. GIS formats made it possible to implement quantitative statistics on individual objects, systematize landslide-prone areas in detail, and characterize the consequences of their occurrence. Special attention is paid to the description of the ecosystem conditions of numerous Sevastopol bays and the few estuaries of regulated rivers. Interactive GIS realization is providing access to the information in a visual interactive cartographic version.

**KEYWORDS:** Crimea coastal zone, information and reference system, satellite and contact information, sustainable development, protected areas, beaches recreational resources.

### INTRODUCTION

Interest in the development of the coastal zone of the Crimea is constantly growing following by expansion of the recreational sphere in the Crimea economy. Currently, this trend is developing even more, due to the objective conditions of the pandemic that has engulfed the whole world and the tendency to redirect the tourists flow to Russian resorts. The Sevastopol region of Crimea, previously famous for historical and patriotic tourism, is also currently making attempts to develop recreational tourism and improve the quality of the service sector to the required level. All these circumstances, as well as specialized high-budget federal programs for the development of Crimea and Sevastopol, are aimed, to a large extent, at transforming the coastal zone. For example, a large-scale project to create a cultural and historical cluster is being implemented at the Crystal Cape in Sevastopol<sup>3</sup>, a decision has been made on the fundamental development of the

---

<sup>1</sup> FRC Marine Hydrophysical Institute RAN, Kapitanskaya, 2, 299011, Sevastopol. Russia, *e-mail*: [yngor@mhi-ras.ru](mailto:yngor@mhi-ras.ru)

<sup>2</sup> FRC Marine Hydrophysical Institute RAN, Kapitanskaya, 2, 299011, Sevastopol. Russia, *e-mail*: [vdolotov@mail.ru](mailto:vdolotov@mail.ru)

<sup>3</sup> In Sevastopol, the project of the cultural cluster on the Crystal was presented. FGBU Russian Newspaper. 2020. <https://rg.ru/2020/12/25/reg-ufo/v-sevastopole-predstavili-proekt-kulturnogo-klastera-na-hrustalnom.html>. (accessed 11.04.2021) (in Russian).

Northern side of the city<sup>1</sup> with its transformation into an independent recreational zone of world-class service. Due to the limited water resources, a grandiose structure was built on the Belbek River to accumulate water reserves and use part of the river's drains for the purpose of water supply to the city. At the same time, on some landslide-prone areas of the North Side, large-scale work is being carried out to removing the top layer of soil, which, together with potential beach material, is being realized for other, very dubious, purposes.

All of the above and potentially probable actions are accompanied or may be accompanied by a deterioration in the ecological and aesthetic condition of the coastal zone. This is significant, since even now some seashores are characterized by chaotic construction, which does not take into account natural conditions and the accumulated experience of nature management, primarily negative [Kunz, 1993; Oliferov, 2008; Gogoberidze, 2013; Gogoberidze, 2014; Afanasyev, 2018; Shuisky, 2018; Isaev, 2020].

This state is not least due to the lack of awareness of economic entities and decision-making bodies about the current changes taking place in the coastal zone, as the authors have seen at meetings at various levels. No less alarming is the fact that the managers and directors of individual coastal facilities, in most cases, are persons who have not lived in Sevastopol before and have not experienced the history of the development of the coastal zone of the region as their own experience.

In addition, organizations that do not have an elementary understanding of the lithodynamics of the coastal zones are sometimes involved in the development of construction projects in those zones and the preparation of shore protection schemes. Therefore, it is obvious that informing as many people as possible related to the nature management in the coastal zone about its current state and changes is very important task.

In order to solve this problem, the authors developed an electronic interactive version of the information and reference system corresponding to the current level of management, which combined the available data on the study of the coastal zone obtained by various organizations and is available to all interested parties. The system contains a large number of map features, including their characteristic data. In the future, it is planned to ensure the continuous development of the system by supplementing it with new materials.

## MATERIALS AND METHODS

Taking into account the traditional presentation of most information systems, based on the list of its sections [Dolotov, 2013; Vetsalo, 2008] and also traditional GIS structure with the display of a list and map representation of objects [Filatov, 1997; Goodchild, 2000; Svidzinska, 2011; Chumachenko, 2014; Dolotov, 2017], the system user interface is implemented in the format shown in Fig. 1 (a).

The user interface implements both the viewing of the system's text materials and the main features of GIS tools, in particular: the selection of individual types of objects with information about each of them, the shifting and scaling of the map. Detail map representation can be configured by the user. So, the map includes the main database of geographical names, which can be displayed depending on the scale, which is clearly seen in Fig. 2 (a) and the insets in Fig. 1 (a). In addition, the system implements a mechanism for creating spatial bookmarks, calculating distances, and some other useful functions. The base map, also traditionally, is based on the use of a number of vector layers that display its individual components (Fig. 2 (b)). The map representation uses the well-known ESRI shape file formats

---

<sup>1</sup> What obvious-incredible solutions for the Northern Side were offered to the residents of Sevastopol. 2019. <https://sevastopol.su/news/kakie-ochevidnye-neveroyatnye-resheniya-dlya-severnoy-storony-predlozhili-zhitely-am> (accessed 11.04.2021) (in Russian).

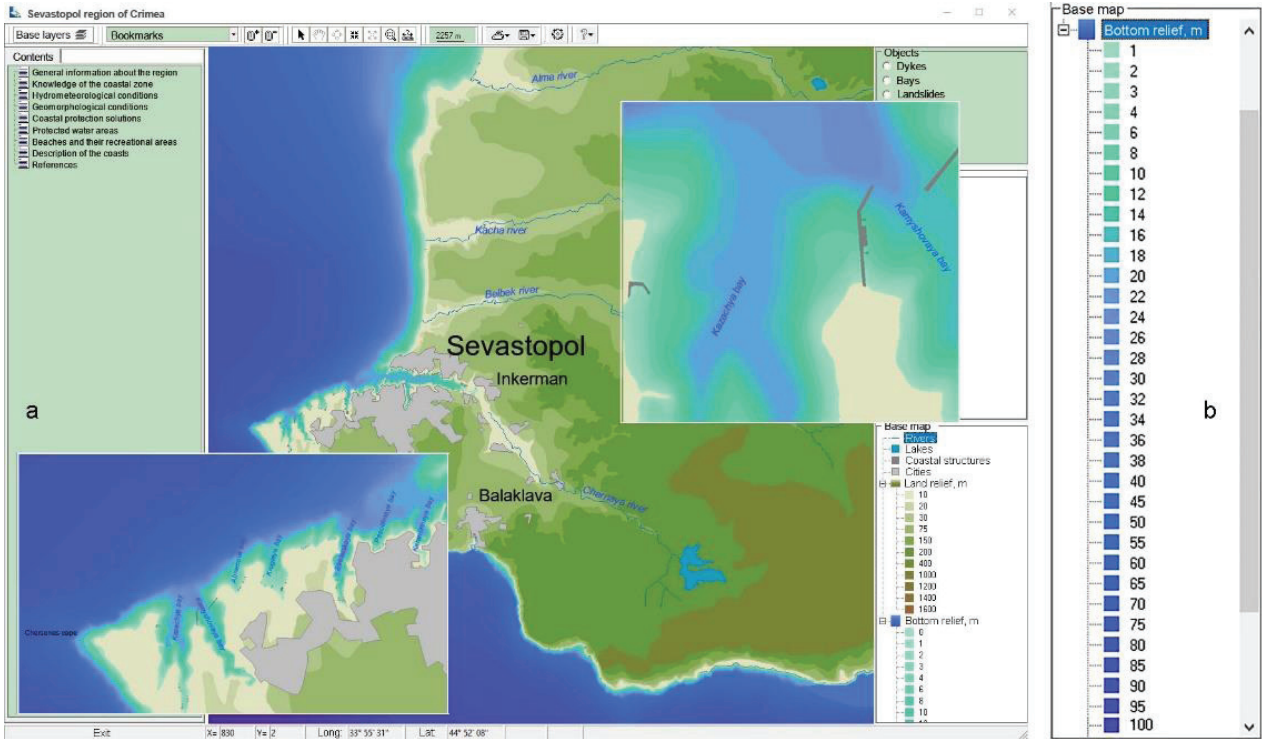


Fig 1. User interface (a) and bathymetry legend (b)

The main attention in the preparation of the digital map was paid to the study of the bottom relief, which largely determines the processes of mass transfer in the coastal zone. That is why the bottom relief on the map is represented by isobaths with detail increasing towards the shore as shown on Fig. 1, (b). The scanned navigation maps of scales from 1:100 000 to 1:5000 as of 1992<sup>1</sup>, were used during preparing the map. Both individual depth points and isobates were digitized simultaneously, and line figures were later converted into points by GIS tools. After that, the resulting arrays of points were combined and the common array was used for generating a given

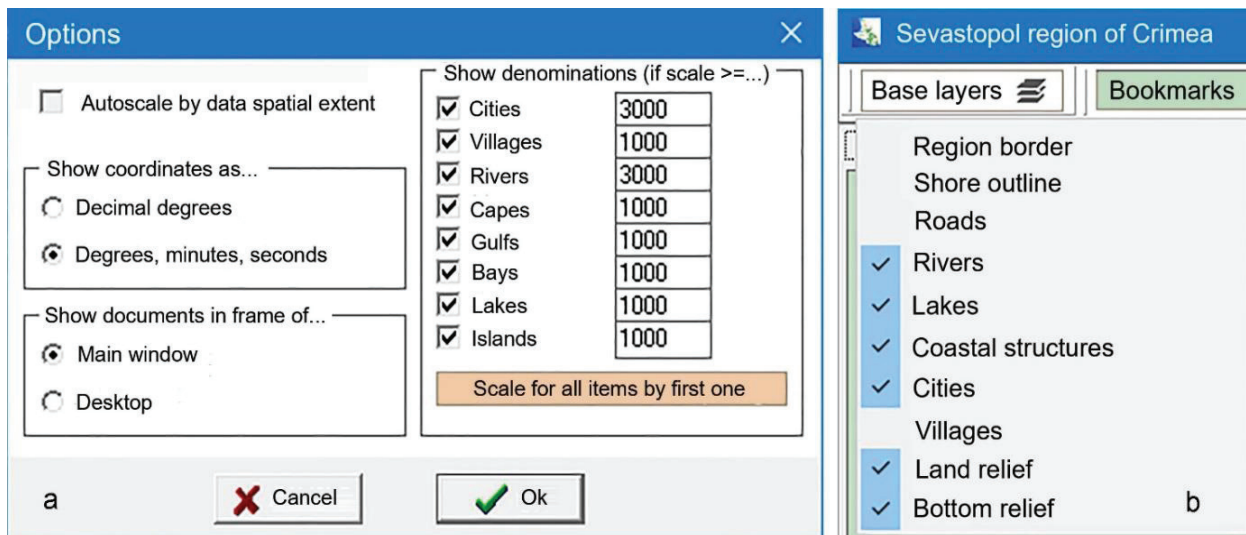


Fig. 2. Options window (a) and map representation panel (b)

<sup>1</sup> Collection of navigation maps of the Black and Azov Seas [2000-2008, BMP, PDF]. 2016. <https://www.liveinternet.ru/users/skyready/post396766569/> (accessed 11.04.2021).

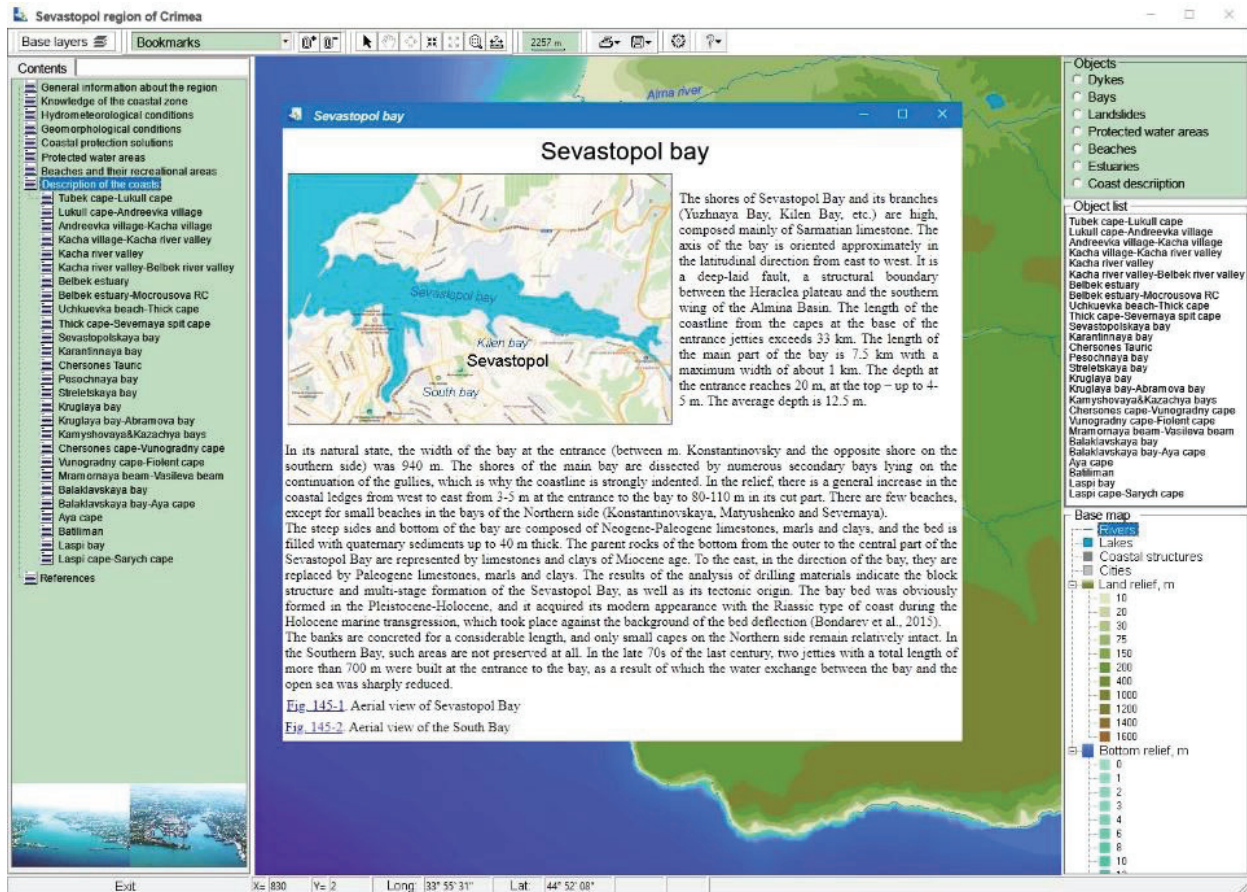


Fig. 3. Coast's description window format

list of depths in form of isolines. The resulting linear shapes were carefully checked for topological irregularities and then the digital linear map was converted to adjacent polygons. Thus, by analogy with the earlier work of the authors [Dolotov, 2013] the ability to represent the depth map both as isolines and as a gradation fill was implemented. It is also possible to use both options together. In practice, an overly detailed isobates map in the coastal zone interferes with detailed viewing and analysis of processes occurring near the shore, and therefore, the map is most often displayed in the form of polygons, as shown in Fig. 1 (a). In addition, when the mouse cursor moves over the Black Sea, the current depth is displayed in the system status bar.

The traditional content of the system includes the following main sections with drop-down subsections:

- General information about the region;
- Knowledge of the coastal zone of the region;
- Hydrometeorological conditions;
- Geomorphological conditions;
- Coastal protection solutions;
- Protected water areas;
- Beaches and their recreational areas;
- Description of the coasts.

The last section corresponds to the individual pages of the previously published Atlas [Goryachkin, 2019], presented as their copies (Fig. 3).

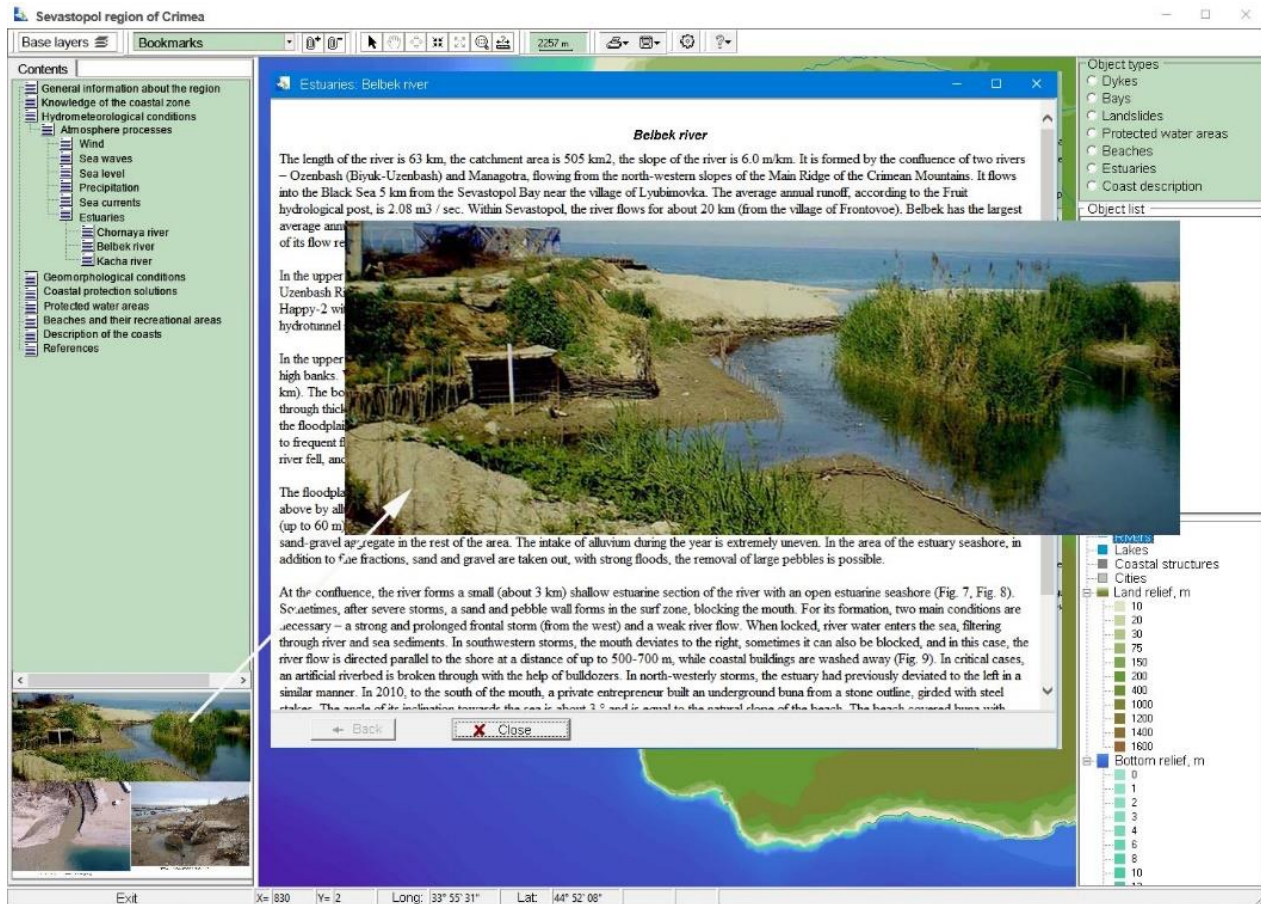


Fig. 4. Example of text materials visualization

All text documents are displayed in the < html> format with images presented either directly in the text or as thumbnails displayed at the bottom of the content panel. The latter format seemed to be the most convenient, since it does not take up a significant part of the text space with the ability to immediately see the approximate content of all images (Fig. 4).

If you need a more detailed view of the images, they can be displayed in a separate window at the click of the mouse.

Map features are displayed on the map as points, lines, and polygons. The list of individual categories of objects represented in the system is displayed in the corresponding panel at the top right. Selecting a specific category, such as "Bays" (Fig. 5), provides a complete list of objects in this category and displays them on the map.

At the same time, when the mouse cursor moves through the list of objects, each of them is highlighted on the map for quickly determine their spatial location. You can select an item to display its associated information from either the list or the map.

## RESULTS AND DISCUSSION

The usual result of the development of information systems is the created tool in the form of a computer program that includes its own special database. This tool allows you to quickly get information about the state and dynamics of any section of the coast of the Sevastopol region, its ownership, purpose, cost and other indicators. In the developed tool, all the information is presented as correctly and accessible as possible. A large number of maps and illustrations are used.

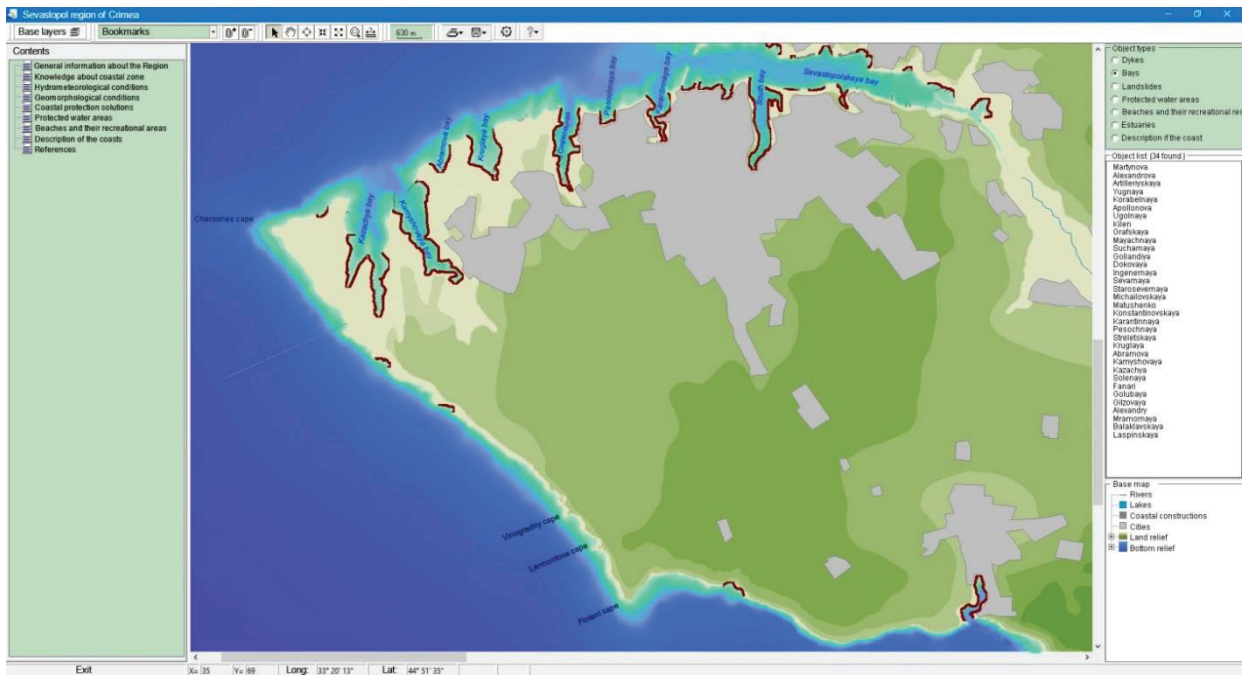


Fig. 5. Visualization of map objects on the example of bays

The feasibility of developing such systems is confirmed by the implementation of the described GIS-oriented tool in the Sevastopol Main Department of Natural Resources and Ecology.

## CONCLUSION

Comparative variants of different GIS implementation allow us to assert that Internet products using modern open technologies can significantly speed up the work and the capabilities of such products often exceed the capabilities of traditional programming methods. In this regard, it should be noted that there is no need for careful preparation of the base map and zooming technologies. An additional advantage is the ability to use GIS on any platform, including tablets and smartphones.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research № 0555-2021-0005.

## REFERENCES

1. *Afanasyev A., Ignatov E.* Geomorphological aspects of the problem of coastal protection in high latitudes. *Geosystems of transition zones.* 2018. V. 2. No 2. P. 116–124.
2. *Chumachenko A., Makarov V., Danilov V.* Structure and the Module Content «Science» in GIS «National Park» (for Example, GIS NP «Khvalinsky»). *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Earth sciences.* 2014. V.14. No 2. P. 38–44 (in Russian).
3. *Dolotov V., Goryachkin Yu.* Information and reference system "Sea shores of Crimea". *Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources.* 2013. V. 1. No 27. P. 358–362 (in Russian).

4. *Dolotov V., Dolotov A.* Prospects for the Internet implementation of oceanographic information systems. InterCarto/InterGIS. 2017. V. 2. P. 182–192. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-2-23-182-192.
5. *Filatov N.* Geographical information systems and their application in the study of the environment. Textbook for students of higher pedagogical educational institutions. Petrozavodsk. 1997. 112 p.
6. *Gogoberidze G., Lednova J., Oganova S., Lazareva M., Ezernitskaya E.* Methods of Strategic Environmental Assessment for Coastal Landscapes. Proceeding volume of the EMECS«10 – MEDCOAST«13 Joint Conference «Global Congress on ICM: Lessons Learned to Address New Challenges». 2013. P. 343–349.
7. *Gogoberidze G., Karlin L., Abramov V., Lednova J.* Indicator method estimation of human impact assessment for coastal local municipalities. Measuring and Modeling of Multi-Scale Interactions in the Marine Environment. IEEE/OES Baltic International Symposium. 2014. P. 1–8.
8. *Goodchild M.* Spatial analysts and GIS practitioners. The current status of GIS and spatial analysis. Journal of Geographical Systems. 2000. V. 2. No 1. P. 0005–0010.
9. *Goryachkin Yu., Dolotov V.* Crimea sea shores. Sevastopol. 2019. 256 p. (in Russian).
10. *Isaev V., Ignatov E., Novikov A., Kashirina E., Trachuk V., Amandgurov R., Gorshkov E., Verboovsky V.* Using laser scanning to assess the dynamics of abrasive-landslide processes in the coastal zone of Sevastopol. Materials of the 5th conference. Lomonosov Moscow State University. 2020. P. 87–100 (in Russian).
11. *Kunz H.* Sand losses from an artificially nourished beach. Proc. Intern. Conf. on Coastal Zone Management (CZ'93), “Beach Nourishment: Engineering and Management Considerations” (eds.: D.K. Stauble & N.C. Kraus), New Orleans, USA, ASCE, New York, 1993a. P. 191–205.
12. *Oliferov A.* Dynamics of Crimea beaches. Geopolitics and geodynamics of regions. 2008. V. 1–2. P. 59–64. (in Russian).
13. *Shuiskyi Yu., Pankratenkova D.* Short estimation of antropogenous impact factor on the Black sea coastal zone. 2018. Arctic Shores: the Path to Sustainability: proceedings of the XXVII International Conference. coastal conference. P. 277–280 (in Russian).
14. *Svidzinska D.* Open GIS educational potential (on the example of open desktop GIS SAGA). Geoinformatics 2011 – 10th International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects. 2011. P. A017.
15. *Vetsalo L., Galkovskaya L., Godin E., Zhuk E., Konoplyannikov A., Ingerov A., Isaeva A., Khaliulin A.* Experience in developing and creating Web products in the MIST department of Marine Hydrophysical Institute. Information technology and management in environmental control systems. 2008. V. 11. P. 11–19 (in Russian).



УДК: 551.465

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-49-58

С.И. Казаков<sup>1</sup>

**ИССЛЕДОВАНИЕ  
ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ  
ПАРАМЕТРОВ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ВОД  
В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ЮЖНОГО КРЫМА**

**АННОТАЦИЯ**

Рассматриваются вопросы формирования и временной изменчивости вертикальной структуры вод Черного моря у берегов южного Крыма. Используется большой массив данных инструментальных измерений, полученный во второй половине (июнь–декабрь) 2013 г. при проведении оперативного мониторинга вертикального профиля температуры в районе стационарной океанографической платформы Морского гидрофизического института в прибрежной зоне у мыса Кикинеиз. Измерения были проведены с помощью термолинии, представляющей собой систему датчиков температуры, распределенных по глубине от поверхности до дна.

Для исследования вертикальной структуры поля температуры рассматривается двухслойная стратификация, когда два квазиоднородных слоя (верхний слой более теплый и нижний холодный), разделены слоем больших вертикальных градиентов температуры – термоклин. Проведены расчеты ряда параметров вертикальной структуры вод: вертикального градиента температуры, его максимальных значений и глубины залегания, температуры ядра термоклина (если он регистрировался) и квазиоднородных слоев, разности температур этих слоев, толщины термоклина. Проанализированы медианные оценки суточных значений перечисленных параметров. Рассмотрены конкретные случаи трансформации вертикального профиля температуры воды во время процессов апвеллинга и даунвеллинга.

Показано, что временная изменчивость параметров вертикальной структуры значительна, особенно в летний гидрологический сезон. Основной вклад в изменчивость вносят сезонный ход теплового потока из атмосферы через поверхность моря и процессы апвеллинга и даунвеллинга в летний период, вызванные резкими изменениями вдоль-береговой компоненты ветра. В осенний гидрологический сезон термоклин регистрируется эпизодически с небольшим градиентом в виде нижней границы подповерхностного слоя дневного прогрева, или тонкого придонного слоя.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** температура воды, термоклин, квазиоднородный слой, вертикальный градиент температуры, глубина залегания и толщина термоклина, Южный берег Крыма.

---

<sup>1</sup> Морской гидрофизический институт РАН, 299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2, e-mail: science@bshpg-ras.ru

Sergey I. Kazakov<sup>1</sup>

## STUDY OF TEMPORARY VARIABILITY OF VERTICAL STRUCTURE PARAMETERS OF WATER IN THE COASTAL ZONE OF SOUTHERN CRIMEA

### ABSTRACT

The issues of the formation and temporal variability of the vertical structure of the Black Sea waters off the coast of the southern Crimea are considered. A large array of instrumental measurement data obtained in the second half of 2013 (June–December) during operational monitoring of the vertical temperature profile in the area of Stationary oceanographic platform of the Marine Hydrophysical Institute in the coastal zone near Cape Kikineiz is used. The measurements were carried out using a thermoline, which is a system of temperature sensors distributed in depth from the surface to the bottom.

To study the vertical structure of the temperature field, a model of two-layer stratification is considered, when two quasi-homogeneous layers (the upper one is warmer and the lower one cold) are separated by a layer of large vertical temperature gradients – the thermocline. A number of parameters of the vertical structure of waters were calculated: the vertical temperature gradient, its maximum values and depth of occurrence, the temperature of the thermocline core (if it was recorded) and quasi-uniform layers, the temperature difference between these layers, and the thermocline thickness. The median estimates of the daily values of the listed parameters are analyzed. Specific cases of transformation of the vertical profile of water temperature during the upwelling and downwelling processes are considered.

It is shown that the temporal variability of the parameters of the vertical structure is significant, especially in the summer hydrological season. The main contribution to the variability is caused by the seasonal course of the heat flow from the atmosphere through the sea surface and surge processes (upwelling and downwelling) in the summer period caused by abrupt changes in the alongshore wind component. In the autumn hydrological season, the thermocline is recorded sporadically with a slight gradient in the form of the lower boundary of the subsurface layer of daytime heating, or a thin bottom layer.

**KEYWORDS:** water temperature, thermocline, quasi-uniform layer, vertical temperature gradient, depth and thickness of the thermocline, southern coast of Crimea.

### ВВЕДЕНИЕ

Вертикальные термохалинные структуры вод центральной части и прибрежных районов Черного моря значительно отличаются. Основной причиной, определяющей различие, является общая вертикальная циркуляция моря, при которой происходит подъем вод в центральной его части и опускание их в прибрежных районах, что находит свое отражение в куполообразном распределении изотермических поверхностей [Книпович, 1932].

Прибрежная зона у южных берегов Крыма характеризуется приглубыми берегами, испытывает влияние меандрирующего Основного черноморского потока и вихревых динамических образований, связанных с его неустойчивостью. Шельф в этом районе расположен вдали от устьев крупных рек и характеризуется пониженной вертикальной стратификацией вод. Все это создает условия для увеличения толщины слоя термоклина и уменьшения вертикального градиента плотности по сравнению с водами центральной

---

<sup>1</sup> Marine Hydrophysical Institute, 2, Kapitanskaya St., Sevastopol, Russian Federation, 299011,  
e-mail: science@bshpg-ras.ru

части моря с восходящими движениями [Белокопытов, 2019]. Различные параметры стратификации вод у южного Крыма исследованы во многих работах, например, [Гидрометеорологические..., 1986; Гидрометеорология..., 1991; Гидрометеорологические..., 2012; Горячкин и др., 1999, 2004, 2005; Иванов и др., 2011; Belokopytov, 2018].

Особенно следует отметить монографии [Блатов и др., 1984, 1992], где изложены результаты изучения вертикальной структуры вод Черного моря, в том числе и на шельфе южного Крыма. Среди факторов определяющих тепловой режим и вертикальную структуру вод у южного Крыма выделены такие как глубины, течения, положение района вдали от источников распреснения. Распределение температуры воды в верхних слоях имеет ярко выраженный внутригодовой ход. Процессы прогрева протекают быстрее, а слой скачка выражен резче, чем в открытом море [Блатов и др., 1992]. В зимний и летний периоды года основной вклад в формирование структуры поля температуры вносит теплообмен через поверхность моря. Термический фактор преобладает над соленостным до глубин порядка 30 м. Для весеннего и осеннего сезонов характерно формирование поля температуры под действием вертикальных движений в сезонном термоклине, ярким проявлением которых являются апвеллинги и даунвеллинги [Блатов и др., 1984; Сильвестрова и др., 2017]. Сильные и продолжительные ветры вдольберегового направления приводят к выходу на поверхность холодных глубинных вод (при апвеллингах) или повышению температуры воды в прибрежной зоне и увеличению толщины верхнего квазиоднородного слоя (при даунвеллингах).

Климатические среднемесячные поля глубин верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) в Эгейском, Мраморном, Черном и Азовском морях исследовались авторами в работе [Kara, et al., 2009]. Там же проведено сравнение результатов оценки глубин ВКС различными методами. Вопросы изменчивости ВКС на межгодовых и десятилетних масштабах рассмотрены в работе [Oguz, et al., 2006].

Несмотря на достаточно подробную изученность процессов формирования и трансформации вертикальной структуры вод на шельфе южного Крыма, привлечение и анализ новых оригинальных данных наблюдений позволяет уточнить детали данного процесса и проследить более подробно этапы временной трансформации параметров вертикальной структуры вод в указанном регионе. Понимание этих процессов крайне важно, поскольку район исследования находится в шельфовой зоне моря, где очень активно развивается хозяйственная деятельность, которая часто весьма неблагоприятно сказывается на рекреационных ресурсах побережья южного Крыма.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для исследования временной изменчивости параметров вертикальной структуры вод у южного Крыма послужили данные натурных измерений вертикального профиля температуры воды с Океанографической платформы Морского гидрофизического института (МГИ) в прибрежной зоне у мыса Кикинеиз. Используются данные измерений за вторую половину 2013 г. Измерения проводились с помощью термолинии, которая разработана в МГИ. Термолиния представляет собой систему распределенных по глубине от поверхности датчиков температуры воды. Нижний конец ее закреплен на дне, верхний на палубе платформы. Глубина моря у платформы 30 м, расстояние от берега 700 м. Количество датчиков температуры термолинии может изменяться. Рассматриваемый массив данных получен на 17 датчиках. Верхние 11 датчиков, начиная от поверхности моря, расположены с интервалом 1 м до глубины 10 м, остальные с интервалом 2 м до глубины 22 м. Регистрация значений температуры производилась каждые 60 с, точность измерений составляла 0,05 °С. Диапазон измерений температуры воды – от минус 2 °С до 35 °С, длина погружаемой части – не более 28 м. Кроме того измерялась

величина атмосферного давления с точностью  $\pm 1$  гПа в интервале от 850 до 1055 гПа и гидростатическое давление на глубине нижнего конца термоклини с точностью  $\pm 20$  гПа в диапазоне от 1000 до 4000 гПа. Таким образом, измерения охватывают всю толщу воды от поверхности до дна.

Для исследования вертикальной структуры вод рассматривалась двухслойная стратификация, когда высокоградиентный слой, сезонный термоклин, разделяет два квазиоднородных слоя.

Глубина залегания ядра термоклина определялась по максимуму значения вертикального градиента температуры. Для каждого временного отсчета определялась величина вертикального градиента температуры в термоклине, температура ядра и толщина термоклина, разность температур верхней и нижней границ термоклина. На основании этих расчетов были получены медианные оценки суточных значений всех указанных параметров, начиная с 20-х чисел июня по декабрь включительно. Таким образом, полученные оценки характеризуют временную изменчивость вертикальной структуры вод у берегов южного Крыма в летний и осенний гидрологические сезоны (не считая последней декады июня) [Блатов и др., 1992]. Кроме того, рассмотрены конкретные случаи, когда стратификация вод резко и быстро менялась во время процессов апвеллинга и даунвеллинга.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты оценки изменчивости температурных параметров сезонного термоклина представлены на рис. 1. Для каждого месяца отражена температура ядра термоклина – температура воды на глубине максимального вертикального градиента, а также температуры верхней и нижней границ термоклина, т.е. температуры верхнего и нижнего квазиоднородных слоев. Здесь же представлена и разность температур между этими слоями.

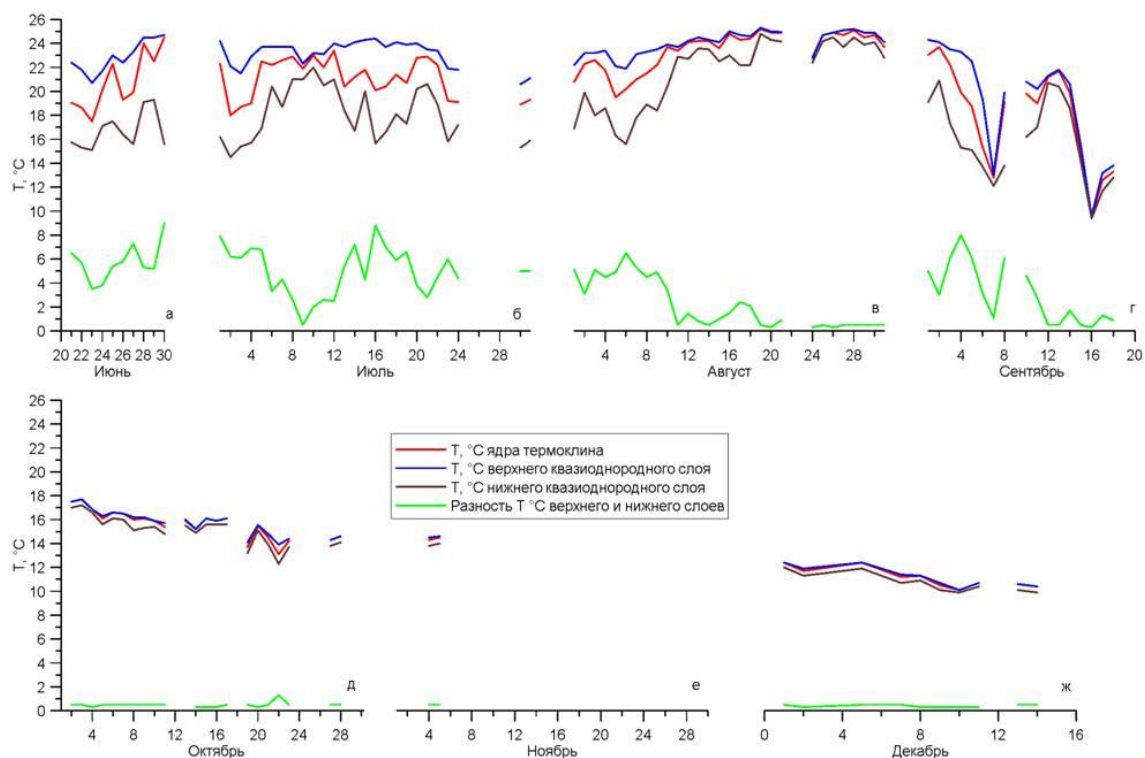


Рис. 1. Временная изменчивость температурных параметров термоклина

Fig. 1. Temporal variability of temperature parameters of the thermocline

В последней декаде июня (рис. 1, а) происходит прогрев моря, температура верхнего и нижнего квазиоднородных слоев увеличивается, температура ядра термоклина растет от 18 °С до 25 °С. Разность температур между квазиоднородными слоями колеблется от 3,5 °С до 9 °С, постепенно увеличиваясь, что говорит о более быстром прогреве верхнего слоя. Колебания температур в этот период обусловлены, прежде всего, процессами ветрового апвеллинга, например, 22-23 июня. Июль (рис. 1, б) характеризуется колебаниями температуры ядра термоклина в пределах 18 °С–23 °С, верхнего и нижнего слоев – от 22 °С до 24 °С и от 15 °С до 22 °С, соответственно. Разность температур колеблется от 1 °С до 9 °С. Для августа (рис. 1, в) характерен дальнейший рост температур, причем во второй половине августа быстрее растет температура нижнего квазиоднородного слоя, нежели верхнего. Соответственно, в этот период уменьшается разность температур между верхним и нижним слоями. В сентябре начинается процесс охлаждения вод, рис. 1, г. Отметим, что после 20-го сентября термоклин регистрировался лишь эпизодически в виде нижней границы подповерхностного слоя дневного прогрева с небольшим перепадом температур. Характерной особенностью осеннего гидрологического сезона является температурная однородность во всем диапазоне глубин. Формально в этом случае температуры обоих слоев и термоклина совпадают. Иногда термоклин фиксируется почти у дна с маленьким градиентом и небольшой разницей температур. Разрывы данных, которые имеют место в летний сезон, обусловлены техническими проблемами измерений, а в осенний и зимний сезоны – отсутствием термоклина.

На рис. 2 показана временная изменчивость глубин залегания ядра, верхней и нижней границ термоклина. Для июня (рис. 2, а) характерен рост всех трех величин параметров, что связано с увеличением потока тепла через поверхность моря и прогревом водной толщи.

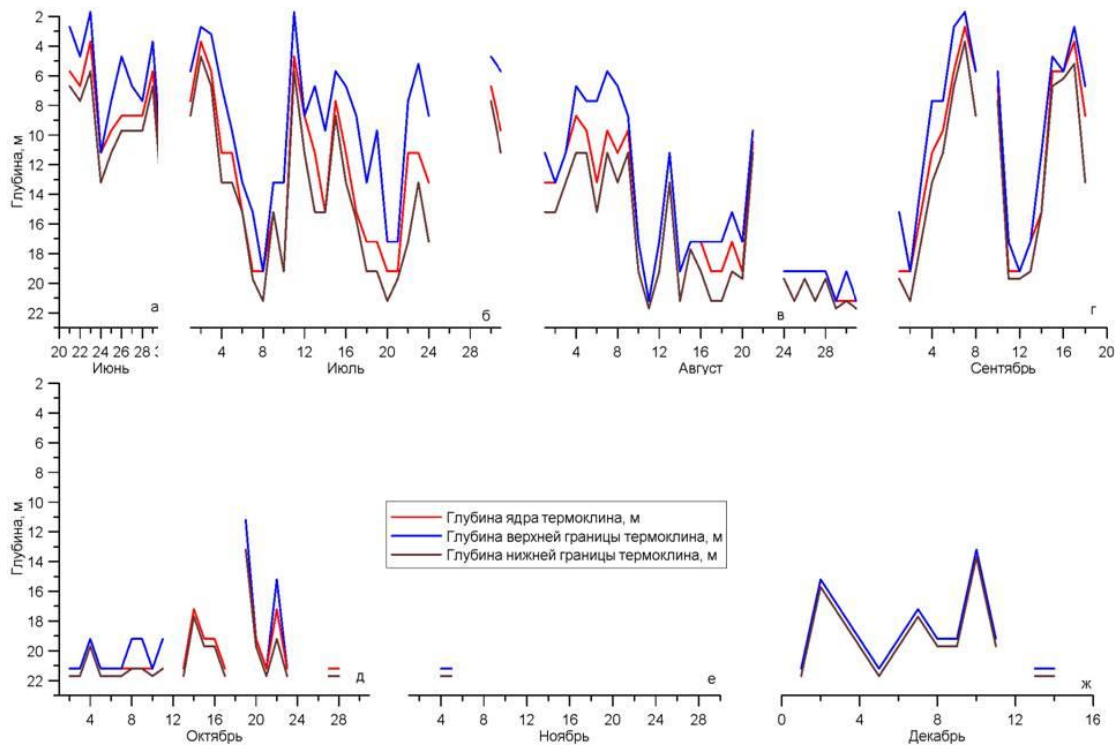


Рис. 2. Временная изменчивость глубин залегания ядра, верхней и нижней границ термоклина

Fig. 2. Temporal variability of the core depth, upper and lower boundaries of the thermocline

Такой же характер изменчивости наблюдается и в летний сезон (июль–сентябрь, рис. 2, б, в, г). В конце августа ВКС достигает максимальных глубин, порядка 19–20 м, а его температура – 24–25 °С. В летние месяцы глубина залегания термоклина (~15 м) и его градиент (~1–5 °С/м) (рис. 3) в прибрежной зоне определяются в основном процессами апвеллинга и даунвеллинга, в зависимости от вдольбереговых компонент скорости ветра и течения [Блатов и др., 1984; Сильвестрова и др., 2017]. Их величины за короткие промежутки времени могут меняться в широких пределах (возможны смещения термоклина на 15 м за несколько часов). Кроме того, были зарегистрированы явления развития полного апвеллинга, когда приток глубинных вод приводит к подъему термоклина и быстрому понижению поверхностной температуры (22–23 июня, 6–7 сентября и после 16 сентября). При апвеллинге термоклин поднимается вверх, температура его ядра падает, величина градиента и толщина термоклина уменьшаются. И, наоборот, при даунвеллинге (9 и 20 июля, 12–14 и 23–29 августа, 9, 13 и 15 сентября) термоклин опускается, вытесняя холодный нижний слой (рис. 2 б, в, г). В этом случае растет температура и глубина его ядра, толщина термоклина и градиент уменьшаются (рис. 1–4).

Величина максимального вертикального градиента температуры в течение всего периода исследования меняется в широких пределах. С конца июня по сентябрь включительно его величина меняется в пределах от 1 °С/м до 5 °С/м (рис. 3). Такие большие колебания обусловлены, прежде всего, явлениями апвеллинга/даунвеллинга. Максимальные градиенты температуры отмечаются во время развития апвеллинга и на стадии перехода к даунвеллингу.

С конца сентября величина максимального градиента падает до значений 0,8 °С/м – 2 °С/м. В основном градиент мал, что говорит о температурной однородности толщи воды на всех горизонтах в осенний гидрологический сезон.

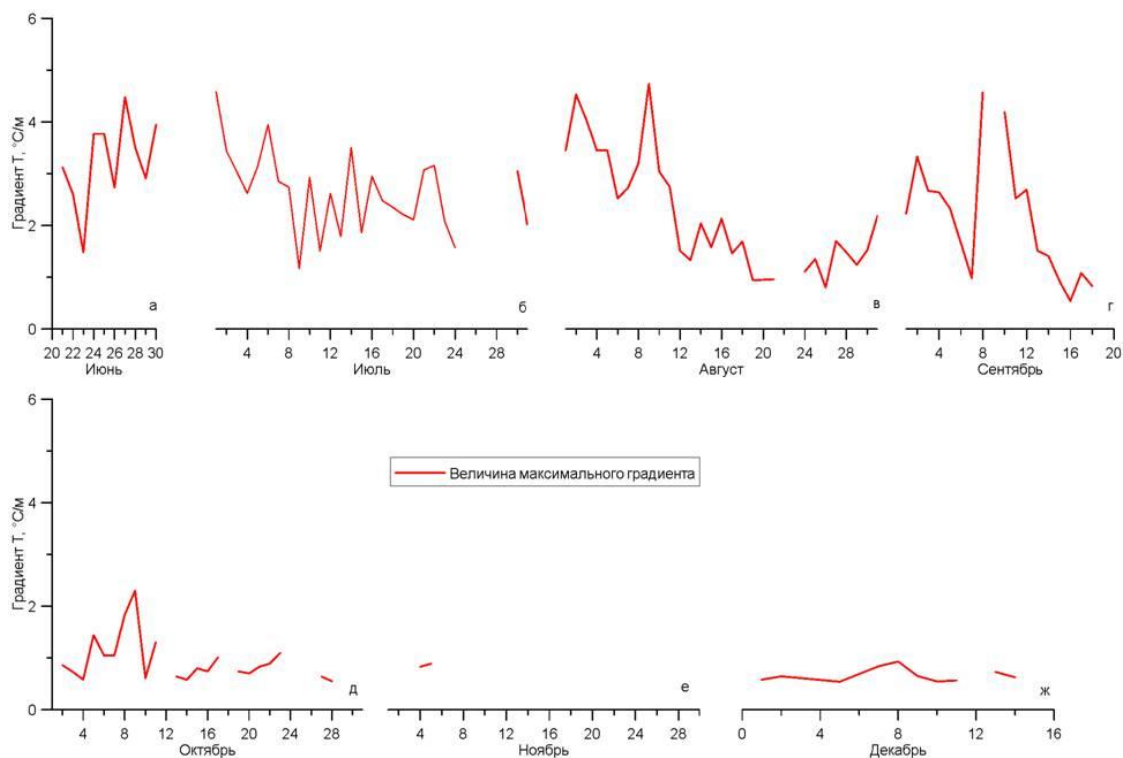


Рис. 3. Временная изменчивость величины максимального вертикального градиента температуры

Fig. 3. Time variability of the maximum vertical temperature gradient

В летний сезон временная изменчивость толщины термоклина, также в основном, определяется процессами, зависящими от вдольбереговых компонент скорости ветра и течений. В летний сезон она варьирует в пределах 1,0–8,5 м (рис. 4, а, б, в, г). В зимний сезон, термоклин в редких случаях фиксируется почти у дна, толщина его при этом минимальна (рис. 4, д, е, ж).

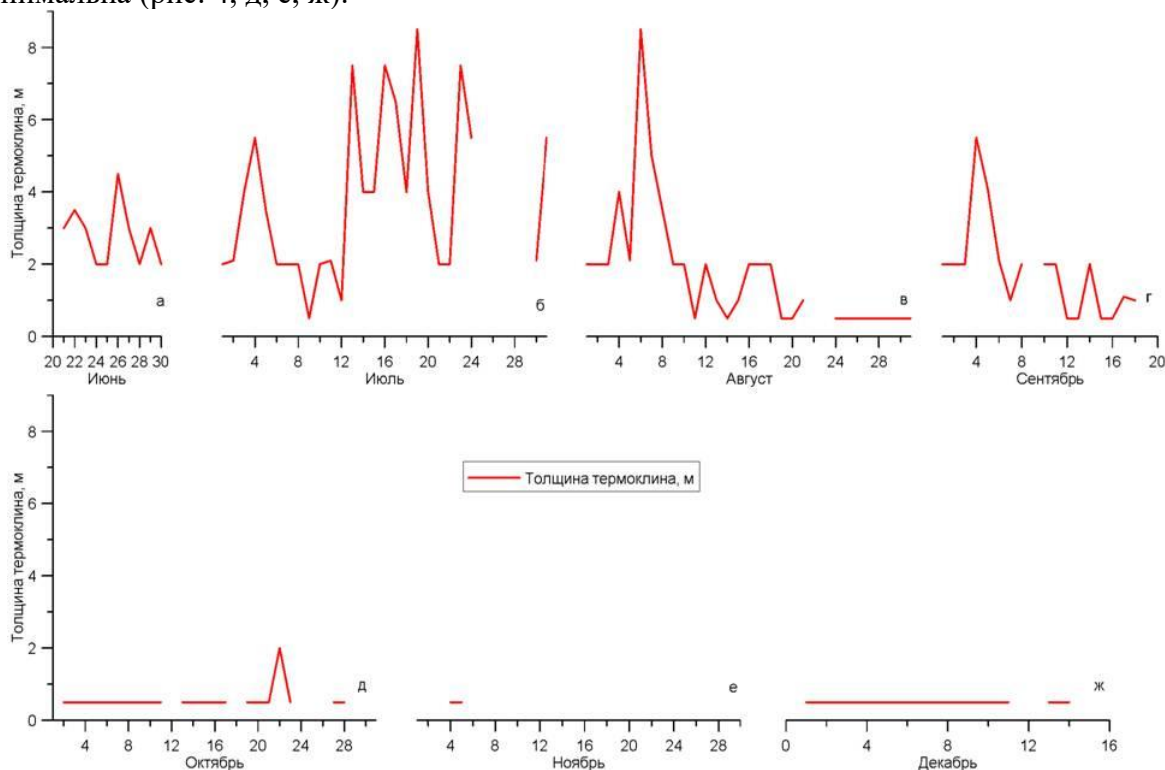


Рис. 4. Временная изменчивость толщины термоклина

Fig. 4. Temporal variability of the thermocline thickness

Толщина термоклина (если он регистрируется) максимальна в июле и первой половине августа, однако и в этот период ее колебания весьма значительны. Начиная с сентября и далее до конца года, термоклин фиксируется крайне редко, и толщина его очень мала.

Для иллюстрации процессов трансформации вертикальных профилей температуры воды во время апвеллинга и даунвеллинга на рис. 5, в качестве примера, представлены кривые профилей для периодов 6–8 сентября и 12 августа. Первый период соответствует случаю полного апвеллинга, второй – полного даунвеллинга.

При усилении западной составляющей ветра в период 6–7 сентября развился апвеллинг (рис. 5, а). По данным наблюдений гидрометеорологического пункта Черноморского гидрофизического подспутникового полигона МГИ 6 и 7 сентября наблюдался ветер западного направления, среднесуточная величина его составляла около 4 м/с. В течение 2-х суток вертикальный профиль температур резко менялся. Приток глубинных вод приводит к подъему термоклина, наблюдается резкое понижение поверхностной температуры. Термоклин выходит практически на поверхность и исчезает. Всю толщу вод занимает квазиоднородный слой с температурами порядка 9 °С. Однако, при изменении ветрового режима, стратификация с двумя квазиоднородными слоями и термоклинном между ними очень быстро восстанавливается.

Во время полного даунвеллинга 12 августа (рис. 5, б) наблюдается температурная однородность во всей толще вод.

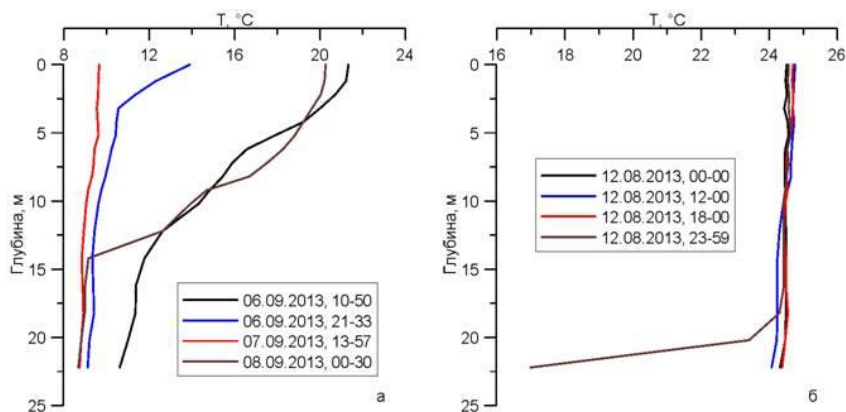


Рис. 5. Пример изменчивости вертикального профиля температуры воды в период апвеллинга (а) и даунвеллинга (б)

Fig. 5. An example of the variability of the vertical profile of water temperature during upwelling (a) and downwelling (b)

Ветровой режим в это время характеризуется штилевой погодой с небольшими отклонениями, обусловленными суточным ходом скорости и направления ветра. Термоклин опускается и вытесняет холодный нижний слой. Формально, в этот период температуры квазиоднородных слоев и термоклина совпадают, и только к концу суток термоклин проявляется в нижнем придонном слое.

Приведенные примеры демонстрируют большую изменчивость вертикальной стратификации и параметров вертикальной структуры вод у берегов южного Крыма.

## ВЫВОДЫ

Используя большой массив данных натуральных измерений вертикального распределения температуры воды у Южного берега Крыма, охватывающий два гидрологических сезона (летний и осенний) 2013 года, получены оценки параметров вертикальной структуры вод и их временной изменчивости. Дана оценка изменчивости температуры ядра сезонного термоклина, температуры верхнего и нижнего квазиоднородных слоев, разности температур между ними. Исследована изменчивость глубины залегания термоклина, нижней и верхней его границ, величины максимального вертикального градиента температуры воды, толщины термоклина.

С последней декады июня по август температура ядра термоклина растет, изменяясь от 18 °С до 25 °С. Температура квазиоднородных слоев также растет в этот период, причем в августе температура нижнего слоя растет более высокими темпами, чем верхнего. Разность температур квазиоднородных слоев максимальна в конце июня, в июле, первой половине августа и сентября. Максимальные значения ее порядка 10 °С. Во второй половине августа (время максимального прогрева) и со второй декады сентября (начало охлаждения вод) по декабрь термоклин практически полностью исчезает.

Интервал изменчивости глубины термоклина в летний сезон составляет 2–20 м, при наиболее вероятной глубине 15 м. Толщина термоклина изменяется в интервале 1–8 м, а максимальный градиент температуры – в пределах 1–5 °С/м.

В зимний период термоклин фиксируется иногда в виде нижней границы подповерхностного слоя дневного прогрева с небольшим перепадом температур, например, 9, 16, 22 октября, или в придонном слое.

Общий характер вертикальной структуры вод у берегов южного Крыма определяется вертикальной циркуляцией (подъем вод в центре моря и опускание их на периферии), удаленностью от источников распреснения, тепловым потоком через поверхность моря.



Временная изменчивость параметров вертикальной структуры температуры воды (особенно в летний период) во многом определяется процессами апвеллинга и даунвеллинга, вызванными изменениями вдольбереговой составляющей ветра. Это находит отражение в изменчивости параметров вертикальной структуры температуры воды, диапазон которой достаточно велик, особенно в летний гидрологический сезон.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках научной темы 0555-2021-0005 государственного задания ФИЦ МГИ 2021 г.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out within the framework of the scientific theme 0555-2021-0005 of the state assignment of Marine Hydrophysical Institute, 2021.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белокопытов В.Н.* Сезонный ход вертикальной термохалинной стратификации вод на черноморском шельфе Крыма. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря, 2019. Вып. 3. С. 19–24.
2. *Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А., Косарев А.Н., Тужилкин В.С.* Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
3. *Блатов А.С., Иванов В.А.* Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря (на примере Южного берега Крыма). Киев: Наукова думка, 1992. 242 с.
4. *Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т.4. Черное море.* Под ред. Терзиева Ф.С. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 100 с.
5. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море.* Под ред. Симоннова А.И., Альтмана Э.Н. СПб., 1991. 429 с.
6. *Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 2. Черное море.* Под ред. Ильина Ю.П. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. 421 с.
7. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А.* Гидрометеорологический режим южного побережья Черного моря. Препринт. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 1999. 45 с.
8. *Горячкин Ю.Н., Кондратьев С.И., Ляшенко С.В.* Особенности пространственного распределения гидрологических и гидрохимических характеристик в Феодосийском заливе в августе 2002 г. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. Вып. 10. С. 58–69.
9. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А.* Изменчивость солености поверхностных вод в прибрежной зоне Южного берега Крыма. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. Вып. 12. С. 22–28.
10. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с.
11. *Книпович Н.М.* Гидрологические исследования в Черном море. Тр. Азово-Черноморской научно-промысловой экспедиции. М: ВНИИ Морского рыбного хозяйства, 1932. Вып. 10. 272 с.
12. *Сильвестрова К.П., Зацепин А.Г., Мысленков С.А.* Прибрежные апвеллинги в Геленджикском районе Черного моря: связь с ветровым воздействием и течением. Океанология, 2017. 57. № 4. С. 521–530.
13. *Belokopytov V.N.* Retrospective analysis of the Black Sea thermohaline fields on the basis of empirical orthogonal functions. Physical Oceanography, 2018. V. 25. Iss. 5. P. 380–389.

14. Kara A.B., Helber R.W., Boyer T.P., Elsner J.B. Mixed layer depth in the Aegean, Marmara, Black and Azov Seas: Part I: General features. *J. of Marine Systems*, 2009. V. 78. Supplement. P. S169-S180. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2009.01.022.
15. Oguz T., Dippner J. W., Kaymaz Z. Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales. *J. Marine Systems*, 2006. V. 60, Iss. 3–4. P. 235–254.

## REFERENCES

1. Belokopytov V.N. Seasonal variation of vertical thermohaline stratification of waters on the Crimean Black Sea shelf. *Environmental safety of the coastal and shelf zones of the sea*, 2019. Iss. 3. P. 19–24 (in Russian).
2. Belokopytov V.N. Retrospective analysis of the Black Sea thermohaline fields on the basis of empirical orthogonal functions. *Physical Oceanography*, 2018. V. 25. Iss. 5. P. 380–389.
3. Blatov A.S., Bulgakov N.P., Ivanov V.A., Kosarev A.N., Tugilkin V.S. Variability of the Black Sea hydrophysical fields. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984. 240 p. (in Russian).
4. Blatov A.S., Ivanov V.A. Hydrology and hydrodynamics of the shelf zone of the Black Sea (on the example of the southern coast of Crimea). Kiev: Naukova Dumka, 1992. 242 p. (in Russian).
5. Goryachkin Yu.N., Ivanov V.A. Hydrometeorological regime of the southern coast of the Black Sea. Preprint. Sevastopol: ECOSI-Hydrophysics, 1999. 45 p. (in Russian).
6. Goryachkin Yu.N., Kondratyev S.I., Lyashenko S.V. Features of the spatial distribution of hydrological and hydrochemical characteristics in the Feodosiya Gulf in August 2002. *Environmental safety of the coastal and shelf zones and comprehensive studies of shelf resources*. Sevastopol: ECOSI-Hydrophysics, 2004. Iss. 10. P. 58–69 (in Russian).
7. Goryachkin Yu.N., Ivanov V.A. Variability of surface water salinity in the coastal zone of the southern coast of Crimea. *Environmental safety of the coastal and shelf zones and comprehensive studies of shelf resources*. Sevastopol: ECOSI-Hydrophysics, 2005. Iss. 12. P. 22–28 (in Russian).
8. *Hydrometeorological conditions of the shelf zone of the seas of the USSR*. V.4. Black Sea. Ed. F.S. Terziev. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. 100 p. (in Russian).
9. *Hydrometeorology and Hydrochemistry of the USSR Seas*. V.4. Black Sea. Ed. Simonova A.I., Altman E.N. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1991. 429 p. (in Russian).
10. *Hydrometeorological conditions of the seas of Ukraine*. V. 2. Black Sea. Ed. Ilyin Yu.P. Sevastopol: ECOSI-Hydrophysics, 2012. 421 p. (in Russian).
11. Ivanov V.A., Belokopytov V.N. *Oceanography of the Black Sea*. Sevastopol: ECOSI-Hydrophysics, 2011. 212 p. (in Russian).
12. Knipovich N.M. Hydrological research in the Black Sea. Tr. Azov-Black Sea scientific fishing expedition. Moscow: All-Union Scientific Research Institute of Marine Fisheries, 1932. No 10. 272 p. (in Russian).
13. Kara A.B., Helber R.W., Boyer T.P., Elsner J.B. Mixed layer depth in the Aegean, Marmara, Black and Azov Seas: Part I: General features. *J. of Marine Systems*, 2009. V. 78. Supplement. P. S169-S180. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2009.01.022.
14. Oguz T., Dippner J.W., Kaymaz Z. Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales. *J. Marine Systems*, 2006. V. 60, Iss. 3–4. P. 235–254.
15. Silvestrova K.P., Zatsepin A.G., Myslenkov S.A. Coastal upwellings in the Gelendzhik region of the Black Sea: relationship with wind and current. *Oceanology*, 2017. 57. No 4. P. 521–530 (in Russian).

УДК: 551.461

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-59-73

А.А. Полозок<sup>1</sup>, В.В. Фомин<sup>2</sup>, И.Н. Фомина<sup>3</sup>

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СГОННО- НАГОННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ЗАЛИВЕ ДОНУЗЛАВ (ЧЕРНОЕ МОРЕ)

### АННОТАЦИЯ

Сгонно-нагонные колебания в прибрежной зоне морей могут оказывать существенное влияние на инфраструктуру и безопасность судоходства в бухтах и заливах. Цель настоящей работы – исследование сгонно-нагонных колебаний в заливе Донузлав, расположенном на западном побережье Крымского полуострова и соединенном с морем узким проливом. Для этого используется гидродинамическая модель Advanced Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries (ADCIRC).

Численный алгоритм модели основан на методе конечных элементов, использующем треугольные элементы и линейные базисные функции. Входными данными модели ADCIRC служили поля скорости приземного ветра и атмосферного давления над Черным морем. Численное моделирование выполнялось на двух вложенных неструктурированных сетках. Первая сетка включала все Черное море, вторая сетка включала залив и прилегающую к нему акваторию моря.

Для графического отображения результатов моделирования применялся картографический пакет Generic Mapping Tools (GMT). Анализ результатов моделирования для разных направлений ветра показал, что при воздействии ветра на акваторию залива Донузлав в полях уровня моря и течений возникают сейшеобразные колебания.

Интенсивность этих колебаний определяется тем, насколько быстро скорость ветра достигает своего максимального значения. Из-за узости пролива за пределами залива колебания не проявляются. Выполнено моделирование экстремальной штормовой ситуации, возникшей в Черном море 11 ноября 2007 г.

В период шторма произошла быстрая смена направления ветра с юго-восточного на западное с одновременным усилением скорости ветра до 15–21 м/с. Это вызвало подъем уровня моря в вершине залива до 0,5 м и усиление скорости течения в проливе до 0,6 м/с.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Черное море, Донузлав, сгонно-нагонные колебания, моделирование, ADCIRC, GMT.

<sup>1</sup> Морской гидрофизический институт РАН, ул. Капитанская, д. 2, 299011, Россия, Севастополь, *e-mail*: [polozok.umi@gmail.com](mailto:polozok.umi@gmail.com)

<sup>2</sup> Морской гидрофизический институт РАН, ул. Капитанская, д. 2, 299011, Россия, Севастополь, *e-mail*: [v.fomin@mhi-ras.ru](mailto:v.fomin@mhi-ras.ru)

<sup>3</sup> Государственный океанографический институт имени Н.Н.Зубова, Кропоткинский пер., д. 6, 119034, Россия, Москва, *e-mail*: [irina.fomina@ukr.net](mailto:irina.fomina@ukr.net)

**Anton A. Polozok<sup>1</sup>, Vladimir V. Fomin<sup>2</sup>, Irina N. Fomina<sup>3</sup>**

**NUMERICAL MODELING OF SURGE OSCILLATIONS IN THE DONUZLAV BAY  
(BLACK SEA)**

**ABSTRACT**

Surge oscillations in the coastal zone of the seas can have a significant impact on the infrastructure and safety of navigation in bays and bays. The purpose of this work is to study the surge oscillations in the Donuzlav Bay located on the western coast of the Crimean Peninsula and connected to the sea by a narrow strait. The Advanced Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries (ADCIRC) is used for this. The numerical algorithm of the model is based on the finite element method using triangular elements and linear basis functions. The input data of the ADCIRC model were the surface wind velocity and atmospheric pressure fields over the Black Sea. Numerical modeling was performed on two nested unstructured grids. The first grid included the entire Black Sea, the second grid included the bay and the adjacent sea area. To graphically display the simulation results, the Generic Mapping Tools (GMT) mapping package was used. Analysis of the simulation results for different wind directions showed that when the wind acts on the water area of the Donuzlav Bay, seiche-like oscillations occur in the fields of sea level and currents. The intensity of these fluctuations is determined by how quickly the wind speed reaches its maximum value. Owing to the narrowness of the strait outside the bay, fluctuations do not appear. Modeling of an extreme storm situation that occurred in the Black Sea on November 11, 2007 was carried out. During the storm, a rapid change in wind direction from southeast to west occurred with a simultaneous increase in wind speed to 15–21 m/s. This caused a rise in sea level at the top of the bay to 0.5 m and an increase in the current velocity in the strait to 0.6 m/s.

**KEYWORDS:** Black Sea, Donuzlav, surge fluctuations, modeling, ADCIRC, GMT.

**ВВЕДЕНИЕ**

В Черном море стонно-нагонные колебания имеют широкое распространение и разнообразный характер. Наиболее интенсивные стонно-нагонные поднятия и понижения уровня у побережья Черного моря возникают под воздействием атмосферных воздействий синоптического масштаба. Подробный обзор особенностей стонно-нагонных колебаний в Черном море, их параметры и библиографию по данному вопросу можно найти в [Фомичева и др., 1991; Иванов и др., 1999; Горячкин и др., 2006]. Также существует ряд работ по исследованию сейшевых колебаний в бухтах и заливах Черного моря [Горячкин и др., 2002; Медведев и др., 2015; Bazykina et al., 2016; Фомин и др., 2017; Manilyuk et al., 2020].

---

<sup>1</sup> Marine Hydrophysical Institute of RAS, Kapitanskaya Str., 2, 299011, Russian Federation, Sevastopol, e-mail: [polozok.umi@gmail.com](mailto:polozok.umi@gmail.com)

<sup>2</sup> Marine Hydrophysical Institute of RAS, Kapitanskaya Str., 2, 299011, Russian Federation, Sevastopol, e-mail: [v.fomin@mhi-ras.ru](mailto:v.fomin@mhi-ras.ru)

<sup>3</sup> N.N.Zubov's State Oceanographic Institute, Kropotkinsky per, 6, 110034, Russian Federation, Moscow, e-mail: [irina.fomina@ukr.net](mailto:irina.fomina@ukr.net)

Наименее изученным с точки зрения сгонно-нагонных колебаний является залив Донузлав. Залив расположен на западном побережье Крымского полуострова и представляет собой вытянутый и сужающийся в северо-восточном направлении бассейн, соединенный с морем узким каналом (рис. 1). Акватория залива является важным рекреационным объектом и естественной гаванью для малотоннажных судов различного назначения. В южной части проводится промышленная добыча песка. Значительная часть акватории занята мелководьем с глубинами 0,5–3 м. Вдоль оси залива имеется узкий канал с глубинами 10–20 м. В целом, средняя глубина залива составляет 4–5 м.



*Рис. 1. Расположение залива Донузлав. Треугольниками показаны точки, в которых анализировались результаты численного моделирования*  
*Fig. 1. Location of the Donuzlav Bay. The triangles show the points at which the results of numerical modeling were analyzed*

До настоящего времени известно несколько публикаций, дающих представление о динамике вод в заливе Донузлав [Андросович и др., 1996; Ломакин и др., 2021; Немировский и др., 2000; Фомин и др., 2006]. Тем не менее, предметных исследований, посвященных сгонно-нагонным колебаниям в указанном районе, до настоящего времени не проводилось.

Настоящая работа восполняет этот пробел и ставит своей целью на основе численного моделирования исследовать пространственно-временную структуру сгонно-нагонных колебаний в заливе для разных типов ветровых условий.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Расчеты течений и уровня моря в заливе Донузлав и прилегающей акватории проводились с использованием длинноволновой гидродинамической модели 2DDI ADCIRC [Luettich et al., 1992]. Исходные уравнения модели в декартовой системе координат имеют вид:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -g \frac{\partial}{\partial x} \left[ \eta + \frac{P_a}{g\rho_0} \right] + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_0 H} + \frac{M_x}{H}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -g \frac{\partial}{\partial y} \left[ \eta + \frac{P_a}{g\rho_0} \right] + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_0 H} + \frac{M_y}{H}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

здесь  $x, y, t$  – горизонтальные координаты и время;

$U, V$  – средние по глубине компоненты вектора скорости течений по осям  $x$  и  $y$  соответственно;

$\eta$  – отклонение свободной поверхности моря от невозмущенного состояния;

$f$  – параметр Кориолиса;  $g$  – ускорение силы тяжести;

$P_a$  – атмосферное давление;

$\rho_0 = 1024 \text{ кг/м}^3$  – средняя плотность морской воды;

$H = h + \eta$  – динамическая глубина;

$h$  – глубина моря;  $M_x = A_h \Delta q_x$ ,  $M_y = A_h \Delta q_y$  – компоненты горизонтальной

турбулентной вязкости;

$A_h = 10 \text{ м}^2/\text{с}$  – коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости;

$\Delta$  – оператор Лапласа по переменным  $x, y$ ;

$q_x = UH$ ,  $q_y = VH$  – компоненты вектора полных потоков.

Касательные напряжения трения в уравнениях (1), (2) задаются выражениями:

$$\tau_{sx} = \rho_a C_a W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}, \quad \tau_{sy} = \rho_a C_a W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}, \quad (4)$$

$$\tau_{bx} = \rho_0 C_d U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad \tau_{by} = \rho_0 C_d V \sqrt{U^2 + V^2}, \quad (5)$$

где  $\rho_a = 1 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха;

$W_x, W_y$  – компоненты вектора скорости приводного ветра;

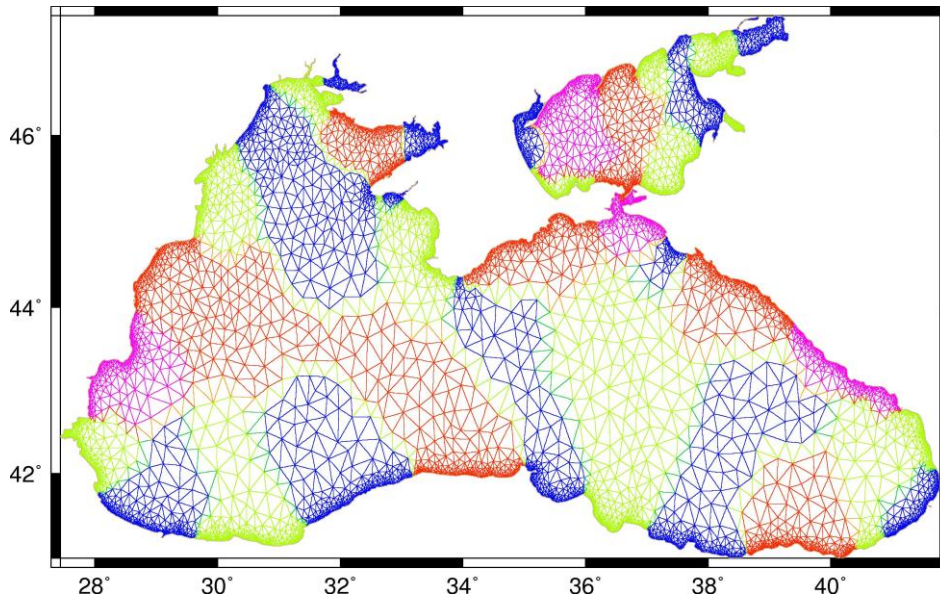
$C_a = 0,001(0,75 + 0,067\sqrt{W_x^2 + W_y^2})$  – коэффициент поверхностного трения;

$C_d = 0,0025$  – коэффициент донного трения.

В основе численного алгоритма модели лежит метод конечных элементов, использующий треугольные элементы и линейные базисные функции<sup>1</sup>. Аппроксимация по времени проводится методом конечных разностей. Моделирование выполнялось в режиме параллельных вычислений на основе технологии MPI.

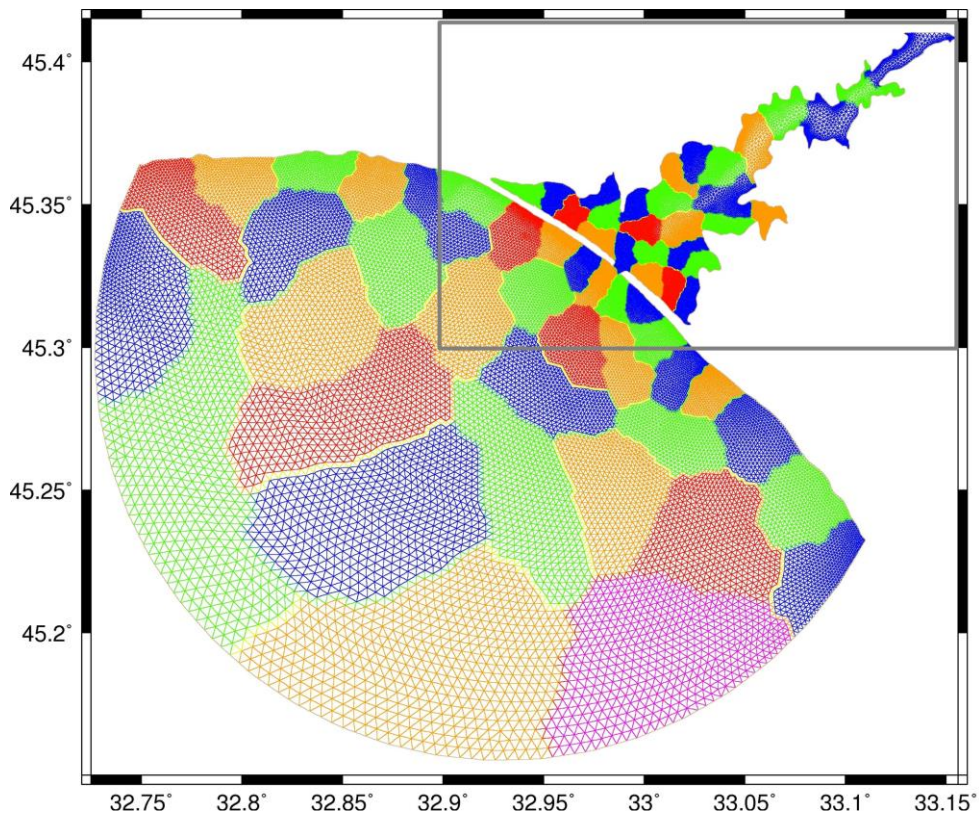
При заданных полях ветра и атмосферного давления численное моделирование выполнялось на двух вложенных неструктурированных сетках. Первая сетка покрывает весь Азово-Черноморский бассейн и содержит 20146 конечных элементов (рис. 2). Вторая сетка включает залив Донузлав, прилегающую к нему акваторию и состоит из 66046 конечных элементов (рис. 3). Разными цветами на рис. 2, 3 показано разбиение расчетных узлов между отдельными процессорами. Результаты расчетов на первой сетке использовались в качестве граничных условий на жидком контуре второй области.

<sup>1</sup> Luetlich R.A., Westerink J.J. Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC. 2004. [http://adcirc.org/adcirc\\_theory\\_2004\\_12\\_08.pdf](http://adcirc.org/adcirc_theory_2004_12_08.pdf)



*Рис. 2. Неструктурированная расчетная сетка для моделирования сгонно-нагонных колебаний в Азово-Черноморском бассейне*

*Fig. 2. Unstructured computational grid for simulating surges in the Azov-Black Sea basin*



*Рис. 3. Неструктурированная расчетная сетка для моделирования сгонно-нагонных колебаний в заливе Донузлав и прилегающей акватории Черного моря*

*Fig. 3. Unstructured computational grid for simulating surge fluctuations in the Donuzlav Bay and the adjacent Black Sea water area*

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Интенсивность и продолжительность сгонно-нагонных колебаний в заливе Донузлав определяются особенностями атмосферных процессов, протекающими над самим заливом и прилегающей акваторией Черного моря. При определенных синоптических ситуациях, характеризующихся сильными ветрами, на отдельных участках акватории залива могут возникать значительные подъемы или спады уровня.

Согласно данным глобального атмосферного ре-анализа ERA-Interim за период 1979–2017 гг. (apps.ecmwf.int<sup>1</sup>), статистические характеристики скорости приземного ветра  $W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$  для исследуемого района следующие: максимум – 25,8 м/с; среднее значение – 7,4 м/с; медиана – 7,0 м/с; среднеквадратическое отклонение – 3,5 м/с. В целом, наибольшую повторяемость (10%) имеет ветер северо-восточного направления. Со стороны моря наибольшей повторяемостью (6%) характеризуется юго-западный ветер.

*Постоянный ветер разных направлений.* В первом цикле численных экспериментов моделировалась ситуация, когда на поверхность моря воздействует однородный по пространству ветер заданного направления  $\theta$ . В начальный момент времени  $t = 0$  скорость течения, возвышения уровня моря имеют нулевые значения. При  $t > 0$  скорость ветра  $W$  линейно увеличивается и при  $t = t_m$  достигает своего максимального значения  $W_m = 15$  м/с, оставаясь далее неизменной. Атмосферное давление считается постоянным.

Представляет интерес выяснить, как при таком типе ветра происходит формирование сгонно-нагонных колебаний в заливе. Рассмотрим влияние параметра  $t_m$  на интенсивность сгонно-нагонных колебаний. На рис. 4 показаны результаты расчета уровня моря в вершине залива (точка 1) для двух направлений ветра (юго-западного и северо-восточного) и трех значений  $t_m$ . Общее время ветрового воздействия равнялось 48 ч.

Анализ этих зависимостей показывает, что под воздействием ветра в заливе формируется колебательный режим. Самые сильные колебания возникают на стадии увеличения скорости ветра. После того, как  $W$  достигает максимума и перестает меняться, колебания начинают затухать, и уровень постепенно приближается к некоторому постоянному значению, зависящему от направления ветра. С увеличением  $t_m$  интенсивность колебаний уменьшается. Таким образом, чем быстрее увеличивается скорость ветра, тем более интенсивные колебания уровня моря он вызывает.

На рис. 5 и 6 для юго-западного ветра при  $t_m = 1$  ч приведены зависимости от времени модуля средней по глубине скорости  $u = \sqrt{U^2 + V^2}$  и направления течения (здесь и далее направление течения и скорости ветра даны в декартовой системе координат). Черные кривые соответствуют точке, расположенной в проливе (точка 2), голубые кривые – точке, находящейся с внешней стороны северной косы (точка 3). Сопоставление эти вариантов показывает их существенное различие.

В проливе формируются реверсивные колебания скорости течения. Это проявляется в том, что направление течения периодически меняется с юго-западного (45°) на северо-восточное (225°). Эти колебания максимальны на стадии увеличения скорости ветра (максимум на этом интервале времени составляет 0,6 м/с). Со временем происходит их затухание, и средняя по глубине скорость течения приближается к нулю, т.е. расход воды в проливе также стремится к нулю (объемы втекающей и вытекающей в пролив воды становятся одинаковыми).

<sup>1</sup> ECMWF | ERA Interim, Daily. Электронный ресурс: <https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc> (дата обращения 05.03.2021).



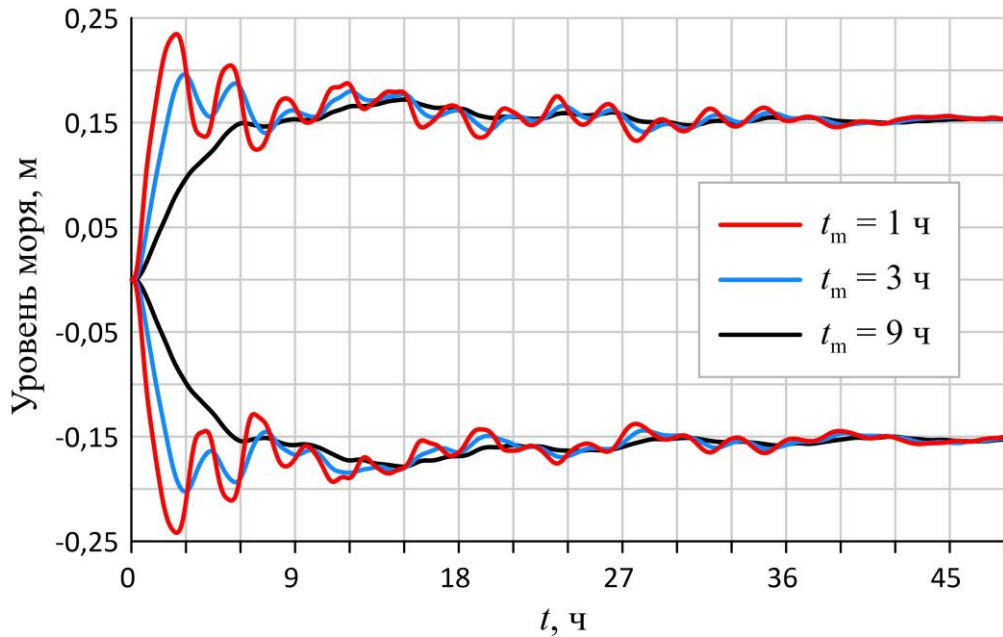


Рис. 4. Колебания уровня моря в вершине залива Донузлав (точка 1) для разных значений  $t_m$  при  $W_m = 15$  м/с. Положительные значения уровня моря соответствуют юго-западному направлению ветра, отрицательные – северо-восточному

Fig. 4. Sea level fluctuations at the top of Donuzlav Bay (point 1) for different values of  $t_m$  at  $W_m = 15$  m/s. Positive sea level values correspond to the southwest wind direction, negative – to the northeast

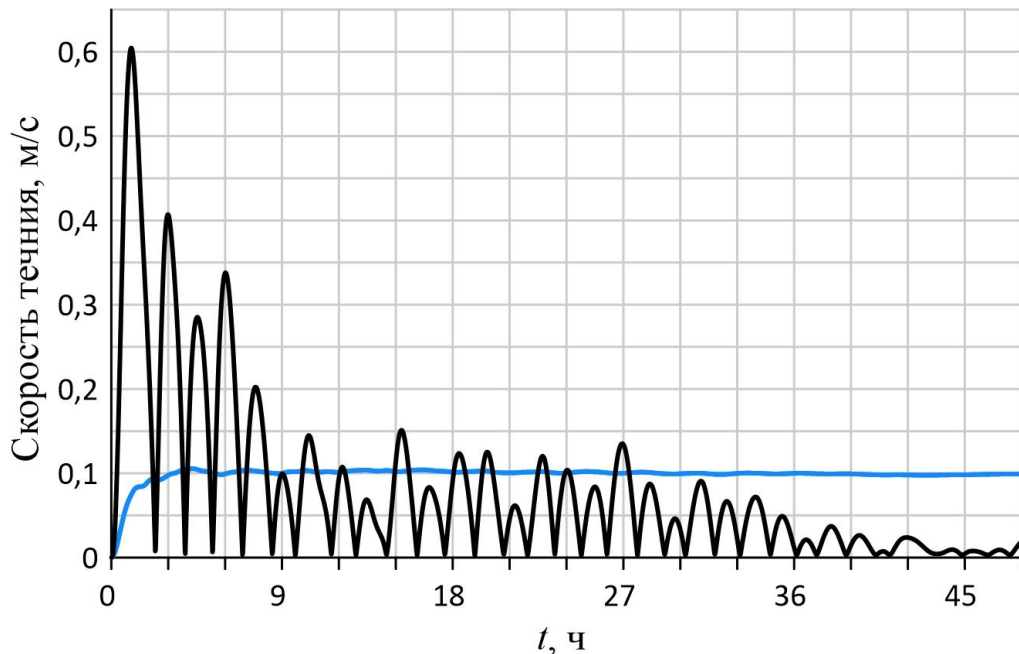


Рис. 5. Модуль скорости течений в проливе между заливом Донузлав с морем (черная кривая), и с внешней стороны северной косы (голубая кривая) для юго-западного ветра при  $t_m = 1$  ч и  $W_m = 15$  м/с

Fig. 5. Modulus of current velocity in the strait between the Donuzlav Bay and the sea (black curve), and on the outer side of the northern spit (blue curve) for the southwestern wind at  $t_m = 1$  h and  $W_m = 15$  m/s

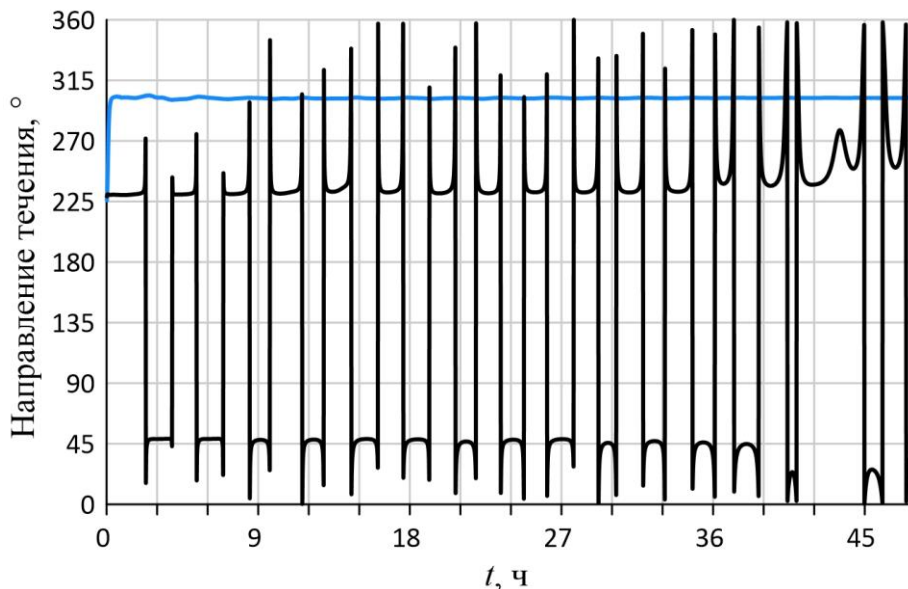


Рис. 6. Направление скорости течений в проливе между заливом Донузлав с морем (черная кривая), и с внешней стороны северной косы (голубая кривая) для юго-западного ветра при  $t_m = 1$  ч и  $W_m = 15$  м/с

Fig. 6. The direction of the speed of currents in the strait between the Donuzlav Bay and the sea (black curve), and on the outer side of the northern spit (blue curve) for the southwestern wind at  $t_m = 1$  h and  $W_m = 15$  m/s

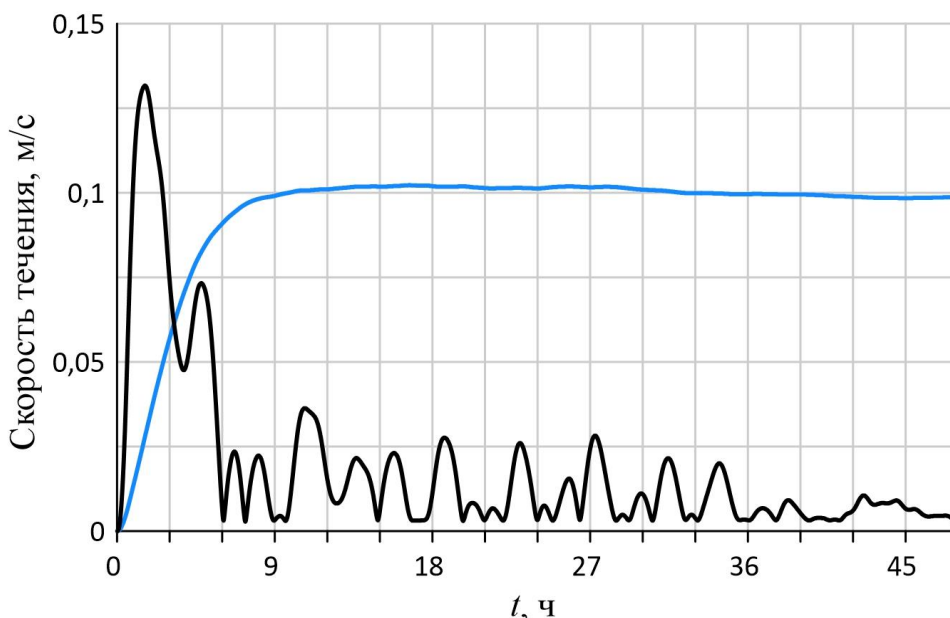


Рис. 7. Модуль скорости течений в проливе между заливом Донузлав с морем (черная кривая), и с внешней стороны северной косы (голубая кривая) для юго-западного ветра при  $t_m = 9$  ч и  $W_m = 15$  м/с

Fig. 7. Modulus of current velocity in the strait between the Donuzlav Bay and the sea (black curve), and on the outer side of the northern spit (blue curve) for the southwestern wind at  $t_m = 9$  h and  $W_m = 15$  m/s

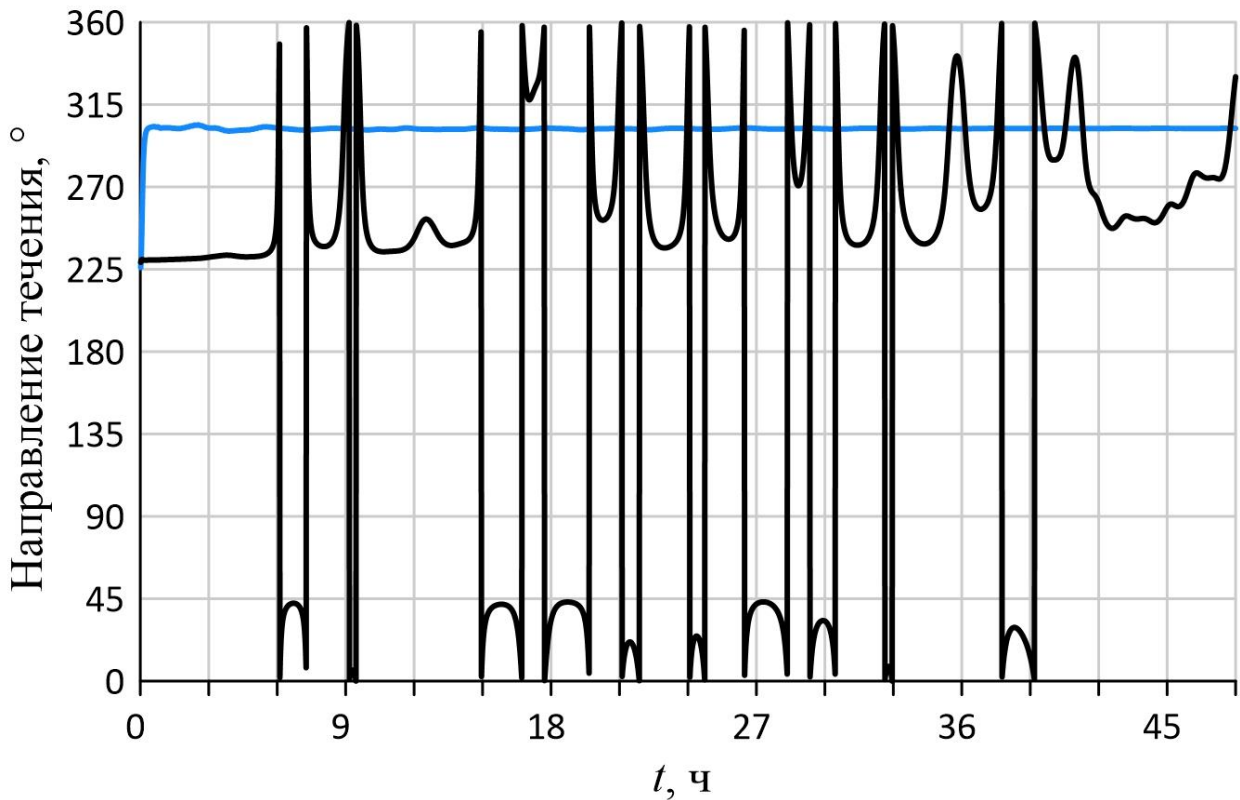


Рис. 8. Направление скорости течений в проливе между заливом Донузлав с морем (черная кривая), и с внешней стороны северной косы (голубая кривая) для юго-западного ветра при  $t_m = 9$  ч и  $W_m = 15$  м/с

Fig. 8. The direction of the current velocity in the strait between the Donuzlav Bay and the sea (black curve), and on the outer side of the northern spit (blue curve) for the southwestern wind at  $t_m = 9$  h and  $W_m = 15$  m/s

В свою очередь, за пределами залива колебания скорости течений не проявляются, а сами течения здесь оказываются более слабыми и однонаправленными. После выхода скорости ветра на стационарный режим скорость течения практически не меняется ( $\sim 0,1$  м/с).

На рис. 7, 8 для юго-западного ветра при  $t_m = 9$  ч приведены зависимости от времени модуля средней по глубине скорости и направления течения. Цвета кривых имеют тот же смысл, что и на рис. 4, 5. Качественно, приведенный здесь результат такой же, как и при  $t_m = 1$  ч (рис. 6). Только величина осцилляции скорости течения в проливе существенно меньше.

Проведенные расчеты позволяют отметить следующее. При воздействии ветра на акваторию залива Донузлав в полях уровня моря и течений возникают короткопериодные колебания. Их интенсивность определяется тем, насколько быстро скорость ветра достигает своего максимального значения: чем быстрее достигается максимум, тем больше интенсивность. Из-за узости пролива за пределами залива Донузлав эти колебания не прослеживаются. Указанные колебания имеют сейшевую природу, поскольку они проявляются в заливе и после прекращения действия ветра. Визуально периоды этих колебаний составляют 2–3 ч. В первом приближении периоды сейш для закрытого бассейна можно оценить по формуле Мериана [Rabinovich, 2009]:

$$T_n = \frac{2L}{n\sqrt{gH}},$$

где  $n$  – номер моды,  
 $L$  – длина бассейна,  
 $g$  – ускорение свободного падения,  
 $H$  – средняя глубина бассейна.

При  $L = 26,5$  км и  $H = 4$  м период первой моды сейшевых колебаний  $T_1$  составляет  $\sim 2,4$  ч.

Таким образом, можно предположить, что под воздействием ветра в заливе возбуждается низшая мода сейшевых колебаний. Данное утверждение требует более детального рассмотрения с привлечением данных натуральных наблюдений и не входило в задачи данного исследования.

#### *Реальная синоптическая ситуация*

Далее проводилось численное моделирование сгонно-нагонных колебаний в заливе Донузлав для реальной синоптической ситуации. Входными данными для модели ADCIRC служили поля скорости ветра и атмосферного давления над Азово-Черноморским бассейном за период 5–15 ноября 2007 г. из метеорологической модели SKIRON<sup>1</sup> с дискретностью по времени 2 ч и пространственным разрешением 0,1°. В этот период в Черном море возник экстремальный шторм, вызванный прохождением с юго-запада на северо-восток глубокого атмосферного циклона

На рис. 9 приведены зависимости от времени скорости ветра, направления ветра и уровня моря в районе залива Донузлав. Черная кривая на нижнем рисунке соответствует вершине залива (точка 1), голубая кривая – внешняя сторона северной косы (точка 3). Как видно, штормовая ситуация в районе залива Донузлав получила свое максимальное развитие 11 ноября. В это время произошла быстрая смена направления ветра с юго-восточного (135°) на западное (0°). При этом скорость ветра усилилась с 9–11 м/с до 15–21 м/с. Это спровоцировало резкий подъем (до 0,5 м) уровня моря в вершине залива и стало причиной сильного опускания уровня в юго-западной части. За пределами залива подъем уровня достигал 0,35 м. Анализ расчетов показал, что в период шторма наибольшее усиление скорости течений (до 0,6 м/с) происходит в проливе, что обусловлено усилением водообмена между заливом и морем.

#### *Визуализация модельных полей*

В настоящей работе для графического отображения результатов численного моделирования гидродинамических полей применялась адаптированная авторами фортран-программа FigureGen [Dietrich et al., 2013], использующая утилиты картографического пакета Generic Mapping Tools (GMT). В качестве примера, на рис. 10, 11 показаны пространственные распределения уровня моря в заливе Донузлав для двух моментов времени: 02:00 ч и 08:00 ч 11 ноября 2007 г. Полная анимация синоптической ситуации 5–15 ноября 2007 г. представлена на сайте МГИ РАН<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> SKIRON – Regional, Forecast Europe - Mediterranean Sea. Электронный ресурс: [forecast.uoa.gr/en/forecast-maps/skiron](http://forecast.uoa.gr/en/forecast-maps/skiron)

<sup>2</sup> Вычислительный кластер МГИ РАН. [fomin.hpc-mhi.org/donuzlav/storm1](http://fomin.hpc-mhi.org/donuzlav/storm1)

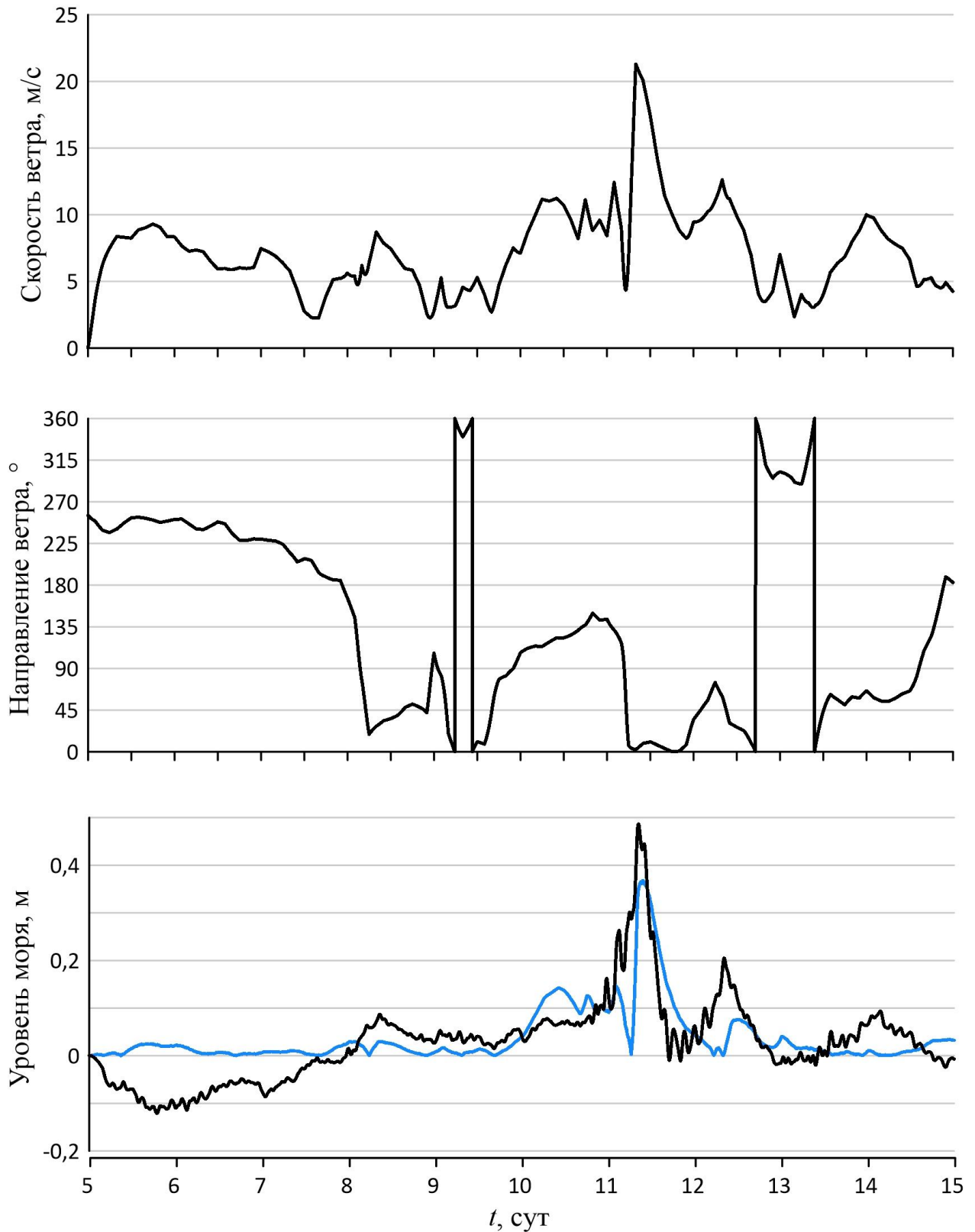


Рис. 9. Скорость ветра, направление ветра и колебания уровня моря в период 5–15 ноября 2007 г.

Fig. 9. Wind speed, wind direction and sea level fluctuations during November 5–15, 2007

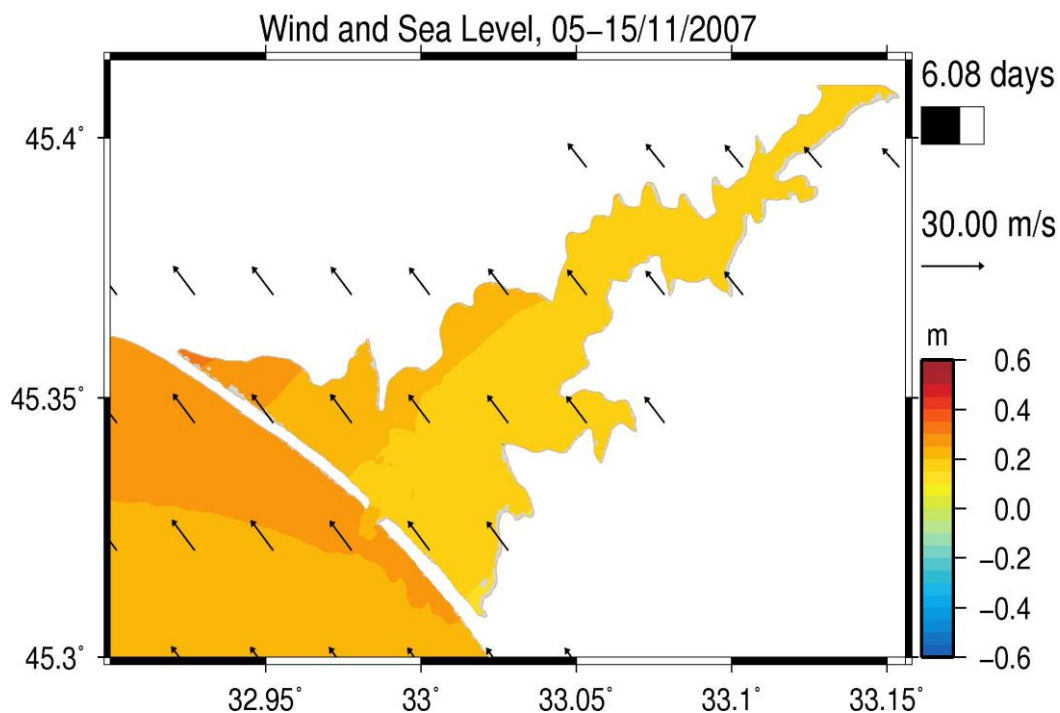


Рис. 10. Ветер и поле уровня моря в заливе Донузлав, соответствующее 02:00 11 ноября 2007 г.

Fig. 10. Wind and sea level field in Donuzlav Bay corresponding to 02:00 on November 11, 2007

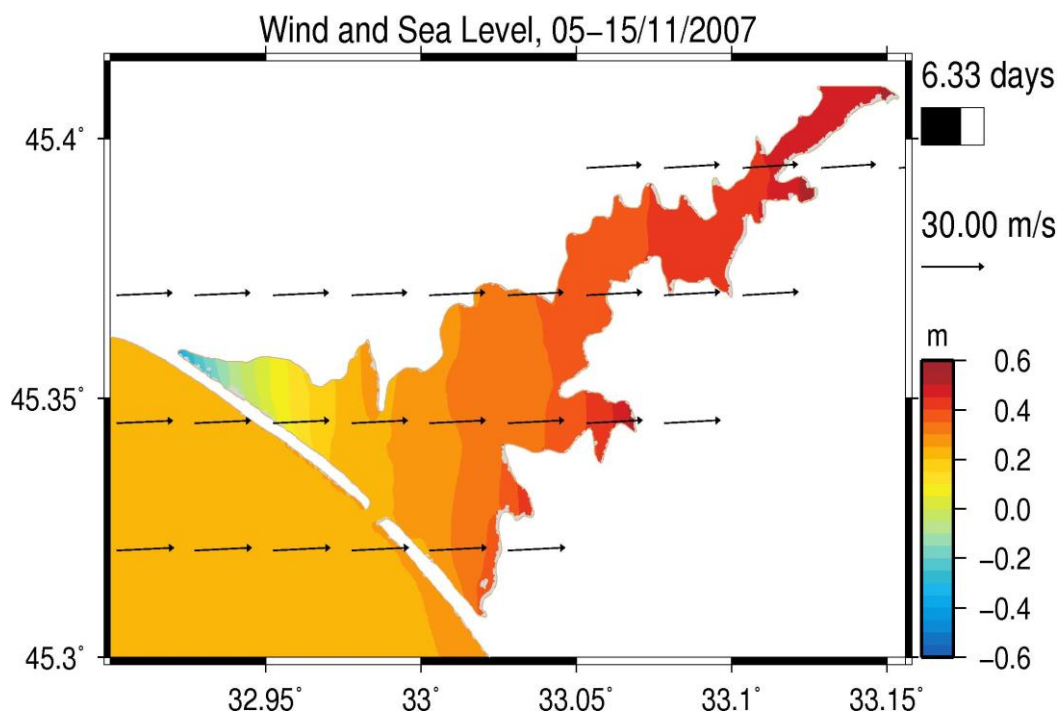


Рис. 11. Ветер и поле уровня моря в заливе Донузлав, соответствующее 08:00 11 ноября 2007 г.

Fig. 11. Wind and sea level field in Donuzlav Bay corresponding to 08:00 on November 11, 2007

## ВЫВОДЫ

Выполнено численное моделирование сгонно-нагонных колебаний в заливе Донузлав. Анализ результатов моделирования позволил выявить следующие особенности динамики вод в заливе.

Показано, что под воздействием однородного по пространству ветра на акваторию залива Донузлав в полях уровня моря и течений возникают короткопериодные колебания. Интенсивность этих колебаний определяется тем, насколько быстро скорость ветра достигает своего максимального значения: чем быстрее достигается максимум, тем интенсивнее колебания. Указанные колебания имеют природу сейш. Из-за узости пролива за пределами залива они не проявляются.

Выполнено моделирование экстремальной штормовой ситуации, возникшей в Черном море 11 ноября 2007 г. В период шторма произошла быстрая смена направления ветра с юго-восточного на западное с одновременным усилением скорости ветра до 15–21 м/с. Это спровоцировало резкий подъем уровня моря в вершине залива до 0,5 м. За пределами залива подъем уровня достигал 0,35 м. В период шторма наибольшее усиление скорости течений (до 0,6 м/с) происходит в проливе, что обусловлено усилением водообмена между заливом и морем.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Численное моделирование сгонно-нагонных колебаний в заливе Донузлав проводилось в рамках темы Морского гидрофизического института РАН № 0555-2021-0005 «Прибрежные исследования».

## ACKNOWLEDGEMENTS

Numerical modeling of surge oscillations in the Donuzlav bay was carried out within the framework of the Marine Hydrophysical Institute of the RAS No. 0555-2021-0005 «Coastal Research».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андросович А.И., Иванов В.А., Михайлова Э.Н., Шатино Н.Б. Моделирование ветровых течений в озере Донузлав. Морской гидрофизический журнал, 1996. № 2. С. 15–26.
2. Горячкин Ю.Н., Иванов В.А. Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006. 210 с.
3. Горячкин Ю.Н., Иванов В.А., Репетин Л.Н., Хмара Т.Н. Сейши в Севастопольской бухте. Труды УкрНИГМИ, 2002. Вып. 250. С. 342–353.
4. Иванов В.А., Коновалов А.В., Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В. Математическое моделирование сгонно-нагонных колебаний в Черном море. Метеорология и гидрология, 1999. № 11. С. 56–63.
5. Ломакин П.Д., Рябушко В.И., Чепыженко А.И., Щуров С.В. Контроль системы течений и полей концентрации общего взвешенного и растворенного органического веществ в озере Донузлав в мае 2019 года. Системы контроля окружающей среды, 2021. № 1 (43). С. 87–94. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-1-87-94.
6. Медведев И.П., Архипкин В.С. Колебания уровня моря в Голубой бухте (Геленджик). Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2015. No 3. P. 70–78.

7. *Немировский М.С., Ковригина Н.П.* Динамика вод озера Донузлав. Экология моря, 2000. Вып. 51. С. 10–13.
8. *Фомин В.В., Иванов В.А.* Объединенная численная модель течений, волнения и транспорта наносов озера Донузлав. Морской гидрофизический журнал, 2006. № 2. С. 1–23.
9. *Фомин В.В., Лазоренко Д.И., Иванча Е.В.* Моделирование сейш в Балаклавской бухте. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. Сборник научных трудов, 2017. № 3. С. 32–39.
10. *Фомичева Л.А., Рабинович А.Б., Демидов А.Н.* Уровень моря. Проект «Моря СССР». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. 1. СПб.: Гидрометеоиздат, 1991. С. 329–354.
11. *Bazykina A.Yu., Dotsenko S.F.* Propagation of Tsunami-like Surface Long Waves in the Bays of a Variable Depth. *Physical Oceanography*, 2016. No 4, pp. 3–11.
12. *Dietrich J.C. et al.* Real-Time Forecasting and Visualization of Hurricane Waves and Storm Surge Using SWAN+ADCIRC and FigureGen. In: Dawson C., Gerritsen M. (eds) *Computational Challenges in the Geosciences. The IMA Volumes in Mathematics and its Applications*. Springer, New York, NY. 2013. V. 156. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7434-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7434-0_3).
13. *Luettich Jr. R.A., Westerink J.J., Scheffner N.W.* ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts, and estuaries, report 1: theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. Dredging research program technical report DRP-92-6. Vicksburg: U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, 1992. 137 p.
14. *Manilyuk Y.V., Lazorenko D.I., Fomin V.V.* Investigation of Seiche Oscillations in the Adjacent Bays by the Example of the Sevastopol and the Quarantine Bays. *Physical Oceanography*, 2020. No 27(3). P. 242–256.
15. *Rabinovich A.B.* Seiches and harbor oscillations. In: *Handbook of Coastal and Ocean Engineering* / Ed. Y.C. Kim. Chapter 9. Singapore: World Scientific Publ., 2009. P. 193–236.

#### REFERENCES

1. *Androsovich A.I., Ivanov V.A., Mihajlova E.N., Shapiro N.B.* Modeling wind currents in Donuzlav lake. *Physical Oceanography*, 1996. No 2. P. 15–26.
2. *Bazykina A.Yu., Dotsenko S.F.* Propagation of Tsunami-like Surface Long Waves in the Bays of a Variable Depth. *Physical Oceanography*, 2016. No 4. P. 3–11.
3. *Dietrich J.C. et al.* Real-Time Forecasting and Visualization of Hurricane Waves and Storm Surge Using SWAN+ADCIRC and FigureGen. In: Dawson C., Gerritsen M. (eds) *Computational Challenges in the Geosciences. The IMA Volumes in Mathematics and its Applications*. Springer, New York, NY. 2013. V. 156. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7434-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7434-0_3).
4. *Fomicheva L.A., Rabinovich A.B., Demidov A.N.* Sea level. Project «Sea of the USSR». *Hydro-meteorology and Hydrochemistry of the USSR Seas*. V. 4. Black Sea. Issue (1). St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1991. P. 329–354.
5. *Fomin V.V., Ivanov V.A.* Combined numerical model of currents, waves and sediment transport of Lake Donuzlav. *Physical Oceanography*, 2006. No 2. P. 1–23.
6. *Fomin V.V., Lazorenko D.I., Ivancha E.V.* Numerical simulation of seiches in the Balaklava Bay. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, 2017. No 3. P. 32–39.



7. *Goryachkin Y.N., Ivanov V.A.* Black Sea level: past, present and future. Sevastopol: MHI of the NAS of Ukraine, 2006. 210 p.
  8. *Goryachkin Y.N., Ivanov V.A., Repetin L.N., Hmara T.N.* Seiches in the Sevastopol Bay. Proceedings of the Ukrainian Scientific Research Hydrometeorological Institute, 2002. No 250. P. 342–353.
  9. *Ivanov V.A., Konovalov A.V., Manilyuk Y.V., Cherkesov L.V.* Mathematical modeling of surge oscillations in the Black Sea. Meteorology and Hydrology, 1999. No 11. P. 56–63.
  10. *Luettich Jr. R.A., Westerink J.J., Scheffner N.W.* ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts, and estuaries, report 1: theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. Dredging research program technical report DRP-92-6. Vicksburg: U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, 1992. 137 p.
  11. *Lomakin P.D., Ryabushko V.I., Chepyzhenko A.I., Shchurov S.V.* Control of the system of currents and fields of concentration of total suspended and dissolved organic matter in Lake Donuzlav in May 2019. Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy, 2021. No 1 (43). P. 87–94. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-1-87-94.
  12. *Manilyuk Y.V., Lazorenko D.I., Fomin V.V.* Investigation of Seiche Oscillations in the Adjacent Bays by the Example of the Sevastopol and the Quarantine Bays. Physical Oceanography, 2020. No 27(3). P. 242–256.
  13. *Medvedev I.P., Arhipkin V.S.* Sea level fluctuations in the Blue Bay (Gelendzhik). Moscow University Bulletin, 2015. Series 5. Geography. No 3. P. 70–78.
  14. *Nemirovskij M.S., Kovrigina N.P.* The dynamics of the waters of Lake Donuzlav. Ekologiya morya, 2000. No 51. P. 10–13.
  15. *Rabinovich A.B.* Seiches and harbor oscillations. In: Handbook of Coastal and Ocean Engineering / Ed. Y.C. Kim. Chapter 9. Singapore: World Scientific Publ., 2009. P. 193–236.
-

УДК: 551.467.3(262.54)

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-74-84

А.А. Магаева<sup>1</sup>, Н.А. Яицкая<sup>2</sup>

## ДИНАМИКА ПРИПАЯ АЗОВСКОГО МОРЯ В XXI ВЕКЕ

### АННОТАЦИЯ

Статья посвящена исследованию динамики припая Азовского моря за период 2000–2020 гг. В качестве исходных данных использованы схемы ледовой обстановки в Азовском море по данным спутниковых снимков, полученные из Международного центра данных – Морской Лед (МЦД-МЛ), а также данные прибрежных ГМС о сроках образования, разрушения и продолжительности стояния припая. Обработка и анализ данных осуществлялась с помощью программного пакета ArcGIS 10.4.

В результате получены данные пространственно-временных характеристик припая за период 2000–2020 гг. – площадь и ширина, а также продолжительность стояния припая в районе прибрежных ГМС. Построены карты частоты формирования припая для каждого месяца зимнего периода: декабрь – март.

Показано, что продолжительность стояния припая на всех прибрежных ГМС сократилась: для пунктов северного побережья Таганрог и Мариуполь – на 3–5 дней, для пунктов южного побережья Таганрогского залива Ейск и Должанская – на 10–12 дней, для ГМС Геническ – 7 дней. Среднемноголетняя площадь припая за 2000–2020 гг. составляет 1800 км<sup>2</sup>.

Но фоне роста зимних температур воздуха площадь припая сокращается, а в последние зимние периоды припай не наблюдается вовсе. Ширина припая в пределах северного побережья Азовского моря и Таганрогского залива составляет 5–10 км. В западной и юго-восточной частях моря (створы Темрюк (№8), Арабатская (№6) и Обиточный (№4)) припай наблюдался в 25% случаев, его ширина составляет 2–5 км в среднем за зиму.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Азовское море, припай, ширина припая, ледяной покров, ледовый режим.

---

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41; Южный федеральный университет, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42, *e-mail: a.magaeva@mail.ru*

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр Субтропический научный центр Российской академии наук, г. Сочи, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, 354002, Сочи, Россия; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук», ул. Чехова, д. 41, 344006, Ростов-на-Дону, Россия, *e-mail: yautskayan@gmail.com*

Anastasiia A. Magaeva<sup>1</sup>, Natalia A. Yaitskaya<sup>2</sup>

## FAST ICE DYNAMICS OF THE SEA OF AZOV IN THE XXI CENTURE

### ABSTARCT

The article is dedicated to the investigation of the fast ice dynamics for the period 2000–2020 according to satellite data and field observations using GIS technologies. We used data from International Data Center – Sea Ice and coastal observation points to analyze long-term changes. Data processing and analysis was carried out using the ArcGIS 10 \* software package.

As a result, data were obtained on the spatial and temporal variability of fast ice in the Sea of Azov for the 2000–2020. The area and width of fast ice, the periods of formation, destruction and duration were analyzed. The maps of the fast ice formation frequency were constructed for each month of the winter period: December – March. It is shown that the duration of fast ice on all coastal observation points decreased: for points on the northern coast Taganrog and Mariupol – by 3–5 days, for points on the southern coast of Taganrog Bay – Yeisk and Dolzhanskaya – by 10–12 days, for point Genichesk – 7 days. Average long-term fast ice area for 2000–2020 is 1800 km<sup>2</sup>. But against the background of an increase in winter air temperatures, the fast ice area is decreasing, and in the last winter periods it is not observed. The width of the fast ice at the northern coast of the Sea of Azov and the Taganrog Bay is 5–10 km. In the western and southeastern parts of the sea (sections Temryuk, Arabatskaya and Obitochny), the fast ice width is 2–5 km on average over the winter and was observed in 25% of cases.

**KEYWORDS:** the Sea of Azov, fast ice, fast ice width, ice cover, ice regime.

### ВВЕДЕНИЕ

Азовское море – южный мелководный водоем, в среднем с декабря по март, покрытый льдом. Площадь, даты образования и разрушения ледяного покрова сильно варьируются: в теплые по температурному режиму зимы (сумма градусодней мороза менее 400 °С) лёд образуется только в Таганрогском заливе и других мелководных прибрежных областях, в суровые зимы (сумма градусодней мороза более 850 °С) льдом покрывается вся акватория Азовского моря, а в некоторых случаях и северная часть Чёрного моря, замерзает и Одесский порт (например, зима 1953/1954 гг.). В самую суровую за весь период инструментальных наблюдений зиму 1953/1954 гг. (сумма градусодней мороза на ГМС Таганрог составила 1653°С) всю акваторию Азовского моря покрывал припай, его продолжительность на прибрежных гидрометеостанциях (ГМС) достигала 65 дней на ГМС Опасное и 143 дня на ГМС Таганрог, толщина – 75 см на ГМС Таганрог [Крындин, 1964].

Ледовые условия Азовского моря достаточно хорошо изучены на сегодняшний день. Анализ климата, температурного и ледового режимов Азовского моря описан в работах [Матишов и др., 2008; Матишов и др., 2014], в которых исследован 120-летний ряд термohалинных данных моря и показано, что для региона характерно чередование холодных циклов с замерзанием и высокой степенью ледовитости всей акватории и тёплых безлёдных фаз в течение всей зимы [Матишов и др., 2008]. В работах [Думанская,

<sup>1</sup> Southern Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Chehova, 41, 344006, Rostov-on-Don, Russia; South Federal University, 105/42, Bolshaya Sadovaya Str., Rostov-on-Don, 344006, Russia, e-mail: a.magaeva@mail.ru

<sup>2</sup> Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, 2/28, Yana Fabritsiusa Str., Sochi, 354002, Russia; Southern Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Chehova, 41, 344006, Rostov-on-Don, Russia, e-mail: yautskayan@gmail.com

2013; Букатов, Павленко, 2012; Федоренко, 2011] изложены результаты исследований связи атмосферных процессов и ледовых условий на Азовском море. Доказано, что Скандинавское колебание влияет на изменчивость ледовитости и толщину льда как внутри сезона, так и по годам [Федоренко, 2011]. Опыт применения математического моделирования и данных дистанционного зондирования Земли для мониторинга и исследования ледяного покрова Азовского моря представлен в публикациях [Боровская, 2006; Дашкевич и др., 2016; Mizyuk, Puzina, 2019]. Ряд статей и монографий [Матишов и др., 2014; Думанская, 2014; Букатов и др., 2001] посвящен анализу основных параметров ледового режима: ледовитости; положению кромки и толщины льда в течение сезона при среднеклиматических условиях, а также в зависимости от суровости зимы.

Увеличение повторяемости мягких по температурному режиму зим в последние десятилетия [Яцкая, Магаева, 2018] привело к сокращению площади льда и продолжительности ледового сезона. Происходящие изменения, с одной стороны, оказывают положительное влияние на судоходство, так как ледяной покров не препятствует движению морских судов, с другой стороны, ледяной покров защищает береговую зону от динамического воздействия, замедляя абразионные процессы, а там, где образуется припай прекращается перемещение наносов на подводном склоне [Зенкович, 1962]. Так в Арктике, прибрежно-шельфовая зона которой большую часть времени покрыта припайными и дрейфующими льдами, величина суммарного расхода волновой и приливной энергии сокращается в 5–10 раз [Сафьянов, 1978; Огородов, 2011]. Следовательно, сокращение продолжительности ледового сезона приводит к увеличению нагрузки на берега и интенсификации абразионных процессов.

Цель настоящей работы – исследование динамики припая Азовского моря за период 2000–2020 гг. по данным спутниковых данных и натурных наблюдений с помощью ГИС-технологий.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа динамики припая использованы схемы ледовой обстановки в Азовском море по данным спутниковых снимков, полученные из Международного Центра Данных – Морской Лед (МЦД-МЛ)<sup>1</sup>. Схемы представлены шейп-файлами содержащими полигоны воды и ледяного покрова с разными характеристиками – атрибутивная информация содержит конкретные значения сплоченности льда, возрастных характеристик (толщина) льда, формы плавучего льда и т.д. Файлы с полигонами и структура атрибутов соответствует формату SIGRID (архивный формат для геопривязанной векторной информации о морском льде). За период 2000–2020 гг. получено 359 шейп-файлов (схемы ледовой обстановки публикуются раз в 7–10 дней в течение ледового сезона). Обработка и анализ векторных данных осуществлялась с помощью программного пакета ArcGIS 10.4. Для корректного расчета значений площади исходные геометрии (полигоны) были перепроецированы в равноплощадную (равновеликую) проекцию Ламберта (Cylindrical Equal Area) и рассчитаны суточные, среднемесячные, максимальные и средние значения площади припая за сезон. Частота формирования припая рассчитывалась по сетке с размером ячейки 10 × 10 км по формуле (1):

$$P_k = \frac{N_k}{n_k} * 100\% \quad (1)$$

где  $N_k$  – число встреч припая,  $n_k$  – количество наблюдений в  $k$ -й ячейке.

<sup>1</sup> <http://wdc.aari.ru/datasets/>

На основе полученных данных построены карты частоты формирования припая для каждого месяца зимнего периода: декабрь – март.

Для анализа ширины припая были заложены 11 створов, перпендикулярных береговой линии Азовского моря (рис 1). Начало всех створов, за исключением Арабатского и Обиточного (створы 4 и 6), соответствуют прибрежным пунктам наблюдений. Длина створов обусловлена физико-географическими особенностями моря, в частности – замкнутостью и наличием узких заливов и лиманов (Таганрогский и Утлюкский соответственно), а также максимальным развитием припая за рассматриваемый период 2000–2020 гг.

Данные натурных наблюдений о сроках образования, разрушения и продолжительности стояния припая на прибрежных ГМС за период 1965–2014 гг. получены из [Атлас льдов..., 2015]. Результаты исследования интегрированы в геоинформационную систему (ГИС) «Ледовый режим южных морей России» [Яицкая, Магаева, 2018].



Рис. 1. Максимальная площадь припая Азовского моря за 2000–2020 гг. и створы, заложенные для оценки ширины припая

Fig. 1. Maximum fast ice area of the Sea of Azov for 2000–2020 and section for estimating the width of fast ice

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характерная особенность ледовых условий Азовского моря – неоднократные замерзания и вскрытия акватории вследствие колебаний температур воздуха. Припай – наиболее устойчивая характеристика ледового режима Азовского моря, так как образование устойчивого неподвижного ледяного покрова происходит спустя 5–7 дней после первого появления льда. К концу декабря почти на всём Таганрогском заливе и мелководных лиманах отмечается припай, достигая наибольшего развития в конце января – начале февраля [Гидрометеорологический..., 1962] (рис. 2).

По данным прибрежных натуральных наблюдений, в Таганрогском заливе припай наблюдается в среднем 2–2,5 месяца с конца декабря по начало марта. При этом в южной и центральной частях моря припай наблюдается только в суровые зимы, а в некоторые зимы не наблюдается вовсе. Анализ 30-летних климатических периодов (рекомендуемый Всемирной метеорологической организацией (ВМО) период для оценки климатических изменений) показал незначительные изменения для пунктов северного побережья Таганрог и Мариуполь – продолжительность стояния припая сократилась на 3–5 дней. Для пунктов южного побережья Таганрогского залива Ейск и Должанская продолжительность стояния припая сократилась на 10–12 дней, для ГМС Геническ – 7 дней (табл. 1).

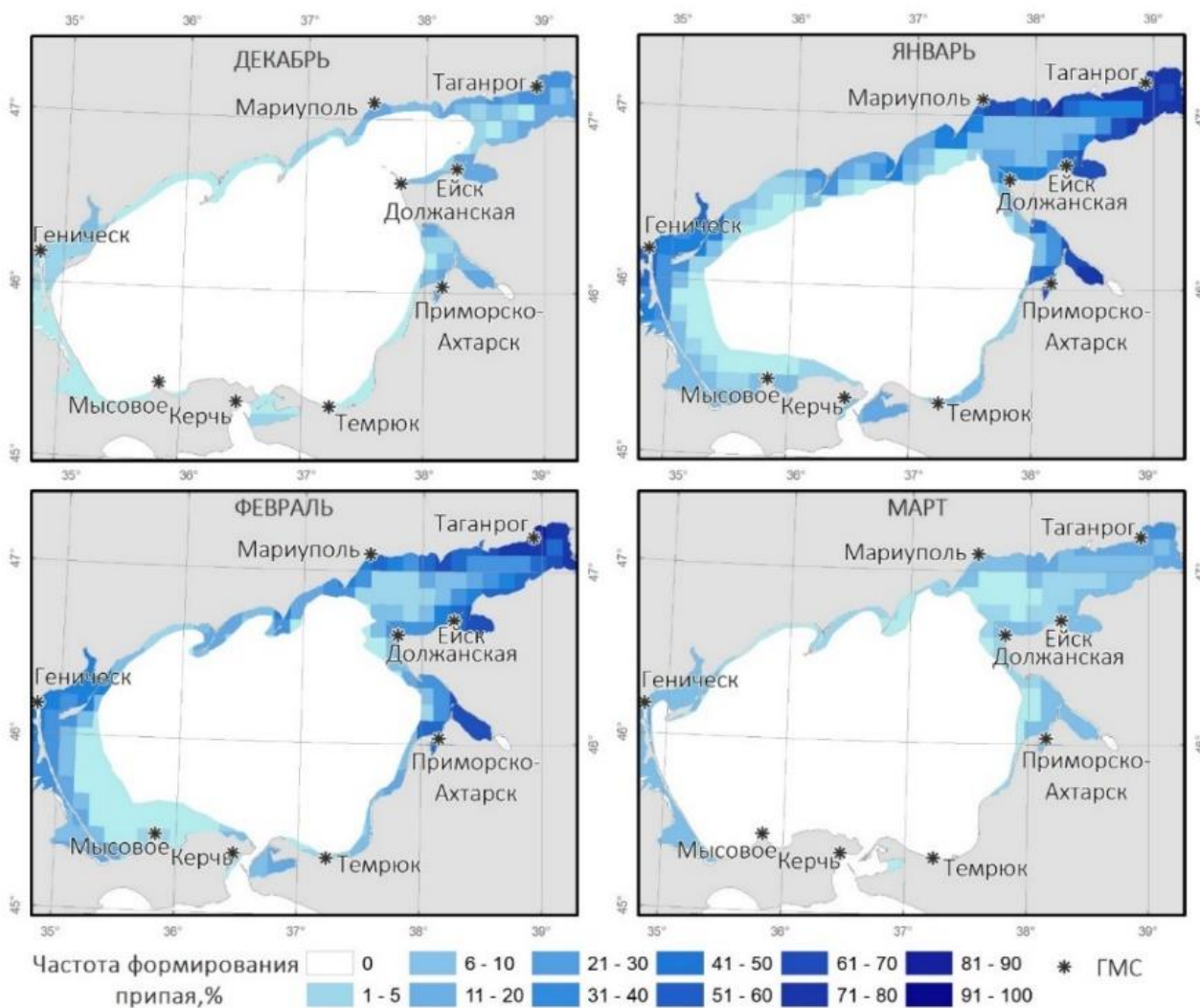


Рис. 2. Частота (%) формирования припая в Азовском море

Fig. 2. Frequency (%) of fast ice formation in the Sea of Azov

Табл. 1. Среднемноголетние сроки образования и разрушения припая по данным прибрежных ГМС

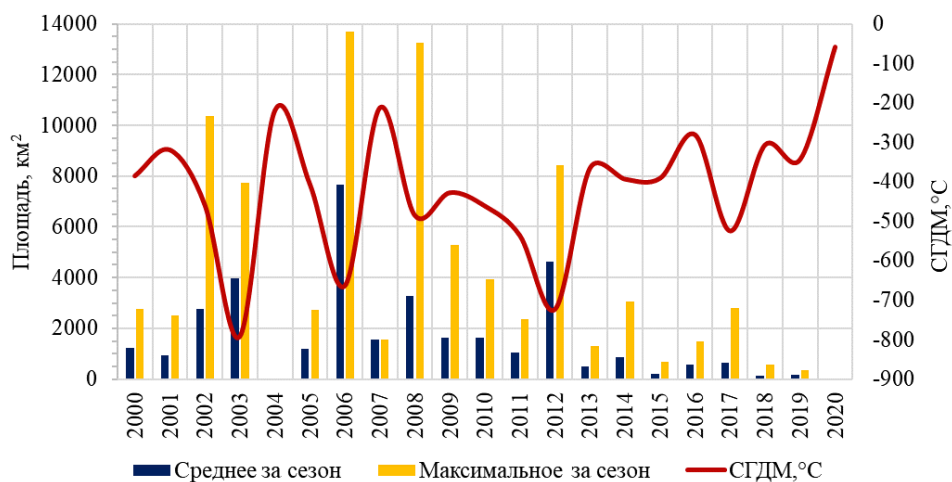
Table 1. Average long-term periods of fast ice formation and destruction according to coastal GMS data

Пункт/Период	Параметр	1965-2014	1971-2000	1981-2010
Таганрог	1	25 дек	24 дек	25 дек
	2	70	69	64
	3	2 мар	3 мар	25 фев
Мариуполь	1	22 дек	21 дек	13 фев
	2	51	55	49
	3	10 фев	05 мар	1 мар
Ейск	1	25 дек	19 дек	24 дек
	2	63	75	63
	3	27 фев	3 мар	23 фев
Должанская	1	1 янв	1 янв	3 янв
	2	39	46	41
	3	12 фев	18 фев	14 фев
Приморско-Ахтарск	1	30 дек	30 дек	28 дек
	2	57	58	52
	3	26 фев	1 мар	25 фев
Геническ	1	6 янв	4 янв	6 янв
	2	68	73	66
	3	8 мар	8 мар	6 мар

1 – дата образования припая; 2 – продолжительность стояния припая, дни; 3 – дата разрушения припая

Среднемноголетняя площадь припая за 2000–2020 гг. составляет 1800 км<sup>2</sup> (площадь Азовского моря – 39300 км<sup>2</sup>; рис. 3). Максимальная площадь припая за исследуемый период отмечена в зимний период 2005/2006 гг. и составила 7600 км<sup>2</sup>. Однако, в последние годы на фоне сокращения отрицательных температур воздуха (выражается в сумме градусодней мороза, °С) площадь припая сократилась и не превышает 400 км<sup>2</sup> за сезон, а в зиму 2019/2020 г. (как и в 2003/2004 гг.) припай вовсе не наблюдался. Стоит отметить, что зима 2019/2020 г. – самая теплая за весь период инструментальных наблюдений начиная с 1883 г.

Ширина припая варьируется в зависимости от района и физико-географических особенностей исследуемой акватории. Так в пределах северного побережья Азовского моря и Таганрогского залива ежегодно образуется припай шириной 5–10 км в период 2000–2015 гг. В западной и юго-восточной частях моря (створы Темрюк (№8), Арабатская (№6) и Обиточный (№4)) припай образовывался в течении 5 зимних периодов (из 20 рассматриваемых), шириной 2–5 км в среднем за зиму. С 2013 г. припай наблюдался только в северной части Таганрогского залива и Утлюкском лимане, с 2016 г. – в районе Таганроге и единожды в Приморско-Ахтарске. Ширина припая в эти зимы не превышает 3 км.



*Рис. 3. Средняя и максимальная за сезон площади припая Азовского моря и сумма градусодней мороза (СГДМ) на ГМС Таганрог*  
*Fig. 3. Average and maximum seasonal fast ice area of the Sea of Azov and the cumulative freezing degree-days (°C) at the hydrometeorological station Taganrog*

Как говорилось выше, морской ледяной покров является одним из рельефообразующих факторов береговой зоны. Берега подвержены ледовым воздействиям как в период осеннего ледообразования, так и во время весеннего разрушения припая и очищения моря ото льдов.



*Рис. 4. Навалы льда на берег в районе с. Красный Десант (северное побережье Таганрогского залива) 14.03.2021 г.*  
*Fig. 4. Rubble field near the village Krasny Desant (northern coast of the Taganrog Bay) 14.03.2021 г.*



В замерзающих морях с неустойчивым ледяным покровом, где припай не образуется или часто взламывается, надвиги и навалы морских льдов на берег случаются в течение всего ледового сезона [Огородов, 2011], в результате чего образуются экзарационные формы рельефа – борозды, ямы и др. Случаи навалов льда на берега Азовского моря наблюдаются регулярно – например, в зимы 2009/2010, 2010/2011, 2019/2020 (рис. 4).

Фрагменты припая и битый лёд, вынесенные на пляж или остающиеся на мелководье, способны некоторое время защищать берега от прямого разрушительного воздействия волн. Однако такие льды сравнительно быстро тают или уничтожаются прибоем. Наличие плавучих льдов вблизи берега также приводит к существенному падению энергии волн и даже к их полному гашению [Огородов, 2011].

Побережье Азовского моря подвержено активному разрушению, что обусловлено геологическим строением берегов и гидродинамическими процессами. Экстремальные сгонно-нагонные колебания воды, которые возникают при ветре со скоростью более 15 м/с, приводят к интенсивному размыву берегов, сложенных в основном легкоразмываемыми суглинками и глинами. При этом наибольшая повторяемость штормовых нагонов в Азовском море наблюдается в осенне-зимний период с октября по март [Яицкая, 2017]. Наличие или отсутствие ледяного покрова, в том числе устойчивого, в этот период может оказывать непосредственное влияние на интенсивность размыва берегов.

## **ВЫВОДЫ**

На основе спутниковых и натурных наблюдений с применением ГИС-технологий выполнен анализ динамики припая Азовского моря. Исследованы пространственно-временные характеристики припая за период 2000–2020 гг. – площадь и ширина, а также продолжительность стояния припая по данным прибрежных ГМС. Построены карты частоты формирования припая для каждого месяца зимнего периода: декабрь – март.

Установлено, что продолжительность припая на всех прибрежных ГМС сократилась: для пунктов северного побережья Таганрог и Мариуполь – на 3–5 дней, для пунктов южного побережья Таганрогского залива Ейск и Должанская – на 10–12 дней, для ГМС Геническ – 7 дней. Среднеголетняя площадь припая за 2000–2020 гг. составляет 1800 км<sup>2</sup>. Но фоне роста зимних температур воздуха площадь припая сокращается, а в последние зимние периоды не наблюдается вовсе.

Среднеголетняя ширина припая в пределах северного побережья Азовского моря и Таганрогского залива составляет 5–10 км. В западной и юго-восточной частях моря (створы Темрюк (№8), Арабатская (№6) и Обиточный (№4)) припай наблюдался в 25% случаев, его ширина составляет 2–5 км в среднем за зиму. Будущий анализ толщины припайных льдов поможет установить воздействие на дно водоема.

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-80082, 19-35-90131 и в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта 01201363188.

## **ACKNOWLEDGMENTS**

The reported study was funded by RFBR, project number 18-05-80082, 19-35-90131 and under the state assignment research of SSC RAS, project No. 01201363188.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас льдов Черного и Азовского морей. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2015. 219 с.
2. *Боровская Р.В.* Особенности ледового режима Керченского пролива за последние 15 лет по данным спутниковых наблюдений. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон. 2006. Т. 14. С. 253–258.
3. *Букатов А.Е., Завьялов Д.Д., Букатова О.М., Соломаха Т.А.* Влияние ледяного покрова на волновые возмущения в Азовском море. Морской гидрофизический журнал. 2001. № 4. С. 11–22.
4. *Букатов А.Е., Павленко Е.А.* Анализ связи климатической изменчивости метеорологических характеристик и ледового режима Азовского моря с индексами атмосферной циркуляции. Физические проблемы экологии. 2012. Т. 18. С. 48–72.
5. Гидрометеорологический справочник Азовского моря. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 853 с.
6. *Дашкевич Л.В., Немцева Л.Д., Бердников С.В.* Оценка ледовитости Азовского моря в XXI веке по спутниковым снимкам Terra/Aqua MODIS и результатам математического моделирования. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 91–100.
7. *Думанская И.О.* Ледовые условия морей европейской части России. М.: ИГ–СОЦИН, 2014. 608 с.
8. *Думанская И.О.* Типовые условия на основных судоходных трассах морей европейской части России для зим различной суровости. Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2013. № 350. С. 142–166.
9. *Зенкович В.П.* Основы учения о морских берегах. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 710 с.
10. *Крындин А.Н.* Сезонные и межгодовые изменения ледовитости и положения кромки льда на Черном и Азовском морях в связи с особенностями атмосферной циркуляции. Труды ГОИН. 1964. № 76. С. 7–79.
11. *Матишов Г.Г., Бердников С.В., Жичкин А.П., Макаревич П.Р., Дженюк С.Л., Кулыгин В.В., Яицкая Н.А., Поважный В.В., Шевердяев И.В., Кумпан С.В., Третьякова И.А., Цыганкова А.Е.* Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013). Регион 1. Моря Восточной Арктики. Регион 2. Чёрное, Азовское и Каспийское моря. Ростов-на-Дону: Издательство ЮНЦ РАН, 2014. 256 с.
12. *Огородов С.А.* Роль морских льдов в динамике рельефа береговой зоны. М.: Изд-во МГУ, 2011. 171 с.
13. *Сафьянов Г.А.* Береговая зона океана в XX веке. М.: Мысль. 1978. 263 с.
14. *Федоренко А.В.* Исследование сезонных и внутривековых колебаний основных ледовых параметров на южных морях (Азовское и Каспийское). Труды ГОИН. 2011. Т. 215. С. 15–25.
15. *Яицкая Н.А.* Результаты ретроспективного анализа ветрового волнения в Азовском море (на примере зим 2015–2017 гг. Наука Юга России. 2017. Т. 13. № 4. С. 60–70.
16. *Яицкая Н.А., Магаева А.А.* Динамика ледового режима Азовского моря в XX–XXI вв. Лёд и Снег. 2018; 58(3):373–386. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-3-373-386>.
17. *Matishov G.G., Matishov D.G., Berdnikov S.V., Sorokina V.V., Levitus S., Smolyar I.V.* Secular climate fluctuations in the Sea of Azov region (based on thermohaline data over 120 years). Doklady Earth Sciences. 2008. Т. 422. № 1. С. 1101–1104.

18. *Matishov G.G., Chikin A.L., Dashkevich L.V., Kulygin V.V., Chikina L.G.* The ice regime of the Sea of Azov and climate in the early 21st century. *Doklady Earth Sciences*. 2014. T. 457. № 2. C. 1020–1024.
19. *Mizyuk A.I., Puzina O.S.* Sea ice modeling in the Sea of Azov for a study of long-term variability. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2019. T. 386. № 1. P. 012023.

#### REFERENCES

1. *Borovskaya R.V.* Features of the ice regime of the Kerch Strait over the past 15 years according to satellite observations. *Ecological safety of coastal and shelf zones*. 2006. V. 14. P. 253–258 (in Russian).
2. *Bukatov A.E., Pavlenko E.A.* Analysis of the relationship between the climatic variability of meteorological characteristics and the ice regime of the Sea of Azov with atmospheric circulation indices. *Physical problems of ecology*. 2012. V. 18. P. 48–72 (in Russian).
3. *Bukatov A.E., Zav'yalov D.D., Bukatova O.M., Solomaha T.A.* Influence of the ice cover on wave disturbances in the Sea of Azov. *Marine Hydrophysical Journal*. 2001. No 4. P. 11–22 (in Russian).
4. *Dashkevich L.V., Nemtseva L.D., Berdnikov S.V.* Assessment of the Sea of Azov ice cover in the XXI century using Terra/Aqua MODIS images and numerical modelling. *Current problems of remote sensing of the Earth from space*. 2016. T. 13. No 5. P. 91–100 (in Russian).
5. *Dumanskaya I. O.* Ice conditions of the seas of the European part of Russia. Moscow: IG SOTSIN, 2014. 608 p. (in Russian).
6. *Dumanskaya I.O.* Typical conditions on the main navigable routes of the seas of the European part of Russia for winters of varying severity. *Proceedings of Hydrometcentre of Russia*. 2013. No 350. P. 142–166 (in Russian).
7. *Fedorenko A.V.* The study of seasonal and intra-annual variations of the main ice parameters on the southern seas (the Sea of Azov and the Caspian Sea). *Proceedings of the GOIN*. 2011. V. 215. P. 15–25 (in Russian).
8. *Hydrometeorological directory of the Sea of Azov*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1962. 853 p. (in Russian).
9. *Ice Atlas of the Black and Azov Seas*. Sevastopol: NPC «EKOSI-Gidrofizika», 2015. 219 p. (in Russian).
10. *Kryndin A.N.* Seasonal and interannual changes in ice coverage and the position of the ice edge in the Black and Azov seas due to the peculiarities of atmospheric circulation. *Proceedings of the GOIN*. 1964. No 76. P. 7–70 (in Russian).
11. *Matishov G.G., Bernikov S.V., Zhichkin A.P., Makarevich P.R., Dzhenyuk S.L., Kulygin V.V., Yaickaya N.A., Povazhnyj V.V., Sheverdyayev I.V., Kumpan S.V., Tret'yakova I.A., Cygankova A.E.* Atlas of climatic changes in large marine ecosystems of the Northern Hemisphere (1878–2013). Region 1. The seas of the Eastern Arctic. Region 2. Black, Azov and Caspian Seas. Rostov-on-Don: Publishing house of the SSC RAS, 2014. 256 p. (in Russian).
12. *Matishov G.G., Matishov D.G., Berdnikov S.V., Sorokina V.V., Levitus S., Smolyar I.V.* Secular climate fluctuations in the Sea of Azov region (based on thermohaline data over 120 years). *Doklady Earth Sciences*. 2008. T. 422. No 1. C. 1101–1104.
13. *Matishov G.G., Chikin A.L., Dashkevich L.V., Kulygin V.V., Chikina L.G.* The ice regime of the Sea of Azov and climate in the early 21st century. *Doklady Earth Sciences*. 2014. T. 457. № 2. C. 1020–1024.

14. *Mizyuk A.I., Puzina O.S.* Sea ice modeling in the Sea of Azov for a study of long-term variability. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019. T. 386. No 1. P. 012023.
  15. *Ogorodov S.A.* The Role of Sea Ice in Coastal Dynamics. Moscow: Moscow University Press., 2011. 171 p. (in Russian).
  16. *Saf'yanov G.A.* The coastal zone of the ocean in the twentieth century. Moscow, "Mysl" Publishers, 1978. 264 p. (in Russian).
  17. *Yaitskaya N.A.* The results of hindcasting experiments of wind wave in the Sea of Azov (as illustrated by winters 2015-2017). Science in the South Russia. 2017. T. 13. No 4. P. 60–70. DOI:10.23885/2500-0640-2017-3-4-60-70 (in Russian).
  18. *Yaitskaya N.A., Magaeva A.A.* Dynamics of the ice regime of the Sea of Azov in the XX–XXI centuries. Ice and Snow. 2018. T. 58. No 3. P. 373–386 (in Russian) <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-3-373-386>.
  19. *Zenkovich V.P.* Fundamentals of the theory of the development of marine shores Moscow, Academy of Sciences of the USSR. 1962. 710 p. (in Russian).
-

УДК: 551.435.31

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-85-97

А.С. Богуславский<sup>1</sup>, С.И. Казаков<sup>2</sup>

## ОСОБЕННОСТИ ЛИТОДИНАМИКИ ГАЛЕЧНЫХ ПЛЯЖЕЙ ЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА

### АННОТАЦИЯ

Представлены результаты исследования особенностей литодинамики галечных пляжей Южного берега Крыма на основе данных долговременного мониторинга состояния пляжей, выполняемого в Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне Морского гидрофизического института РАН в п.г.т. Кацивели.

Охарактеризовано долговременное изменение пляжа Лименской бухты за период с 1950 г. Выполнена оценка объема поступления и выноса гальки при смене ветро-волновых режимов на примере пляжа Лименской бухты и искусственных пляжей берегоукрепительных сооружений на участке береговой линии от п.г.т. Кацивели до п.г.т. Понизовка.

Наиболее влиятельным фактором формирования галечных пляжей Южного берега Крыма является смена вдольбереговых ветро-волновых режимов в масштабе времени «дни-месяцы», которая приводит к существенным колебаниям уровня моря у берега и соответствующей смене направлений придонных компонент скорости течения, перпендикулярных береговой линии. Наибольший расход и приход пляжеформирующего материала (до 1 м<sup>3</sup>/сут на погонный метр пляжа) происходит во время штормов соответственно при ветро-волновых режимах восточного и западного направлений.

Наибольший необратимый вынос массы пляжеформирующих материалов при смене ветро-волновых режимов происходит с восточных и центральных участков бухт и искусственных пляжей берегоукрепительных сооружений, а частичное восстановление пляжей – на их западных участках.

Природные подводные рифы в прибрежной акватории бухт и искусственных пляжей берегоукрепительных сооружений способствуют сохранению в них пляжей.

Причиной постепенной среднесуточной деградации пляжей может быть преобладание восточных штормовых ветров над западными в условиях блокирования естественного поступления пляжеформирующих материалов со стороны берега объектами береговой инфраструктуры.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пляжи, формирование, литодинамика, ветро-волновой режим, придонные течения, мониторинг, Южный берег Крыма, геоинформация

<sup>1</sup> Морской гидрофизический институт РАН, ул. Капитанская, 2, 299011, Севастополь, e-mail: [al\\_bhs@mail.ru](mailto:al_bhs@mail.ru)

<sup>2</sup> Морской гидрофизический институт РАН, ул. Капитанская, 2, 299011, Севастополь, e-mail: [science@bshpg-ras.ru](mailto:science@bshpg-ras.ru)

Alexander S. Boguslavsky<sup>1</sup>, Sergey I. Kazakov<sup>2</sup>

## FEATURES OF LITHODYNAMICS OF PEBBLE BEACHES AT SOUTH COAST OF CRIMEA

### ABSTRACT

The results of the study of the peculiarities of lithodynamics of pebble beaches of the South Coast of Crimea based on the long-term monitoring of the state of beaches performed at the Black Sea Hydrophysical Subsatellite Proving Ground of the Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences in the settlement of Katsiveli are presented.

Long-term changes of the beach of Limensky Bay since 1950 and of beaches of the shore protection structures since 1988 are characterized. The volume of income and outcome of pebbles during the change of wind-wave regimes was estimated by the example of Limensky Bay beach and the artificial beaches of the coast protection structures in the coastline section from Katsiveli to Ponizovka settlement.

The most influential factor in the formation of the pebble beaches of the Southern Coast of Crimea is the change in alongshore wind-wave regimes in the “days-months” time scale, which leads to significant fluctuations in sea level near the coast and a corresponding change in the directions of the bottom current velocity components perpendicular to the shoreline. The largest expense and income of beach-forming material (up to 1 m<sup>3</sup>/day per linear meter of beach) occurs during storms, respectively, with wind-wave regimes of the eastern and western directions.

The largest irreversible removal of the mass of beach-forming materials during the change in wind-wave regimes occurs from the eastern and central sections of the bays and artificial beaches of coastal protection structures, and partial restoration of beaches – on their western sections.

Natural underwater reefs in the coastal waters of bays and artificial beaches of shore protection structures contribute to the preservation of beaches in them.

The reason for the gradual average long-term degradation of beaches may be the predominance of eastern storm winds over western ones in conditions of blocking the natural income of beach-forming materials from the coast by the coastal infrastructure objects.

**KEYWORDS:** beaches, formation, lithodynamics, wind-wave regime, bottom currents, South coast of Crimea, geoinformation

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение процессов формирования и деградации пляжей составляет важный раздел в исследованиях состояния морских берегов и динамики береговых наносов. Наиболее полное описание состояния берегов и пляжей Южного берега Крыма (ЮБК) впервые выполнено В.П. Зенковичем [Зенкович, 1960]. Особенности современного состояния берегов Крыма и их исторические изменения рассматривались в работах Ю.Н. Горячкина, В.В. Фомина, В.Ф. Удовика [Горячкин, Фомин, 2020; Удовик, Горячкин, 2013] и других авторов.

Для территории Южного берега Крыма (ЮБК) – от г. Алушта на востоке до мыса Фиолент на западе – характерны берега абразионно-бухтового типа с немногочисленными галечными пляжами в бухтах. Около 40% длины береговой линии ЮБК занимают

<sup>1</sup> Marine Hydrophysical Institute RAS, Kapitanskaya str., 2, Sevastopol, Russia, e-mail: [al\\_bhs@mail.ru](mailto:al_bhs@mail.ru)

<sup>2</sup> Marine Hydrophysical Institute RAS, Kapitanskaya str., 2, Sevastopol, Russia, e-mail: [science@bshpg-ras.ru](mailto:science@bshpg-ras.ru)

искусственные пляжи берегоукрепительных сооружений (бунирования). Галечные пляжи ЮБК являются защитным барьером берегов, а также имеют высокий рекреационный потенциал [Орлова, и др., 2006].

Формирование пляжей и их физическое состояние определяются балансом поступления и выноса пляжеформирующих материалов (ПФМ) и их переработкой в результате активных высокоэнергетических процессов взаимодействия трех сред – суши, моря и атмосферы. Интенсивность и направленность этих процессов влияют на комплекс морфометрических параметров пляжа: ширину, протяженность, мощность, распределение гранулометрического состава пород ПФМ в зоне сопряжения суши и моря вдоль и поперек береговой линии. С другой стороны, состав и свойства пород (твердость, абразивность), размер, форма и окатанность гальки [Wadell, 1932], свидетельствуют об «истории» пляжа – его происхождении (источниках ПФМ), длительности кругооборота ПФМ в зоне пляжа, определяющей его устойчивость во времени.

Согласно результатам полевых исследований авторов [Богуславский, и др., 2016], наиболее характерными ПФМ пляжей ЮБК являются:

- обломочный материал верхнеюрских известняков разных размеров от крупнозернистого известнякового песка, дресвы и щебня (0,01–0,1 м) до крупных скальных блоков размером 10 м и более в составе: береговых делювиальных отложений массандровской свиты, береговых участков скал и осыпей Главной гряды и отторженцев Крымских гор;
- обломочный материал сланцево-песчаникового делювия береговых и русловых обнажений таврической формации (западная часть ЮБК от Фороса до Лименской бухты);
- обломочный материал изверженных пород, интрузивных массивов и даек: Лименской вулканической группы (г. Пиляки, г. Хыр), вулканических групп Кастрополя и мыса Фиолент: андезито-базальтовые лавы и их туфы, пестрые яшмы преимущественно коричневатых и зеленоватых оттенков, роговики, кварцы, туфопесчаники, диориты, и др., палеогалька, рис. 1.



*Рис. 1. Потенциальные источники ПФМ пляжей района исследований: 1 - обломочный материал верхнеюрских известняков; 2 - аргиллиты и песчаники таврической серии; 3 – вулканогенные породы и палеогалька береговых отложений*

*Fig. 1. Potential sources of beach-forming materials in the study area: 1 - clastic material of the Upper Jurassic limestones; 2 - mudstones and sandstones of the Taurian series; 3- volcanic rocks and paleo-pebbles of coastal sediments*

Обломочный материал поступает в баланс пляжей под действием эрозионных процессов, в период паводково-селевого стока близлежащих водотоков – р. Лименка в Лименской бухте, Качивельский ручей на южной оконечности мыса Кикинеиз.

Состояние пляжей, определяемое комплексом перечисленных показателей, может служить «барометром» экологического состояния берегов и должно рассматриваться как важный целевой элемент системы их комплексного геоэкологического мониторинга.

Факторы формирования галечных пляжей ЮБК были предварительно рассмотрены нами в работе [Богуславский, и др., 2016] с разделением их на 3 группы – геологические, морские и атмосферные.

Из морских факторов по итогам выполненных исследований важным в условиях ЮБК является смена прибрежных ветро-волновых режимов. Аналогичный вывод приводится также в работе [Inman, Filloux, 1960] для северо-западного побережья Калифорнийского залива.

Для условий прибрежной зоны ЮБК [Шулейкин, 1968] максимальные скорости придонной компоненты течения, направленной от берега в море, достигаются при штормовых нагонных (восточных румбов) ветрах. У берегов ЮБК продолжительные ветры этих направлений, достигающие штормовой силы (до 20 м/с) обычно дуют в весенний период, что обусловлено значительным контрастом прогрева воздушных масс над морем и сушей. Во время таких ветров суммарное ветровое и волновое повышение уровня моря у берега в Лименской бухте может составлять от нескольких десятков сантиметров до метра и более, что приводит к развитию мощной компенсационной компоненты придонного течения, направленной в море и перемещающей гальку на более глубокие горизонты. При этом важную роль играет механизм разрывных течений, определяемый рельефом дна, в частности, наличием субмеридиональных ложбин в рельефе подводного склона.

Противоположная картина наблюдается при западном (сгонном) ветро-волновом режиме, когда под действием силы Кориолиса, отклоняющей поток вправо, происходит максимальное понижение уровня моря у берегов и отток поверхностных вод в море, в результате чего усиливается придонное течение, направленное в сторону берега [Шулейкин, 1968]. Для ЮБК характерны летние сгоны в середине июня. В зимний период в отдельные годы наблюдались мощные юго-западные циклонические штормы (январь 1966 г., ноябрь 1991 и 1992 гг., и др. [Наумова и др., 2010]), прибой от которых достигал большой разрушительной силы. Во время этих штормов произошло наибольшее разрушение бун берегоукрепительных сооружений на наблюдаемом участке береговой линии.

В Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне Морского гидрофизического института РАН (ЧГПП МГИ) в пос. Кацивели с 2016 г. выполнялся мониторинг состояния пляжей на Кацивельском участке береговой линии, который включает Лименскую бухту, участок естественного берега мыса Кикинеиз и участок берегоукрепительных сооружений от п.г.т. Кацивели до п.г.т. Понизовка.

Целью исследования являлось уточнение особенностей литодинамики пляжей ЮБК на примере указанных участков, оценка баланса ПФМ при смене вдольбереговых ветро-волновых режимов, а также оценка многолетних изменений состояния рассматриваемых пляжей.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалами исследования являлись следующие исходные данные: 1) состав и залегание в породах ПФМ, поступающих со временем в баланс пляжа в результате процессов эрозии и абразии, изменение геоморфологических условий береговой зоны – формы береговой линии, береговых обрывов, русел водотоков, по результатам предшествующих полевых геолого-геоморфологических наблюдений авторов [Богуславский, и др., 2016]; 2) данные метеорологических параметров метеопоста ЧГПП



МГИ (скорость и направление ветра, высота волн в прибрежной акватории, атмосферные осадки); 3) данные уровня моря стационарной станции уровня моря ЧГПП; 4) данные скорости и направления прибрежных течений по результатам выполняемого мониторинга с океанографической платформы ЧГПП МГИ, а также имеющиеся литературные данные по скоростям и направлениям ветра и характеру волнения [*Наумова, и др., 2010, Репетин, и др., 2008*]; 5) имеющиеся исторические данные (фото, свидетельства старожилов) о состоянии пляжа Лименской бухты (морфометрических параметров, состава ПФМ, и др.) с 1950 г., и искусственных межбунных пляжей со времени их сооружения в начале 1980-х годов.

В целом методика исследований базировалась на регулярных натуральных наблюдениях на контрольных участках морфометрических параметров (длины, ширины, мощности) отдельных массивов пляжа, гранулометрического состава ПФМ и их изменения со временем, в зависимости от смены ветро-волновых режимов.

Для измерения размеров и объема характерных участков пляжа и их изменений (валов или выемок) в результате штормов, использовались обычные инструменты – рулетка, вешки из арматуры, а также отметки на устойчивых крупных камнях, бунах, противоволновых «ежах», высота и поперечные размеры которых на контрольных участках были вымерены заранее и известны.

Эффективным методом является фотометрия – сравнение фотоснимков контрольного участка пляжа до и после шторма или смены ветро-волнового режима. При нагонном шторме прибой захватывает ПФМ с пляжа, формируя отчетливую выемку на ширину зоны заплеска прибоя в сторону берега от предшествующей шторму линии уреза воды. При сгонном шторме прибой в зоне заплеска формирует свежий «вал» ПФМ в сторону моря от прежней линии уреза воды. При сильных сгонных штормах на пляжах ЮБК ширина зоны заплеска отчетливо определяется на фото по наличию обрывков водорослей цистозиры (бородача), сорванных с подводных камней мощными придонными потоками. Эти водоросли имеют плавучесть, близкую к нулевой, и легко выбрасываются прибоем на берег.

При фиксации изменения морфометрических параметров пляжа после шторма в случае нагонного режима (расход ПФМ с пляжа) замерялся объем выемки ПФМ, а в случае сгонного режима (приход ПФМ на пляж) – объем свежего вала ПФМ на единицу длины вдольбереговой линии по урезу воды. Изменение массы ПФМ при этом подсчитывалось на основе оценки их средней плотности. Гранулометрический состав и плотность ПФМ определялись путем отбора и взвешивания проб фиксированного объема (обычно ведро 5 л) на ручных пружинных весах. Погрешность определения изменения объема и массы ПФМ по нашим оценкам изменялась в пределах 10%, в зависимости от размера и сложности формы замеряемого «тела» пляжа.

Для изучения формы пляжей бухт и межбунных промежутков на протяженных участках использовались детальные космоснимки (Landsat, и др.), доступные в известном приложении «Гугл Планета Земля».

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценено историческое изменение состояния пляжа Лименской бухты с 1950 г. и межбунных промежутков на участке берега от п.г.т. Кацивели до п.г.т. Пониловка (с 1978 г.). По рассказам старожилов, в западной части бухты ширина галечного пляжа достигала 40 м, постепенно сужаясь к востоку (до устья р. Лименка) до 10 м. Далее к востоку, у подножья г. Кошка, расположены мощные хаотические навалы крупных скал, которые практически не изменились. На рис. 2(1) показано фото Лименской бухты 1950 г.

На фото заметны характерные шлейфы фрагментов водорослей цистозиры (бородача), которые соответствуют границе зоны заплеска прибоя при сгонных западных штормах. Рис. 2(2) и 2(3) – современные фото восточной и западной части бухты.



*Рис. 2. Деградация галечного пляжа Лименской бухты.  
1 – 1950 г.; 2, 3 – современное состояние: восточная часть бухты (2),  
западная часть бухты (3)*

*Fig. 2. Degradation of the pebble beach in Limensky Bay.  
1 – 1950; 2, 3 – present state: east part of the bay (2),  
west part of the bay (3)*

В 1960-е годы производился интенсивный отбор гальки Лименского пляжа на строительные нужды, что имело место также и на других пляжах ЮБК (за исключением пляжей санаториев и правительственных дач). В результате, уже к концу 1970-х годов в восточной части бухты (район Аквапарка) имели место подмыв и частичное обрушение берегового обрыва с понижением вышележащих отметок поверхности земли примерно на 5 м и обрушением дороги Кацивели-Симеиз.

В 1980-е годы, во избежание дальнейших разрушений, на месте бывшего пляжа восточной части бухты был произведен навал глыб пород и противоприбойных бетонных «ежей», рис. 2(2), а в западной части, в целях безопасности радиотелескопа РТ-22, сооружены две бунны с искусственным пляжем в межбунном промежутке, рис. 2(3). Интенсивное строительство берегоукрепительных сооружений с бунированием и созданием искусственных межбунных пляжей в эти годы было выполнено практически вдоль всей береговой линии ЮБК.

Ширина пляжа в западной части бухты с 1950 г. сократилась с 30–40 м до 20 м (в центре межбунного промежутка), а в восточной части с 10–20 м до 5 м и менее.

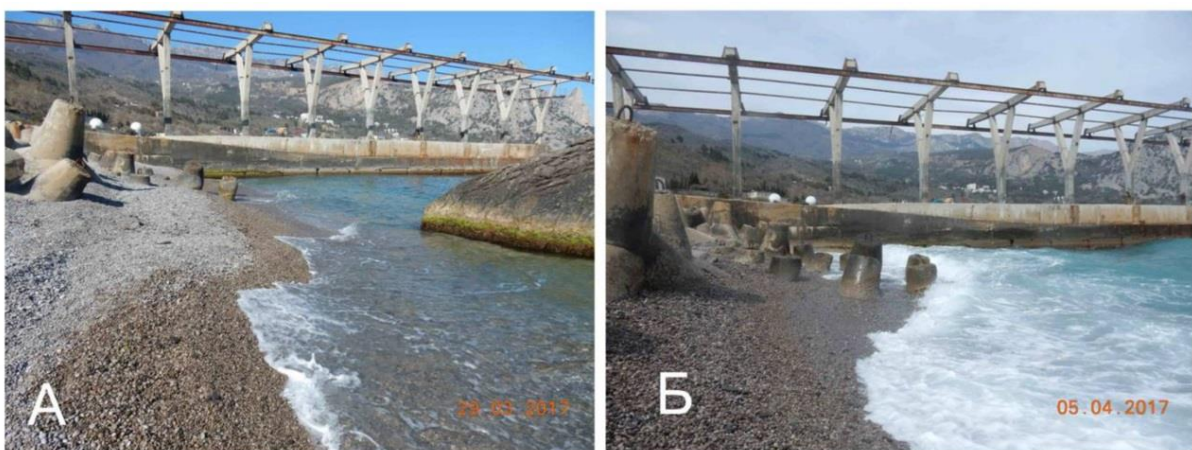
Из 25 межбунных промежутков участка «Кацивели-Понизовка» к западу от мыса Кикинеиз остатки пляжа сохранились только в 4 промежутках в небольших бухтах, где они были и в естественном состоянии до начала берегоукрепительных работ. Наибольшие разрушения берегоукрепительных сооружений произошли на мысовых частях берега, где наблюдается конвергенция силовых линий прибоя вдоль нормалей к его фронту, в отличие от их разрежения в бухтах. Во всех мысовых межбунных промежутках искусственные пляжи полностью исчезли. В результате мощных циклонических осенних штормов преимущественного западного направления большая часть бун были разрушены полностью или частично, рис. 3.



*Рис. 3. Полуразрушенные берегоукрепительные сооружения мысового участка берега в районе Понизовки: 1-с полностью вымытым материалом искусственных пляжей, 2 – с частично сохранившимся пляжем*

*Fig. 3. Half-destroyed shore protection structures of the cape section, in the Ponizovka coast: 1 - with completely washed out material of artificial beaches, 2 – with a partially preserved beach*

Рассмотрим более детально влияние смены ветро-волнового режима на литодинамику пляжа Лименской бухты. Наиболее показательная смена ветро-волнового режима наблюдалась весной 2017 г. Западный ветер умеренной силы (10–15 м/с) наблюдался в течение суток 28 марта. Высота волн прибоя достигла 1,5–2 м. Ночью 29 марта ветер утих, и до утра продолжалась юго-западная зыбь. При этом урез воды, отошедший примерно на 1,5 м в сторону моря, вернулся обратно, рис. 4(А). С 31 марта подул уже восточный ветер 10–15 м/с, т.е. примерно той же силы, что и предшествующий западный. Высота волн прибоя достигла 1,5–2 м, как и в случае предшествующего шторма. Через сутки ветер утих, и в течение нескольких дней море было спокойным, что позволило произвести оценку изменения массы гальки по отметкам выступающих камней и противоволновых бетонных «ежей» в полосе прибоя. Днем 5 апреля была произведена съемка того же участка пляжа, рис. 4(Б).

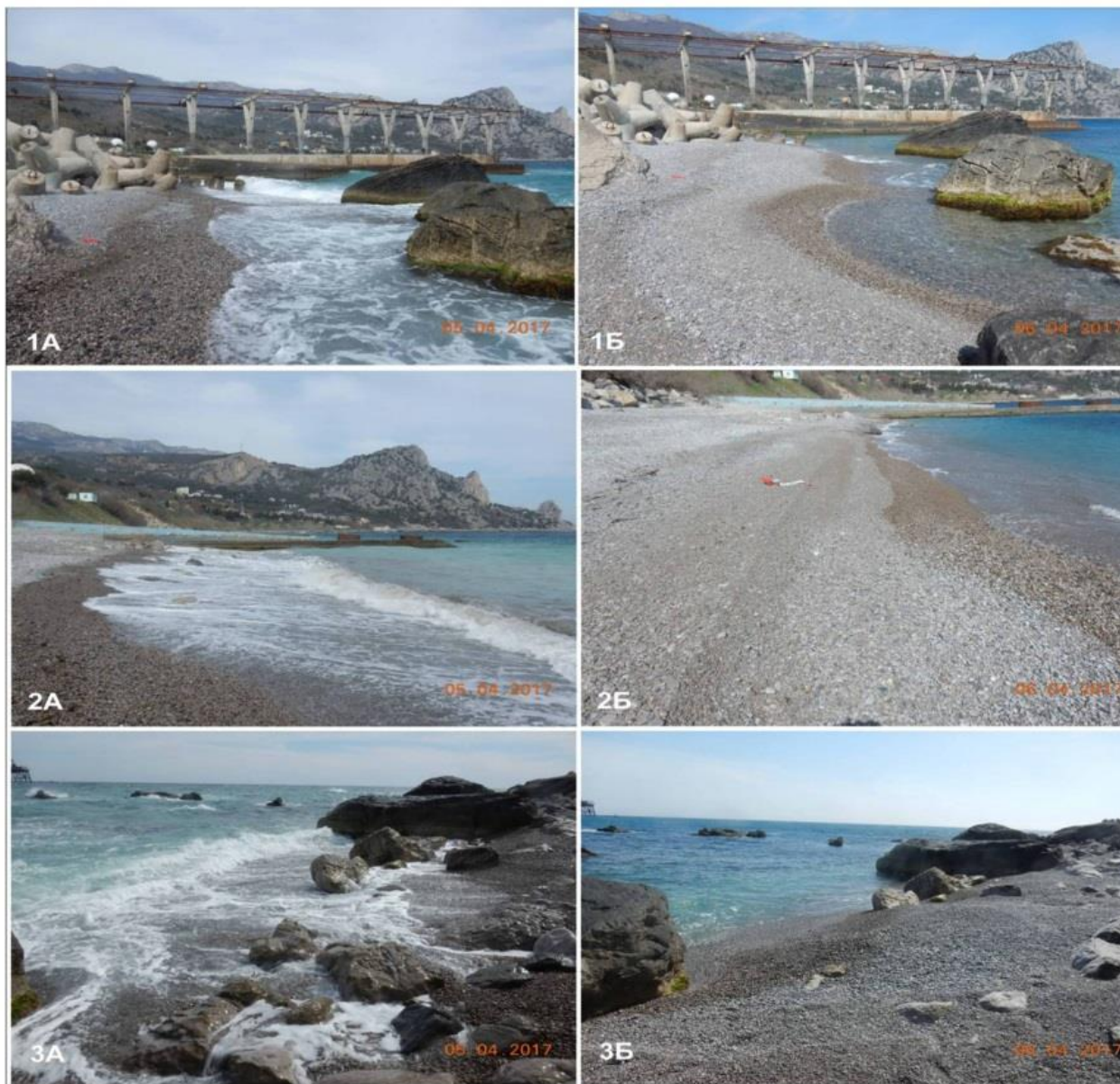


*Рис. 4. Изменение морфометрических параметров пляжа на контрольном участке Лименской бухты после смены западного ветро-волнового режима на восточный*

*Fig. 4. Changes in the morphometric parameters of the beach at a site of the Limensky Bay after the change of the western wind-wave regime to the eastern one*

Результаты замера показали, что произошел вынос в море слоя гальки шириной порядка 1,5 м и мощностью 30–40 см. Преобладающий размер гальки 3–5 см. С учетом рассчитанной плотности гальки  $1,6 \text{ кг/дм}^3$ , удельный объем выноса составил 0,84 т на погонный метр пляжа.

Вечером 5 апреля ветер сменился на западный, и ночью на 6 апреля достиг штормовой силы 10–15 м/с при высоте волн до 2 м. К концу дня 6 апреля западный ветер утих, и были произведены замеры морфометрических параметров пляжа. На рис. 5 показано изменение пляжа Лименской бухты на трех участках в течение указанных суток.



*Рис. 5. Изменение морфометрических параметров пляжа на трех контрольных участках Лименской бухты после смены восточного штормового ветра на западный*

*Fig. 5. Changes in the morphometric parameters of the beach at three control sites of the Limensky Bay during the day after the change of the east storm wind to the west one*

Оцененный в среднем по трем участкам суточный выброс ПФМ после шторма составил примерно  $1 \text{ м}^3$  гальки (1,6 т) на погонный метр пляжа.

По результатам выполненных наблюдений можно сделать вывод, что в условиях ЮБК наиболее влиятельным пляжеформирующим фактором, работающим в масштабе времени «дни-месяцы», является смена ветро-волнового режима с восточного на западный и обратно. Существенное значение имеет угол фронта прибоя к береговой линии и высота волн, а также тип волнения – ветровая волна, зыбь, ветровая волна на фоне зыби, толчея [Наумова, и др., 2010]. При вдольбереговых ветро-волновых режимах, в результате трения у дна на мелководье, нормаль к фронту волн прибоя вблизи берега отклоняется от направления ветра примерно на угол  $45^\circ$  в сторону береговой линии.

В межбунных промежутках берегоукрепительных сооружений, ввиду резких изломов искусственной береговой линии по отношению к фронту прибоя, естественное воздействие смены придонных течений на литодинамику пляжей нарушается.



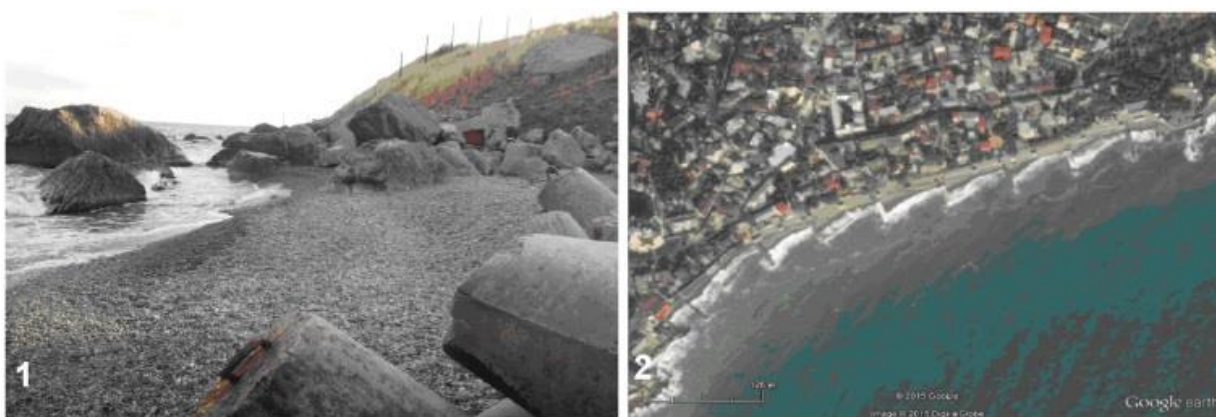
*Рис. 6. Фото межбунного промежутка при восточном (1) и западном (2) ветро-волновом режиме на наблюдаемом участке берегоукрепительных сооружений. Стрелками показано направление переноса пляжеформирующих материалов*

*Fig. 6. Western (1) and eastern (2) wind-wave regime at the observed section of shore protection structures. Arrows show directions of beach-forming material transport*

Во время восточного (нагонного) режима, рис. 6(1), при подходе фронта волны к восточной буне промежутка на мысовой части береговой линии, ближняя к берегу часть волны «обрезается» буной, а дальняя в результате дифракции претерпевает дополнительный поворот в сторону берега, и, попадая в промежуток, накатывается на пляж. В это же время к центру промежутка приходит и часть волны, отраженная от следующей к западу буны. В результате в центре промежутка, как в фокусе, эти два потока объединяются. Таким образом, имеет место резонанс, приводящий к резкому повышению уровня и формированию мощной отбойной волны в центре промежутка. Ее придонная компонента представляет собой разрывное течение, которое выносит ПФМ в море. Со временем оно вырабатывает по центру промежутка ложбину. Подобные ложбины обнаруживаются на спутниковых снимках у большинства межбунных промежутков.

При западном (сгонном) ветро-волновом режиме, рис. 6(2), как и в естественных условиях Лименской бухты, наблюдается заметное понижение уровня моря у берега, и линия уреза воды сдвигается в море тем сильнее, чем более пологий уклон пляжа. Однако возвратная придонная компонента течения не может получить достаточное развитие,

вследствие перекрытия соседними бунами основного вдольберегового потока, и происходит лишь частичный возврат ПФМ на пляж. Определенный нагонный эффект от прибоя при этом имеется в восточной части бухт и межбунных промежутков, откуда донные отложения перемещаются дополнительной придонной компонентой течения к западу. По этой причине восстановление пляжа в большинстве бухт и межбунных промежутков ЮБК после сгонных штормов происходит преимущественно в западной части бухт и межбунных промежутков, рис. 7.



*Рис. 7. Восстановленный природный пляж в западной части Лименской бухты (1); асимметрия искусственных пляжей берегоукрепительных сооружений Массандры на космоснимке (2)*

*Fig. 7. Renewed natural beach in the western part of Limensky bay (1); asymmetry of artificial beaches of shore-protection structures of Massandra, at a space image (2)*

Во время сильных западных штормов вместе с ПФМ на берег часто выносятся сорванные с камней дна водоросли (в основном, цистозира), которые могут формировать навалы в центральных и западных частях бухт и межбунных пляжей. Явление характерно только для ЮБК, и является индикатором мощности шторма и силы придонного течения при сгонном ветро-волновом режиме (стебель цистозеры на прибрежных донных камнях имеет прочность на разрыв 10 кгс и более). По ширине и мощности шлейфов выбросов можно судить о силе шторма. Максимально удаленные от уреза воды шлейфы соответствуют границе зоны супралиторали. В западной части Лименской бухты навалы цистозеры толщиной до 1 м наблюдались в конце 1970-х – начале 1980-х гг. и продолжают в меньших размерах в настоящее время. Детально это явление описано в работе Н.В. Шадрин [Шадрин, 1998].

Согласно данным гидрометеорологических источников [Наумова, и др., 2010; Репетин, Белокопытов, 2008] для условий ЮБК восточные штормовые ветры имеют относительное преобладание, поэтому в условиях блокирования естественного поступления ПФМ из береговых отложений и отсутствия их искусственного пополнения происходит постепенная необратимая деградация межбунных пляжей и дальнейшее разрушение берегоукрепительных сооружений.

Низкая эффективность и недолговечность характерна не только для берегоукрепительных сооружений ЮБК, но и для аналогичных сооружений восточной части Черного моря (район г. Туапсе) [Косьян, Крыленко, 2008].

Следует отметить, что на относительно открытых береговых и мысовых участках наблюдаемой береговой линии к западу от п.г.т. Качивели естественные пляжи до начала берегоукрепительных работ располагались в неглубоких бухтах (пляжи Татарский,

Куинджи, Понизовский). Со стороны моря они были частично защищены подводными рифами и скалами, расположенными на расстоянии 10–100 м от берега. Более удаленные от берега скалы не были взорваны при строительстве берегоукрепительных сооружений, и после их частичного разрушения пляжи сохранились именно на этих участках, см. рис. 3(2), рис. 6.

Несмотря на имеющуюся тенденцию среднемноголетнего затухания интенсивности максимальных штормов со временем [Репетин, Белокопытов, 2008], ввиду постепенного среднемноголетнего роста уровня моря в Качивели, который составляет по данным стационарного мареографа ЧГПП МГИ 3,2 мм/год, можно ожидать, что при непринятии восстановительных мер, в долгосрочной перспективе имеющиеся остатки берегоукрепительных сооружений будут окончательно разрушены. В результате произойдет разблокирование естественного абразионно-эрозийного и обвально-оползневого поступления ПФМ из береговых отложений обрывов и водотоков и восстановление природных пляжей в бухтах.

## **ВЫВОДЫ**

Оценено историческое изменение состояния пляжа Лименской бухты (с 1950 г.) и пляжей межбунных промежутков (с 1988 г.). Ширина пляжа центральной и западной части Лименской бухты сократилась с 30–40 м до 20 м, и с 15–20 м до 0 в восточной части. Из 25 межбунных промежутков участка «Качивели-Понизовка» остатки пляжа сохранились только в 6 промежутках, 2 из которых расположены в центре Лименской бухты, а остальные в небольших бухтах к западу от мыса Кикинеиз в тех местах, где они были и в естественном состоянии до начала берегоукрепительных работ.

Наиболее влиятельным фактором формирования пляжей является режим смены восточных и западных ветро-волновых режимов. При этом важную роль играет механизм разрывных течений, связанный с рельефом дна подводного берегового склона.

Оценка баланса массы ПФМ при смене ветро-волнового режима показывает, что уже при умеренной силе ветра (порядка 10 м/с) и высоте волн 1,5–2 м суточный оборот ПФМ на погонный метр пляжа достигает до 1 м<sup>3</sup> (1,6 т) и более.

Наибольший необратимый вынос массы ПФМ пляжа при смене ветро-волновых режимов происходит с восточных и центральных участков бухт и межбунных промежутков, а частичное восстановление пляжей – на их западных участках.

Природные подводные рифы в прибрежной акватории пляжей бухт и межбунных промежутков в значительной мере способствуют сохранению в них пляжей.

Причиной постепенной среднемноголетней деградации пляжей может быть преобладание восточных штормовых ветров над западными в условиях блокирования естественного поступления ПФМ со стороны берега берегоукрепительными сооружениями и другими объектами береговой инфраструктуры.

Задачей будущих исследований является продолжение и совершенствование мониторинга состояния пляжей ЮБК с целью прогнозирования и улучшения их экологического состояния.

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Работа выполнена в рамках научной темы 0555-2021-0005 государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ 2021 г.

**ACKNOWLEDGEMENTS**

The work was carried out within the framework of the scientific theme 0555-2021-0005 of the State assignment of Marine Hydrophysical Institute RAS, 2021.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Богуславский А.С., Кузнецов А.С. Казаков С.И.* Факторы формирования галечных пляжей береговой зоны Горного Крыма. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. Севастополь: 2016. Вып. 1. С. 46–54.
2. *Горячкин Ю.Н., Фомин В.В.* Волновой режим и литодинамика в районе аккумулятивных берегов Западного Крыма. Морской гидрофизический журнал, 2020. Т. 36. № 4. С. 451–466.
3. *Зенкович В.П.* Морфология и динамика советских берегов Черного моря. Т. 1, 2. М.: АН СССР, 1960. 215 с.
4. *Косьян Р.Д., Крыленко М.В.* Опыт защиты от волновой эрозии восточного побережья Черного моря [Электронное издание]. Геленджик: ЮО ИО РАН, 2008. <http://www.coruna.coastdyn.ru/pg024.html>.
5. *Наумова В.А., Евстигнеев М.П., Евстигнеев В.П., Любарец Е.П.* Ветро-волновые условия азово-черноморского побережья Украины. Тр. УкрНИГМИ, 2010. Вып. 259. С. 263–283.
6. *Орлова М.С., Долотов В.В., Иванов В.А.* Разработка кадастровой оценки пляжей на примере Крымского побережья. Труды международной конференции, «Латвия-Европа, Европа-Латвия» Латвия, Rezekne, SIA "JUMI", ВКИ, 2006. С. 103–104.
7. *Репетин Л.Н., Белокопытов В.Н.* Режим ветра над побережьем и шельфом северо-восточной части Черного моря. Тр. УкрНИГМИ, 2008. Вып. 257. С. 84–105.
8. *Удовик В.Ф., Горячкин Ю.Н.* Межгодовая изменчивость вдольберегового потока наносов в береговой зоне Западного Крыма. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное исследование ресурсов шельфа. Севастополь: 2013. Вып. 27. Т. 1. С. 363–368.
9. *Шадрин Н.В.* Выбросы водорослей в супралиторали Черного моря: экологическая и геохимическая роль. Докл. НАН Украины, 1998. №3. С. 192–195.
10. *Шулейкин В.В.* Физика моря. М: Наука, 1968. 1084 с.
11. *Wadell H.* Volume, shape, and roundness of rock particles. J. Geol., 1932. No 40. P. 443–451.
12. *Inman D.L., and Filloux J.* Beach cycles related to tide and local wind wave regime. The Journal of Geology, 1960. V. 68. No 2. P. 225–231.

**REFERENCES**

1. *Boguslavsky A.S., Kuznetsov A.S., Kazakov S.I.* Factors of pebble beach formation in the coastal zone of the mountain Crimea. Ecological safety of coastal and shelf zones of sea, Sevastopol, 2016. Issue 1. P. 46–54 (in Russian).
2. *Goryachkin Yu.N., Fomin V.V.,* 2020. Wave Regime and Lithodynamics in the Region of the Western Crimea Accumulative Coasts. Physical Oceanography, [e-journal], 2020. V. 27. No 4. P. 415–429. DOI:10.22449/1573-160X-2020-4-415-429 (in Russian).
3. *Inman D.L., and Filloux J.* Beach cycles related to tide and local wind wave regime. The Journal of Geology, 1960. V. 68. No 2. P. 225–231.
4. *Kosyan R.D., Krylenko M.V.* Experience of protection against wave erosion of the eastern coast of the Black Sea [e-journal]. Gelendzhik: SO IO RAS, 2008. <http://www.coruna.coastdyn.ru/pg024.html> (in Russian).



5. *Naumova V.A., Evstigneev M.P., Evstigneev V.P., Lyubarets E.P.* Wind-wave conditions of the Azov-Black Sea coast of Ukraine. Proceedings of UkrNIGMI, 2010. Issue 259. P. 263–283 (in Russian).
  6. *Orlova M.S., Dolotov V.V., Ivanov V.A.* Development of a cadastral assessment of beaches on the example of the Crimean coast. Proceedings of the international conference, "Latvia-Europe, Europe-Latvia" Latvia, Rezekne, SIA "JUMI", BKI, 2006. P. 103–104 (in Russian).
  7. *Repetin L.N., Belokopytov V.N.* Wind regime over the coast and shelf of the northeastern part of the Black Sea. Proceedings of UkrNIGMI, 2008. Issue 257. P. 84–105 (in Russian).
  8. *Shadrin N.V.* Emissions of algae in the Black Sea supralittoral: ecological and geochemical role. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1998. No 3. P. 192–195.
  9. *Shuleikin V.V.* Physics of the sea. Moscow: Nauka, 1968. 1084 p. (in Russian).
  10. *Udovik V.F., Goryachkin Yu.N.* Interannual variability of alongshore sediment flow in the coastal zone of Western Crimea. Ecological safety of the coastal and shelf zones and comprehensive research of shelf resources. Sevastopol: 2013. Issue 27. V. 1. P. 363–368. (in Russian).
  11. *Wadell H.* Volume, shape, and roundness of rock particles. J. Geol., 1932. No 40. P. 443-451.
  12. *Zenkovich V.P.* Morphology and dynamics of the Soviet Black Sea coast. V. 1, 2. Moscow: AN SSSR, 1960. 215 p. (in Russian).
-

УДК: 551.466

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-98-107

Е.Е. Химченко<sup>1</sup>, А.Н. Серебряный<sup>2</sup>, А.А. Коныхова<sup>3</sup>

## КОРОТКОПЕРИОДНЫЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ НА КРУТОМ ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ ЛЕТОМ 2018 ГОДА

### АННОТАЦИЯ

Представлены результаты анализа данных по наблюдению за короткопериодными внутренними волнами на северо-восточном шельфе Черного моря в июне 2018 г. Исследуемый район отличается узким шельфом с резким свалом глубин, уклон дна составляет 23°.

Измерения велись со стационарного морского павильона Института экологии академии наук Абхазии, где глубина места достигает 13 м. На глубине 52 м была установлена заякоренная станция, оснащенная автономными точечными датчиками температуры.

На платформе велись наблюдения за изменчивостью температурной структуры моря при помощи точечных датчиков температуры, автономного распределенного датчика температуры (РДТ) и вертикальных ежечасных профилирований при помощи зонда. Дополнительно акустическим доплеровским профилометром течений ADCP велась регистрация прибрежных течений у платформы.

В результате анализа установлен частый подход квазиинерционных внутренних волн близко к берегу. Зарегистрированы цуги короткопериодных внутренних волн и уединенные волны, относящиеся к первой моде, а также отдельные проявления внутренних волн второй моды.

Приводятся примеры наблюдаемых волн, а также их параметры. За все время измерений чаще всего регистрировались внутренние волны с периодом 5–10 мин и высотой 1–2 м. Уединенные волны отличались большим периодом и высотой. Установлено, что короткопериодные внутренние волны в месте измерений преимущественно привязаны к подходящим к берегу квазиинерционным внутренним волнам.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** короткопериодные внутренние волны, Черное море, шельф.

---

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Нахимовский проспект, 117997, д. 36, г. Москва, Россия, *e-mail*: [ekhymchenko@gmail.com](mailto:ekhymchenko@gmail.com)

<sup>2</sup> АО «Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева», ул. Шверника, 4, 117036, г. Москва, Россия, *e-mail*: [serebryany@hotmail.com](mailto:serebryany@hotmail.com)

<sup>3</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Россия, *e-mail*: [konyuhova.aa@phystech.edu](mailto:konyuhova.aa@phystech.edu)

Elizaveta E. Khimchenko<sup>1</sup>, Andrey N. Serebryany<sup>2</sup>, Anastasia A. Konukhova<sup>3</sup>

## SHORT-PERIOD INTERNAL WAVES ON THE STEEP SHELF OF THE BLACK SEA IN SUMMER 2018

### ABSTRACT

The results of the analysis of data on observation of short-period internal waves on the northeastern shelf of the Black Sea in June 2018 are presented. The study area is distinguished by a narrow shelf with a sharp drop in depths, the bottom slope is 23 °. The measurements were carried out from the stationary marine platform of The Institute of Ecology of the Academy of Sciences of the Abkhazian Republic, where the depth of the site reaches 13 m. An anchored station was installed, equipped with autonomous point temperature sensors at a depth of 52 m. At the platform, the variability of the sea temperature structure was monitored using point temperature sensors, an autonomous line temperature sensor (LTS), and vertical hourly profiling using a probe. In addition, coastal currents were measured by the acoustic Doppler current profiler ADCP equipped near the platform. As a result of the analysis, a frequent approach of near-inertial internal waves close to the coast was revealed. Trains of short-period internal waves and solitary waves related to the first mode, as well as individual manifestations of internal waves of the second mode, were recorded. Examples of observed waves and their parameters are given. During the entire observation period, internal waves with a period of 5–10 min and a height of 1–2 m were most often recorded. Solitary waves were distinguished by a large period and height. It was found that short-period internal waves at the measurement site are predominantly tied to near-inertial internal waves which approach the coast.

**KEYWORDS:** short-period internal waves, the Black Sea, shelf.

### ВВЕДЕНИЕ

Внутренние волны – природный феномен, изучение которого представляет важную научную и практическую значимость, влияя как на физические, так и биологические процессы в шельфовой зоне океанов и морей. Внутренние волны оказывают существенное влияние на вертикальную стратификацию вод, турбулентное перемешивание [Walter et al., 2016], перераспределение питательных веществ [Shea, Broenkow, 1982], и даже на распределение плотности скоплений массовых пелагических рыб [Краснобородько, 2020]. Внутренние волны также воздействуют на распространение акустических сигналов в морской среде [Colosi et al., 2012]. Все это, в конечном счете, сказывается на экологическом состоянии прибрежных морских экосистем [Woodson, 2018].

Короткопериодные внутренние волны – широко распространенное явление на шельфе Мирового океана, генерация которого чаще всего обусловлена нелинейной трансформацией приливных внутренних волн [Jackson, Apel, 2004]. Короткопериодные внутренние волны относятся к высокочастотному диапазону мезомасштабной изменчивости и характеризуются колебаниями в области термоклина (пикноклина) на частотах, близких к частоте Вьяйсяля-Брента (частота плавучести).

<sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Nakhimovskii prospect, 36, 117997, Moscow, Russia, e-mail: ekhymchenko@gmail.com

<sup>2</sup> Andreyev Acoustics Institute, Shvernika st., 4, 117036, Moscow, Russia, e-mail: serebryany@hotmail.com

<sup>3</sup> Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Institutskiy per. 9, 141701, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia, e-mail: konyuhova.aa@phystech.edu

Хотя Черное море относится к бесприливным морям, здесь удастся регистрировать достаточно интенсивное поле внутренних волн и выделять механизмы их генерации, отличные от приливного [Серебряный, Иванов, 2013]. Внутренние волны имеют определяющее значение для понимания процессов обмена в условиях бесприливногo моря, оказывая существенное влияние на вертикальное перемешивание. Наблюдения за внутренними волнами в Черном море ведутся с середины XX века [Ямпольский, 1960; Иванов и др., 1969; Коняев, Сабинин, 1973] и продолжаются в настоящее время [Химченко, Серебряный, 2018; Иванов и др., 2019, Serebryany et al., 2020]. Помимо контактных измерений, ведется регистрация поверхностных проявлений внутренних волн при помощи дистанционного зондирования. Обзор спутниковых наблюдений внутренних волн в Черном море представлен в работе [Lavrova, Mityagina, 2017]. Хотя в последние годы для наблюдения за полем внутренних волн дистанционные методы выходят на первый план, контактные измерения по-прежнему остаются главным источником новой информации об их структуре и параметрах, при сопутствующих гидрофизических измерениях.

Настоящая работа представляет собой анализ натурных наблюдений за внутренними волнами, зарегистрированными в районе северо-восточного шельфа Черного моря в июне 2018 г.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализируемые данные были получены во время прибрежных экспедиционных работ со стационарного морского павильона Института Экологии академии наук Абхазии, а также в акватории м. Красный маяк (м. Сухумский). Наблюдения велись на протяжении 10 суток, начиная с 11 июня 2018 г. Исследуемый район отличается узким шельфом с резким свалом глубин, средний уклон дна составляет около  $23^\circ$ . Такая специфика батиметрии прибрежной зоны способствует формированию особенностей в гидродинамике наблюдаемых прибрежных процессов, в частности, внутренних волн [Serebryany et al., 2020].

Во время работ нами использовалось следующее оборудование: вертикальные цепочки, оснащенные автономными датчиками температуры DST-centi "Starr-Oddi", стационарно закрепленный акустический доплеровский профилометр течений ADCP "Rio Grande 600 kHz", океанографический минизонд температуры и скорости звука miniSVP фирмы "Valeport", а также автономный распределенный датчик температуры (РДТ) [Денисов, Серебряный, 2019]. У основания платформы на глубине 13 м была установлена заякоренная станция, оборудованная точечными измерителями и автономным РДТ. Запись по времени велась с дискретностью 30 с.

Район проведения работ и схема расстановки станций представлены на рис. 1. Справа показано вертикальное распределение частоты плавучести в месте наблюдений. На глубине 52 м располагалась станция, оснащенная только точечными датчиками температуры.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для района наблюдений характерно регулярное проявление квазиинерционных внутренних волн, которые здесь подходят близко берегу, что обусловлено особенностями рельефа дна. В свою очередь прохождение длинных инерционных внутренних волн сопровождается генерацией короткопериодных внутренних волн [Serebryany et al., 2020].

Рассматриваемый материал хорошо иллюстрирует подход инерционных внутренних волн на мелководье. На рис. 2 представлены записи временной изменчивости температурной структуры водной толщи на глубине 52 м и у платформы за весь срок наблюдений. Заякоренная станция на глубине была установлена 12 июня и поднята 20 июня, соответственно ее запись короче.

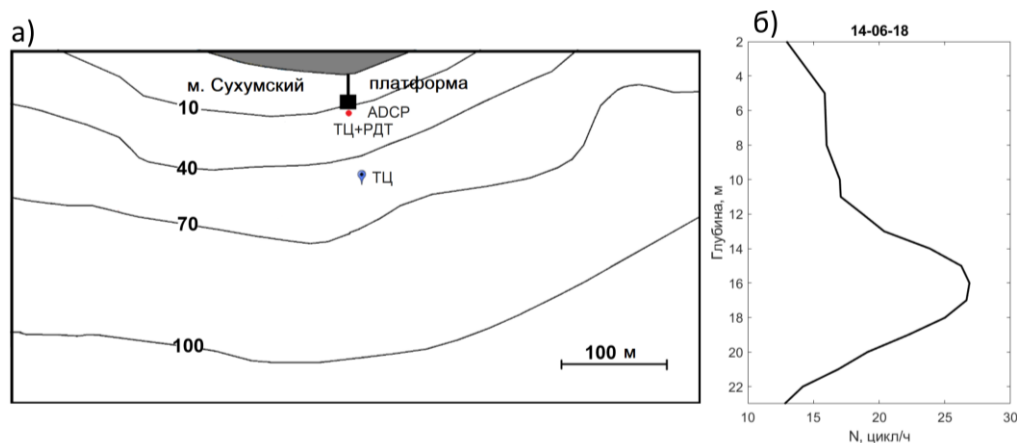


Рис. 1. а) Район проведения работ и схема расстановки станций в июне 2018 г.

б) Вертикальный профиль частоты плавучести 14 июня

Fig. 1. a) The study area and the scheme of stations layout in June 2018

b) The vertical profile of the buoyancy frequency on June 14

На мелководье, в начале наблюдений, термоклин был расположен в приповерхностном слое, к концу измерений, по мере прогревания водной толщи, его положение заглублялось, и 21 июня термоклин оказался на глубине 10 м. На записях температуры прослеживаются хорошо выраженные колебания с периодом, близким к 17–18 ч, что также отмечается и в записях скорости течений. В точке наблюдений локальная инерционная частота составляет 17,6 ч. В первые дни измерений зарегистрирована квазиинерционная волна высотой 6 м. В последующие дни у платформы колебания термоклина с инерционным периодом имели высоты порядка 2–3 м.

На глубоководной станции положение термоклина изменялось в пределах от 25 м до 15 м. В моменты прохождения квазиинерционных внутренних волн положение термоклина смещалось на 5–10 м.

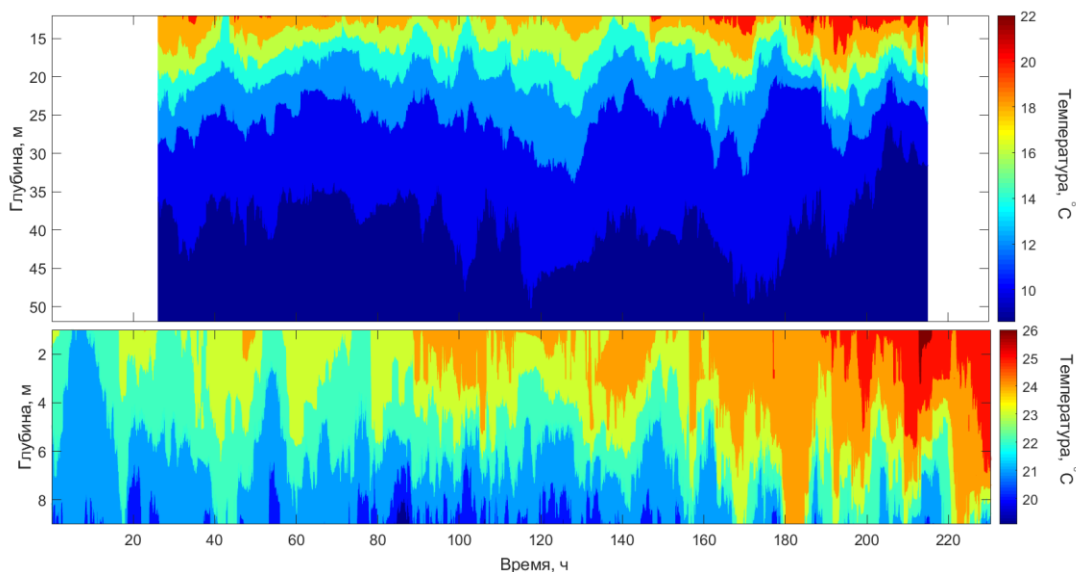


Рис. 2. Временная изменчивость температурной структуры моря по данным цепочки термодатчиков на глубине 52 м и у платформы

Fig. 2. Temporal variability of the sea temperature structure according to the thermistors chains data at 52 m depth and near the platform

На фоне периодических колебаний с инерционной частотой выделяются высокочастотные осцилляции, в большинстве случаев являющиеся проявлением короткопериодных внутренних волн. В качестве примера на рис. 1 представлен профиль частоты плавучести для 14 июня. Максимум частоты Вьясьяля-Брента достигал значений 25–27 цикл/ч и располагался на горизонтах от 14 м до 21 м. За девять суток на глубоководной станции было выделено 35 цугов короткопериодных внутренних волн с высотой от 0,5 м и выше. Колебания с меньшей высотой не рассматривались. Приведем последовательно примеры наблюдаемых внутренних волн первой и второй моды, а затем уединенных внутренних волн. Примечательно, что представленные короткопериодные внутренние волны были зарегистрированы на гребнях проходящих квазиинерционных внутренних волн, а уединенные волны – на переднем фронте. В зависимости от расположения пикноклина (термоклина) ближе к поверхности или ко дну моря, относительно всей толщи в месте наблюдений, наблюдаемые волны могут являться волнами углублений или возвышений. Хотя, как показывают натурные данные, в данном районе это «правило» иногда нарушается.

На рис. 3 представлены примеры регистрации короткопериодных внутренних волн первой моды, зарегистрированные на глубоководной станции. На записи от 12 июня цуг короткопериодных волн состоит из 8 колебаний. Осцилляции распространяются на термоклине, расположенном ближе к поверхности, потому имеют форму волн-углублений. Период волн изменяется от 3 мин до 6 мин, а высота достигает 0,5–1 м. Волны с такими параметрами, в целом, являются достаточно типичными для черноморского бассейна.

На рис. 3 б изображен цуг из пяти волн-возвышений, период которых варьируется в пределах 4–10 мин. Хотя термоклин также расположен ближе к поверхности, форма наблюдаемых волн может быть охарактеризована как волны-возвышения (после 6:47 изотермы поднимаются). Головная волна отличается наибольшей высотой – 3,5 м и периодом 10 мин. За ней следуют две волны с периодом 7 мин и 4 мин, высота волн 1 м и 0,5 м соответственно. Затем спустя 10 мин после прошедшего цуга наблюдается следующий, имеющий более выраженные волны с заостренными вершинами, высота этих волн 2–3 м, период 5 мин.

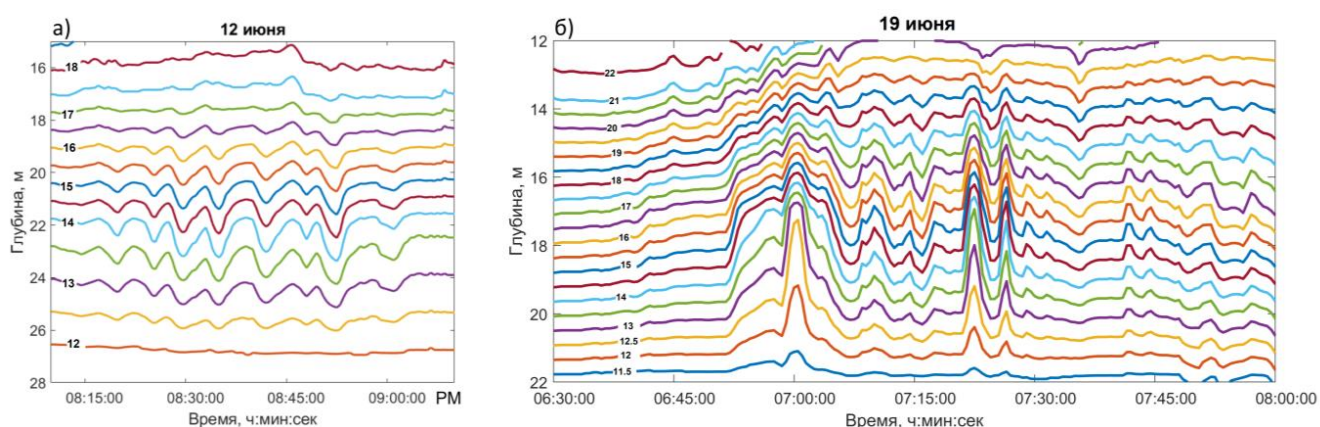


Рис. 3. Временная изменчивость смещения изотерм 12 июня (а) и 19 июня (б) в момент прохождения короткопериодных внутренних волн первой моды

Fig. 3. Temporal variability of the isotherms displacement on June 12 (a) and June 19 (b) during the passage of short-period internal waves of the first mode

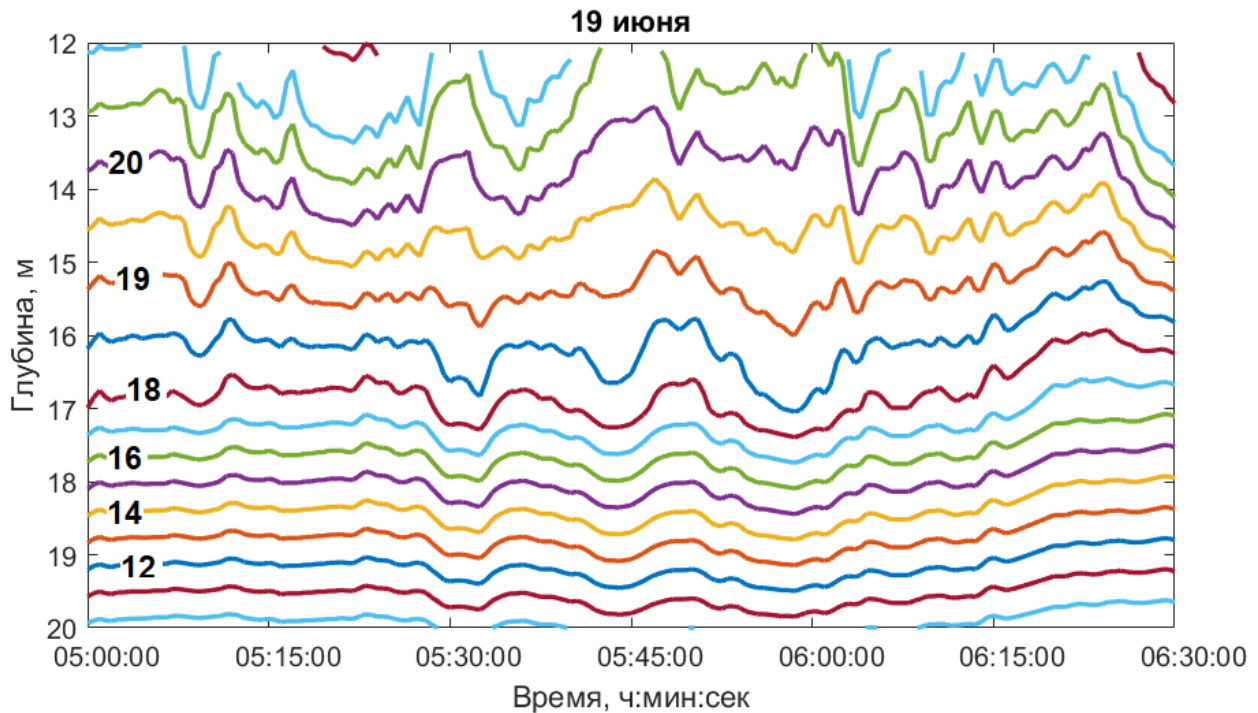


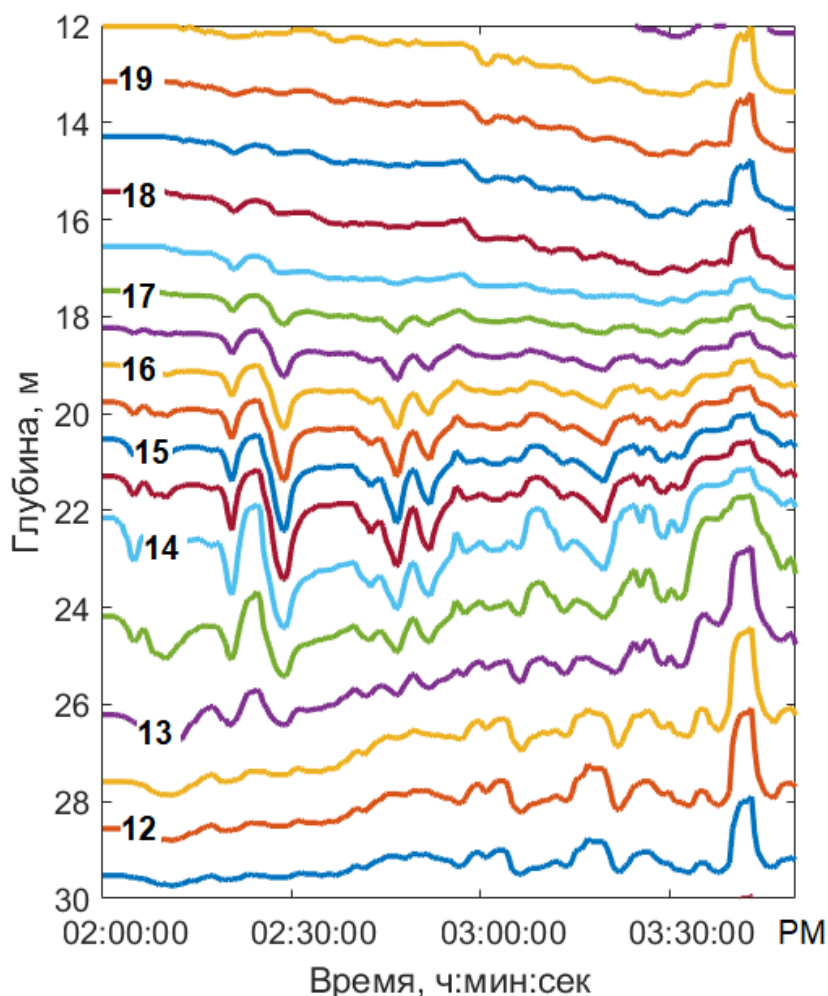
Рис. 4. Временная изменчивость смещения изотерм 19 июня в момент прохождения короткопериодных внутренних волн второй моды

Fig. 4. Temporal variability of the isotherms displacement during the passage of short-period internal waves of the second mode.

Во время летних наблюдений были зарегистрированы короткопериодные внутренние волны, относящиеся ко второй моде (рис. 4). 19 июня от 5:10 ч утра наблюдалось сначала несколько волн-углублений. Вероятно, они в большей степени были выражены в слое выше 12 м, но наши данные ограничены этим горизонтом. Далее от 05:25 ч от горизонта 15 м наблюдается расширение термоклина. На глубине 15 м происходит смещение изотерм вверх, а ниже одновременное заглубление вплоть до горизонта 20 м. Хорошо прослеживаются 2 колебания в виде волн-расширений, их период составил 12 мин. Проявления короткопериодных внутренних волн второй моды в Черном море ранее уже наблюдались [Химченко, Серебряный, 2018; Serebryany et al., 2020]. По данным ADCP известно, что накануне, до регистрации цуга волн второй моды, происходили необычные изменения в вертикальной структуре течений. Наблюдалась резкая смена направления течений с последующей его интенсификацией. Можно предположить, что генерация цуга второй моды обусловлена взаимодействием интенсивного течения с крутым шельфом. Однако это утверждение требует проведения дополнительного анализа.

На рисунке 5 представлены примеры уединенных внутренних волн, зарегистрированных на глубоководной станции. 12 июня периоды незначительных фоновых колебаний перемежались проявлениями одиночных внутренних волн. Первая волна, зарегистрированная около 14:30 имеет период 9 мин и высоту 2 м. Данная волна имеет более крутой передний фронт, что косвенно может указывать на сильную нелинейность процесса. Спустя час на записи во всей толще воды наблюдаются смещения изотерм вверх, вызванные уединенной волной. По своей форме ее можно отнести к волне-возвышения, хотя, как было отмечено выше, пикноклин здесь расположен в слое ближе к поверхности моря. Такое необычное проявление ее формы, возможно, связано с тем, что

данный «солитон» подошел к месту наблюдения из более глубоководной части моря, где имел форму углубления, а подходя к заякоренной станции, вероятно, прошел точку переворота, приняв форму волны-возвышения. Однако, дать точное объяснение, располагая данными лишь в одной точке, невозможно.



*Рис. 5. Временная изменчивость смещения изотерм 12 июня во время прохождения уединенных внутренних волн*

*Fig. 5. Temporal variability of the displacement of isotherms on June 12 during the passage of solitary internal waves*

## ВЫВОДЫ

В работе представлены некоторые результаты анализа натуральных наблюдений внутренних волн, зарегистрированных на крутом шельфе Черного моря в июне 2018 г. На фоне периодических колебаний с инерционной частотой выражены короткопериодные осцилляции, в большинстве случаев являющиеся проявлением высокочастотных внутренних волн. За время наблюдений на глубоководной станции было выделено 35 цугов короткопериодных внутренних волн с высотой от 0,5 м и выше. Чаще всего наблюдались группы внутренних волн первой моды, включающие в себя 3–4 волны высотой 1–2 м и периодом 5–10 мин. В отдельных случаях регистрировались уединенные волны («солитоны»), их период и амплитуда превышали средние значения волн, наблюдаемых в



группах. Это можно объяснить тем, что солитоны внутренних волн отличаются высокой степенью нелинейности. В редких случаях встречались внутренние волны второй моды. Зарегистрированные короткопериодные внутренние волны были сгенерированы на фоне проходящих квазиинерционных внутренних волн.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках темы госзадания Минобрнауки № 0128-2021-0010, обработка и анализ данных выполнены при поддержке гранта Президента РФ МК-5064.2021.1.5, а также гранта РФФИ № 19-05-00715.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института экологии АНА Кенигсбергеру Г.В. и Нешенко И.П., а также сотруднику Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН Попову О.Е. за помощь в проведении работ и сборе экспериментальных данных.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No 0128-2021-0010, data processing and analysis were carried out with the support of a grant of the President of the Russian Federation МК-5064.2021.1.5, and the Russian Foundation of Basic Research, grant No 19-05-00715.

The authors are grateful to the staff of the Institute of Ecology of the ANA Kenigsberger G.V. and Neshenko I.P., as well as an employee of the Institute of Atmospheric Physics. A.M. Obukhov RAS Popov O.E. for their help in carrying out the work and collecting experimental data.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

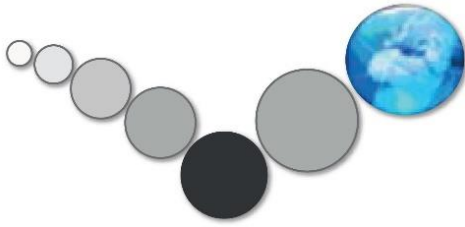
1. *Денисов Д.М., Серебряный А.Н.* Автономный измеритель внутренних волн на основе распределенного датчика температуры. Приборы и техника эксперимента, 2019. №2. С. 159-160. DOI: 10.1134/S0032816219020058.
2. *Иванов Ю.А., Смирнов Б.А., Тареев Б.А., Филюшкин Б.Н.* Экспериментальные исследования колебаний температуры в море в диапазоне частот внутренних гравитационных волн. Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1969. Т. 5. № 3. С. 416–425.
3. *Иванов В.А., Шульга Т.Я., Багаев А.В., Медведева А.В., Пластун Т.В., Вержеская Л.В., Свищева И.А.* Внутренние волны на шельфе Черного моря в районе Герacleйского полуострова: моделирование и наблюдение. Морской гидрофизический журнал, 2019. Т. 35. № 4 (208). DOI:10.22449/0233-7584-2019-4-322–340.
4. *Коняев К.В., Сабинин К.Д.* Новые данные о внутренних волнах в море полученные с помощью распределенных датчиков температуры. ДАН СССР, 1973. Т. 209. № 1. С. 86–89.
5. *Краснобородько О.Ю.* Внутренние волны в шельфовой зоне Марокко в осенние периоды 2015 и 2019 годов. Труды АтлантНИРО, 2020. Т. 4. № 2 (10). Калининград: АтлантНИРО. С. 43–57.
6. *Серебряный А.Н., Иванов В.А.* Исследования внутренних волн в Черном море с океанографической платформы МГИ. Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2013. Т. 6. № 3. С. 34–45.
7. *Химченко Е.Е., Серебряный А.Н.* Внутренние волны на кавказском и крымском шельфах Черного моря (по летне-осенним наблюдениям 2011–2016 гг.). Океаноло-

- гические исследования, 2018. Т. 46. № 2. С. 69–87. DOI:10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(2).7.
8. *Ямпольский А.Д.* О внутренних волнах в Черном море по наблюдениям на многослойной якорной станции. Труды ИОАН СССР, 1960. Т. 39. С. 111–126.
  9. *Colosi J.A., Duda T.F., Lin Y.T., Lynch J.F., Newhall A.E., Cornuelle B.D.* Observations of sound-speed fluctuations on the New Jersey continental shelf in the summer of 2006. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012. V. 131. № 2. P. 1733–1748.
  10. *Jackson C.R., Apel J.* An atlas of internal solitary-like waves and their properties. Contract, 2004. Электронный ресурс: [http://www.internalwaveatlas.com/Atlas2\\_index.html](http://www.internalwaveatlas.com/Atlas2_index.html) (дата обращения 27.04.2021).
  11. *Lavrova O., Mityagina M.* Satellite Survey of Internal Waves in the Black and Caspian Seas. Remote Sensing, 2017. V. 9. № 9. P. 892. DOI:10.3390/rs9090892.
  12. *Serebryany A., Khimchenko E., Popov O., Denisov D., Kenigsberger G.* Internal Waves Study on a Narrow Steep Shelf of the Black Sea Using the Spatial Antenna of Line Temperature Sensors. Journal of Marine Science and Engineering, 2020. V. 8. № 11. P. 833. DOI:10.3390/jmse8110833.
  13. *Shea R.E., Broenkow W.W.* The role of internal tides in the nutrient enrichment of Monterey Bay, California. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1982. V. 15. № 1. P. 57–66.
  14. *Walter R.K., Phelan P.J.* Internal bore seasonality and tidal pumping of subthermocline waters at the head of the Monterey submarine canyon. Continental Shelf Research, 2016. V. 116. P. 42–53. DOI: 10.1016/j.csr.2016.01.015.
  15. *Woodson C. B.* The fate and impact of internal waves in nearshore ecosystems. Annual Review of Marine Science, 2018. V. 10. P. 421–441. DOI:10.1146/annurev-marine-121916-063619.

#### REFERENCES

1. *Colosi J.A., Duda T.F., Lin Y.T., Lynch J.F., Newhall A.E., Cornuelle B.D.* Observations of sound-speed fluctuations on the New Jersey continental shelf in the summer of 2006. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012. V. 131. No 2. P. 1733–1748.
2. *Denisov D.M., Serebrjanyj A.N.* Autonomous internal wave meter based on a distributed temperature sensor. Instruments and experimental techniques, 2019. No 2. P. 159–160. DOI: 10.1134/S0032816219020058. (in Russian).
3. *Himchenko E.E., Serebrjanyj A.N.* Internal waves on the Caucasian and Crimean shelves of the Black Sea (according to summer-autumn observations of 2011–2016). Oceanological research, 2018. Т. 46. No 2. P. 69–87. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(2).7 (in Russian).
4. *Ivanov Ju.A., Smirnov B.A., Tareev B.A., Filjushkin B.N.* Experimental studies of temperature fluctuations in the sea in the frequency range of internal gravitational waves. Izv. of the USSR Academy of Sciences. Atmospheric and Ocean physics, 1969. Т. 5. No 3. P. 416–425 (in Russian).
5. *Ivanov, V.A., Shul'ga, T.Ja., Bagaev, A.V., Medvedeva, A.V., Plastun, T.V., Verzhetskaja, L.V., Svisheva, I.A.* Internal waves on the Black Sea shelf in the area of the Heraclea Peninsula: modeling and observation. Marine Hydrophysical Journal, 2019. Т. 35. No 4 (208). DOI: 10.22449/0233-7584-2019-4-322-340 (in Russian).
6. *Jackson C.R., Apel J.* An atlas of internal solitary-like waves and their properties. Contract, 2004. Электронный ресурс: [http://www.internalwaveatlas.com/Atlas2\\_index.html](http://www.internalwaveatlas.com/Atlas2_index.html) (дата обращения 27.04.2021).
7. *Jampol'skij A.D.* About internal waves in the Black Sea from observations at a multi-day anchor station. Trudy IOAN SSSR, 1960. Т. 39. P. 111–126 (in Russian).

8. *Konjaev K.V., Sabinin K.D.* New data on internal waves in the sea obtained using distributed temperature sensors. DAN SSSR, 1973. T. 209. No 1. P. 86–89.
  9. *Krasnoborod'ko O.Ju.* Internal waves in the offshore zone of Morocco in the autumn periods of 2015 and 2019. Trudy AtlantNIRO, 2020. T. 4. № 2 (10). Kaliningrad: AtlantNIRO. P. 43–57 (in Russian).
  10. *Lavrova O., Mityagina M.* Satellite Survey of Internal Waves in the Black and Caspian Seas. Remote Sensing, 2017. V. 9. No. 9. P. 892. DOI:10.3390/rs9090892.
  11. *Serebrjanyj A.N., Ivanov V.A.* Studies of internal waves in the Black Sea from the MGI oceanographic platform. Fundamental and applied hydrophysics, 2013. T. 6. № 3. P. 34–45 (in Russian).
  12. *Serebryany A., Khimchenko, E., Popov, O., Denisov, D., Kenigsberger, G.* Internal Waves Study on a Narrow Steep Shelf of the Black Sea Using the Spatial Antenna of Line Temperature Sensors. Journal of Marine Science and Engineering, 2020. V. 8. No 11. P. 833. DOI: 10.3390/jmse8110833.
  13. *Shea R.E., Broenkow W.W.* The role of internal tides in the nutrient enrichment of Monterey Bay, California. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1982. V. 15. No 1. P. 57–66.
  14. *Walter R.K., Phelan P.J.* Internal bore seasonality and tidal pumping of subthermocline waters at the head of the Monterey submarine canyon. Continental Shelf Research, 2016. V. 116. P. 42–53. DOI: 10.1016/j.csr.2016.01.015.
  15. *Woodson C.B.* The fate and impact of internal waves in nearshore ecosystems. Annual Review of Marine Science, 2018. V. 10. P. 421–441. DOI:10.1146/annurev-marine-121916-063619.
-



## ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ИЗУЧЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

### GIS SUPPORT FOR CLIMATE CHANGE STUDIES

УДК: 551.583; 528.9; 681.324

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-108-119

Д.К. Абиева<sup>1</sup>, Р.К. Карагулова<sup>1</sup>, А.С. Нысанбаева<sup>2</sup>, Н.Н. Абаев<sup>3</sup>, Г.М. Уразбаева<sup>1</sup>,  
О.В. Радуснова<sup>1</sup>, Ж.М. Шарапханова<sup>1</sup>, А.К. Толепбаева<sup>1</sup>

#### ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОЕ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА КАЗАХСТАНА

##### АННОТАЦИЯ

Данные моделирования по изменению климата представляют собой большие массивы данных, требующие определенных компетенций и вычислительных ресурсов для их преобразования и адаптации к потребностям пользователей. В качестве решения проблемы в статье рассматриваются геопространственные веб-приложения и геопорталы. Глобальные веб-ресурсы не предоставляют геоинформационную поддержку исследованиям изменения климата Казахстана в силу агрегирования или низкого разрешения исходных данных и ограниченности функционала для интерактивной геовизуализации и анализа данных.

В статье приводится описание разработанного авторами веб-приложения «Kazakhstan Climate Change», цель которого – поддержка исследований пространственно-временных особенностей изменения климата Казахстана. В качестве исходных данных используются данные моделей CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project – Проект сравнения объединенных моделей). На основе исходных показателей по температуре и осадкам с помощью разработанных скриптов Python и климатических пакетов скриптов R Climpack рассчитаны дополнительные показатели для определения влияния изменения климата на водные ресурсы и сельское хозяйство – эвапотранспирация, индексы засухливости, теплообеспеченности и продолжительности вегетационного периода. К ключевым преимуществам приложения отнесены геовизуализация time-series, интерактивность формирования диаграмм и таблиц для проведения анализа, в том числе для выбранных единиц водохозяйственного районирования.

Геопространственное веб-приложение «Kazakhstan Climate Change» решает задачу представления пользователям большого массива климатических данных в виде информации легкой для восприятия и геовизуального анализа. Функционал веб-приложения поз-

---

<sup>1</sup> АО «Институт географии и водной безопасности» Министерства образования и науки Республики Казахстан, Центр геоинформационных технологий, ул. Пушкина д. 99, 050010, Алматы, Казахстан, *e-mail: dabiyeva@gmail.com*

<sup>2</sup> Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Географический факультет, пр. аль-Фараби, 71, 050040, Алматы, Казахстан, *e-mail: ayman.nysanbaeva@kaznu.kz*

<sup>3</sup> РГП «КАЗГИДРОМЕТ», Министерство экологии, геологии и природных ресурсов Республики Казахстан, проспект Мәңгілік ел 11/1, 010000, Нур-Султан, Казахстан, *e-mail: abayev.nurlan@gmail.com*

воляет пользователям, без навыков работы в ГИС, самостоятельно исследовать сценарии изменения климата, что представляет практическую ценность для научного и образовательного сообщества, для лиц, определяющих политику в области изменения климата, управления водными ресурсами.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** геопространственное веб-приложение, изменение климата, временной ряд, геовизуализация, веб-сервис покрытий WCS.

**Dinara K. Abiyeva<sup>1</sup>, Poza K. Karagulova<sup>1</sup>, Aiman S. Nysanbaeva<sup>2</sup>, Nurlan N. Abayev<sup>3</sup>, Gulzhamila M. Urazbayeva<sup>1</sup>, Olga V. Radusnova<sup>1</sup>, Zhanerke M. Sharapkhanova<sup>1</sup>, Akmaral K. Tolepbaeva<sup>1</sup>**

## GEOSPATIAL WEB APPLICATION TO SUPPORT CLIMATE CHANGE RESEARCH IN KAZAKHSTAN

### ABSTRACT

Climate change modelling data is represented by large datasets that require certain expertise and computational resources for its transformation and adjustment to user needs. Geospatial web applications and geoportals are considered as a solution to this problem in this article. Global web resources do not provide geoinformation services for research on climate change in Kazakhstan due to aggregation or low resolution of the source data coupled with limited functionality for interactive geo-visualization and data analysis.

The article describes the web application “Kazakhstan Climate Change” developed by the authors, the purpose of which is aimed at supporting research on spatial-temporal patterns of climate change in Kazakhstan. The data derived from CMIP5 models served as the source data. Based on the initial indicators such as temperature and precipitation, using the developed Python scripts and R Climact climate script packages, additional indicators such as evapotranspiration, drought indices, heat supply indices and indices of the length of the growing season were calculated in order to determine the impact of climate change on water resources and agriculture. The key advantages of the web application include time-series geo-visualization, interactive generation of diagrams and tables for analysis, in particular for selected units of water management zoning.

The geospatial web application “Kazakhstan Climate Change” responds to the challenges of presenting large climate datasets in the easy-to-perceive style and in an easily comprehensible way for geospatial analysis. The functionality of the web application allows users, without GIS skills, to explore climate change scenarios on their own, this opportunity is of practical value for scientific and educational community, for policymakers in the field of climate change and water resources management.

**KEYWORDS:** geospatial web-application, climate change, time-series, geo-visualization, Web Coverage Service WCS.

<sup>1</sup> JSC "Institute of Geography and Water Safety" Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan, Center for Geoinformation Technologies, 99 Pushkin St., 050010, Almaty, Kazakhstan, e-mail: [dabiyeva@gmail.com](mailto:dabiyeva@gmail.com)

<sup>2</sup> Kazakh National University named after al-Farabi, Geographical Faculty, 71 Al-Farabi Avenue, 050040, Almaty, Kazakhstan, e-mail: [ayman.nysanbaeva@kaznu.kz](mailto:ayman.nysanbaeva@kaznu.kz)

<sup>3</sup> RSE "KAZHYDROMET", Ministry of Ecology, Geology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan, 11/1 Mangilik Yel Avenue, 010000, Nur-Sultan, Kazakhstan, e-mail: [abayev.nurlan@gmail.com](mailto:abayev.nurlan@gmail.com)

## ВВЕДЕНИЕ

Проявления и последствия глобального изменения климата по-разному проявляются на региональном и местном уровнях [Nkoana et al., 2018; Ojha et al., 2018]. В седьмом национальном Сообщении и третьем двухгодичном Докладе Республики Казахстан по Рамочной конвенции ООН об изменении климата указывается, что процесс изменения климата в Казахстане происходит настолько быстро, что природные экосистемы не успевают адаптироваться. Изменение климата несет угрозу обеспечению водной и продовольственной безопасности страны. В перспективе изменение климата может вызвать проблемы, связанные с обеспечением водой водохозяйственных комплексов, поддержанием экологического равновесия, выполнением требований энергетических, рыбохозяйственных, судохозяйственных и других попусков<sup>1</sup>.

Для лучшего понимания изменений климата и управления климатическими рисками, обоснования политических решений важно иметь доступ к согласованным и надежным данным и информационным продуктам, адаптированным к потребностям пользователей. Это требует глубокого понимания потребностей пользователей и контекста, в котором работают эти пользователи [Buontempo et al., 2020].

Достижения геоинформационных технологий позволяют выполнять геопространственные вычисления, моделирование, геовизуализацию и анализ данных, управлять пространственной информацией и извлекать новые знания [Katpatal, 2018]. Веб-картографирование представляет собой инструмент для интеграции и распространения разнообразной информации [Siles et al., 2018]. Популярности веб-приложений способствует интерактивность пользовательского интерфейса и возможность проведения операций с пространственными данными. Интерактивные визуализации, позволяют широкому кругу пользователей самостоятельно исследовать среды и сценарии изменения климата [Bennett et al., 2012], что позволяет использовать ГИС для поддержки принятия решений как в стратегическом планировании, так и в решении оперативных задач [Kitka et al., 2018].

Данные по климатическим параметрам изменения климата, находящиеся в открытом доступе, требуют определенных компетенций и вычислительных ресурсов для их преобразования и дальнейшего использования. В настоящее время доступны различные глобальные, региональные и национальные геопорталы и веб-приложения, связанные с изменением климата, которые предоставляют возможность геовизуализации климатических параметров изменения климата. Среди них можно выделить приложение «KNMI Climate Change Atlas» Всемирной метеорологической организации<sup>2</sup>, портал Climate Change Knowledge Portal Всемирного банка<sup>3</sup>, портал данных Climate Change Scenarios Национального центра атмосферных исследований США<sup>4</sup>, приложения Климатического центра Росгидромета по сценарным прогнозам на основе глобальных<sup>5</sup> и региональных<sup>6</sup> моделей.

<sup>1</sup> Министерство энергетики Республики Казахстан, Программа Развития ООН в Казахстане, Глобальный Экологический Фонд. Седьмое национальное Сообщение и третий двухгодичный Доклад Республики Казахстан Рамочной конвенции ООН об изменении климата. Астана, 2017. 307 с.

<sup>2</sup> KNMI Climate Change Atlas. Электронный ресурс: [https://climexp.knmi.nl/plot\\_atlas\\_form.py](https://climexp.knmi.nl/plot_atlas_form.py) (дата обращения 08.04.2021).

<sup>3</sup> Climate Change Knowledge Portal. Электронный ресурс: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/> (дата обращения 17.06.2020).

<sup>4</sup> Climate Change Scenarios. Электронный ресурс: <https://gisclimatechange.ucar.edu/> (дата обращения 17.09.2020).

<sup>5</sup> Сценарные прогнозы на основе глобальных моделей. Электронный ресурс: <http://cc.voeikovmgo.ru/ru/klimat/izmenenie-klimata-rossii-v-21-veke> (дата обращения 12.03.2021).

<sup>6</sup> Сценарные прогнозы на основе региональной модели. Электронный ресурс: <http://cc.voeikovmgo.ru/ru/klimat/lf-hr> (дата обращения 17.09.2020).

Веб-портал Climate Impacts Online Потсдамского Института Исследования Изменения Климата и Национальной Метеослужбы Германии был использован в качестве примера геовизуализации результатов по сценариям изменения климата. Данный веб-ресурс предоставляет данные по изменению климата на территории Германии, а также прогноза его влияния на различные сектора (сельское хозяйство, лесное хозяйство, гидрология, энергетика, здоровье и туризм). Данные доступны за период 1901–2010 гг. (наблюдаемые данные) и 2011–2100 гг. (прогнозные данные). Функционал карты представлен панелью фильтра для выбора сценария изменения климата (репрезентативные траектории концентраций (далее RCP), периода осреднения данных (10- и 30-летий), временного масштаба (сезонные и годовые данные), построения диаграмм по выбранной точке и выходных таблиц. Результаты прогноза изменения климата или его воздействия на сектора можно посмотреть в виде карт time-series с помощью бегунка времени.

Хотя глобальные геопространственные веб-приложения и геопорталы по изменению климата предоставляют данные и на территорию Казахстана, они не могут внести достаточный вклад для поддержки исследований по изменению климата Казахстана по нескольким причинам. Во-первых, картографические данные этих веб-ресурсов представлены в агрегированном виде на уровне страны или с низким разрешением. Во-вторых, приложения не предоставляют возможность их геовизуализации в виде карт time-series. В-третьих, возможности интерактивного анализа данных в рассмотренных глобальных приложениях значительно ограничены.

Цель данного исследования заключалась в разработке геопространственного веб-приложения для поддержки исследований пространственно-временных особенностей изменения климата Казахстана. Разработанное геопространственное веб-приложение «Kazakhstan Climate Change» решает задачу представления пользователям большого массива климатических данных в виде информации легкой для восприятия и геовизуального анализа.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве входных данных для геопространственного веб-приложения использовались векторный слой границ водохозяйственных бассейнов и участков (далее ВХУ) и наборы климатических данных (суточная максимальная и минимальная температуры, суточное количество осадков) ансамбля из 21 моделей, участвовавших в CMIP5. Анализ источников данных для прогноза изменения климата Казахстана показал, что данные моделей CMIP5, предоставленные платформой NASA NEX-GDDP на настоящий момент являются наиболее предпочтительными и скорректированными на системные ошибки на основе исторических данных<sup>1</sup>. Данные представлены ретроспективными данными (1950–2005 гг.) и данными проекций климата для сценариев RCP 4.5 и RCP 8.5 (2006–2100 гг.). Пространственное разрешение данных 0,25 градуса. Межмодельный разброс средних годовых значений температуры воздуха для территории Казахстана [Белдеубаев, 2019], рассчитанный для исторического периода 1980–1999 гг. по ансамблю из 21 модели CMIP5 небольшой и составляет всего  $\pm 0,25$  °C. Максимальные отклонения отмечаются в некоторых центральных и северных районах Казахстана, что соответствует районам с наибольшей изменчивостью температуры. Для температур зимнего и весеннего сезонов максимальные значения отклонений достигают  $\pm 0,4$  °C, лет-

<sup>1</sup> NEX-GDDP: Global Daily Downscaled Projections for Studies of Climate Change Impacts. Электронный ресурс: [https://esgf.nccs.nasa.gov/esgdoc/NEX-GDDP\\_Tech\\_Note\\_v0.pdf](https://esgf.nccs.nasa.gov/esgdoc/NEX-GDDP_Tech_Note_v0.pdf) (дата обращения 20.04.2020).

него и осеннего –  $\pm 0,3$  °C<sup>1</sup>. Данные были скачаны с сайта NASA Center for Climate Simulation<sup>2</sup>. Данные выгружались по экстенду, который охватывал все бассейны трансграничных рек Казахстана.

Объем скачанных данных составил примерно 60 млрд записей пространственно-временного формата NetCDF. Одной из техник анализа больших данных является ансамблевый анализ данных [Hong Shu, 2016]. Выгруженные в формате NetCDF климатические данные пересчитывались в осредненные данные ансамбля и загружались в СУБД. Затем суточные данные пересчитывались в среднемесячные, среднесезонные, среднегодовые показатели в разрезе периодов осреднения (десятилетий, двадцатилетий, тридцатилетий). На основе значений максимальной и минимальной температуры рассчитывались значения среднемесячной температуры.

Расчет отклонений значений параметров каждого периода осреднения от средних многолетних значений базовых периодов проведен для ретроспективных данных с 1950 г. по 2005 г., а также для двух климатических сценариев для периода с 2006 по 2100 гг. Согласно Руководящим указаниям ВМО по расчету климатических норм<sup>3</sup> в качестве опорного периода для долгосрочной оценки изменения климата по 30-летним осреднениям определен период с 1961 по 1990 гг. В связи с тем, что с 2000 по 2005 гг. – ретроспективная проекция климата, с 2006 г. – прогнозная проекция, в качестве базового периода для 10-летнего осреднения определен период 1991–2000 гг., для 20-летнего – 1981–2000 гг.

Для изучения влияния изменения климата на формирование водных ресурсов, кроме показателей температуры и осадков, требуются данные по суммарному испарению – эвапотранспирации (ET).

*Методика расчета эвапотранспирации.* Эвапотранспирация (ET) – это сочетание двух отдельных процессов, при которых почва теряет воду через испарение, а растения – через транспирацию. Основными метеорологическими параметрами, влияющими на эвапотранспирацию, являются: температура воздуха, радиация, скорость ветра влажность. Испаряющая сила атмосферы выражается эталонной эвапотранспирацией (ET<sub>0</sub>), которая представляет собой эвапотранспирацию со стандартной растительной поверхности.

Следовательно, ET<sub>0</sub> является климатическим параметром и может быть подсчитана, исходя из метеоданных. ET<sub>0</sub> выражает испаренную силу атмосферы в конкретной местности и для конкретного времени года и не зависит от сельхозкультур или типа почвы.

В мае 1990 г. Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО) в сотрудничестве с Международной комиссией по ирригации и дренажу (МКИД) и Всемирной метеорологической организацией (ВМО), рекомендовали принять комбинированный метод Пенмана-Монтейта (Penman-Monteith) за новый стандарт расчета эталонной эвапотранспирации. Метод Пенмана-Монтейта рекомендован как единственный метод определения ET<sub>0</sub>, так как он хорошо аппроксимирует ET<sub>0</sub> для травы исследуемой местности к физически обоснованным, физиологическим и аэродинамическим параметрам<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> Седьмое национальное Сообщение и третий двухгодичный Доклад Республики Казахстан Рамочной конвенции ООН об изменении климата. Программа Развития ООН в Казахстане. Электронный ресурс: [http://sustainable.eep.kz/upload/RUS\\_Saulet\\_Report\\_12-2017\\_RUS.pdf](http://sustainable.eep.kz/upload/RUS_Saulet_Report_12-2017_RUS.pdf) (дата обращения 20.04.2020).

<sup>2</sup> NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP). Электронный ресурс: <https://www.nccs.nasa.gov/services/data-collections/land-based-products/nex-gddp> (дата обращения 20.04.2020).

<sup>3</sup> Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм ВМО-№ 1203. Электронный ресурс: [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=4168](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4168). (дата обращения 23.09.2019).

<sup>4</sup> Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 1998. 300 с. (FAO irrigation and drainage paper; 56). ISBN 92-5-104219-5.



Для повышения совместимости метеорологических данных, замеры должны производиться на высоте 2 м (или преобразованы для этой высоты) над обширной поверхностью зеленой травы, затеняющей поверхность и хорошо увлажненной. Уравнение Пенмана-Монтейта (по методике ФАО) может быть выведено из комбинированного уравнения Пенмана-Монтейта и уравнений аэродинамического и поверхностного сопротивлений. Уравнение Пенмана-Монтейта:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

- $ET_0$  - эталонная эвапотранспирация [мм сут<sup>-1</sup>];
- $R_n$  - чистая радиация на поверхности растений [МДж м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup>];
- $G$  - плотность теплового потока почвы [МДж м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup>];
- $T$  - среднесуточная температура воздуха на высоте 2 м [°C];
- $u_2$  - скорость ветра на высоте 2 м [м с<sup>-1</sup>];
- $e_s$  - давление пара насыщения [кПа];
- $e_a$  - фактическое давление [кПа];
- $(e_s - e_a)$  - дефицит давления пара насыщения [кПа];
- $\Delta$  - уклон кривой давления пара [кПа °C<sup>-1</sup>];
- $\gamma$  - психрометрическая постоянная [кПа °C<sup>-1</sup>].

Уравнение Пенмана-Монтейта требует данных по температуре и влажности воздуха, солнечной радиации и скорости ветра для суточных, недельных и месячных расчетов.

*Алгоритм расчета эвапотранспирации по историческим данным и по данным климатических прогнозов (сценарий климата).* В связи с тем, что прогностические данные имеются только по температуре воздуха и количества осадков, нами предлагается проведение расчетов по процедуре с недостающими данными. Таким образом, расчеты по ретроспективным данным и данным климатических прогнозов могли быть сопоставимы между собой. Уравнение Пенмана-Монтейта определяет эвапотранспирацию с гипотетической эталонной травяной поверхности, с которой можно сопоставлять эвапотранспирацию для различных периодов года или других регионов, а также других культур.

Процедура расчета состоит из следующих шагов: **1.** Расчет температурно-влажностных параметров (средняя месячная температура  $T_{mean}$ ; градиент кривой давления пара  $\Delta$ ; атмосферное давление в зависимости от высоты местности  $P$ ; давление пара насыщения  $e_s$ ) из суточной максимальной ( $T_{max}$ ) и минимальной ( $T_{min}$ ) температуры воздуха, абсолютной отметки местоположения ( $z$ ) и средней скорости ветра ( $u_2$ ). **2.** Для определения эвапотранспирации необходимы данные скорости ветра на высоте 2 м над поверхностью Земли. Чтобы скорректировать данные по скорости ветра, измеренной на другой высоте, согласно предложенной методике, используется логарифмический ветровой профиль для измерений над поверхностью с коротким травяным покровом или же рассчитанный переводной множитель<sup>15</sup>. **3.** Расчет дефицита давления пара ( $e_s - e_a$ ). Давление пара насыщения ( $e_s$ ) рассчитываются из  $T_{max}$  и  $T_{min}$ , а фактическое давление пара ( $e_a$ ) может быть выведено из температуры точки росы ( $T_{dew}$ ), максимальной ( $RH_{max}$ ) и минимальной ( $RH_{min}$ ) относительной влажности, из максимальной ( $RH_{max}$ ) или средней ( $RH_{mean}$ ) относительной влажности. **4.** Определение чистой радиации ( $R_n$ ) как разницы между чистой коротковолновой ( $R_{ns}$ ) и чистой длинноволновой ( $R_{nl}$ ) радиациями. Влияние почвенного теплового потока ( $G$ ) для суточных расчетов игнорируется,

поскольку его величина сравнительно мала. Чистая радиация, выраженная в МДж м-2сут-1, преобразуется в мм/сут (эквивалентное испарение) в уравнении Пенмана-Монтейта с помощью преобразующего коэффициента 0,408.

В рамках исследования определен перечень расчетных показателей, характеризующих прямое и опосредованное влияние изменения климата на сельское хозяйство. Для расчета значений следующих групп показателей – индексы засушливости, показатели теплообеспеченности и продолжительности вегетационного периода использованы готовые климатические пакеты скриптов R Climpact<sup>1, 2</sup>.

Полученные расчетные показатели изменения климата с помощью скриптов Python конвертированы в растровые наборы для последующей публикации в виде веб-сервисов покрытий WCS (Web Coverage Service) для поддержки визуализации time-series.

Веб-приложение «Climate change» использует компоненты геопортала, созданного на платформе GeoNode – GeoServer как пространственного сервера и СУБД PostgreSQL+PostGIS как пространственную базу данных. Реализация основного бэкенда веб-приложения «Climate change» написана на C#, который передает функции, связанные с бизнес-логикой бэкенду GeoNode – Django. В качестве картографического клиента использует OpenLayers.

Серверная часть приложения отвечает за создание директории хранения растров, загрузку растров и создание из них мозаики пространственно-временных наборов растров с таблицей индексов в базе PostgreSQL+PostGIS и файлами конфигурации свойств, определение поля атрибута измерения времени, назначения стиля отображения и публикации в виде картографических сервисов и сервисов покрытия, расчеты средних значений параметров для пользовательских и предопределенных территориальных единиц – ВХУ.

Для интерпретации данных карт разработаны шкалы градаций показателей на основе естественных границ, определяемых автоматически на основе анализа всего массива значений или на основе принятых в климатологии градаций данных. На основе шкал градаций для каждой мозаики наборов данных разработана легенда для визуализации в формате SLD файла и загружена на GeoServer для оформления картографических веб-сервисов.

Используемые технологии, методы обработки и извлечения данных, позволяют автоматизировать формирование большого массива геопро пространственных данных, их хранение и управление с целью веб-представления знаний по изменению климата Казахстана.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Веб-приложение «Kazakhstan Climate Change» предоставляет возможность визуализации тематических карт time-series по изменению климата Казахстана и сопредельных территорий с 1950 по 2100 г. и их геовизуального анализа, в том числе интерактивное формирование диаграмм и таблиц, агрегирования и выгрузки данных.

В общей сложности в растровое хранилище приложения на GeoServer загружено 16 196 среднемесячных, сезонных и годовых растровых карт по периодам осреднения данных и сценариям проекций по RCP 4.5 и 8.5, из которых сформированы 306 мозаик для публикации веб-сервисов покрытий WCS в виде time-series.

Веб-приложение представлено двумя пользовательскими интерфейсами, которые условно назовем картографическим и аналитическим интерфейсом.

<sup>1</sup> Providing climate science basis for climate adaptation and mitigation activities. Электронный ресурс: <https://climateinformation.org/> (дата обращения 20.05.2020).

<sup>2</sup> Climpact Indices. Электронный ресурс: <https://climpact-sci.org/indices/> (дата обращения 20.05.2020).

В картографическом интерфейсе, согласно запросу пользователя, формируются для отображения карты изменения климата. На верхней панели пользователю предоставляется возможность выбора показателя изменения климата. Показатели сгруппированы по следующим разделам: температура воздуха, осадки, эвапотранспирация, агроклиматические показатели, последний из которых разделен на индексы засушливости и термические ресурсы (рис. 1). На левой боковой панели пользователю предоставляется возможность формирования запроса на отображение слоев по следующим параметрам: тип периода осреднения данных (10-, 20- или 30-летний периоды); временное разрешение данных (среднегодовое, среднесезонное (выбор из выпадающего списка сезонов – весна, лето, осень, зима) или среднемесячное (выбор месяца из выпадающего списка месяцев)); сценария прогноза (RCP 4.5 или RCP 8.5).

Название карты динамически генерируется на основе выбранного климатического параметра, сценария прогноза климата, отображаемого на текущий момент периода осреднения данных и временного разрешения.

Инструмент TimeSlider («Бегунок времени») предоставляет возможность в ручном или автоматизированном режиме (анимации) просматривать карты изменения климата по десяти-, двадцати- или тридцатилетиям по выбранным параметрам. Шаг инструмента «Бегунок времени» меняется в зависимости от выбранного типа периода осреднения данных. При выборе в качестве параметра отклонений значений показателей от значения базового периода, автоматически переопределяется базовый период, соответствующий выбранному периоду осреднения данных.

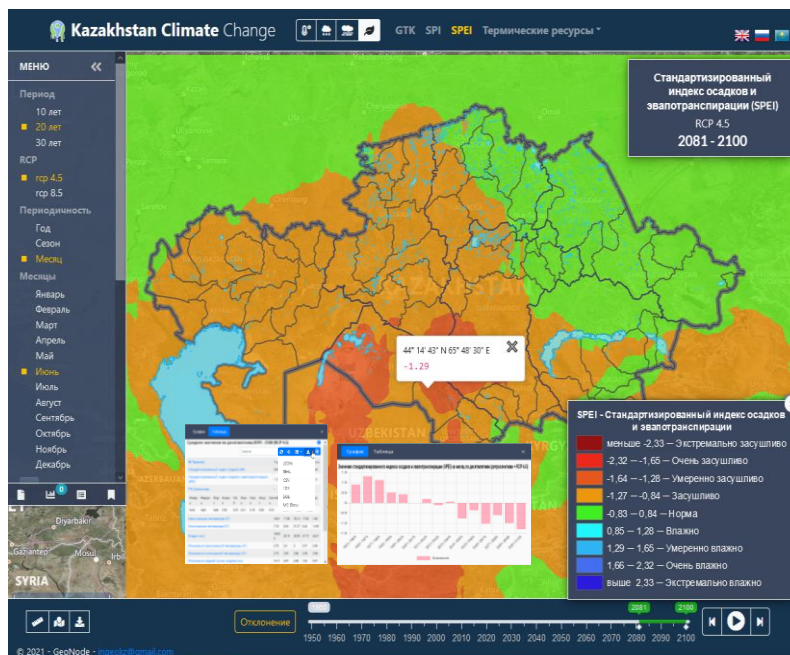


Рис. 1. Картографический интерфейс веб-приложения «Kazakhstan Climate Change»

Fig. 1. Cartographic interface of the web application “Kazakhstan Climate Change”

При клике на карте в всплывающем окне отображается информация о координатах точки и значение показателя выбранного климатического параметра с выбранным разрешением на период, установленный на TimeSlider выбранного показателя, а также дополнительное окно с вкладками интерактивных диаграмм и таблиц. Картографический вьювер включает инструменты измерения и выборки данных для экспорта в пределах выбранного пользователем экстенда на карте.

Переход на аналитический интерфейс осуществляется при выборе объекта из слоя ВХУ с помощью инструмента «Выбрать объект на карте». В интерфейсе реализована возможность проведения сопряженного сравнительного анализа двух выбранных показателей изменения климата, значения которых агрегированы в пределах выбранного ВХУ. Сопряженный анализ выполняется в картографических выюверах, которые навигационно связаны и синхронно масштабируемы (рис. 2). Каждый картографический выювер имеет свой фильтр, где из ниспадающего списка выбирается климатический параметр, сценарий прогноза климата, периодичность данных. Фильтры работают автономно, что позволяет выбирать для сравнения карты разных показателей, или одного показателя при разных сценариях. Инструмент TimeSlider работает синхронно на два картографических выювера в ручном или автоматизированном режиме, шаг инструмента управляется выборкой периода осреднения данных.

Фильтр выбора объекта (ВХУ) связан не только с картографическими выюверами, но и с окном диаграмм, которое имеет вкладки: график и таблица. Панель фильтра графиков включает возможности выбора климатического параметра, сценария проекции климата, срока периода осреднения данных, одного или нескольких периодов осреднения данных.

Через вкладки окна графика настраивается отображение периодичности данных (год, по месяцам, по сезонам), типы статистического показателя агрегированных данных по ВХУ (максимум, минимум, медиана). Исследование диаграмм годового хода значений отдельных показателей позволяет выявить особенности смещений изменений по месяцам при разных проекциях сценариев RCP. Вкладка таблицы позволяет выбрать показатели по заданным параметрам и экспортировать результаты выборки в различных форматах (JSON, XML, txt, csv, MS Excel и др.).

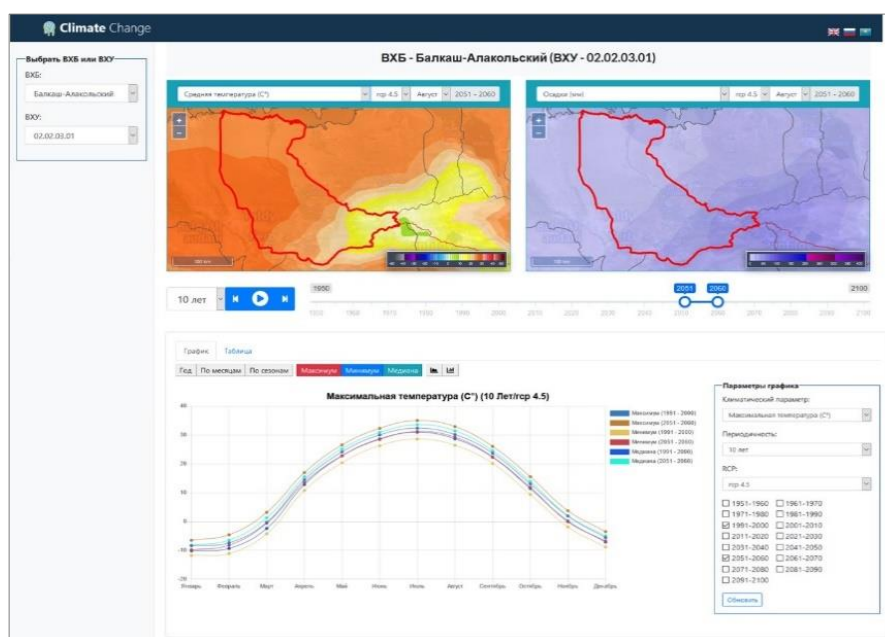


Рис. 2. Аналитический интерфейс веб-приложения «Kazakhstan Climate Change»

Fig. 2. Analytical interface of the web application “Kazakhstan Climate Change”

На основе сравнения функционала приложения, характеристик исходных данных, визуального представления данных с вышерассмотренными аналогичными веб-ресурсами, определены преимущества разработанного геопространственного веб-приложения «Kazakhstan Climate Change». К основным преимуществам разработанного нами приложения относятся разрешение сетки исходных данных  $0,25^\circ$  против  $1^\circ$  исходных данных гло-

бальных веб-приложений порталов, расширение набора показателей за счет расчетных показателей эвапотранспирации, засушливости, теплообеспеченности и продолжительности вегетационного периода, а также их отклонений от значений базового периода, реализация геовизуализации в виде изображений time-series и интерактивность взаимодействия с данными. Веб-приложение портала Climate Impacts Online по изменению климата Германии и его воздействию на различные сектора безусловно оказывает большую геоинформационную поддержку исследованиям изменения климата за счет широкого набора показателей, полученных в том числе в результате моделирования. Однако можно отметить, что функционал приложения «Kazakhstan Climate Change» позволяет пользователю экспортировать данные для их дальнейшей обработки в различных программах, а также выполнять сопряженный геовизуальный анализ агрегированных данных в пределах ВХУ, что способствует эффективности использования приложения для прогнозных расчетов климатически-обусловленного стока в разрезе единиц водохозяйственного районирования.

Использование в качестве исходных данных приложения «Kazakhstan Climate Change» данных моделей СМIP6 возможно увеличит ценность приложения для исследования изменения климата Казахстана. Результаты современных моделей СМIP6 стали доступны недавно и еще нет опубликованных данных об эффективности ансамблевых данных моделей СМIP6 по сравнению с моделями СМIP5 для Казахстана. В исследованиях по Китаю [Luo et al., 2020], Канаде [Bourdeau-Goulet et al., 2021], Бангладешу<sup>1</sup> приводятся данные об отсутствии явного превосходства отдельных моделей СМIP6 над соответствующими моделями СМIP5. Исследователи данных СМIP6 по Канаде также отмечают, что средние значения многомодельного ансамбля СМIP5 и СМIP6 почти одинаковы. Однако представление в приложении «Kazakhstan Climate Change» данных по альтернативным сценариям SSP (Shared Socio-Economic Pathways – Общие пути социально-экономического развития) может внести существенный вклад в повышение ценности приложения как источника данных для формирования представления о возможных изменениях климата Казахстана.

## ВЫВОДЫ

Приведенное выше описание геопространственного веб-приложения и его сравнение с аналогичными веб-продуктами, позволяет сделать вывод о возможностях разработанного приложения оказывать геоинформационную поддержку исследованиям изменения климата Казахстана. Результаты картирования изменения климата, представленные в приложении, могут быть использованы при прогнозной оценке водных ресурсов Казахстана, включая сток, формирующийся за пределами страны. Широкий спектр агроклиматических показателей, в совокупности с функционалом приложения, оказывает картографическую и аналитическую поддержку принятия решения по адаптации сельского хозяйства к изменению климата, как основного климато-зависимого сектора экономики Казахстана. Данные также могут быть использованы для прогноза изменения экосистемных услуг, например, будущего депонирования углерода.

В дальнейшем планируется рассмотреть возможность обновления или включения в приложение новых данных, созданных на основе обработки данных СМIP6, а также развития аналитического функционала приложения.

<sup>1</sup> Kamruzzaman M., Shahid Sh., Islam A., Hwang S., Cho J., Zaman Md., Ahmed M., Rahman Md., Hossain Md. (2021). Comparison of CMIP6 and CMIP5 Model Performance in Simulating Historical Precipitation and Temperature in Bangladesh: A Preliminary Study. DOI:10.21203/rs.3.rs-233789/v1. Электронный ресурс: [https://assets.researchsquare.com/files/rs-233789/v1\\_stamped.pdf](https://assets.researchsquare.com/files/rs-233789/v1_stamped.pdf) (дата обращения 06.05.2021).

Веб-приложение «Kazakhstan Climate Change» может служить примером перевода больших открытых данных из информации, требующей мощных вычислительных ресурсов для обработки, специальных знаний для понимания процессов обработки и анализа, в легкодоступную, легко воспринимаемую широким кругом пользователей информацию. Функционал веб-приложения позволяет пользователям, без навыков работы в ГИС, исследовать пространственно-временные особенности изменения климата, что позволяет предположить его практическую ценность для научного и образовательного сообщества, для лиц, определяющих политику в области изменения климата, управления водными ресурсами.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в АО «Институт географии и водной безопасности» в рамках программно-целевого финансирования Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан. Авторы выражают огромную благодарность разработчикам программного обеспечения веб-приложения «Kazakhstan Climate Change» И.А. Переливскому, Н.А. Кенжебекову, К.А. Аюпову.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out at the JSC “Institute of Geography and Water Security” within the framework of earmarked funding provided by the Committee of Science of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan. The authors express their deep gratitude to the software developers of the web application “Kazakhstan Climate Change” I.A. Perelivsky, N.A. Kenzhebekov, K.A. Ayupov.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белдеубаев Е., Смирнова Е., Долгих С.* Подходы и результаты оценки вероятного изменения климата Казахстана. Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде. CITES '2019, 27 мая – 6 июня 2019. Москва, Россия. С. 321–323.
2. *Bennett R., Senot H., Pettit C. J., Aurambout J.-P., Sheth F., Soste L., Sposito V.* Using digital globes to visualize climate change impact. *Advances in geo-spatial information science (ISPRS book series)*. CRC Press, 2012. P. 205–218.
3. *Bourdeau-Goulet S., Hassanzadeh E.* Comparisons Between CMIP5 and CMIP6 Models: Simulations of Climate Indices Influencing Food Security, Infrastructure Resilience, and Human Health in Canada. *Earth's Future*, 2021. V. 9. DOI: 10.1029/2021EF001995.
4. *Buontempo C., Hutjes R., Beavis P., Berckmans J., Cagnazzo C., Vamborg F., Thépaut J., Bergeron C., Almond S., Amici A., Ramasamy S., Dee D.* Fostering the development of climate services through Copernicus Climate Change Service (C3S) for agriculture applications. *Weather and Climate Extremes*, 2020. V. 27:100226. DOI: 10.1016/j.wace.2019.100226.
5. *Hong Shu.* Big data analytics: six techniques. *Geo-spatial Information Science*, 2016. V. 19. P. 119–128. DOI: 10.1080/10095020.2016.1182307.
6. *Katpatal Y.B.* Geospatial Applications in Water Resource Management with Special Reference to Climate Change. *Geospatial Technologies in Land Resources Mapping, Monitoring and Management book series (GEOTECH, volume 21)*. 2018. P. 587–601.
7. *Kitka G., Kovács-Györi A., Tátrai J., Oroszi V.G.* Application of GIS for a Climate Change Prepared Disaster Management in Csongrád County, Hungary. *Journal of Environmental Geography*, 2018. V. 11 (3–4). P. 49–56. DOI: 10.2478/jengeo-2018-0012.
8. *Luo N., Guo Y., Gao Zh., Chen K., Chou J.* Assessment of CMIP6 and CMIP5 model performance for extreme temperature in China. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2020. V. 13:6. P. 589–597. DOI: 10.1080/16742834.2020.1808430.

9. *Nkoana E. M., Verbruggen A., Hugé J.* Climate Change Adaptation Tools at the Community Level: An Integrated Literature Review. *Journal of Sustainability*, 2018. V. 10, 796. DOI: 10.3390/su10030796.
10. *Ojha A., Pattnaik A., Rout J.* Climate change impacts on natural resources and communities: A geospatial approach for management. *Lakes & Reservoirs: Science, Policy and Management for Sustainable Use*, 2018. V. 23 (1). P. 34–42. DOI: 10.1111/lre.12209.
11. *Siles G., Voirin Y., Bénié G.B.* Open-source based geo-platform to support management of wetlands and biodiversity in Quebec. *Journal of Ecological Informatics*, 2018. V. 43. P. 84–95. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2017.11.005.

## REFERENCES

1. *Beldeubaev E., Smirnova E., Dolgikh S.* Approaches and results of assessing the likely climate change in Kazakhstan. *International Youth School and Conference on Computational Information Technologies for Environmental Sciences. CITES '2019, May 27 – June 6, 2019. Moscow, Russia.* P. 321–323 (in Russian).
2. *Bennett R., Senot H., Pettit C. J., Aurambout J.-P., Sheth F., Soste L., Sposito V.* Using digital globes to visualize climate change impact. *Advances in geo-spatial information science (ISPRS book series).* CRC Press, 2012. P. 205–218.
3. *Bourdeau-Goulet S., Hassanzadeh E.* Comparisons Between CMIP5 and CMIP6 Models: Simulations of Climate Indices Influencing Food Security, Infrastructure Resilience, and Human Health in Canada. *Earth's Future*, 2021. V. 9. DOI: 10.1029/2021EF001995.
4. *Buontempo C., Hutjes R., Beavis P., Berckmans J., Cagnazzo C., Vamborg F., Thépaut J., Bergeron C., Almond S., Amici A., Ramasamy S., Dee D.* Fostering the development of climate services through Copernicus Climate Change Service (C3S) for agriculture applications. *Weather and Climate Extremes*, 2020. V. 27:100226. DOI: 10.1016/j.wace.2019.100226.
5. *Hong Shu.* Big data analytics: six techniques. *Geo-spatial Information Science*, 2016. V. 19. P. 119–128. DOI: 10.1080/10095020.2016.1182307.
6. *Katpatal Y.B.* Geospatial Applications in Water Resource Management with Special Reference to Climate Change. *Geospatial Technologies in Land Resources Mapping, Monitoring and Management book series (GEOTECH, volume 21)*, 2018. P. 587–601.
7. *Kitka G., Kovács-Győri A., Tátrai J., Oroszi V.G.* Application of GIS for a Climate Change Prepared Disaster Management in Csongrád County, Hungary. *Journal of Environmental Geography*, 2018. V. 11 (3–4). P. 49–56. DOI: 10.2478/jengeo-2018-0012.
8. *Luo N., Guo Y., Gao Zh., Chen K., Chou J.* Assessment of CMIP6 and CMIP5 model performance for extreme temperature in China. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2020. V. 13:6. P. 589–597. DOI: 10.1080/16742834.2020.1808430.
9. *Nkoana E.M., Verbruggen A., Hugé J.* Climate Change Adaptation Tools at the Community Level: An Integrated Literature Review. *Journal of Sustainability*, 2018. V. 10, 796. DOI: 10.3390/su10030796.
10. *Ojha A., Pattnaik A., Rout J.* Climate change impacts on natural resources and communities: A geospatial approach for management. *Lakes & Reservoirs: Science, Policy and Management for Sustainable Use*, 2018. V. 23 (1). P. 34–42. DOI: 10.1111/lre.12209.
11. *Siles G., Voirin Y., Bénié G.B.* Open-source based geo-platform to support management of wetlands and biodiversity in Quebec. *Journal of Ecological Informatics*, 2018. V. 43. P. 84–95. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2017.11.005.

УДК: 551.58/ 528.88

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-120-135

А.Н. Шихов<sup>1</sup>, Р.К. Абдуллин<sup>1</sup>, А.В. Чернокульский<sup>2</sup>, И.О. Ажигов<sup>1</sup>, Ю.И. Ярынич<sup>2,3</sup>,  
А.А. Спрыгин<sup>4</sup>, Д.П. Корнев<sup>5</sup>

## СОЗДАНИЕ КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ БАЗЫ ДАННЫХ И ВЕБ-СЕРВИСА «КОНВЕКТИВНЫЕ ОПАСНЫЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА»

### АННОТАЦИЯ

Конвективные опасные явления погоды (КОЯП), такие как сильные ливни, крупный град, шквалы и смерчи, являются одним из значимых источников возникновения чрезвычайных ситуаций природного характера на территории России. Территория Центрального Федерального округа (ЦФО) отличается максимальной в России плотностью населения, что с одной стороны создает наибольшие риски, связанные с конвективными явлениями, а с другой стороны – обеспечивает условия для сбора максимально подробной о них (включая случаи, пропущенные наблюдательной сетью и зафиксированные по факту нанесенного ущерба). В настоящей работе рассматривается структура и информационное наполнение картографической базы данных о случаях КОЯП для территории ЦФО. Основным отличием разработанной базы данных от существующих аналогов является ее структура, включающая сведения как о самих явлениях и их последствиях, так и об условиях их возникновения. К последним относятся, в частности, характеристики мезомасштабных конвективных систем (конвективных штормов) по данным с метеорологических спутников и диагностические переменные, характеризующие состояние атмосферы по данным систем реанализа CFS и ERA-5. Также реализованы связи с ранее опубликованными базами данных смерчей в Северной Евразии и крупных ветровалов в Европейской части России. В настоящее время собраны данные о более чем 2 тыс. случаях КОЯП на территории ЦФО за период 2001–2020 гг., большинство из которых были зафиксированы по факту нанесенного ущерба. Для управления базой данных и ее редактирования используется свободная объектно-реляционная СУБД PostgreSQL, а обеспечение открытого доступа к базе данных в сети Интернет реализовано путем создания картографического веб-приложения, доступного по адресу <http://convective-storms.psu.ru/>.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** конвективные опасные метеорологические явления, шквалы, смерчи, крупный град, сильные ливни, картографическая база данных, картографический веб-сервис, Центральный федеральный округ.

---

<sup>1</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, ул. Букирева, 15, Пермь, Россия, *e-mail*: [gis@psu.ru](mailto:gis@psu.ru)

<sup>2</sup> Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 119017, Пыжевский пер. 3, Москва, Россия, *e-mail*: [a.chernokulsky@ifaran.ru](mailto:a.chernokulsky@ifaran.ru)

<sup>3</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Ленинские горы, д. 1, стр. 1, Москва, Россия, *e-mail*: [julia.yarinich@yandex.ru](mailto:julia.yarinich@yandex.ru)

<sup>4</sup> Научно-производственное объединение «Тайфун», 249038, ул. Победы, 4, г. Обнинск, Калужская область, Россия, *e-mail*: [spralexandr@gmail.com](mailto:spralexandr@gmail.com)

<sup>5</sup> Центральная аэрологическая обсерватория, 141707, ул. Первомайская, д. 3, г. Долгопрудный, Московская область, Россия, *e-mail*: [kdan1@yandex.ru](mailto:kdan1@yandex.ru)



Andrey N. Shikhov<sup>1</sup>, Rinat K. Abdullin<sup>1</sup>, Alexander V. Chernokulsky<sup>2</sup>, Igor O. Azhigov<sup>1</sup>, Yulia I. Yarinich<sup>2,3</sup>, Alexander A. Sprygin<sup>4</sup> and Daniil P. Korenev<sup>5</sup>

## DEVELOPMENT OF A GIS DATABASE AND WEB SERVICE "HAZARDOUS CONVECTIVE WEATHER EVENTS ON THE TERRITORY OF CENTRAL FEDERAL DISTRICT"

### ABSTRACT

Hazardous convective weather events (HCWE), such as heavy rainfall, large hail, squalls and tornadoes, are one of the substantial sources of natural emergencies in Russia. The territory of the Central Federal District (CFD) is characterized by the highest population density in Russia. On the one hand, this leads to increased risks associated with HCWE, but on the other hand, it provides the possibilities for collecting the most detailed information on them (including the events missed by the observation network and reported based on damage assessment). In this study, we consider the structure and information content of the GIS database of HCWE for the territory of the CFD. The main advantage of the developed database comparing with existing analogues is its structure, which includes information on both the events themselves and their consequences, and the conditions of their occurrence. This includes, in particular, the characteristics of meso-scale convective systems (convective storms) based on the images from meteorological satellites and diagnostic variables characterizing the atmospheric environments according to the data from ERA-5 and CFS reanalysis systems. Also, the developed database is associated with previously published databases on tornadoes in Northern Eurasia and large-scale windthrow events in European Russia. At present, we compiled the data on more than 2.000 cases of HCWE in the CFD for the period 2001-2020, most of which were reported based on damage assessment. The open-source PostgreSQL DBMS is used to manage and edit the database. Open access to the database on the Internet is implemented through an online web map service available at <http://convective-storms.psu.ru/>.

**KEYWORDS:** hazardous convective weather events, squalls, tornadoes, large hail, heavy rainfalls, GIS database, online web map service, Central Federal District.

### ВВЕДЕНИЕ

Ежегодно на территории России фиксируется множество случаев конвективных опасных явлений погоды (КОЯП) – сильных ливней, шквалов, крупного града и смерчей, которые отличаются внезапностью возникновения и сложностью прогнозирования, наносят значительный ущерб и могут приводить к гибели людей. Ряд исследований показывает, что на фоне современного изменения климата условия для развития глубокой конвекции и соответственно, связанных с ней КОЯП могут стать более благоприятными [*Diffenbaugh et al.*, 2013; *Meredith et al.*, 2015; *Pucik et al.*, 2017; *Radler et al.*, 2019]. Однако подтвердить или опровергнуть эту гипотезу применительно к конкретному региону часто не позволяет отсутствие многолетней и репрезентативной (независимой от плотности населения и

<sup>1</sup> Perm State University, Bukirev str., 15, 614990, Perm, Russia; e-mail: [gis@psu.ru](mailto:gis@psu.ru)

<sup>2</sup> A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky 3, 119017, Moscow, Russia; e-mail: [a.chernokulsky@ifaran.ru](mailto:a.chernokulsky@ifaran.ru)

<sup>3</sup> M.V. Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia; e-mail: [julia.yarinich@yandex.ru](mailto:julia.yarinich@yandex.ru)

<sup>4</sup> Typhoon Research and Production Association, Pobedy str 4, 249038, Obninsk, Kaluga region, Russia, e-mail: [spralexandr@gmail.com](mailto:spralexandr@gmail.com)

<sup>5</sup> Central Aerological Observatory, Pervomaiskaya str. 3, 141707, Dolgoprudny, Moscow region, Russia, e-mail: [kdan1@yandex.ru](mailto:kdan1@yandex.ru)

наблюдательной сети) информации о случаях КОЯП. Закономерности пространственно-временного распределения КОЯП остаются сравнительно малоизученными по причине ограниченности выборки, обусловленной локальным характером этих явлений.

В последние годы в мире существует тенденция к более детальному документированию случаев КОЯП, в том числе пропущенных метеостанциями. Важнейшим источником информации о них становятся наблюдения очевидцами самих явлений и отчеты о нанесенном ущербе, имеющие географическую и временную привязку. Такие отчеты могут быть проверены по спутниковым и радиолокационным данным. Наибольший опыт систематизации данных о случаях КОЯП накоплен в США, где национальным центром климатических данных (National Climatic Data Center, NCDC) создана база данных опасных явлений погоды (Storm Events Database). В нее включаются явления, зафиксированные метеостанциями национальной метеослужбы, либо нанесшие социально-экономический ущерб, а также прочие аномальные метеорологические явления. Всего база данных включает 1,2 млн. записей за период с 1950 г. до настоящего времени [Edwards et al., 2013].

В Европе данные очевидцев и отчеты об ущербе составляют основу информационного наполнения Европейской базы данных опасных явлений погоды ESWD<sup>1</sup>, разработанной Европейской лабораторией интенсивных штормов (ESSL) [Dotzek et al., 2009; Groenemeijer et al., 2017]. Однако для Европейской территории России (ЕТР) в ESWD публиковались данные далеко не о всех случаях КОЯП, даже нанесших значительный ущерб, кроме того, база содержит множество ошибок [Chernokulsky et al., 2020]. Таким образом, данные ESWD для ЕТР нельзя считать репрезентативными.

Для территории России в настоящее время доступны следующие официальные источники данных о случаях КОЯП:

- Данные метеостанций: срочные наблюдения<sup>2</sup>, а также отдельно наблюдения за характеристиками погоды<sup>3</sup>.
- Ежемесячные обзоры аномальных гидрометеорологических явлений на территории РФ в журнале «Метеорология и гидрология»<sup>4</sup>.
- База данных ЕСИМО об опасных гидрометеорологических явлениях, нанесших социально-экономический ущерб<sup>5</sup>.

Перечисленные информационные ресурсы также не являются репрезентативными. Большое количество явлений, в том числе вызвавших значительный ущерб, пропускается из-за редкой метеорологической сети, также в ряде случаев некорректно определяется тип явления (например, шквал или смерч). Это определяет актуальность систематизации данных о случаях КОЯП для территории России и их публикации на открытых сервисах. В последние годы важным источником данных о случаях КОЯП, помимо официальных сведений, анализа сообщений очевидцев и информации о нанесенном ущербе, является

<sup>1</sup> European Severe Weather Database. Электронный ресурс: <https://eswd.eu/> (дата обращения 03.04.2021).

<sup>2</sup> Булыгина О.Н., Веселов В.М., Александрова Т.М., Коршунова Н.Н. Описание массива данных по атмосферным явлениям на метеорологических станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620081. Электронный ресурс: <http://meteo.ru/data/345-atmosfernyeyavleniya-sroki#описание-массива-данных> (дата обращения 03.04.2021).

<sup>3</sup> Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549. Электронный ресурс: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных> (дата обращения 03.04.2021).

<sup>4</sup> Научно-технический журнал «Метеорология и гидрология». Электронный ресурс: <http://mijournal.ru/archive> (дата обращения 03.04.2021).

<sup>5</sup> Стихийные бедствия. Электронный ресурс: <http://data.oceaninfo.ru/applications/disaster/index.jsp> (дата обращения 03.04.2021).

также идентификация нарушений лесного покрова, вызванных шквалами и смерчами по спутниковым снимкам [Shikhov, Chernokulsky, 2018; Shikhov et al., 2020].

Создание репрезентативных баз данных о случаях КОЯП на основе интеграции сведений, полученных из множества источников, имеет значение не только для оценки пространственно-временного распределения явлений, но и для последующего изучения условий их возникновения, а также для верификации моделей прогноза [Groenemeijer, Kuhne, 2014; Groenemeijer et al., 2017]. В настоящей работе рассматривается структура и информационное наполнение картографической базы данных КОЯП, разрабатываемой авторами для территории Центрального Федерального округа (ЦФО). Выбор данной территории обусловлен тем, что она отличается наибольшей в России плотностью населения, относительно высокой полностью наблюдательной сети, полностью попадает в зону обзора доплеровских радиолокаторов, а также метеорологических спутников (с наличием архива данных за длительный период времени). Это обеспечивает возможность сбора максимально полной базы данных о случаях КОЯП, а также взаимной верификации данных наземных, радиолокационных и спутниковых наблюдений. Наполнение базы данных производится за период с 2001 г. по н.в., что обусловлено возможностью получения информации из ряда источников, прежде всего электронных СМИ и социальных сетей, только за этот период.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### *Структура базы данных и основные источники информации*

Структура базы данных о случаях КОЯП должна учитывать природу самих явлений, а также особенности источников информации о них. Основной проблемой при ее наполнении является необходимость группировки множества сообщений о случаях КОЯП, фактически связанных с одним и тем же явлением, вызванным прохождением одной мезомасштабной конвективной системы (конвективного шторма). Поскольку база данных создается не только для каталогизации самих случаев КОЯП, но и для анализа условий их возникновения, ее структура должна включать три иерархических уровня (рис. 1).

- Уровень 1 – сведения о самих явлениях и нанесенном ими ущербе.
- Уровень 2 – характеристики мезомасштабных конвективных систем (конвективных штормов), вызвавших эти явления, полученные по данным спутниковых и радиолокационных наблюдений.
- Уровень 3 – синоптическое положение и значения диагностических переменных, характеризующие условия возникновения КОЯП, оцененные по данным систем реанализа

Для территории России опыт проектирования и создания подобных баз данных отсутствует. Из зарубежных работ ближайшим аналогом можно считать базу данных случаев наводнений, оползней и селей для территории Италии, которая также основана на трехуровневой иерархической структуре [Napolitano et al., 2018]. Отличительной особенностью разработанной базы данных является также ее интеграция с ранее опубликованными базами данных случаев смерчей в Северной Евразии [Authors, 2020; Authors, 2021] и ветровалов в Европейской части России [Authors].

*Характеристика случаев КОЯП* представлена в таблице Point\_reports, которая содержит отчеты о КОЯП, зафиксированных по данным метеостанций или в населенных пунктах. Сведения об этих случаях получены на основе анализа нескольких основных источников: данных наблюдательной сети, сведений о случаях КОЯП и нанесенном ущербе, опубликованных в СМИ и социальных сетях, информации из внешних баз данных, в частности ESWD и базы данных ЕСИМО, ежемесячных обзоров в журнале «Метео-

рология и гидрология». Пространственная привязка отчетов осуществляется по положению пункта наблюдательной сети через WMO ID, или по идентификатору населенного пункта в OpenStreetMap.

Для каждого случая КОЯП определены следующие атрибутивные характеристики: качество данных, дата, время, точность определения времени, способ регистрации явления (по данным наблюдательной сети, по данным очевидцев или по нанесенному ущербу), местоположение (субъект РФ, район, населенный пункт), тип явления, интенсивность, число погибших, пострадавших и величина нанесенного ущерба (при наличии). Также приведено краткое текстовое описание самого явления и нанесенного ущерба.

*Характеристика конвективных штормов, вызывающих КОЯП*, получена по двум источникам данных. За период 2001-2009 гг. использованы снимки Terra/Aqua MODIS, полученные из архива NASA<sup>1</sup>. Их недостатком является низкое временное разрешение (два раза в сутки для каждого спутника). В связи с этим, лишь 53% случаев КОЯП за этот период имеют привязку к характеристикам конвективных штормов. Спутниковые данные MODIS обрабатывались в программных пакетах Scanex Image Processor и ArcGIS 10\*.

Спутниковые данные Meteosat второго поколения с 12-ти канального радиометра SEVIRI получены за период с 2010 г. по н.в. из каталога EUMETSAT<sup>2</sup>. Пространственное разрешение снимков составляет около 1,2 км в канале высокого разрешения HRV и 3,4 км в остальных 12 спектральных каналах [Kerkmann et al., 2006], а шаг получения данных по времени равен 15 мин. Это позволяет получить информацию о характеристиках конвективных штормов для всех случаев КОЯП, за исключением тех, для которых не определено время возникновения. Обработка снимков выполнена с помощью программных продуктов MSGDataRetriever, MSGProc и ArcGIS.

Стоит отметить, что за период до 2016 г. доступны снимки со спутников Meteosat, ведущих съемку из точки над пересечением экватора и Гринвичского меридиана. Это приводит к снижению качества данных для рассматриваемого региона, за исключением его северо-восточной части, за счет эффекта параллакса. С 2017 г. доступны данные спутника Meteosat-8 миссии IODC, которые не имеют этого недостатка [Klaes et al., 2017].

Для описания конвективных штормов в базе данных созданы две таблицы. В первой таблице (MCS\_images) даны характеристики шторма по конкретному снимку, полученному в момент времени, максимально близкий к возникновению КОЯП, а именно минимальная температура верхней границы облаков (ВГО), диаметр по большой и малой полуоси, наличие сигнатур, указывающих на сильные восходящие потоки, а также ссылки на соответствующие фрагменты снимков. Изображения подготовлены в синтезе HRVCloud на основе видимого канала высокого разрешения (HRV) и теплового канала infrared 10,8 мкм, а также температуры ВГО на основе канала infrared 10,8 мкм, в цветовой палитре, рекомендованной EUMETSAT [Kerkmann et al., 2006]. Пример изображения конвективного шторма, загруженного в базу данных для конкретного случая КОЯП, приведен на рис. 2.

Во второй таблице (MCS\_reports) приведены характеристики жизненного цикла конвективных штормов, в частности тип шторма, продолжительность существования, направление перемещения. Также для наиболее значимых случаев КОЯП подготовлены картографические анимации развития конвективных штормов на основе снимков Meteosat в синтезе HRVCloud и температуры ВГО, ссылки на которые также даны в этой таблице.

<sup>1</sup> NASA LAADS DAAC. Электронный ресурс: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/> (дата обращения 03.04.2021).

<sup>2</sup> EUMETSAT Earth Observation Portal. Электронный ресурс: <https://eoportal.eumetsat.int/> (дата обращения 03.04.2021).

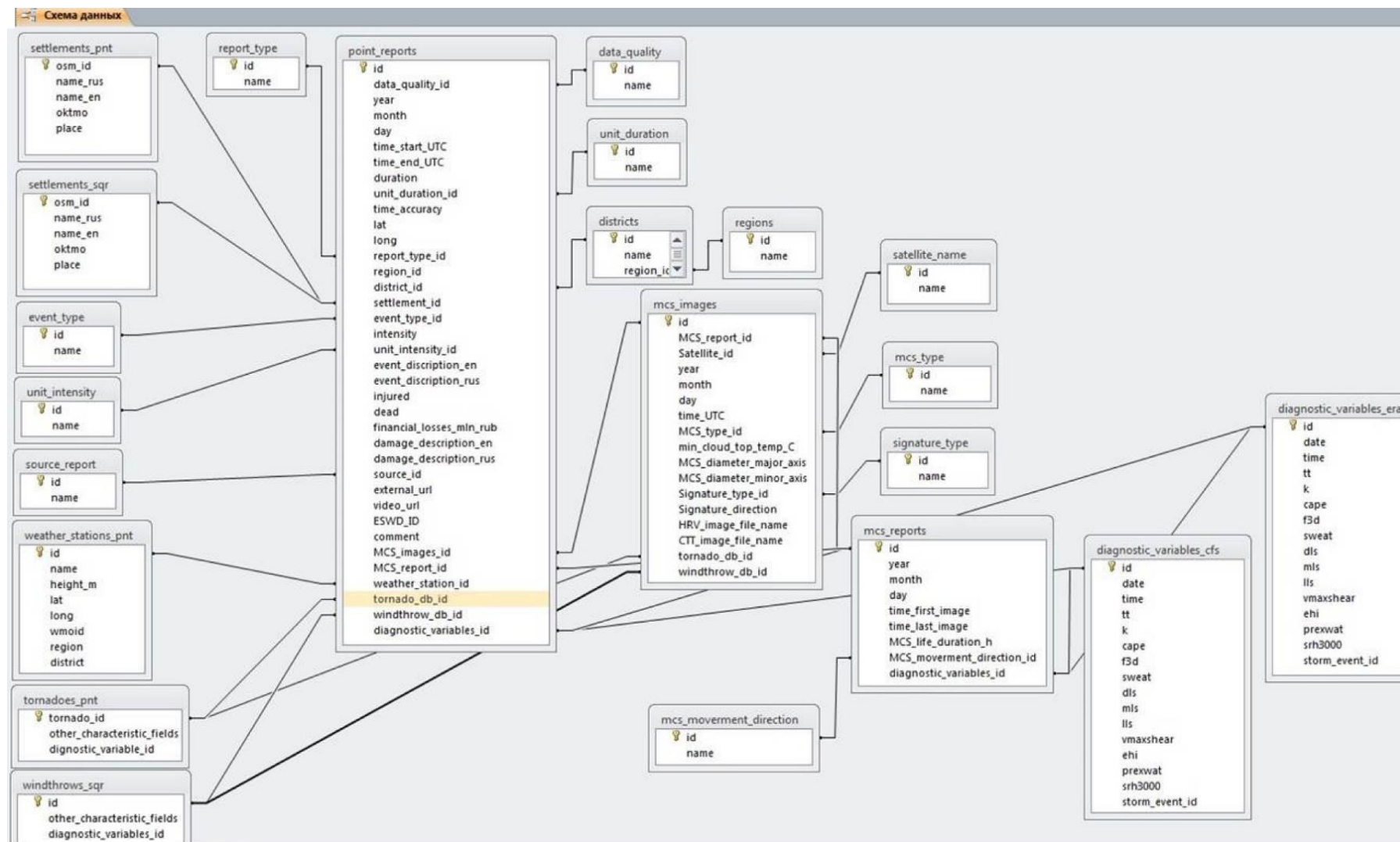


Рис. 1. Схема структуры базы данных КОЯП для территории ЦФО

Fig. 1. Scheme of the structure of the database of HCWE for the territory of the Central Federal District

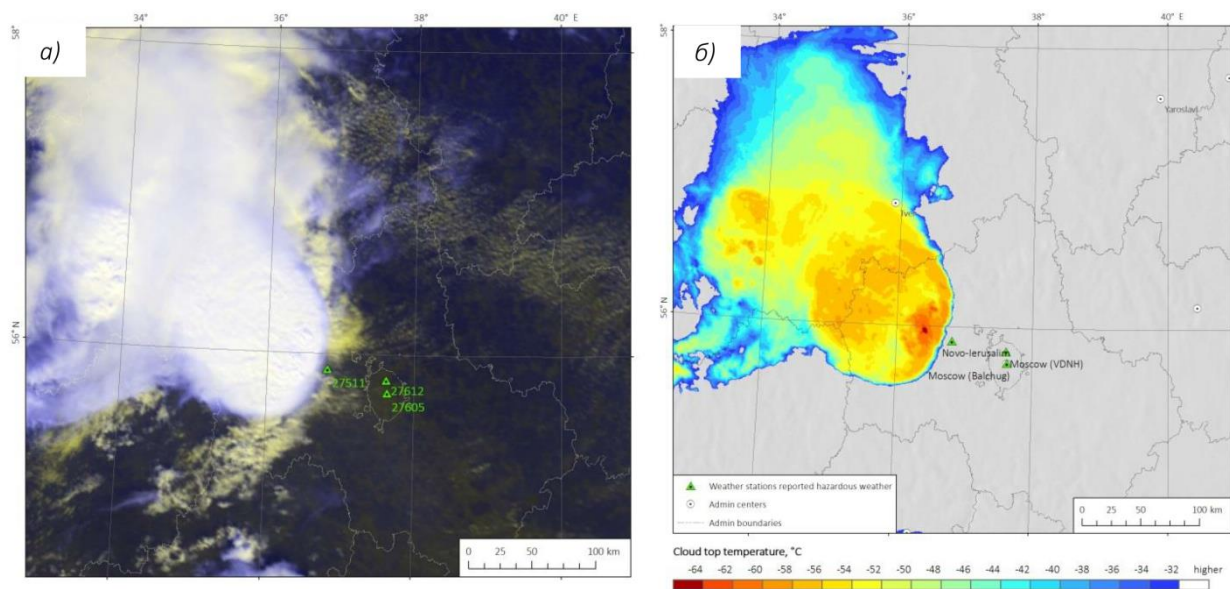


Рис. 2. Пример представления спутниковой информации (Terra MODIS) о конвективном шторме, вызвавшем КОЯП в Москве и Московской области 24.07.2001 г. Снимок Terra MODIS за 09.35 ВСУ в комбинации каналов HRV-HRV-IR (а) и температура верхней границы облаков (б)

Fig. 2. An example of satellite images (Terra MODIS) on convective storm that caused HCWE in the Moscow city and Moscow region on July 24, 2001. Terra MODIS image for 09.35 UTC in the HRV-HRV-IR band combination (a) and the cloud top temperature (b)

Для случаев смерчей, а также шквалов, вызвавших ветровалы, доступна более подробная характеристика на основе ранее опубликованных баз данных смерчей в Северной Евразии [Chernokulsky et al., 2020] и ветровалов в лесной зоне Европейской России [Shikhov et al., 2020]. Эти данные представлены в виде классов пространственных объектов – полигональных (для ветровалов) и точечных (для смерчей). Для каждого случая смерчей и ветровалов определены идентификаторы, на основе которых реализована их связь с отчетами о КОЯП, а также с характеристиками конвективных штормов по спутниковым данным.

При анализе условий возникновения КОЯП общепринятым является использование ингредиентного подхода [Taszarek et al., 2017]. Его применение основано на расчете по данным аэрологического зондирования или реанализа ряда диагностических переменных – параметров состояния атмосферы, характеризующих конвективную неустойчивость, влагосодержание, сдвиги ветра, завихренность в период формирования КОЯП [Taszarek et al., 2017; Chernokulsky et al., 2019].

В рамках данной работы расчет диагностических переменных производится по данным системы реанализа ECMWF ERA-5 с пространственным разрешением 30 км [Hersbach et al., 2020]. Эти данные в сравнении с другими системами реанализа отличаются наиболее высоким пространственным разрешением (30 км). В качестве косвенных предикторов КОЯП были рассчитаны 50 физико-статистических параметров атмосферы по трём основным категориям<sup>1</sup>: температурно-влажностные характеристики, параметры ветра и комплексные индексы, объединяющие две предыдущие категории. В базе данных КОЯП на территории ЦФО для наиболее значимых случаев КОЯП приведены значения 12

<sup>1</sup> Grieser J. Convection parameters. Электронный ресурс: <http://www.juergen-grieser.de/Convection-Parameters/ConvectionParameters.pdf> (дата обращения 03.04.2021).

диагностических переменных. Перечень выбранных переменных из массива аналогичен использованному в работе [Калинин и др., 2021] для анализа условий возникновения сильных шквалов и смерчей. Для ряда случаев КОЯП, в частности сильных шквалов и смерчей, вызвавших крупные ветровалы, получены также значения диагностических переменных по данным CFS/CFSv2 [Saha et al., 2010].

Помимо основных таблиц, характеризующих явления и условия их возникновения, в базе данных имеются также справочные таблицы, необходимые для устранения избыточности и снижения вероятности ошибок при вводе данных. В справочных таблицах указаны допустимые значения таких параметров как качество данных, тип явления, единицы измерения интенсивности и продолжительности, типы источников данных о КОЯП и др. (рис. 1).

К справочным данным можно отнести также топографическую основу, которая получена на основе данных OpenStreetMap и включает слои субъектов РФ (21 субъект), муниципального деления (504 района), населенных пунктов (65507 объектов) и метеостанций (195 станций на территории ЦФО).

### ***Разработка серверной версии базы данных и картографического веб-сервиса***

Для управления базой данных и ее редактирования используется свободная объектно-реляционная СУБД PostgreSQL с установленным расширением PostGIS, которое обеспечивает возможность хранения пространственных данных в реляционной базе данных. Также, для удобства редактирования и наполнения базы данных было разработано веб-приложение с использованием языка программирования PHP, языка разметки HTML5 и таблиц стилей CSS3. Стилистика интерфейса настроена при помощи CSS-фреймворка Bootstrap v4. Обеспечение открытого доступа к базе данных в сети Интернет реализовано путем создания картографического веб-приложения.

При разработке интерфейса пользователя и функциональных возможностей картографического веб-сервиса используется стек технологий HTML5, CSS3, JavaScript. Для публикации пространственных данных о местоположении случаев КОЯП используется открытый картографический сервер GeoServer, а для их отображения в веб-приложении – JavaScript-библиотека Leaflet. Основой разработки пользовательского интерфейса является JavaScript-библиотека с открытым исходным кодом React, преимущества которой состоят в простоте создания и организации более быстрой работы приложения.

Разрабатываемый картографический веб-сервис доступен в сети Интернет по временному адресу <http://convective-storms.psu.ru/>. Его интерфейс представлен на английском языке, в дальнейшем будет создана и русскоязычная версия веб-приложения.

Основными функциональными возможностями сервиса являются просмотр на карте мест фиксации (в виде точечных объектов) случаев КОЯП; фильтрация случаев по типу явления, диапазону дат, субъекту РФ, источнику данных, и получение детальной информации о каждом случае КОЯП и условиях его возникновения (рис. 3). Эта информация включает описание типа явления, источника информации, местоположения, даты и времени, продолжительности, интенсивности, причинённого ущерба (в т.ч. при наличии связи с внешними базами данных) и др. Для большинства случаев опасных явлений доступны ссылки на сообщения в электронных СМИ, фото- и видеоматериалы, на которых представлены дополнительные сведения.

Также на сервисе реализована визуализация распределения случаев КОЯП в виде различных диаграмм, которые строятся по значениям основных атрибутивных характеристик из базы данных. В частности, доступно отображение межгодового, внутригодового распределения, распределение по времени суток, по субъектам РФ, по типам фиксации явления, по характеристикам ущерба и пр. (рис. 4).

При наличии соответствующих данных, для некоторых случаев КОЯП на сервисе доступны характеристики вызвавших их конвективных штормов, фрагменты спутниковых снимков Meteosat-8 или Terra/Aqua MODIS (рис. 5) и анимации на основе данных Meteosat-8. Также для ряда случаев пользователь может отобразить значения диагностических переменных, полученные по данным систем реанализа ERA-5 и CFS.

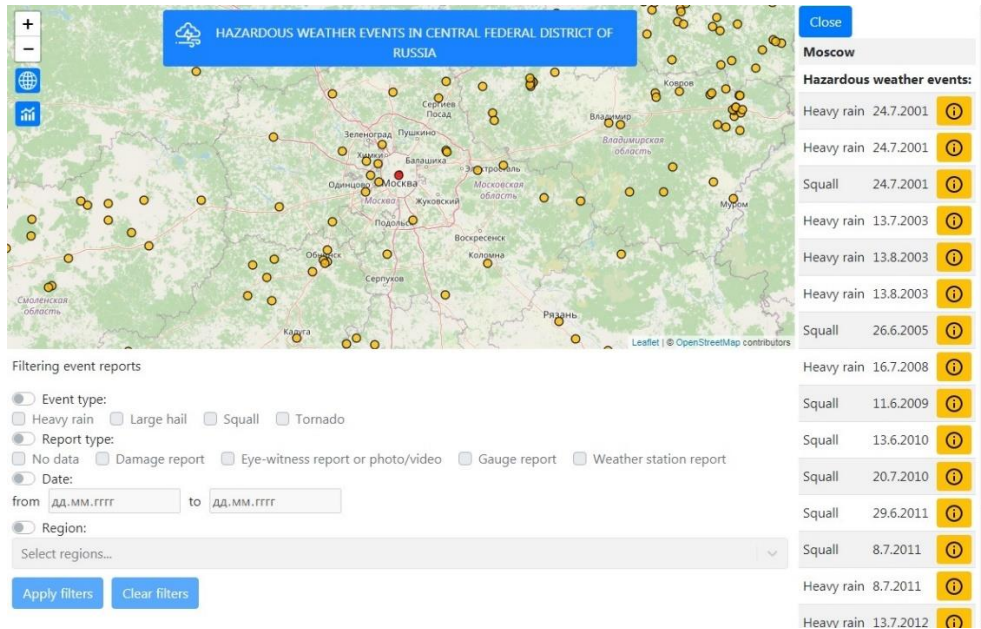


Рис. 3. Список случаев КОЯП для одного населенного пункта (на примере г. Москвы)  
 Fig. 3. List of HCWE for one settlement (on the example of the Moscow city)



Рис. 4. Распределение числа случаев КОЯП по годам  
 (по данным, опубликованным на сервисе)  
 Fig. 4. Inter-annual distribution of HCWE (based on the published data only)



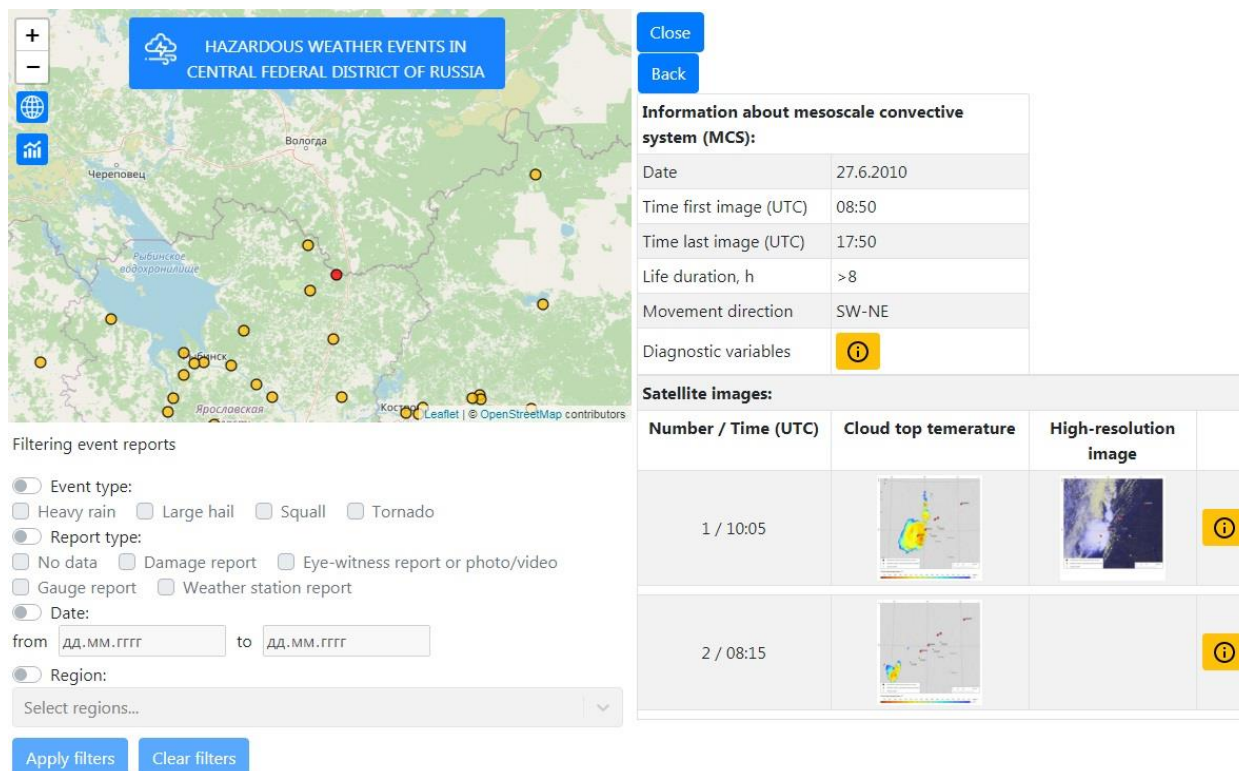


Рис. 5. Характеристики конвективного шторма, представленные на картографическом веб-сервисе

Fig. 5. Characteristics of convective storm, presented on the online web map service

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### *Характеристика случаев КОЯП на территории ЦФО*

В настоящее время в базу данных занесено свыше 630 записей о случаях КОЯП за период 2001–2013 гг., произошедших в 395 населенных пунктах на территории ЦФО. При этом общий объем собранной информации за 2001–2019 гг. значительно больше и составляет свыше 2 тыс. отчетов о КОЯП. Информация за 2013–2020 гг. в настоящее время проходит обработку и верификацию.

Только по сообщениям очевидцев и СМИ о самих явлениях или вызванных ими разрушениях получено 2220 отчетов о КОЯП, часть которых, однако, не имеет точной пространственной привязки. После проведенной фильтрации, общее количество отчетов о КОЯП, собранных по данным очевидцев и СМИ за 2001–2019 гг., составило 1862, включая также данные о смерчах из базы [Чернокульский и др., 2021]. Свыше 71% из всех отчетов приходится на долю шквалов (рис. 6), поскольку именно эти явления чаще всего наносят экономический ущерб [Бедрицкий и др., 2001]. Значительный рост количества сообщений о КОЯП в последние годы имеет искусственный характер, т.е. связан с появлением новых источников информации. Аналогичная закономерность наблюдается для всей территории России [Чернокульский и др., 2001], и для Европы в целом [Groenemeijer and Kuhne, 2014].

Значимым источником данных о случаях КОЯП и их последствиях также является анализ сообщений (новостей и тегов) в социальных сетях. Такой поиск производился за 2020 г. в социальных сетях «ВКонтакте», «Одноклассники», «Instagram», а также на видеохостинге «Youtube». Для всех случаев была определена пространственная привязка

по населенному пункту или геолокации наблюдателя. Также выполнена верификация по оперативно предоставляемым спутниковым данным Meteosat<sup>1</sup> и композитной карте метеоявлений по сети доплеровских радиолокаторов<sup>2</sup>.

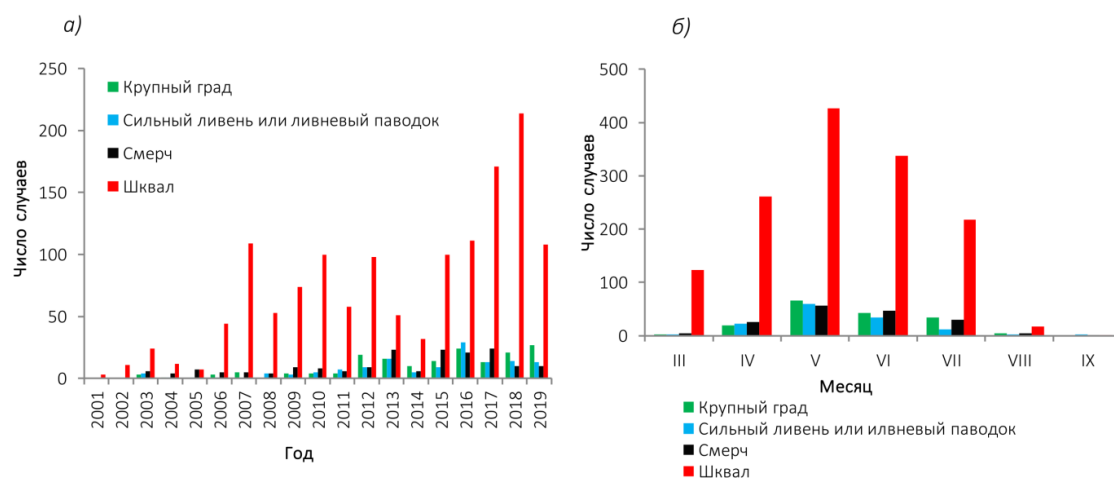


Рис. 6. Межгодовое (а) и внутригодовое (б) распределение отчетов о КОЯП, выявленных по сообщениям в электронных СМИ

Fig. 6. Inter-annual (a) and monthly (b) distribution of HCWE reports, according to web news and media reports

В результате был собран значительный объем данных о случаях КОЯП (2546 записей по территории России за теплый период 2020 г.). Из них 785 случаев зафиксировано на территории ЦФО, в том числе 16 случаев смерчей, 537 случаев шквалов, 133 случая крупного града и 96 случаев локальных сильных ливней и ливневых паводков. Пространственное распределение полученных сообщений о случаях КОЯП имеет сильную корреляцию с плотностью населения, свыше 47% из них приходится на долю Московской области. На основе собранных данных выявлены 4 крупных вспышки КОЯП на территории ЦФО в теплый период 2020 г. (7 июля, 8 июля, 14 июля и 17 сентября), на долю которых приходится 43,3% всех сообщений о КОЯП и вызванном ими ущербе. Несколько менее значимых вспышек отмечены в конце мая и в июне.

#### *Ветровалы, вызванные шквалами и смерчами на территории ЦФО*

Согласно данным из базы [Shikhov et al., 2020], актуализированным до 2020 г., всего на территории ЦФО за рассматриваемый период 2001–2020 гг. зафиксировано 145 событий ветровалов с общей площадью сплошных (stand-replacing) повреждений лесного покрова 40469 га (рис. 7). Из них 82 (7073 га) связаны со смерчами, а еще 63 (33396 га) – со шквалами. Распределение ветровалов по площади крайне неравномерное – на один крупнейший ветровал, вызванный прохождением долгоживущего сильного шквала 27.06.2010 г., приходится 37% от всей площади ветровалов в ЦФО, хотя большая часть этого ветровала находится на территории Вологодской области, которая относится к Северному федеральному округу. Также крупные ветровалы (на общей площади > 1000 га) отмечались 12.06.2010 г. и 30.07.2017 г. в Костромской области, 29.05.2007 г. в Брянской области, 02.08.2017 г. в Тверской области.

<sup>1</sup> Спутниковые снимки Meteosat. Электронный ресурс: <https://kachelmannwetter.com/de/sat> (дата обращения 03.04.2021).

<sup>2</sup> Метеорад. Электронный ресурс: <http://meteorad.ru/static/phenomena24.gif> (дата обращения 03.04.2021).

### Смерчи на территории ЦФО

Согласно данным [Чернокульский и др., 2021], за период 2001-2018 гг. на территории ЦФО зафиксировано 300 случаев смерчей, выявленных со средней или высокой степенью достоверности. Еще 8 случаев подтверждено в 2019 г. и 16 случаев – в 2020 г. Из них 56 случаев являются значительными (интенсивность  $\geq F2$ ) и 5 – сильными (F3) по шкале Фудзита. Сильные смерчи отмечены 01.09.2003 г. в Курской области, 03.06.2009 г. в Московской и Ярославской областях, 12.06.2010 г. в Костромской области, 13.07.2016 г. и 04.08.2017 г. в Московской области.

В межгодовом распределении числа случаев смерчей резко выделяется 2017 г. за счет большого числа событий, выявленных по спутниковым данным. Этот выброс обусловлен вспышкой смерчей 2 августа 2017 г. в Тверской области и Северо-Западном ФО, которая является самой крупной в истории наблюдений в России по количеству зафиксированных смерчей за сутки [Чернокульский и др., 2021]. Подтвердить такое большое число случаев смерчей связанных с данной вспышкой удалось по спутниковым данным о ветровалах, поскольку смерчи проходили над лесопокрытой территорией.

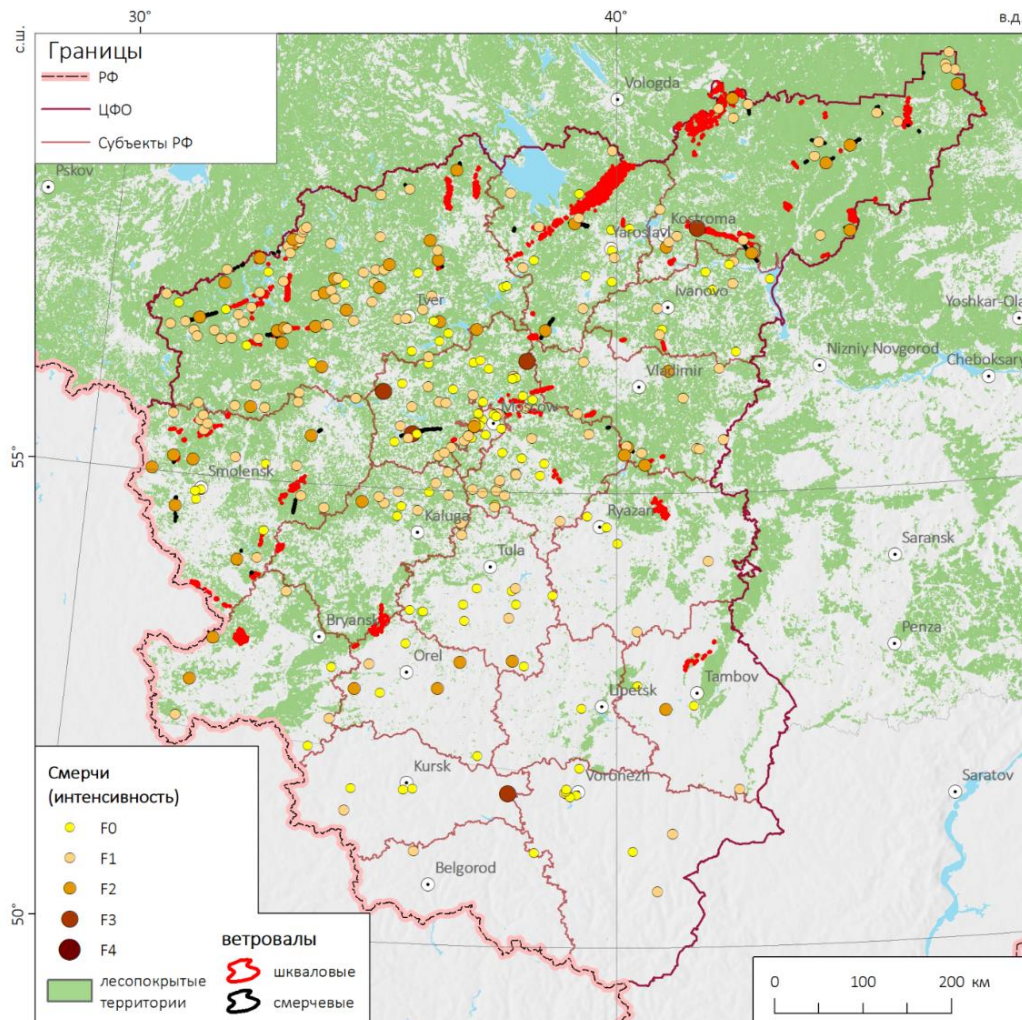


Рис. 7. Пространственное распределение случаев смерчей [Чернокульский и др., 2021] и ветровалов [Shikhov et al., 2020] на территории ЦФО. Данные о смерчах за 2001–2018 гг., о ветровалах – за 2001–2020 гг.

Fig. 7. Spatial distribution of tornadoes in 2001–2018 [Chernokulsky et al., 2021] and windthrow events in 2001–2020 [Shikhov et al., 2020] on the territory of CFD

## ВЫВОДЫ

Разработанная картографическая база данных и онлайн-картографический сервис являются первым подобным проектом для территории России. На основе интеграции различных источников данных впервые могут быть получены реалистичные оценки повторяемости различных видов КОЯП для наиболее населенной части территории страны, которая к тому же характеризуется значительными рисками, связанными с прохождением этих явлений [Rivin *et al.*, 2019]. Полученные данные также представляют интерес для анализа синоптических и мезомасштабных условий возникновения КОЯП и для верификации моделей их краткосрочного прогноза.

В сравнении с ранее опубликованными базами данных о КОЯП, в том числе с Европейской базой данных ESWD, разработанная база данных для территории ЦФО отличается предоставлением более детальной информации об условиях образования явлений, а также о характеристиках конвективных облачных систем, которые сгенерировали данные явления. С одной стороны, это существенно увеличивает время на обработку информации при заполнении базы данных, с другой стороны – позволяет провести взаимную верификацию наземных, радиолокационных и спутниковых наблюдений за случаями КОЯП. В целом создание базы данных в перспективе позволит приблизить изученность климатологии КОЯП на территории ЦФО к уровню США и Западной Европы.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФ (грант № 18-77-10076), сбор исходных данных – при поддержке РФФИ (грант № 20-35-70044) и гранта Президента РФ № МК 313.2020.5.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Scientific Foundation (Project No. 18-77-10076), data collection was funded by Russian Foundation of Basic Research (Project No. 20-35-70044) and RF President Grant no. МК 313.2020.5.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бедрицкий А.И., Коршунов А.А., Коршунова Н.Н., Ламанов В.И., Шаймарданов М.З.* Опасные гидрометеорологические явления, вызываемые ветром, и их влияние на экономику России. Метеорология и гидрология, 2001. № 9. С. 5–17.
2. *Калинин Н.А., Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Костарев С.В., Быков А.В.* Условия возникновения сильных шквалов и смерчей, вызывающих крупные ветровалы в лесной зоне Европейской части России и Урала. Метеорология и гидрология, 2021. №2. С. 35–49.
3. *Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И., Шихов А.Н., Ажигов И.О., Селезнева Е.В., Захарченко Д.И., Antonescu B., Kühne T.* Смерчи в российских регионах. Метеорология и гидрология, 2021. №2. С. 17–34.
4. *Chernokulsky A, Kurgansky M., Mokhov I., Shikhov A., Azhigov I., Selezneva E., Zakharchenko D., Antonescu B., Kühne T.* Tornadoes in Northern Eurasia: from the Middle Age to the Information Era. Monthly Weather Review, 2020. V. 148. P. 3081–3111. DOI: 10.1175/MWR-D-19-0251.1.
5. *Chernokulsky A.V., Kurgansky M.V., Mokhov I.I.* On characteristic reanalysis-based values of convective instability indices for Northern Eurasia tornadoes. IOP Conference Series:

- Earth and Environmental Science, 2019. V. 231. art. No 012012. DOI: 10.1088/1755-1315/231/1/012012.
6. *Diffenbaugh N.S., Scherer M., Trapp R.J.* Robust increases in severe thunderstorm environments in response to greenhouse forcing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013. V. 110 (41). P. 16361–16366. DOI: 10.1073/pnas.1307758110.
  7. *Dotzek N., Groenemeijer P., Feuerstein B., Holzer A.M.* Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD. *Atmospheric Research*. 2009. V. 93. P. 575–586. DOI: 10.1016/j.atmosres.2008.10.020.
  8. *Edwards R., LaDue J.G., Ferree J.T., Scharfenberg K., Maier C., Coulbourne W.L.* Tornado Intensity Estimation: Past, Present, and Future. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013. V. 94(5). P. 641–653. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00006.1.
  9. *Groenemeijer P., Kuhne T.* A climatology of tornadoes in Europe: results from the European Severe Weather Database. *Monthly Weather Review*, 2014. V. 142. P. 4775–4790. DOI: 10.1175/MWR-D-14-00107.1
  10. *Groenemeijer P., Púčik T., Holzer A.M., Antonescu B., Riemann-Campe K., Schultz D.M., Kühne T., Feuerstein B., Brooks H.E., Doswell C.A. III, Koppert H.-J., Sausen R.* Severe Convective Storms in Europe: Ten Years of Research and Education at the European Severe Storms Laboratory. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017. V. 98(12). P. 2641–2651. DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0067.1.
  11. *Hersbach H. et al.* The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020. V. 146. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
  12. *Kerkmann J., Lutz H.J., König M., Prieto J., Pylkko P., Roesli H.P., Rosenfeld D., Zwatz-Meise, V., Schmetz J., Schipper J., Georgiev C., Santurette P.* MSG Channels, Interpretation Guide, Weather, Surface Conditions and Atmospheric Constituents. 2006. Электронный ресурс: [http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg\\_interpretation/index.html](http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg_interpretation/index.html). (дата обращения 03.04.2021).
  13. *Klaes K. D.* A status update on EUMETSAT programmes and plans. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2017. V. 10402. Art. No 1040202. DOI: 10.1117/12.2273849.
  14. *Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D., Park W., Chernokulsky A.V.* Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme. *Nature Geoscience*, 2015. V. 8(8). P. 615–619. DOI: 10.1038/ngeo2483.
  15. *Napolitano E., Marchesini I., Salvati P., Donnini M., Bianchi C., Guzzetti F.* LAND-deFeND – An innovative database structure for landslides and floods and their consequences. *Journal of Environmental Management*. 2018. V. 207, P. 203–218. DOI:10.1016/j.jenvman.2017.11.022.
  16. *Púčik T., Groenemeijer P., Rýva D., Kolář M.* Proximity Soundings of Severe and Nonsevere Thunderstorms in Central Europe. *Monthly Weather Review*. 2015. V. 143 P.4805–4821. DOI: 10.1175/MWR-D-15-0104.1.
  17. *Radler T., Groenemeijer P., Faust E., Sausen R., Púčik T.* Frequency of severe thunderstorms across Europe expected to increase in the 21st century due to rising instability. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2019. V. 30. DOI: 10.1038/s41612-019-0083-7.
  18. *Rivin G.S., Vil'fand R.M., Kiktev D.B., Rozinkina I.A., Tudriy K.O., Blinov D.V., Varentsov M.I., Samsonov T.E., Bundel' A.Y., Kirsanov A.A., Zakharchenko D.I.* The System for Numerical Prediction of Weather Events (Including Severe Ones) for Moscow Megacity: The Prototype Development. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2019. V. 44(11). P. 729–738. DOI: 10.3103/S1068373919110025.

19. *Saha S., et al.*, 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2010. V. 91. P. 1015–1057. DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1.
20. *Shikhov A.N., Chernokulsky A.V.* A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe. *Remote Sensing of Environment*, 2018. V. 204. P. 553–567.
21. *Shikhov A.N., Chernokulsky A.V., Azhigov I.O., Semakina A.V.* A satellite-derived database for stand-replacing windthrow events in boreal forests of European Russia in 1986–2017. *Earth Syst. Sci. Data*, 2020. V. 12. P. 3489–3513. DOI: 10.5194/essd-12-3489-2020.
22. *Taszarek M., Brooks H.E., Czernecki B.* Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe. *Monthly Weather Review*, 2017. V. 145. P. 1511. DOI: 10.1175/MWR-D-16-0384.1.

### REFERENCES

1. *Bedritskii A.I., Korshunov A.A., Korshunova N.N., Lamanov V.I., Shaimardanov M.Z.* Hazardous hydrometeorological phenomena and their impact on Russia's economy: Destructive-force winds. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2001. V. 9. P. 1–9 (in Russian).
2. *Kalinin N.A., Shikhov A.N., Chernokulsky A.V., Kostarev S.V., Bykov A.V.* Formation Environments of Severe Squalls and Tornadoes Causing Large-scale Windthrows in the Forest Zone of European Russia and the Ural. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2021. V. 46(2). P. 83–93. DOI: 10.3103/S1068373921020035 (in Russian).
3. *Chernokulsky A.V., Kurgansky M.V., Mokhov I.I., Shikhov A.N., Azhigov I.O., Selezneva E.V., Zakharchenko D.I., Antonescu B., Kühne T.* Tornadoes in the Russian Regions. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2021. V. 46(2). P. 69–82. DOI: 10.3103/S1068373921020023 (in Russian).
4. *Chernokulsky A., Kurgansky M., Mokhov I., Shikhov A., Azhigov I., Selezneva E., Zakharchenko D., Antonescu B., Kühne T.* Tornadoes in Northern Eurasia: from the Middle Age to the Information Era. *Monthly Weather Review*, 2020. V. 148. P. 3081–3111. DOI: 10.1175/MWR-D-19-0251.1.
5. *Chernokulsky A.V., Kurgansky M.V., Mokhov I.I.* On characteristic reanalysis-based values of convective instability indices for Northern Eurasia tornadoes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019. V. 231. art. No 012012. DOI: 10.1088/1755-1315/231/1/012012.
6. *Diffenbaugh N.S., Scherer M., Trapp R.J.* Robust increases in severe thunderstorm environments in response to greenhouse forcing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013. V. 110 (41). P. 16361–16366. DOI: 10.1073/pnas.1307758110.
7. *Dotzek N., Groenemeijer P., Feuerstein B., Holzer A.M.* Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD. *Atmospheric Research*. 2009. V. 93. P. 575–586. DOI: 10.1016/j.atmosres.2008.10.020.
8. *Edwards R., LaDue J.G., Ferree J.T., Scharfenberg K., Maier C., Coulbourne W.L.* Tornado Intensity Estimation: Past, Present, and Future. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013. V. 94(5). P. 641–653. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00006.1.
9. *Groenemeijer P., Kühne T.* A climatology of tornadoes in Europe: results from the European Severe Weather Database. *Monthly Weather Review*, 2014. V. 142. P. 4775–4790. DOI: 10.1175/MWR-D-14-00107.1.
10. *Groenemeijer P., Půčik T., Holzer A.M., Antonescu B., Riemann-Campe K., Schultz D.M., Kühne T., Feuerstein B., Brooks H.E., Doswell C.A. III., Koppert H-J., Sausen R.* Severe Convective Storms in Europe: Ten Years of Research and Education at the European

- Severe Storms Laboratory. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017. V. 98(12). P. 2641–2651. DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0067.1.
11. *Hersbach H. et al.* The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020. V. 146. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
  12. *Kerkmann J., Lutz H.J., König M., Prieto J., Pylkko P., Roesli H.P., Rosenfeld D., Zwatz-Meise, V., Schmetz J., Schipper J., Georgiev C., Santurette P.* MSG Channels, Interpretation Guide, Weather, Surface Conditions and Atmospheric Constituents. 2006. URL: [http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg\\_interpretation/index.html](http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg_interpretation/index.html). (дата обращения 03.04.2021).
  13. *Klaes K. D.* A status update on EUMETSAT programmes and plans. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2017. V. 10402. Art. No 1040202. DOI: 10.1117/12.2273849.
  14. *Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D., Park W., Chernokulsky A.V.* Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme. Nature Geoscience, 2015. V. 8(8). P. 615–619. DOI: 10.1038/ngeo2483.
  15. *Napolitano E., Marchesini I., Salvati P., Donnini M., Bianchi C., Guzzetti F.* LAND-defeND – An innovative database structure for landslides and floods and their consequences. Journal of Environmental Management, 2018. V. 207. P. 203–218. doi:10.1016/j.jenvman.2017.11.022.
  16. *Půčik T., Groenemeijer P., Rýva D., Kolář M.* Proximity Soundings of Severe and Nonsevere Thunderstorms in Central Europe. Monthly Weather Review. 2015. V. 143 P. 4805–4821. DOI: 10.1175/MWR-D-15-0104.1.
  17. *Radler T., Groenemeijer P., Faust E., Sausen R., Půčik T.* Frequency of severe thunderstorms across Europe expected to increase in the 21st century due to rising instability. NPJ Climate and Atmospheric Science, 2019. V. 30. DOI: 10.1038/s41612-019-0083-7.
  18. *Rivin G.S., Vil'fand R.M., Kiktev D.B., Rozinkina I.A., Tudriy K.O., Blinov D.V., Varentsov M.I., Samsonov T.E., Bundel' A.Y., Kirsanov A.A., Zakharchenko D.I.* The System for Numerical Prediction of Weather Events (Including Severe Ones) for Moscow Megacity: The Prototype Development. Russian Meteorology and Hydrology, 2019. V. 44(11). P. 729–738. DOI: 10.3103/S1068373919110025.
  19. *Saha S., et al.,* 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis. Bull. Am. Meteorol. Soc. 2010. V. 91. P. 1015–1057. DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1.
  20. *Shikhov A.N., Chernokulsky A.V.* A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe. Remote Sensing of Environment, 2018. V. 204. P. 553–567. DOI:
  21. *Shikhov A.N., Chernokulsky A.V., Azhigov I.O., Semakina A.V.* A satellite-derived database for stand-replacing windthrow events in boreal forests of European Russia in 1986–2017. Earth Syst. Sci. Data, 2020. V. 12. P. 3489–3513. DOI: 10.5194/essd-12-3489-2020.
  22. *Taszarek M., Brooks H.E., Czernecki B.* Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe. Monthly Weather Review, 2017. V. 145. P. 1511–1528. DOI: 10.1175/MWR-D-16-0384.1.
-

УДК 551.324.63:338 (571.5)

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-136-150

А.Д. Китов<sup>1</sup>, С.Н. Коваленко<sup>2</sup>

**ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАЛЕОЛЕДНИКОВЫХ  
И МЕРЗЛОТНО-КАМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ГОРНОГО МАССИВА  
МУНКУ-САРДЫК (ВОСТОЧНЫЙ САЯН)**

**АННОТАЦИЯ**

Изучение нивально-гляциальных объектов хребта Мунку-Сардык (Восточный Саян) в качестве хороших долговременных индикаторов развития климата ведутся более 100 лет. Кроме наиболее изученных ледников Перетолчина и второго по величине ледника Радде, найдены различные переходные гляциально-мерзлотные образования, мерзлотно-лёд-каменные образования и погребённые ледники, которые в данной местности практически не исследовались. Один из таких объектов представляет вероятно погребённый ледник (активный каменный глетчер). Он представляет каменно-ледовый оползневым массив обломочного материала с ледяным ядром (мощностью до 20 м), длиной 660 м, шириной 150–250 м и общей толщиной около 25 м (по данным георадарного исследования), с перепадом высот 1810–2030 м над уровнем моря, местами поросший «пьяным» редколесьем. Вероятно, он сформировался 5500–4300 лет назад, одновременно с современными ледниками Перетолчина и Радде. По генетической классификации А.А. Галанина он соответствует каровым языковидным каменным глетчерам. По классификации алтайских гляциологов этот объект соответствует каменно-ледовым комплексам. Из-за постоянно движения потока, на выходе к руслу Бел. Иркутка он заканчивается «живой» осыпью, опасной для проходящих туристов. Возможен также катастрофический сход обломочного материала в русло реки с последствиями временного перекрытия основного русла. Изучение таких образований имеет самостоятельный интерес как самоорганизованной геосистемы длительного развития.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Восточный Саян, нивально-гляциальные образования, ледник, каменный глетчер, каменный поток, дистанционные исследования, георадарное исследование.

Aleksandr D. Kitov<sup>3</sup>, Sergey N. Kovalenko<sup>4</sup>

**PALEOCLIMATIC ANALYSIS PALEOGLACIAL AND PERMAFROST-ROCK  
FORMATIONS OF THE MUNKU-SARDYK MOUNTAIN RANGE (EAST SAYAN)**

**ABSTRACT**

The study of the nival-glacial objects of the Munku-Sardyk Range (East Sayan) as good long-term indicators of climate development has been going on for more than 100 years. In

<sup>1</sup> Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, д. 1, 664033, Иркутск, Россия; *e-mail:* [kitov@irigs.irk.ru](mailto:kitov@irigs.irk.ru)

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет, ул. Карла Маркса, д. 1, 664003, Иркутск, Россия; *e-mail:* [igpug@mail.ru](mailto:igpug@mail.ru)

<sup>3</sup> V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, 664033, Irkutsk, Ulan-Batorskaya st., 1, *e-mail:* [kitov@irigs.irk.ru](mailto:kitov@irigs.irk.ru)

<sup>4</sup> Irkutsk State University, 664003, Irkutsk, Karl Marx st., 1, Russia; *e-mail:* [igpug@mail.ru](mailto:igpug@mail.ru)



addition to the most studied glaciers of the Peretolchin glacier and second largest the Radde glacier, found various transitional glacial-permafrost formations permafrost-ice-rock formations and buried glaciers, which in the area were virtually un explored. One such object is a probably buried glacier (active rock glacier). It represents a rock-ice landslide array of fragmentation material with an ice core (up to 20 m), 660 m long, 150–250 m wide and a total thickness of about 25 m (according to geo-radar research), with a height difference of 1810–2030 m above sea level, overgrown with «drunk» woods. It probably formed 5500–4300 years ago, at the same time as the modern glaciers of Peretolchin and Rudde. According to the genetic classification of A.A. Galanin, it corresponds to the kar tongue rock glaciers. According to the classification of Altai glaciologists, this object corresponds to rock-ice complexes. Because of the constant flow movement, at the exit to the Belyi Irkut river, it ends with a «living» scree, dangerous for passing tourists. There may also be a catastrophic descent of the breakage material into the riverbed with the consequences of the temporary overlap of the main channel. The study of such formations has an independent interest as a self-organized geosystem of long-term development.

**KEYWORDS:** East Sayan, nival-glacial formations, glacier, rock glacier, rock stream, remote research, Ground-penetrating radar research.

## ВВЕДЕНИЕ

Восточный Саян представляет молодые горы, которые выдержали смену нескольких эпох оледенения и потепления. Горный массив Мунку-Сардык с одноименной вершиной, 3491 м н.у.м. (наибольшей в Восточном Саяне) находится на границе России и Монголии, самой северной её части (рис. 1).

За последние 11 тысяч лет значительное потепление было в эпоху оптимума голоцена (7,5 тысяч лет назад), похолодание 4500–5500 лет назад, когда зародились существующие ледники, потепление до XVI века нашей эры и похолодание в малый ледниковый период (МЛП), который закончился 160 лет назад. Нами были исследованы карово-троговые ступени горного района Мунку-Сардык (табл. 1).

Современный межледниковый период характеризуют первые 7 СВУК. Кроме того, шестой среднестатистический уровень нашей лестницы каров (7,5 тыс. лет) подтверждён радиоуглеродным анализом древнего дерева, найденного нами в 2008 г. в морене п/л Широкого в долине р. Буговек, на высоте 2300 м н.у.м (это на 200 м выше и дальше по долине на 1,5 км) от современной границы леса. Это подтверждает существование леса оптимального развития на месте современных ледников (1–2 СВУК, см. табл. 1). Однако в результате изменения климата в сторону потепления [РСС, 2007] происходит трансформации геосистем, связанная с изменением высотных поясов и состояния ледников. Происходит переход глетчеров в каменные глетчеры, преобразования каров существовавших ледников и образования каменно-ледовых потоков, сохраняющих свою активность значительно ниже хионосферы.

По характерным морфолого-количественным признакам каров палеоледников этой лестницы каров северного склона хр. Мунку-Сардык можно примерно восстановить климатическую кривую (верхняя часть рис. 2) похолоданий (местных оледенений) и потеплений в течение голоцена. Как видно из сравнения с подобной шкалой Д. Имбри и К. Имбри [Imbrie, Imbrie, 1986] наша шкала позволяет несколько детальнее её рассмотреть (расчленив) для нашего района.

По нашим данным на формирование рельефа в районе оказали своё влияние несколько палеоледников (п/л), явившихся результатом одной или двух прогрессивных и более восьми регрессивных стадий оледенения. Согласно палеоклиматическим данным самым первым оледенением в Сибири было самаровское, которое хорошо сопоставляется с вюрмским в Европе и соответствует второй половине среднего плейстоцена.

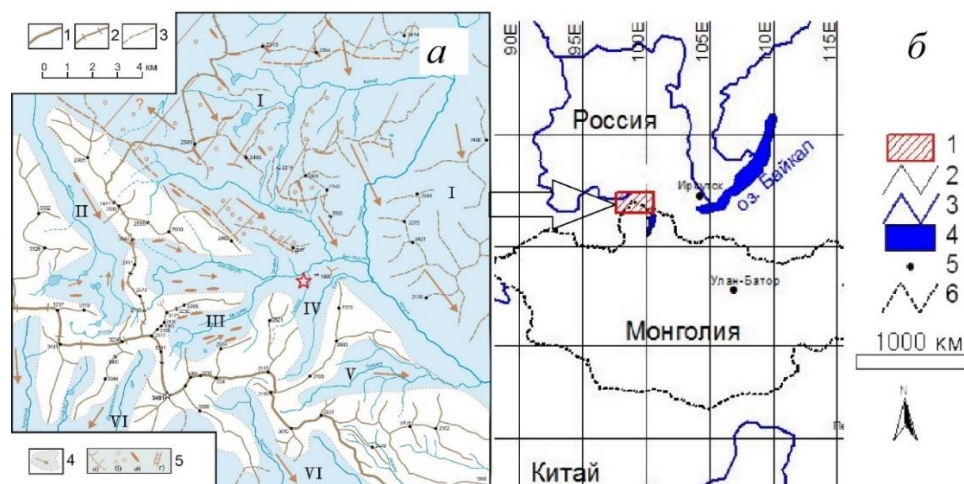


Рис. 1. Район исследования: а – схема структур и направление движения ледников Окинско-го оледенения: 1 – оси водораздельных хребтов; 2 – ось водораздельного хребта бассейнов рек Оки, Иркут и Селенги; 3 – максимальные границы зырянского оледенения и направления движения ледников (I – Окинско-го; II – Жохойско-го, III – Мугувекско-го; IV – Бугувекско-го; V – Буготинско-го; VI – Косогольско-го); 4 – структуры Окинско-го ледника (а – плечи трогов, б – морены, в – курчавые скалы, г – эпигенетические долины); звездочкой помечен рассматриваемый объект; б – общий вид: 1 – район исследования массив Мунку-Сардык; 2 – координатная сетка; 3 – реки; 4 – озёра; 5 – города; 6 – государственные границы

Fig. 1. Area of study: a – the scheme of structures and direction of movement of glaciers of the Okinsky glaciation: 1 – axis of dividing ridges; 2 – the axis of the watershed ridge of the basins of the rivers Oka, Irkut and Selenga; 3 – the maximum boundaries of the glaciation and the direction of the glaciers (I – Okinsky; II – Johoysky, III – Muguveksky; IV – Bugoveksky; V – Bugotinsky; VI – Kosogolskiy); 4 – structures of the Okinsky Glacier (a – the shoulders of trogs, б – moraines, в – curly rocks, г – epigenetic valleys); The object in question is marked with a star; b – general view: 1 – Munko-Sardyk massif research area; 2 – coordinate grid; 3 – rivers; 4 – lakes; 5 – cities; 6 – State Borders

Табл. 1. Возраст и последовательность ГМК долин рек Мугувек и Бел. Иркут

Table 1. Age and consistency of the GMC valleys of the Muguvek and Bel. Irkut rivers

Среднестатистический высотный уровень каров (СВУК)	n+2	n+1	n	8	7	6	5	4	3	2	1
Время экзарационной активности ледников, тыс. лет тому назад	135	110	80	24	11	8	5,5	2,4	0,56	0,31	0,11
Продолжительность последующего абляционного периода тыс. лет	25	30	56	13	3	2,5	3,1	1,84	0,25	0,20	0,15
Название гляциального морфологического комплекса (ГМК)	Окинский и др.		Усть-Иркутный	Портулановский Активный	Лесной, Бело-Иркутный	Луговой, Ровный, Конституции,	Пристенный, Сухой Шатаевой, Уютный Контрастов	Экойский, Озерный, Промежуточный	Древне-Северный, ВСГАО	Перетолчина, Радде, Пограничный	
Тип ледников	Покровно-долинный		Карово-троговой						Каровый		

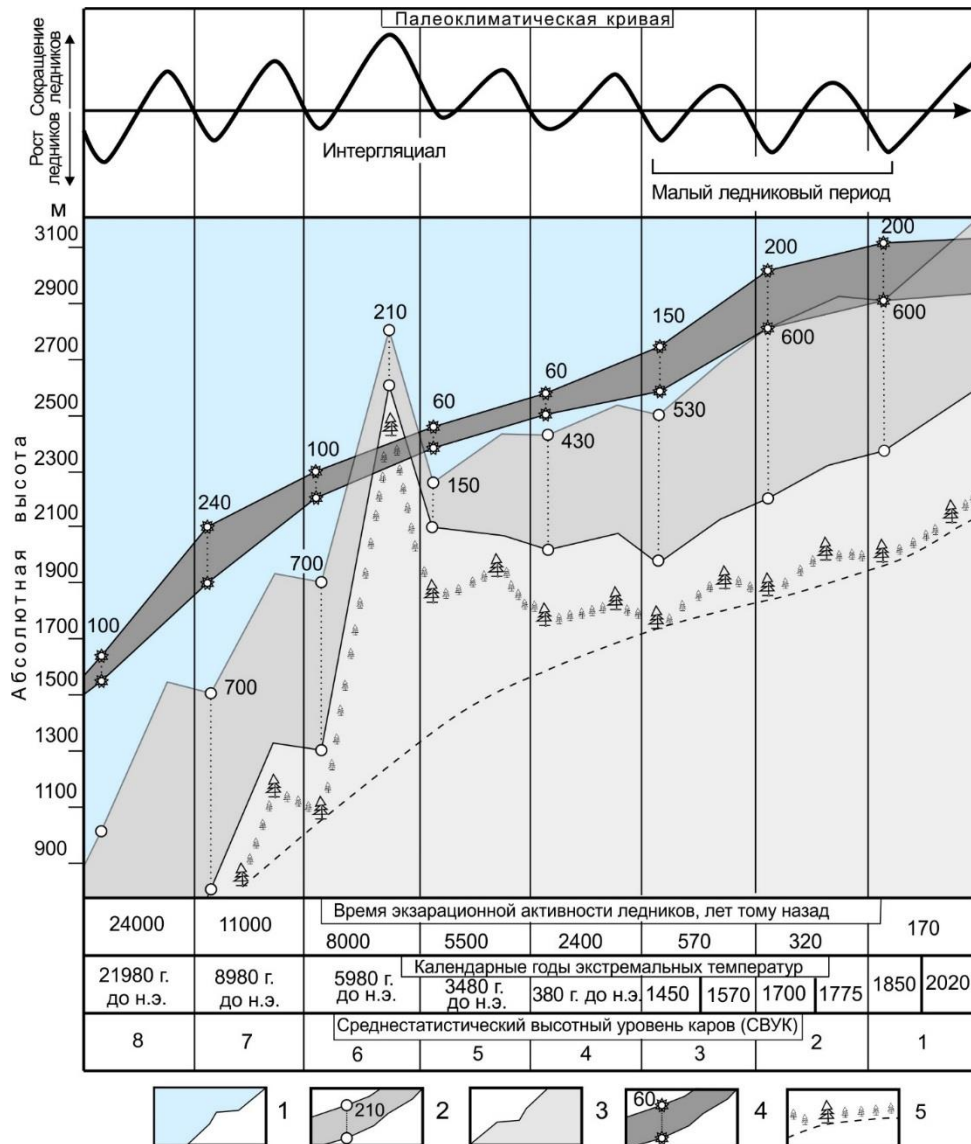


Рис. 2. Восстановление палеоклиматической кривой и положения высотных геокриологических уровней развития рельефа в районе г. Мунку-Сардык: 1–3 ступени развития рельефа: 1 – ледниковая, 2– термальная с указанием максимального значения вертикальной амплитуды, 3 – эрозионная; 4 – вертикальная амплитуда разброса высот палеокаров; 5 – граница леса с указанием её положения без учёта термального максимума (пунктир)

Fig. 2. Restoration of the paleoclimatic curve and the position of high-altitude geocryological levels of relief development in the Munku-Sardyk area: 1–3 stages of relief development: 1–glacial, 2 – thermal with the maximum value of vertical amplitude, 3 – erosive; 4 – vertical amplitude of the scattering of heights of paleokars; 5 – the boundary of the forest with its position without taking into account the thermal maximum (point)

Время начала оледенения около 135 тыс. лет, а окончание – 100–110 тыс. лет. Согласно Д. Кролля [Imbrie, Imbrie, 1986] с конца тазовского оледенения вообще наступила межледниковая эпоха, которая по расчётам учёных продлится ещё две тысячи лет, после чего наступит новое более мощное, чем даже предыдущее вюрмское оледенение, длительностью в 23 тыс. лет.

Согласно палеоклиматическим схемам (рис. 3) во время межледниковой эпохи в голоцене было как минимум пять похолоданий, приведших к возрождению локальных ледников карово-трогового и карового типов в горах с абсолютными высотами, превышающими исторически депрессивную снежную границу в этот период.

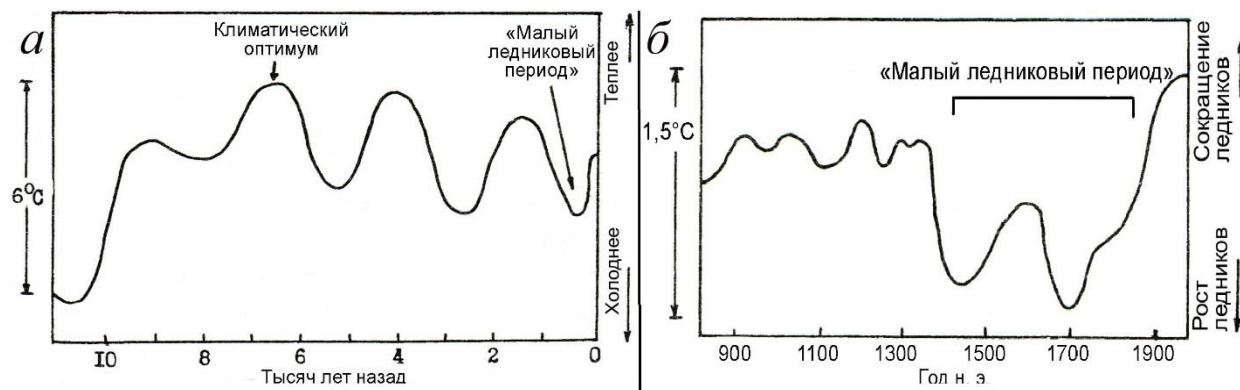


Рис. 3. Палеоклимат: а – изменения глобальной температуры в голоцене; б – климат последнего тысячелетия, установленный по анализу исторических материалов (по Имбри [Imbrie, Imbrie, 1986])

Fig. 3. Paleoclimate: a change in global temperature in the Holocene; b - the climate of the last millennium, established by the analysis of historical materials [Imbrie, Imbrie, 1986]

Основные формы рельефа горного массива Мунку-Сардык (основные водоразделы и отдельные отроги хребтов, верхние части долин рек Оки и Иркута) были сформированы в результате деятельности самых древних ледников первого оледенения второй половины среднего плейстоцена — самаровского и частично зырянского. Эти основные структуры рельефа горного массива значительно подработал и создал новые палеоледник Окинский. Область питания этого ледника находилась на водораздельной части рек Оки и Иркута.

Этот ледник имел прогрессивный покровно-долинный тип и максимальных размеров достиг, вероятно, во время зырянского оледенения. Его языки могли достигать Мондинской впадины. Им были заложены основные направления речных долин района вдоль основных направлений движения его языков III и IV (см. рис. 1 а).

Для восстановления палеоклимата, а также реконструкции происходящих процессов, большое значение имеет обнаружение артефактов. Такой меткой датирования стал найденный нами в древней морене значительно выше современной границы леса пень (а затем ещё несколько пней чуть ниже в заболоченной низине) лиственницы возрастом около 400 лет и более метра в диаметре. Это показало, что в оптимуме голоцена ледники полностью стаяли. Всего вероятнее они образовались вновь после последующего похолодания 4000–5000 лет назад (см. рис. 2, 3).

Погребённые ледники и каменные глетчеры помогают понять некоторые процессы деградации и самоорганизации нивально-гляциальных геосистем при изучении палеоклимата. Результаты изучения внутреннего строения каменных глетчеров в составе позднеголоценовых (неогляциальных) комплексов указывает на унаследованное их развитие на фоне климатических изменений путем перерождения из нормальных ледников в результате изменения питания, морфологии и внутреннего строения [Галанин, 2010, рис. 2]

В мае 2013 году нами был обнаружен уникальный каменный глетчер [Коваленко и др., 2013], образовавшийся ниже кара бывшего ледника на уровне 7-й ступени СВУК (см. табл. 1). Это мерзлотно-лёд-каменное образование (МЛКО), названное нами

первоначально каменный поток Активный, заканчивается «живой» осыпью в русло Бел. Иркут, которая представляет опасность для проходящих мимо туристов в любое время года. В 2014 году МЛКО был детальнее исследован в летнее время [Китов и др., 2014], а в 2017 частично проведено георадарное профилирование.

Дополнительно необходимо остановиться на терминологии и классификации каменных глетчеров, которая ещё не устоялась, тем более что терминология отечественной школы и зарубежных геоморфологов, и гляциологов не совпадает. Так, например, Д. Барш [Barsch, 1996] все что является продолжением действующих ледников, или их бронированной и погребённой части, считает каменными глетчерами (rock glacier), все остальное мерзлотными, присклоновыми и иными каменными потоками. Поэтому активные и неактивные каменные глетчеры относятся также к ледникам (хотя они могут быть погребены грунтом, покрыты лесом и не иметь явной зоны снежно-ледового питания. А.П. Горбунов выделяет ледники, активные, не активные и древние каменные глетчеры [Горбунов, 2006, 2013]. Алтайские учёные [Останин, Дьякова, 2013; Дьякова и др., 2020] каменные глетчеры и каменные потоки мерзлотного происхождения определяют, как гляциально-мерзлотные каменные образования (ГМКО). Наиболее развёрнутую классификацию с учётом генезиса каменных глетчеров дал А.А. Галанин [2008, 2010]. Кроме того, мерзлотно-ледовые каменные образования могут быть техногенного происхождения. Часто они образуются на основе хвостовых отвалов месторождений. При определении типа образования необходимо учитывать его происхождение. Также необходимо учитывать долю камней и льда, их соотношение. Например, типичный каменный поток – курум, как правило не содержит в своём составе лёд. Логично считать образование занимающее древний кар или оконечность современного ледника с соотношением лёд: камни около 50:50 % – каменным глетчером (это отмечает А. Горбунов [2006]). При большой доле льда (более 60%) – погребённым ледником или языком ледника под каменным чехлом, при большей доли камней и почвы, чем льда и не имеющем древней или современной связи с ледником – каменным потоком.

Мы тоже долго обсуждали это странное образование. Первоначально после наблюдения из русла Бел. Иркут сформировалась первая оползневая гипотеза. Это громадный оползень. Моренный материал, оставшийся после последнего оледенения, постепенно сползает по склону в долину.

В 2013 году мы впервые поднялись на склон и в кар этого образования и убедились, что это не оползень. Возникла вторя гипотеза – каменный поток на месте полностью стаявшего древнего ледника. Каменный поток, получая обломочный материалом с крутых склонов, транспортирует его с достаточно высокой скоростью и создаёт формы рельефа «псевдоморены» очень похожие на краевые морены настоящих ледников. Например, правая боковая осыпная «морена» высотой 12–15 м и шириной 25–30 м, подпитываясь коллювиально-деляпсивным материалом со склона, имеет длину более 150 м. Она, как и центральная движущаяся часть каменного потока, разбивается поперечными трещинами отрыва [Коваленко и др., 2013].

В 2017 году было проведено георадарное исследование центральной пологой части образования. Это исследование показало, что основную долю составляет метаморфический лёд, который не может образоваться подпиткой грунтовыми и поверхностными водами, унаследован от древнего ледника. Правильнее сказать, что это не каменный глетчер, а погребённый ледник. Его поверхностный грунтовый чехол составляет не более 5–10 % общей мощности. Однако в литературе отдельно не рассматриваются погребённые ледники, их классифицируют как абляционные каменные глетчеры, или каменные глетчеры с ледяным ядром [Barsch, 1996; Галанин, 2010].

По классификации Галанина [Галанин, 2008, 2010] – это образование следует отнести к активному языковидному каменному глетчеру. Если даже сравнить древесную растительность на нижней части глетчера и окружающих территорий, имеющих хотя и угнетённую, но близкую к оптимальному развитию состояние, то в русле же потока это в основном кустарниковая и сильно редуцированное листовенничное редколесье в виде «пьяного леса». Это свидетельствует о смещении и сильном охлаждении почвы. Кроме того, его генезис очевиден, он находится в русле бывшего ледника и повторяет его формы и поведение, но потерял ледово-фирновую область питания. Проводились исследования, как сильно каменный чехол замедляет таяние льда ледника. Слой всего 60 см в 4 раза замедляет таяние льда по сравнению с открытым льдом [Lambrecht et al., 2011]. Поэтому погребённый лёд может сохраняться тысячелетиями. Галанин также отмечает, что «формирование абляционных глетчеров является неким синергетическим процессом «самоорганизации ледников» – обратной реакции на неблагоприятные климатические условия» [Галанин, 2010].

В массиве Мунку-Сардык в 1950-е годы был обнаружен погребённый ледник, который внесён в каталог ледников под №29 [Каталог, 1973]. Этот ледник был исследован нами, но провалов кровли и выходящего на поверхность линз льда найдено не было. Он требует дополнительно георадарного изучения для определения глубинной структуры.

Данная работа представляет продолжение исследований геосистем горного массива Мунку-Сардык и их особенностей в связи с изменением климата [Kitov et al., 2009].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения динамики и инвентаризации современного состояния ледников Мунку-Сардык использованы разномасштабные (с разным пространственным разрешением) космоснимки, полученные со спутников Quick Bird, Pleiades, Landsat-4, -5, -7, -8. Георадарное профилирование МЛКО проведено в 2017 году с помощью георадара Око-2 с антенным блоком АБДЛ «Тритон» (центральная частота 100 МГц) с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 10$  (в отличие от льда, когда  $\epsilon = 3$  [Мачерет, 2006]) и дистанцией ожидания отражённой волны 100 м. Обработка георадиолокационных разрезов проводилась в программе «GeoScan-32». Учитывался опыт георадарного исследования каменных глетчеров по работам отечественных [Останин, Дьякова, 2013] и зарубежных авторов [Maurer, Hauck, 2007].

Навигационная информация собиралась с помощью портативных GPS-приёмников Garmin GPSmap-64st. Запись приёмником велась в формате WGS-84 десятичных градусов.

Ландшафтная оценка территории производилась на основе разновременных космических снимков Landsat с разрешением 15–30 м/пиксел. Снимки были привязаны к топографической карте масштаба 1:100 000 и приведены в единую проекцию Пулковско-1942 WGS-84, зона 17. Дешифрирование и векторизация границ бъекта проводились в ручном режиме RGB-синтезированных снимков каналы 2-4-7 для Landsat-7 и 3-5-7 для Landsat-8. Все измерения выполнялись в программе ArcViewGIS-3.2a. Учитывая разрешение снимков 15 м/пиксель систематическая погрешность определения площади ледника оценивается в 0,12 км<sup>2</sup> или 5 % от измеряемой величины. Также использовались наземные снимки для детального морфологического изучения компонентов объекта.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассматриваемый МЛКО «Активный» расположен в самом интенсивно посещаемом туристами и учёными месте – в правом борту реки Белый Иркут в трёх километрах от устья (рис. 4). На схеме выделена наиболее активная часть МЛКО. Каменные глетчеры Восточного Саяна ранее упоминались в работе М.Г. Гросвальдом

[1959]. Нами они описывались в Вестнике кафедры географии ВСГАО [Коваленко, 2011] в районе Мунку-Сардык, причём, как современные, так и древние, находящиеся на различных стадиях формирования, выделяемых Л.Н. Ивановским [1981].

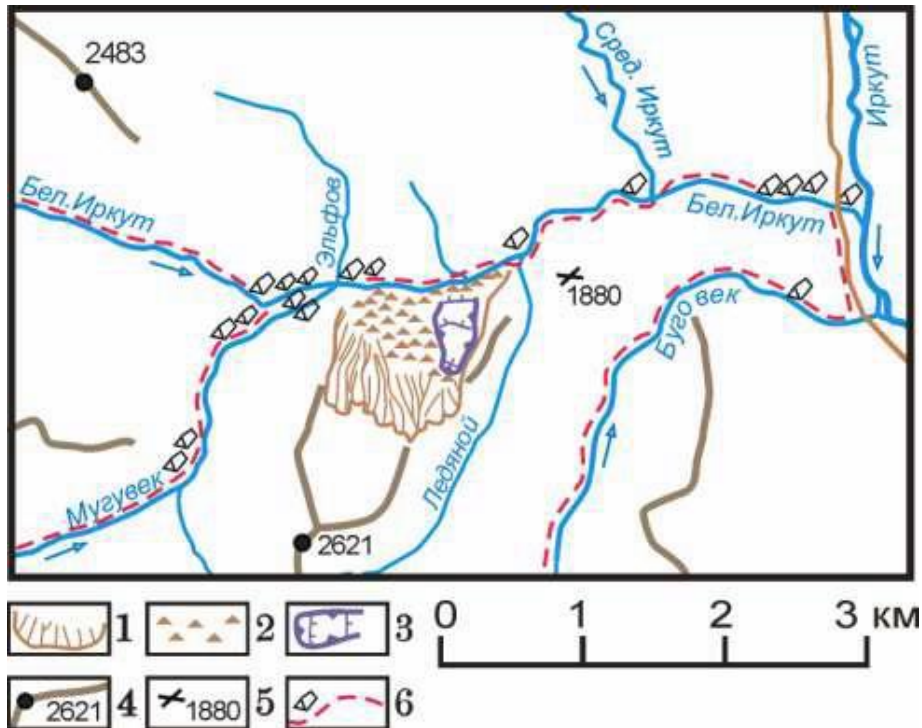


Рис. 4. Положение каменного глетчера на карте района и в структуре живой Бело-Иркутской осыпи: 1 – денудационная часть осыпи, 2 – денудационно-аккумулятивная часть осыпи, 3 – каменный глетчер, 4 – основные хребты с отметками высот, 5 – активно посещаемые туристами перевалы с отметками высот, 6 – места постоянных стоянок и наиболее популярные маршруты туристов

Fig. 4. The position of the rock glacier on the map of the area and in the structure of the living Belo-Irkut scree: 1 – denudation part of the scree, 2 – denudation-accumulating part of the scree, 3 – rock glacier, 4 – main ridges with elevations, 5 – actively visited by tourists passes with elevation marks, 6 – places of permanent parking and the most popular routes of tourists

При беглом знакомстве с обнаруженным объектом создается впечатление, что это будто бы стабилизировавшийся длительно существующий каменный глетчер на третьем этапе развития (по Л.Н. Ивановскому), когда «на его поверхности выделяются чёткие и глубокие продольные и поперечные ложбины-рвы-провалы над трещинами в ледяном теле подземной части ледника. Наблюдаются дифференцированные криогенные подвижки поверхностных слоёв рыхлых отложений и пластические перемещения сцементированной вторичным и первичным льдом массы каменного глетчера. В результате этих подвижек образуются многочисленные поперечные гряды, ложбины, уступы и пр. Наиболее древняя приконцевая часть обычно выглядит в виде фронтального уступа, моренный материал, которого часто перемешан со склоновыми отложениями или навален на морены предыдущих стадий. Эта часть глетчера цементируется лишь инфильтрационным льдом» [Коваленко, 2011]. На фронтальном уступе хорошо видна линия днища МЛКО, из-под которого зимой образуется наледь.

Однако МЛКО «Активный» представляет единичный объект такого типа горного массива Мунку-Сардык. По классификации Голанина его можно отнести к комбинированным каменным глетчерам. Термин complex rock glacier ввёл Д. Барш [Barsch, 1996],

учитывая сложность процессов и генезис каменных глетчеров. А. Горбунов [2006] также отмечает, что в образованиях подобного типа наблюдается комплекс мерзлотных и гляциальных процессов.

По данным ДЗЗ были выделены и картографированы с помощью ГИС характерные элементы структуры МЛКО (рис. 5).

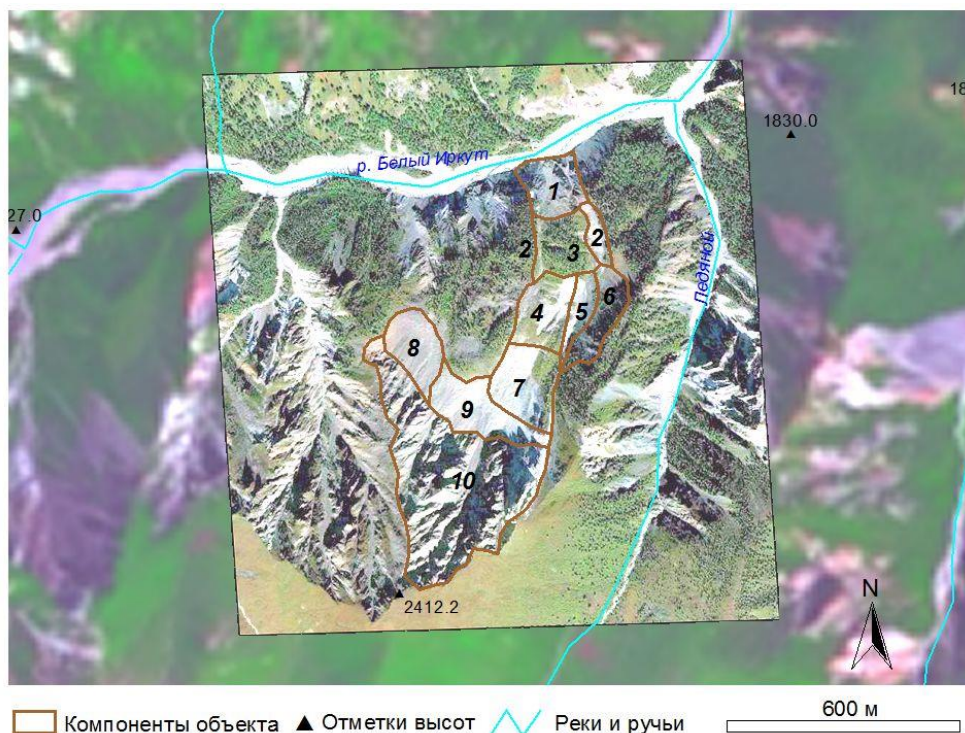


Рис. 5. Структура каменного глетчера, компоненты: 1 – конечная осыпь (фронтальный уступ); 2 – боковая морена; 3 – нижний участок, поросший кустарником и редколесьем; 4 – высокогорный луг (зандровая поляна); 5 – активный гребень; 6 – зона питания обломочным материалом; 7 – правый (основной, активный) язык; 8 – левый (не активный) язык; 9 – низ кара, ложе бывшего ледника; 10 – верх кара (современные осыпи); фон – космоснимок Landsat и фрагмент Quick Bird

Fig. 5. Structure of the rock glacier, components: 1 – the final scree (frontal ledge); 2 – side moraine; 3 – the lower area, overgrown with shrubs and woodland; 4 – alpine meadow (sandur); 5 – the active crest; 6 – feeding area with chip material; 7 – the right tongue (main, active); 8 – the left tongue (not active); 9 – the bottom of the kar, the bed of the former glacier; 10 – the top of the kar (modern scree); background is space image Landsat and Quick Bird

Верхнюю часть структуры представляют крутые склоны кара (10). В отдельных кулуарах склона вероятно формируются снежники и фирновые образования, представляющие временную зону питания в начале лета. Ниже выположенный участок кара (9) – бывшее основное ложе ледника. Возможно под обломочным материалом сохранилось ледяное ядро. Как видно, ледник спускался двумя языками: левого не активного потока (8) и правого активного (7) соответственно. Из зоны питания (6) поступает дополнительный обломочный материал со склонов. Активный гребень (5) состоит из современного обломочного материала, имеет трещины отрыва, в которых просматриваются ледяные вкрапления (вероятно это эмбриональный каменный глетчер, по классификации Галанина). Левее гребня расположен пологий участок (4) в виде луговины. Ниже по центру расположен участок, уже поросший кустарником и «пьяным» редколесьем (3), с



боковой мореной (2). Заканчивается вся эта структура фронтальным уступом и «живой» осыпью (1), с которой постоянно в русло Бел. Иркутта скатываются камни. Весь МЛКО (7, 5, 4, 3, 2, 1) неравномерно движется вниз. Со стороны Бел. Иркутта на осыпи (фронтальном уступе) видна линия соприкосновения рыхлого материала, сцементированного льдом, с коренными породами. Высота ступени около 15 м. Она же является истоком образования наледи на склоне осыпи. В летнее время – это постоянный сток глетчера.

По данным георадарного зондирования (рис. 6) толщина льда составляет значительную часть МЛКО.

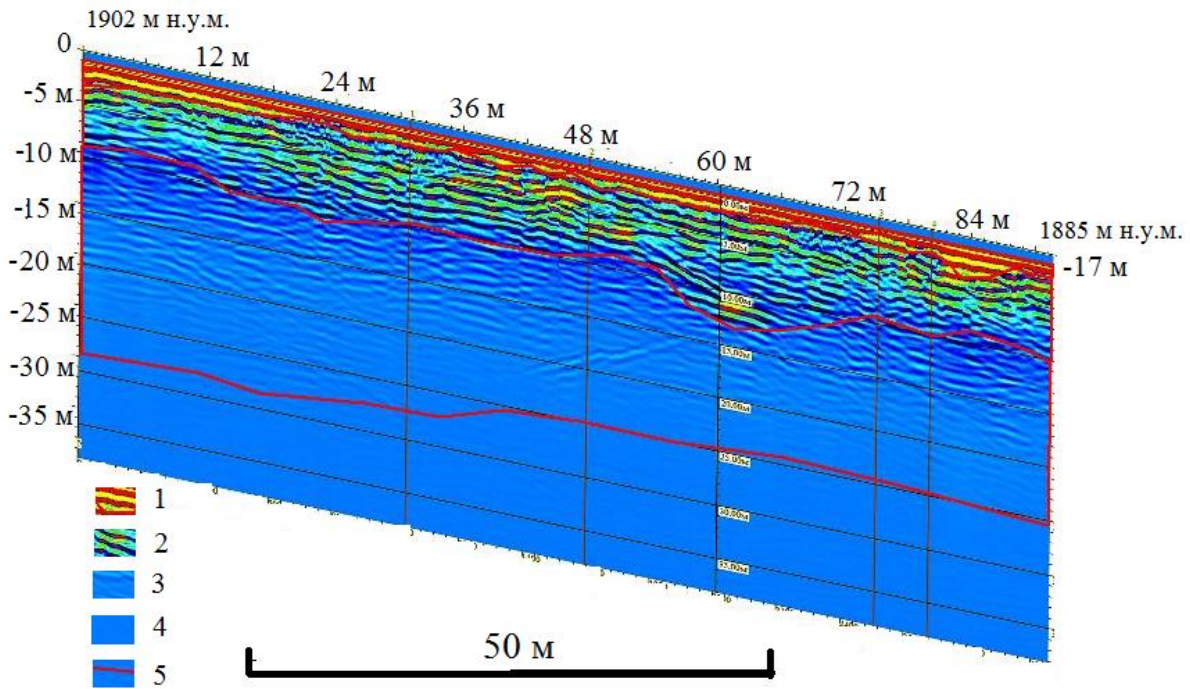


Рис. 6. Радарограмма МЛКО вдоль структуры 5 и 3 (см. рис. 5) длиной 92 м с учётом рельефа: 1 – каменная кровля; 2 – ледово-каменное тело (примерно в равных соотношениях льда и обломочного материала); 3 – метаморфический лёд (ледяное ядро); 4 – ложе (мёрзлые коренные породы); 5 – линии разграничения сред (1–2–3–4)

Fig. 6. Radarogram along structure 5 and 3 (see figure 5) 92 m long, taking into account relief: 1 – rock roof; 2 – ice-rock body (approximately equal ratios of ice and debris material); 3 – metamorphic ice (ice core); 4 – lodge (dark indigenous breeds); 5 – region demarcation lines (1–2–3–4)

Верхний слой каменного гребня (5) около 2 м составлен каменными обломками, под кровлей до 7 м – каменно-ледовая масса, ниже до 15–20 м ледяное тело. Мёрзлые коренные породы начинаются с 20–25 м. По площади разреза соотношение соответствующих структур 1:2:3 – составляет в процентах соответственно 6:30:64 %. Основную долю объекта представляет лёд. Согласно другой радарограмме полученной ближе к уступу – толщина кровли увеличивается до 3 м, соотношение ледово-каменного тела и ледяного ядра почти одинаковы суммарно до 15 м. Нам не удалось получить чёткую границу ложа каменного глетчера. При изучении каменных глетчеров Тянь-Шаня исследователи [Галанин и др., 2017] устанавливали  $\epsilon = 6$ , а также использовали георадары Око-2 и Питон с разной центральной частотой. На частоте 50 МГц лучше прорабатываются глубинные части объекта, а на частоте 300 МГц – кровля. В нашем же распоряжении был прибор с частотой 100 МГц.

МЛКО находится в диапазоне высот 1810–2030 м н.у.м. Схема продольного разреза представлена рис. 7, а геоморфологическая обстановка – рис. 8.

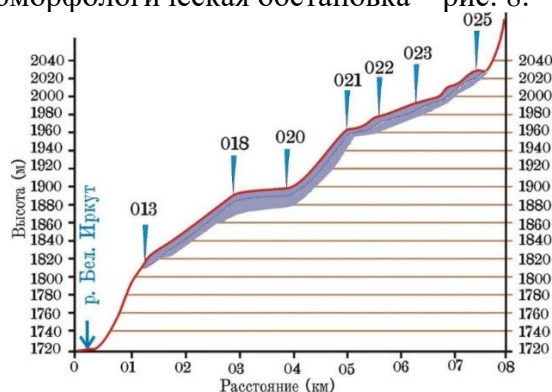


Рис. 7. Гипсометрический профиль МЛКО с точками наблюдения (тН: 013–025)

Fig. 7. Gipsometric profile with observation points (pO: 013–025)

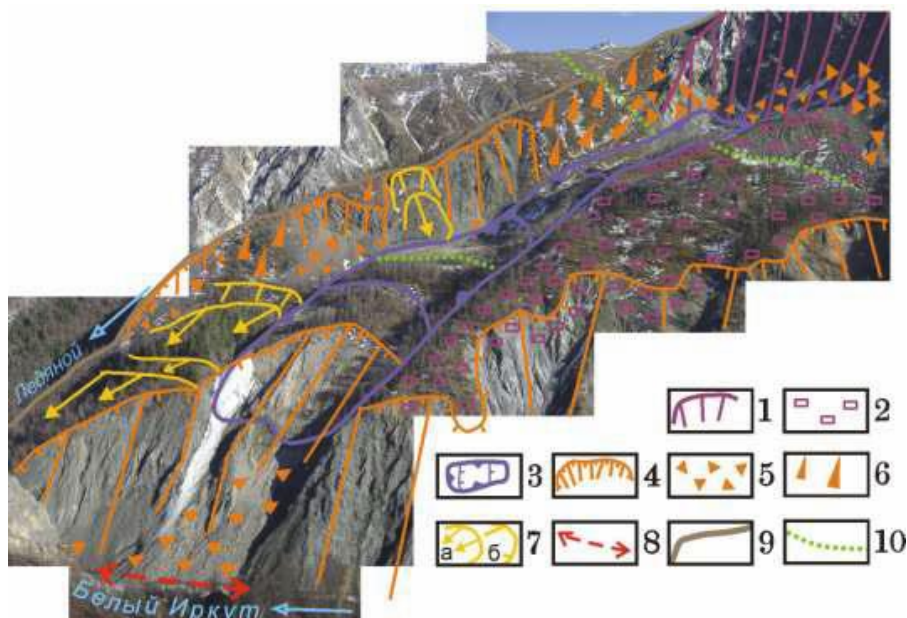


Рис. 8. Общий вид МЛКО Активный: 1– стенка кара п/л Бакалавров ЕГФ, в современном виде представляющая часть денудационной осыпи, частично обеспечивающая каменный поток обломочным и водным материалом; 2 – моренный материал; 3 – контуры основного тела; 4 – денудационная часть живой современной Бело-Иркутной осыпи; 5 – аккумуляционная часть современной осыпи (коллювий); 6 – солифлюкционно-делювиальные отложения; 7 – оползни: а) деляпсий, б) плоскости скольжения; 8 – наиболее опасный участок тропы по Белому Иркуту; 9 – водораздел Белого Иркута и руч. Ледяного; 10 – граница леса

Fig. 8. General view of the Aktivniy rock glacier: 1 – wall kar p/g Bachelors EGF, in its modern form representing part of the denudation scree, partially providing the stone flow of the fragmentation and water material; 2 – moraine material; 3 – contours of the main body; 4 – the denuclearization part of the living modern Bel-Irkut scree; 5 – the accumulation part of modern scree (colluvium); 6 – solvulation-deuvial deposits; 7 – landslides: a) delapia, b) sliding planes; 8 – the most dangerous section of the trail on the Belyi Irkut river; 9 – the watershed of the Belyi Irkut river and the Ledynoy river; 10 – forest boundary

Длина каменного глетчера от выхода его на живую Белоиркутскую осыпь (тН 013) до стенки кара (тН 025) составляет 660–670 м (см. рис. 5). Здесь же на осыпи он имеет максимальную ширину, достигающую 120–150 м. Подошва мёрзлых грунтов каменного потока в тН 013 лежит на абсолютной высоте 1810 м (в 60–80 м над поймой реки), а в верхней части (тН 025) – на высоте 2020–2030 м. Таким образом, амплитуда вертикального размаха МЛКО составляет 200–210 м. На профиле потока в его разных частях можно выделить от трёх до семи выровненных площадок. Горизонтальная или слабонаклонная площадка в верхней части кара-трога глетчера (тН 025) представляет собой дно кара бывшего ледника и в настоящее время находится на высоте 2030 м. Выше неё по краю с коренным скальным склоном или по подножию коллювиальных аккумулятивных конусов осыпей проходит последняя, самая верхняя в системе глетчера трещина отрыва похожая на бергшрудн каровых ледников. Такие параметры верхнего и нижнего уровней выровненных площадок (кара и трога) соответствуют 7 СВУК (Портулановский уровень) или сартанскому возрасту периода оледенения второй его фазе 11 тыс. лет тому назад [Коваленко, 2011]. Поскольку кар сформировался в столь древнее время в рыхлых геологических породах (зелёные и чёрные хлоритовые сланцы), «глетчер» обеспечил себе новую жизнь после оптимума голоцена. Однако его низкое расположение привело к более быстрой деградации по сравнению с современными ледниками такими как Перетолчина и Радде. Он забронировался обломочным материалом, а в нижней части дополнительно почвенным чехлом, став погребённым ледником, или каменным глетчером языковидного типа. Его движение не прекращается круглогодично благодаря сохранившемуся ледяному ядру – это естественное движение глетчера с образованием на поверхности трещин-бергшруднов, но заполненных породой, скрывающей лед.

Центральная часть тела каменного глетчера разбита поперечными и продольными (краевыми) трещинами отрыва и скольжения, что создаёт грядовозападинный рельеф выположенных разноуровневых (повышающихся к стенке кара) поверхностей и довольно высокие извилистые уступы перпендикулярные направлению движения глетчера.



*Рис. 9. Слева фото процесса георадарного профилирования гребня 5 (см.рис. 5), далее выше виден участок 7 и крутой склон кара 10; справа – выдвигание передовой нижней части потока с «пьяным» лесом на живую осыпь 1*

*Fig. 9. On the left is the photo of the process of geo-radar profiling of the crest 5 (see figure 5), then above you can see the area 7 and the steep slope of the kar 10; on the right is the extension of the front end of the stream with a «drunk» forest on the «live» scree 1*

## ВЫВОДЫ

Изучаемая формация является несомненно объектом анализа при палеогеографических и палеоклиматических реконструкциях позднего голоцена Георадарное исследование позволило выявить погребённый лёд и определить соотношение каменной кровли, смеси лёд-камни и долю метаморфического льда. Вероятно, как ледник объект сформировался в период похолодания 5 или 3 тыс. лет назад (см. рис. 3 а), а судя по глубинной структуре сохранившегося ледяного ядра, деградация и погребение произошли 1–1,5 тыс. лет назад. МЛКО имеет следующие метрические характеристики: общая длина от верха кара до русла реки 1150 м, длина активной движущейся части – 660 м, длина осыпи – 140 м, средняя ширина 200 м, общая площадь, включая кар – 0,3 км<sup>2</sup>; площадь активного правого языка – 0,1 км<sup>2</sup>; площадь осыпи – 0,024 км<sup>2</sup>; общая толщина в средней части – 25 м; толщина ледяного ядра – 12 м; толщина каменно-ледовой массы до 10 м, толщина кровли до 3 м. Для дальнейшего подповерхностного исследования необходимо варьирование параметрами георадара. Планируется георадарное профилирование верхней и нижней частей МЛКО Активный, поскольку исследована только его средняя часть. А также необходимо провести зондирование на разных частотах и разных значениях диэлектрической проницаемости для более точного определения состава кровли глетчера и его ложа. На основе информации ДЗЗ проводится мониторинг скорости движения отдельных компонентов объекта.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счёт средств государственного задания (№ госрегистрации темы: АААА-А21-121012190056-4); при поддержке РФФИ, гранта № 20-05-00253А «Трансформация геосистем Байкальской природной территории».

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out at the expense of the state task (subject No АААА-А21-121012190056-4); supported by the Russian Foundation of Basic Research, grant No 20-05-00253А «Transformation of geosystems of the Baikal natural area».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьякова Г.С., Горяевчева А.А., Останин О.В., Оленченко В.В., Бирюков Р.Ю. Геофизические исследования внутреннего строения гляциально-мерзлотных каменных образований Центрального Алтая. Лёд и Снег, 2020. Т. 60. № 1. С. 109–120. DOI: 10.31857/S2076673420010027.
2. Галанин А.А. Каменные глетчеры: история изучения и современные представления. Вестник СВНЦ ДВО РАН, 2008. № 3. С. 15–33.
3. Галанин А.А. Каменные глетчеры: вопросы терминологии и классификации. Вестник СВНЦ ДВО РАН, 2010, № 4. С. 2–11.
4. Галанин А.А., Оленченко В.В., Христофоров И.И., Северский Э.В., Галанина А.А. Высокодинамичные каменные глетчеры Тянь-Шаня. Криосфера Земли, 2017. Т. XXI. № 4. С. 58–74. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-4(58-74).
5. Горбунов А.П. Каменные глетчеры Азиатской России. Криосфера Земли, 2006. Т. X. № 1. С. 22–28.
6. Горбунов А.П. Каменные глетчеры, ледники и вечная мерзлота в Иране. Криосфера Земли, 2013. Т. XVII. № 1. С. 28–34.
7. Гросвальд М.Г. Каменные глетчеры Восточного Саяна. Природа, 1959. № 2. С. 89–91.

8. *Ивановский Л.Н.* Гляциальная геоморфология гор (на примере Сибири и Дальнего Востока). Новосибирск: Наука, 1981. 173 с.
9. *Каталог ледников СССР*. Т. 16. Вып. 1. Ч. 3–5. Вып. 2. Ч. 1. Л.: Гидрометеоздат, 1973. 64 с.
10. *Китов А.Д., Иванов Е.Н., Балязин И.В., Коваленко С.Н., Мункоева Э.В.* Третья 2014 года экспедиция на Мунку-Сардык клуба Портулан. Вестник кафедры географии ВСГАО. 2014. № 4 (11). С. 79–84.
11. *Коваленко С.Н.* Гляциальная геоморфология района г. Мунку-Сардык. Статья 1. Формы локального оледенения долин рек Мугувек и Белого Иркутта. Вестник кафедры географии ВСГАО, 2011. № 1. С. 38–62.
12. *Коваленко С.Н., Китов А.Д., Мункоева Э.В., Зацепина Н.А.* «Каменный глетчер» Белого Иркутта. Вестник кафедры географии ВСГАО, 2013. № 1–2 (7). С. 29–38.
13. *Останин О.В., Дьякова Г.С.* Морфодинамическая классификация каменных глетчеров Алтая. География и природопользование Сибири, 2013. № 16. С. 114–125. <http://elibrary.ru/item.asp?id=22897061>.
14. *Мачерет Ю.Я.* Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
15. *Barsch D.* Rock glaciers: Indicators for the Present and Former Geoecology in High Mountain Environments. Berlin: Springer-Verlag, 1996. 331 p.
16. *Imbrie J. and Imbrie K.P.* Ice ages: Solving the mystery. Cambridge: Harvard University Press, 1986. 224 p.
17. *IPCC.* Climate change 2007. The physical science basis. Contribution of working group 1 to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva: Published by IPCC, 2007. 996 p.
18. *Kitov A.D., Kovalenko S.N., Plyusnin V.M.* The results of 100-year-long observations of the glacial geosystem dynamics in the Munku-Sardyk massif. Geography and natural resources, 2009. V. 30. No 3. P. 272–278. DOI: 10.1016/j.gnr.2009.09.012.
19. *Lambrecht A., Mayer C., Hagg W., Popovnin V., Rezepkin A., LomidzeN., Svanadze D.* A comparison of glacier melt on debris-covered glaciers in the northern and southern Caucasus. The Cryosphere, 2011. V. 5. P. 525–538.
20. *Maurer H., Hauck C.* Instruments and methods geophysical imaging of alpine rock glaciers. Journ. of Glaciology, 2007. V. 53. № 180. P. 110–120.

#### REFERENCES

1. *Barsch D.* Rock glaciers: Indicators for the Present and Former Geoecology in High Mountain Environments. Berlin: Springer-Verlag, 1996. 331 p.
2. *Dyakoval G.S., Goreyavcheva A.A., Ostanin O.V., Olenchenko V.V., Biryukov R.Yu.* Geophysical studies of the internal structure of glacial-permafrost stone formations of the Central Altai. Ice and Snow, 2020. V. 60. No 1. P. 109–120 (in Russian). DOI: 10.31857/S2076673420010027
3. *Imbrie J. and Imbrie K.P.* Ice ages: Solving the mystery. Cambridge: Harvard University Press, 1986. 224 p.
4. *IPCC.* Climate change 2007. The physical science basis. Contribution of working group 1 to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva: Published by IPCC, 2007. 996 p.
5. *Galanin A.A.* Rock glaciers: the study history and modern conceptions Vestnik SVNC DVO RAN, 2008. No 3. P. 15–33 (in Russian).
6. *Galanin A.A.* Rock glaciers: the problems of terminology and classification. Vestnik SVNC DVO RAN, 2010. No 4. P. 2–11 (in Russian).

7. Galanin A.A., Olenchenko V.V., Khristoforov I.I., Severskiy E.V., Galanina A.A. Highly dynamic rock glaciers of Tien Shan. *Earth's cryosphere*, 2017. V. XXI. No 4. P. 58–74 (in Russian).
  8. Gorbunov A.P. Rock glaciers of the Aasian Russia. *Earth's cryosphere*, 2006. V. X. No 1. P. 22–28 (in Russian).
  9. Gorbunov A.P. Rock glaciers, glaciers and permafrost in Iran. *Earth's cryosphere*, 2013. V. XVII. No 1. P. 28–34 (in Russian).
  10. Groswald M. G. Rock Glaciers of East Sayan. *Nature*, 1959. № 2. P. 89–91 (in Russian).
  11. Ivanovsky L.N. Glacial Geomorphology of the Mountains (in the example of Siberia and the Far East). Novosibirsk: Science, 1981. 173 p. (in Russian).
  12. Kitov A.D., Kovalenko S.N., Plyusnin V.M. The results of 100-year-long observations of the glacial geosystem dynamics in the Munku-Sardyk massif. *Geography and natural resources*, 2009. V. 30. No 3. P. 272–278. DOI: 10.1016/j.gnr.2009.09.012.
  13. Kitov A.D., Ivanov E.N., Balyazin I.V., Kovalenko S.N., Munkoyev E.V. Third 2014 expedition to The Munku-Sardyk Club Portulan. *Herald of the Department of Geography of VSGAO*, 2014. No 4 (11). P. 79–84 (in Russian).
  14. Kovalenko S.N. Gatial Geomorphology of the Munku-Sardyk district. Article 1. Forms of local glaciation of the valleys of the Muguvek and White Irkut rivers. *Herald of the Department of Geography of VSGAO*, 2011. No 1. P. 38–62 (in Russian).
  15. Kovalenko S.N., Kitov A.D., Munkoeva E.V. Szezepin N.A. "Rock Glacier" of Bely Irkut. *Herald of the Department of Geography of VSGAO*, 2013. No 1–2 (7). P. 29–38 (in Russian).
  16. Lambrecht A., Mayer C., Hagg W., Popovnin V., Rezepkin A., LomidzeN., Svanadze D. A comparison of glacier melt on debris-covered glaciers in the northern and southern Caucasus. *The Cryosphere*, 2011. V. 5. P. 525–538.
  17. Macheret Ju.Ja. Radio-echo sounding of glaciers. Moscow: Scientific World, 2006. 392 p. (in Russian).
  18. Maurer H., Hauck C. Instruments and methods geophysical imaging of alpine rock glaciers. *Journ. of Glaciology*, 2007. V. 53. № 180. P. 110–120.
  19. Ostanin O.V., Diakova G.S. Morfodynamic classification of Altai rock glaciers. *Geography and natural use of Siberia*, 2013. No 16. P. 114–125. <http://elibrary.ru/item.asp?id=22897061> (in Russian).
  20. USSR Glacier Inventory. V. 16. Iss. 1. Part. 3–5. Iss. 2. Part. 1. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1973. 64 p. (in Russian).
-

УДК 528.8:504.054:574.3

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-151-170

**В.И. Кравцова<sup>1</sup>, О.В. Тутубалина<sup>1</sup>**

**ДИНАМИКА СЕВЕРНЫХ ЭКОСИСТЕМ  
НОРИЛЬСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА  
В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА  
(ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ)**

**АННОТАЦИЯ**

Норильский горно-металлургический комбинат по производству никеля, платины и палладия – один из главных загрязнителей Арктики. Характер и степень его воздействия на природные экосистемы за длительную, с 1935 г., историю его работы, различались вместе с изменением объемов производства при разных формах собственности, а ответная реакция экосистем развивалась на фоне потепления климата. На основании обзора выполненных в регионе исследований выделены периоды с разным соотношением техногенных и природных факторов динамики экосистем, различающиеся и по методам их изучения. Во второй половине XX века, в 1970–1990-е годы рост выбросов в атмосферу сернистого газа привел к усыханию лиственничных лесов на расстоянии до 120 км к юго-востоку от комбината, зафиксированному аэрофотосъемками и лесопатологическими исследованиями, а также составленной по снимкам со спутника Landsat и полевым исследованиям МГУ картой состояния экосистем.

В конце XX века распад СССР, перерыв в работе комбината, перешедшего из государственной в частную собственность, обусловил снижение темпов производства и выбросов в атмосферу. Это сочеталось с потеплением климата, усилившимся в арктических районах. Комплексные экспедиционные работы сибирских ученых в первые десятилетия XXI века, включая геохимические и дендрохронологические исследования, зафиксировали границы зон разной степени нарушенности экосистем, но одновременно показали, что наряду с продолжающейся деградацией растительности появляются признаки частичного восстановления экосистем. В конце второго десятилетия XXI века российские и американские ученые на основе обработки больших объемов дистанционных данных, с опорой на разновременный анализ вегетационных индексов, обнаружили «позеленение» нарушенных местообитаний на территории Норильского района как результат вторичной сукцессии при сложном взаимодействии техногенных и природных, в первую очередь климатических, факторов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** техногенное воздействие, гибель лесов, потепление климата, позеленение, космические снимки.

---

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, e-mail: [valentinamsu@yandex.ru](mailto:valentinamsu@yandex.ru)

Valentina I. Kravtsova<sup>1</sup>, Olga V. Tutubalina<sup>2</sup>

## DYNAMICS OF THE NORTHERN ECOSYSTEMS OF THE NORILSK INDUSTRIAL REGION UNDER THE CONDITIONS OF TECHNOGENIC IMPACT AND CLIMATE WARMING (A REVIEW)

### ABSTRACT

The Norilsk Mining and Metallurgical Plant for the production of nickel, platinum and palladium is the main pollutant in the Arctic. The nature and degree of its impact on natural ecosystems over a long, since 1935, history of its work, varied along with changes in production volumes under different forms of ownership, and the response of ecosystems developed against the background of climate warming. Based on a review of studies carried out in the region, periods with different ratios of technogenic and natural factors in the dynamics of ecosystems are distinguished, which also differ in the methods of their study. In the second half of the 20th century, in the 1970s–1990s, an increase in sulfur dioxide emissions into the atmosphere led to the drying up of larch forests at a distance of up to 120 km southeast of the plant, recorded by aerial photography and forest pathological studies, as well as by a map of the ecosystems state, compiled by Landsat imagery and MSU field research. At the end of the 20th century, after the collapse of the USSR, an interruption in the operation of the plant, which passed from state to private ownership, led to a decrease in production rates and emissions into the atmosphere. This was combined with climate warming, which intensified in the Arctic regions. Complex expeditionary work of Siberian scientists in the first decades of the XXI century, including geochemical and dendrochronological studies, fixed the boundaries of zones of varying degrees of disturbance of ecosystems, but at the same time showed that along with the continuing degradation of vegetation, partial restoration of ecosystems is taking place. At the end of the second decade of the XXI century, Russian and American scientists, based on the processing of large volumes of remote sensing data, based on a multi-temporal analysis of vegetation indices, discovered the "greening" of low habitats in the Norilsk region as a result of secondary succession with a complex interaction of technogenic and natural, primarily climatic, factors.

**KEYWORDS:** technogenic impact, forests destruction, climate warming, greening, satellite images.

### ВВЕДЕНИЕ

Основанный в 1935 г. на месте богатого месторождения цветных металлов Норильский горно-металлургический комбинат, ныне концерн Норильск-Никель – один из крупнейших в мире производителей никеля, платины и палладия и один из главных загрязнителей Арктики. В 1920-х – 1930-х гг. территория в его окрестностях была занята лиственными лесами [Шелкунова, 1974]; нарушения растительности до 1960-х гг. ограничивались вырубками и пожарами [Toutoubalina, Rees, 1999]. Но уже к 1970-м годам леса под воздействием выбросов в атмосферу сернистого ангидрида SO<sub>2</sub> начали усыхать и площади погибших лесов расширялись. За длительную историю существования комбината происходили важные изменения в его деятельности и влиянии на окружающую среду. С течением времени совершенствовались и методы исследования состояния экосистем. В советское время комбинат был государственным предприятием и постоянно наращивал произ-

---

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, e-mail: [valentinamsu@yandex.ru](mailto:valentinamsu@yandex.ru)

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: [valentinamsu@yandex.ru](mailto:valentinamsu@yandex.ru)



водство, вместе с этим росло губительное воздействие на прилегающие леса. Но развал СССР вызвал на рубеже веков перерыв в его деятельности и переход в частную корпорацию с уменьшением производительности. Изменившееся воздействие на природную среду сочетается с потеплением климата, особенно усилившимся в Арктике. Наряду с благоприятным влиянием на растительность, воздействие потепления на состояние мерзлых грунтов привело к усилению аварийности и новым видам техногенных катастроф. Это обусловило необходимость нового витка исследований состояния экосистем региона, предпринимаемых различными организациями по заказу Норильско-Таймырской энергетической компании. В предстоящих работах необходимо учесть опыт и результаты многолетних предшествующих исследований, проводившихся различными организациями. Задача статьи – на основе аналитического обзора публикаций за все время работы комбината рассмотреть сложное взаимодействие техногенных и природных факторов на состояние экосистем региона, изменявшееся в периоды конца XX века, начала XXI века и его второго десятилетия.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

За длительный период воздействия Норильского комбината на природную среду региона менялись и методы оценки ее нарушений. Для контроля за состоянием лесов неоднократно – в 1974, 1981, 1987 г. – проводилась аэрофотосъемка и составлялись лесопатологические карты [Космические..., 1998]. В начале 1990-х гг. выполнено геолого-экологическое картирование [Мельников и др., 1996]. В 1997 г. совместной экспедицией МГУ и Полярного института им. Скотта в Кембридже проведены комплексные полевые исследования (наземное спектрометрирование, геоботанические описания, аэровизуальные наблюдения) в радиусе 150 км от Норильска. Дешифрирование снимков со спутника Landsat-5,7 показало трудности отделения погибших редкостойных лиственничных лесов от травяно-кустарничковых тундр, необходимость учета для этого разносезонных снимков, отражающих стадии фенологического развития. Применение гибридной контролируемой-неконтролируемой классификации позволило впервые по космическим снимкам составить карту состояния растительности региона [Toutoubalina, Rees, 1999].

На втором этапе начала XXI в. исследования сибирских ученых опирались главным образом на проведенные в 2001–2013 гг. красноярским Институтом леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения РАН полевые работы по эталонным участкам, расположенным на разном удалении от источников выброса. Выполнены натурные и аналитические геохимические исследования почв, торфяных образований, растительности, мерзлотных явлений, снежного покрова. Исследования были сосредоточены на опорных ключевых участках в долине р. Рыбной на расстоянии от Норильска 22, 45, 68, 85 км; в последующем эти участки были охвачены повторными наблюдениями с интервалом до 7 лет. ГИС-методами обеспечивалось создание ЦМР ключевых участков и района в целом [Шишкин и др., 2014]

Натурные наблюдения дополнены дистанционными и геоинформационными методами. Выполнено картографирование растительности по снимкам со спутника Landsat-7 и материалам геоботанических полевых исследований на 7 полигонах, размещенных на территории от озера Пясино до Хантайского водохранилища [Телятников, Пристяжнюк, 2014]. Оценка степени нарушенности растительного покрова по наземным обследованиям 2001–2004 гг. дополнена также ГИС-анализом данных дистанционного зондирования — снимков Envisat/MERIS и SPOT/Vegetation за период 1998–2004 гг. [Корец и др., 2014]. Спутниковые наблюдения привлекаются и для регистрации загрязнения, разрабатываются алгоритмы для оценки выбросов SO<sub>2</sub> по спутниковым данным [Streets et al., 2013]. В Институте компьютерного моделирования созданы непараметрические алгоритмы для авто-

матической классификации и распознавания отклонений от естественного типа динамики растительности — индикаторов изменений в условиях жизни растений и техногенного воздействия на растительность [Shevyrnogov et al, 2000].

Важную дополнительную информацию дали дендрохронологические исследования. Для реконструкции влияния промышленности Норильска на леса северной Сибири выполнены физические и биохимические измерения ширины и вещественного состава колец годового прироста древесины сотен живых и погибших деревьев. Только в Норильском регионе сделано и обработано 268 спилов погибших стволов и живых деревьев лиственницы сибирской [Кирдянов и др., 2014]. Выявлено, что рост ширины колец, характерный для потепления, в районах техногенного воздействия замедляется (явление дивергенции).

На современном этапе конца второго десятилетия XXI века обнаруживающееся «позеленение Арктики» определило внимание к многолетнему ходу вегетационных индексов с использованием космических снимков от начала их поступления и привлечением новых методов обработки больших наборов данных. Такие исследования выполнены в Университете Вашингтона по материалам, полученным в рамках международных школ молодых мерзлотоведов в районе Норильска [Nyland, 2015] и в совместных проектах Московского и Кембриджского университетов [Тутубалина и др., 2020].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### Конец XX века, 1970–1990-е годы

Норильский горно-металлургический комбинат с 1965 г. перешел на использование содержащих серу руд Талнахского месторождения. С этого времени начался рост выбросов в атмосферу сернистого ангидрида SO<sub>2</sub> и при картографировании оленьих пастбищ в конце 1960-х гг. было отмечено усыхание лиственничных лесов [Щелкунова, 1974]. Новый пик выбросов SO<sub>2</sub> в 1979 г. пришелся на начало работы медеплавильного завода в спутнике Норильска городе Надежда [Kozlov, Zvereva, 2007]. Общий объем выбросов увеличился с 2 млн тонн в 1980 г. до 4,5 млн тонн в 1991 г. Поступление SO<sub>2</sub> в атмосферу к концу 1990-х составляло 2,4 млн т в год [Toutoubalina, Rees, 1999]. Соединение SO<sub>2</sub> с влагой атмосферы вызывает сернокислые дожди, губительные для растительности. В 1968 г. отмечены первые признаки ослабления и гибели лесов. К лету 1970 г. древесная растительность была повреждена и погибла на площади более 5 тыс. га. В последующие годы площади погибших лесов увеличивались пропорционально росту производства, поскольку газоочистные сооружения отсутствовали. По материалам повторных аэрофотосъемок к 1975 г. площадь поврежденных промышленными выбросами лесов составила более 200 тыс. га [Филипчук, Ковалев, 1990], увеличилась до 1400 тыс. га в середине 1980-х, а по более поздним оценкам до 2 млн га [Lukina, 2011 – в Nyland et al, 2017]. Площадь погибших лесов за 1976–1991 гг. выросла с 50 тыс. га до 400 тыс. га [Ковалев, 1994]. Граница погибших насаждений продвинулась в направлении преобладающих в летний период ветров на юго-юго-восток к 1990 г. на 100 км [Klein, Vlasova, 1992], а к 1997 г. на 120 км до Хантайского водохранилища и Малого Хантайского озера и на восток на 60 км, охватив низовья долин, расчленяющих плато Путорана. Южная граница поврежденных лесов достигла р. Кулюмбэ, а признаки повреждения в виде пожелтения хвои отмечались на расстоянии до 200 км к югу от Норильска – до р. Курейка [Космические..., 1998].

В 1980-х гг. оказались востребованными и появились материалы геоэкологической оценки территории вокруг комбината [Харук и др., 1996]. По весенним космическим снимкам со снежным покровом (Ресурс-Ф, май 1987 г.) и наземным наблюдениям с отбором проб снега Е.И. Пижанковой выявлены площади осаждения твердых фракций загрязнения воздуха в радиусе 100 км от Норильска [Космические..., 1998]. На основе полевых

исследований составлена ландшафтно-экологическая карта Норильского промрайона, охватывающая Норильск, Талнах, Надежду, Кайеркан [Белая и др., 1996, Горшков, 1997]. Выделены зоны с разной степенью загрязнения природной среды вокруг комбината на значительном удалении от него [Мельников и др., 1996].

Оценка состояния растительности региона по космическим снимкам выполнена группой сотрудников Московского университета и Полярного института им. Скотта в Кембридже на основе проведенных в августе 1997 г. комплексных полевых исследований. По снимку Landsat 5/TM 9 июля 1995 г. составлена карта, охватывающая участок 90 × 90 км вокруг Норильска (рис. 1). Карта характеризует земные покровы с указанием типа растительности, ее густоты, особенностей почв при разреженном покрове, степени нарушенности экосистем – всего 24 класса. Это первая составленная по космическим снимкам карта, отражающая состояние растительности Норильского района [Toutoubalina, Rees, 1999].

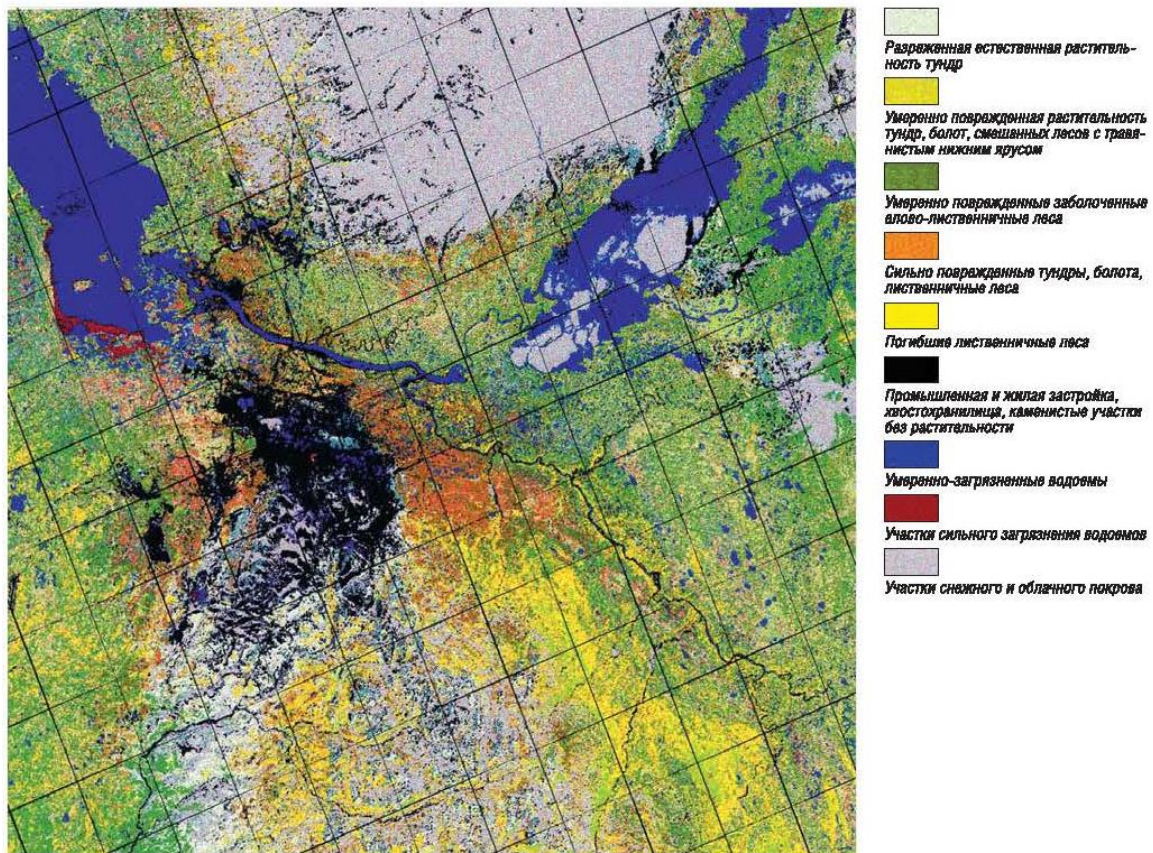


Рис. 1. Карта состояния растительности Норильского района, составленная на основе гибридной классификации снимка Landsat TM 1995 г. с опорой на данные полевых исследований 1997–98 гг. Легенда обобщена. Координатная сетка через 8 км [Toutoubalina, Rees, 1999]

Fig. 1. Map of the vegetation state in the Noril'sk region compiled through hybrid classification of a 1995 Landsat TM image on the basis of 1997–98 field data. The legend is generalized. 8-km coordinate grid [Toutoubalina, Rees, 1999]

В дополнение к этой обзорной карте, на небольшой участок 30 × 17 км вблизи Норильска выполнен анализ панхроматического снимка KeyHole 1961 г. и при сравнении со снимком Landsat-5 1995 г. получены данные об изменениях самого города (промзоны, прудов-охладителей) и о гибели растительности вокруг города за 34 года [Tutubalina, Rees,

2001]. Другими специалистами в пределах города исследована также реакция городских сооружений, построенных на многолетнемерзлых грунтах, на начавшееся потепление климата [Grebenets, Savchenko, 1995]. Выполнено изучение техногенного оползня севернее карьера Медвежий ручей, спровоцированного потеплением и угрожающего промзоне города [Гребенец и др., 2019]. Предпринято изучение городского «острова тепла» на основе сочетания данных наземных измерений автоматических метеостанций и тепловых снимков, полученных системой MODIS [Варенцов и др., 2014].

### **Рубеж веков □ 1990-е гг. и первые десятилетия XXI века**

В конце XX века драматично менялась организационная структура управления комбинатом. В 1989 г. в связи с истощением месторождений в Мурманской области Норильский комбинат был объединен с Североникелем и Печенганикелем в государственный концерн Норильский Никель. После распада СССР в 1991 г. он преобразован в РАО Норникель и в 1994 г. приватизирован по частям через аукцион. В 1995 г. по указу Б. Ельцина образован холдинг Норникель, купленный банком ОНЕКСИМ. В 1997 г. управление перешло основателям этого банка В. Потанину и М. Прохорову. В 1998 г. дефолт и финансовый кризис, а также последовавший мировой экономический кризис привели к падению рынков и перерыву производства. В 2001 г. предпринята финансовая реструктуризация предприятия и в августе начат выпуск никеля [Humphreys, 2011].

На рубеже веков вместе с изменением статуса компании и организации производства меняется соотношение техногенных и природных факторов, определяющих состояние экосистем региона. Все более значимым становится влияние потепления климата, особенно сильно проявляющееся в арктических широтах, где по данным НАСА MERRA за 30 лет (1980-е – 2010-е) отмечено повышение температур воздуха на 1,22 °C со скоростью 0,05 °C в год [Nyland, 2015], а на Таймыре даже 0,08 °C в год [Anisimov et al., 2013; Росгидромет, 2014]. Это приводит к изменению атмосферного давления, полей ветра, режима осадков, продолжительности сезона таяния и через них – к влиянию на биологические системы и углеродный цикл [Macdonald et al., 2005].

Выполнено сопоставление климатических моделей НАСА, разработанных на период 1950–2100 гг., с данными спутниковых наблюдений, в частности продолжительности залегания снежного покрова SCF (Snow Cover Frequency) по данным MODIS за 2001–2016 гг. В целом по Арктике уменьшение SCF составляет 0,91 день/год. В соответствии с расчетными моделями, площадь районов с холодным летом сократится к 2100 г. на 40%, они будут замещены районами с теплым и жарким летом. На представленных климатических картах экосистем 1951 и 2099 гг. район Норильска с современным холодным летом окажется в зоне климата с теплым и жарким летом [Eythorsson et al., 2019].

Взгляд на Землю как единую систему обострил внимание не только к ее естественным долговременным изменениям, но и к глобальным аспектам антропогенных и техногенных вторжений в функционирование этой системы. Современные климатические изменения в Арктике влияют на глобальные потоки ее загрязнения – воздушные и водные [Macdonald, Harner, Fyfe, 2005]. Для глобального мониторинга загрязнения атмосферы Земли, первостепенную значимость приобретают спутниковые методы. Измерения антропогенного SO<sub>2</sub> выполнялись в спутниковых экспериментах GOME, GOME-2, SCIAMACHY, OMI. Выполнен обзор алгоритмов для оценки выбросов SO<sub>2</sub> по спутниковым данным [Streets et al., 2013]. Создаются каталоги и базы данных глобального загрязнения выбросами SO<sub>2</sub>. На карте мира, составленной по данным GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) за 1996–2002 г., в Азии четко выделяется пятно Норильского промышленного района [Khokhar et al., 2005]. На картах мира, составленных на основе базы данных PKU-FUEL, разработанной Пекинским университетом, Норильск выделяется мак-

симальными выбросами в 2005 г. [Luo et al., 2020]. Данные о выбросах SO<sub>2</sub> в атмосферу, полученные со спутников Aura (OMI) и Suomi NPP (OMPS) использованы в экспериментах по картографированию зон экологического риска вблизи Норильска [Zotin et al., 2018]. Кроме спутниковых, для локальных исследований загрязнения в окрестностях Норильска опробованы самолетные эксперименты [Walter et al, 2012].

В новых условиях изменения функционирования концерна Норникель, и все сильнее проявляющегося климатического потепления, территория Норильского промышленного района привлекла пристальное внимание научного сообщества. Многолетние комплексные исследования специфики воздействия горнодобывающего и металлургического производства на лесотундровую растительность и другие компоненты биоценозов проведены в 2001–2013 гг. красноярским Институтом леса им. В.Н. Сукачева Сибирского Отделения РАН по проекту «Комплексная оценка состояния и мониторинг природной среды с целью выявления количественных критериев допустимого воздействия на ее компоненты». В целом полевыми наблюдениями охвачены 34 участка. По материалам исследований создана база данных. Результаты работ по проекту освещены в специальном выпуске Сибирского экологического журнала [Шишкин и др., 2014].

Кроме летних экспедиционных наблюдений по этому проекту в 2002–2004 г. выполнено исследование загрязнения снежного покрова с отбором проб и определением содержания и состава загрязняющих веществ (никеля, меди, других тяжелых металлов и серы) в образцах снега. Установлено, что большая часть загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу в виде пыли (90%), осаждается на подстилающую поверхность на расстоянии до 7 км от источников загрязнения, но они отмечаются и в радиусе 40 км, а в 2002 г. распространялись по долине Рыбной на 80 км. Загрязнители, поступающие в атмосферу в виде аэрозолей и газов, переносятся на значительные расстояния. Расчеты показывают, что только 2% выбросов серы осаждаются в радиусе 250 км, остальные включаются в глобальные геохимические циклы. На картах, составленных по результатам геохимических анализов проб снега, шлейф распространения водорастворимых форм серы с концентрацией более 200 кг/км<sup>2</sup> в год вытянут более чем на 100 км в северном направлении, а с концентрацией более 50 кг/км<sup>2</sup> в год более чем на 400 км в юго-восточном направлении от Норильска [Онучин и др., 2014].

Геохимическая оценка уровня загрязнения торфяных болот показала, что содержание тяжелых металлов проявляется вблизи промышленных предприятий Норильска и Талнаха, а воздействие под влиянием выбросов серы на большем расстоянии в болотных экосистемах долины р. Рыбной. Накопление тяжелых металлов и серы происходит в верхнем 5-сантиметровом (реже 15 см) слое торфяной залежи; глубже 30–35 см техногенные потоки не проникают [Ефремова, Ефремов, 2014]. На ключевых участках, удаленных от источника выбросов более чем на 80 км, поверхностное воздействие незначительно, но болота, расположенные в радиусе до 45 км от Норильска, подверглись сильному техногенному прессу [Карпенко, 2014].

По результатам натурных исследований почвенного покрова на эталонных участках выполнена экологическая оценка состояния почв. Выделены зоны: максимального загрязнения почв (с кларками концентрации тяжелых металлов и серы КК>10) на расстоянии от 3 до 30 км к югу, юго-востоку от Норильска и до 7–10 км к северу; умеренного загрязнения (КК 2–10) до 25 км к северо-западу и незагрязненные фоновые территории с КК < 2, удаленные на 40 км [Пономарева и др., 2014]. При исследованиях почвенного покрова подгольцового пояса плато Путорана в районе озер Кета, Лама и равнинной лесотундры в районе озера Большого влияние Норильского комбината не отмечено [Сеньков, 2014].

Значительно более широкое пространственное воздействие зафиксировано исследованиями состояния растительного покрова, для характеристики которого при участии

специалистов Центрального сибирского ботанического сада СО РАН по снимкам со спутника Landsat-7 и полевым описаниям составлена карта естественной растительности масштаба 1:200 000, охватывающая территорию от озера Пясино до Хантайского водохранилища. Эта детальная карта передает разнообразие растительности, представленное 17 ассоциациями, 9 союзами, 7 порядками, 6 классами; легенда карты включает 38 наименований с подробной характеристикой видового состава ассоциаций. Дополнительно выявлены антропогенные изменения и стадии деградации растительного покрова и составлена схема зон сильного, среднего и слабого антропогенного воздействия на растительность [Телятников, Пристяжнюк, 2014]. Это исследование показало, что под воздействием поллютантов формируются новые искусственные экосистемы, в которых снижено ценотическое и видовое разнообразие во всех группах высших и низших растений. Сокращение площади природных биоценозов ведет к уменьшению аккумуляции солнечной энергии и снижению первичной продуктивности [Телятников и др., 2014].

Для исследования ответной реакции лесных фитоценозов на техногенное воздействие, проявляющейся в ухудшении состояния и гибели древостоев с замещением лесных ассоциаций на более устойчивые комплексы, полевые работы проводились по трансектам в разных направлениях от комбината. В юго-восточном направлении на расстоянии от комбината 30–106 км характерно усыхание древостоев, отмирание кустарников. Гибель древостоя сопровождается трансформацией нижних ярусов, замещением лесных ассоциаций на тундровые и лугово-болотные комплексы. Растительность на трансектах в западном — юго-западном направлении на расстоянии 23–50 км испытала умеренные нарушения с сохранением зональных черт [Пименов и др., 2014].

На 4 эталонных участках по долине р. Рыбной на расстоянии от 22 до 85 км от комбината исследована динамика усыхания лиственницы сибирской. Дендрохронологическими методами определены даты гибели 268 деревьев. Гибель отдельных деревьев вблизи Норильска началась в 1940-х годах, сразу после ввода в эксплуатацию первых предприятий. Массовая гибель древостоев произошла в 1960-х, с вводом новых производств. На период 1975–1980 гг. приходится всплеск гибели лиственницы на расстоянии 85 км от комбината. К 2004 г. здесь только 23% деревьев оставались живыми. Величина радиального прироста годичных колец лиственницы свидетельствует о деградации роста перед полным разрушением древостоев. У отдельных оставшихся живыми деревьев отмечено некоторое увеличение прироста в конце 1990-х – начале 2000-х гг. Несмотря на это, при сохранении существующих темпов загрязнения лесоводы прогнозируют расширение зоны полностью погибших лесов [Кирдянов и др., 2014].

Для экстраполяции данных эталонных полевых наблюдений и лабораторных исследований на прилегающие территории выполнена классификация лесорастительных условий региона на основе цифровой модели рельефа SRTM и ландшафтных карт. По набору характеристик рельефа (высота, уклон, кривизна поверхности, экспозиция) выделено 8 классов сочетания элементов мезорельефа и с учетом информации о природно-климатических зонах классифицированы типы лесорастительных условий [Рыжкова и др., 2014].

По разновременным материалам со спутников Envisat/MERIS и SPOT/Vegetation выполнен анализ динамики состояния экосистем. В ГИС-анализ включены пространственные регрессионные модели содержания тяжелых металлов и серы в различных компонентах наземных экосистем. С опорой на эти материалы выполнена балльная оценка уровней загрязнения территории и степени нарушенности растительности; проведено экспертное зонирование территории по состоянию растительного покрова [Корец и др., 2014]. Выделены техногенные пустоши на расстоянии до 15 км от комбината, техногенные биоценозы в зоне удаления 20–90 км, умеренно (на расстоянии до 110 км) и слабо нарушен-

ные (до 140 км) природные экосистемы. Составленная карта нарушенности растительного покрова впервые четко зафиксировала границы 5 зон по этому показателю [Корец и др., 2014]. Однако сопоставление с предшествующими оценками площадей нарушений [Ковалев, 1994; Государственный..., 2004] показало их значительные расхождения, свидетельствующие о разном понимании исследователями категории «погибший лес».

Кроме экологической, дается и биогеохимическая оценка лесных экосистем в зоне влияния Норильского промышленного комплекса. Наземные исследования на ключевых участках на расстоянии от него от 22 до 85 км показали, что углероддепонирующая роль фитомассы уменьшается по градиенту загрязнения почти в 30 раз. Мертвый растительный материал выполняет роль сорбционного, седиментационного и механического барьера, где происходит концентрация тяжелых металлов и серы [Ведрова, Мухартова, 2014].

Не ограничиваясь материалами наземных исследований и экспертными оценками института леса, специалисты других институтов Сибирского отделения РАН (Ин-т биофизики, компьютерного моделирования) разрабатывали автоматизированные методы обработки материалов спутникового зондирования. Для исследования динамики притундровых лесов использовались временные серии изображений вегетационного индекса NDVI по данным радиометра AVHRR спутников TIROS/NOAA. Временные интервалы выбирались в соответствии с колебаниями уровня производства: 1976–1988 и 1995–2002 гг. Однако оказалось, что полученные по дистанционным материалам результаты расходятся с наземными данными. Осложнения в использовании NDVI связаны с тем, что для зоны сильного техногенного воздействия характерно появление на местах исчезновения лесов травяно-моховой растительности, а в зоне среднего воздействия происходит разрастание кустарниковой растительности, что искажает картину динамики лесов на основе NDVI [Shevyrnogov et al., 2008].

Материалы исследований красноярского Института леса в Норильском промышленном районе могут использоваться для разработки пакета нормативных документов, регламентирующих взаимоотношения между природопользователями и контролирующими экологическими службами. На их основе возможны также мероприятия по созданию устойчивых к выбросам ценозов [Шишкин и др., 2014]. В рамках этого проекта опробованы методы биологической рекультивации техногенных ландшафтов. В трех зонах разной степени нарушенности выполнена закладка экспериментальных культур. Выявлена достаточно высокая приживаемость черенков ивы, взятых в тех же районах, где проводится рекультивация. Сделан вывод о возможности проведения биологической рекультивации в условиях Норильского региона [Вараксин и др., 2014].

Важные концептуальные заключения сделаны в результате дендрохронологических исследований по проекту, проводившихся с целью датировки гибели древостоев. Прирост ширины годичных колец роста обычно следует за ходом температур; при потеплении, особенно сильно сказывающемся в Арктике, ширина колец увеличивается. Однако в зоне загрязнения комбината обнаружено уменьшение чувствительности деревьев к росту летних температур, замедление приращения ширины колец. Графики доли сохранившихся деревьев, хода температур и ширины годичных колец прироста показывают, что гибель деревьев вокруг Норильска началась уже в 1940-х гг., на 1970–1980-е приходится всплеск гибели. Но в 1940–1970-х гг. ширина годичных колец прироста изменялась синхронно с ростом летних температур воздуха, а после 1970 г., при продолжении повышения температур, ширина колец годового прироста стала уменьшаться. Кривые роста, смоделированные по значениям температур, и зафиксированные дендрохронологически по реальным спилам деревьев, расходятся, обозначилась «проблема дивергенции» в дендрохронологии. Она получила широкое обсуждение в научной литературе. По инициативе участников норильского проекта Института леса им. Сукачева появилась статья 25 авторов из России, Англии, Норвегии, Шве-

ции, Германии, Чехии, Швейцарии, США [Kirdyanov *et al.*, 2020], посвященная этим концептуальным последствиям исследований состояния растительности в районах техногенного загрязнения Арктики (рис. 2).

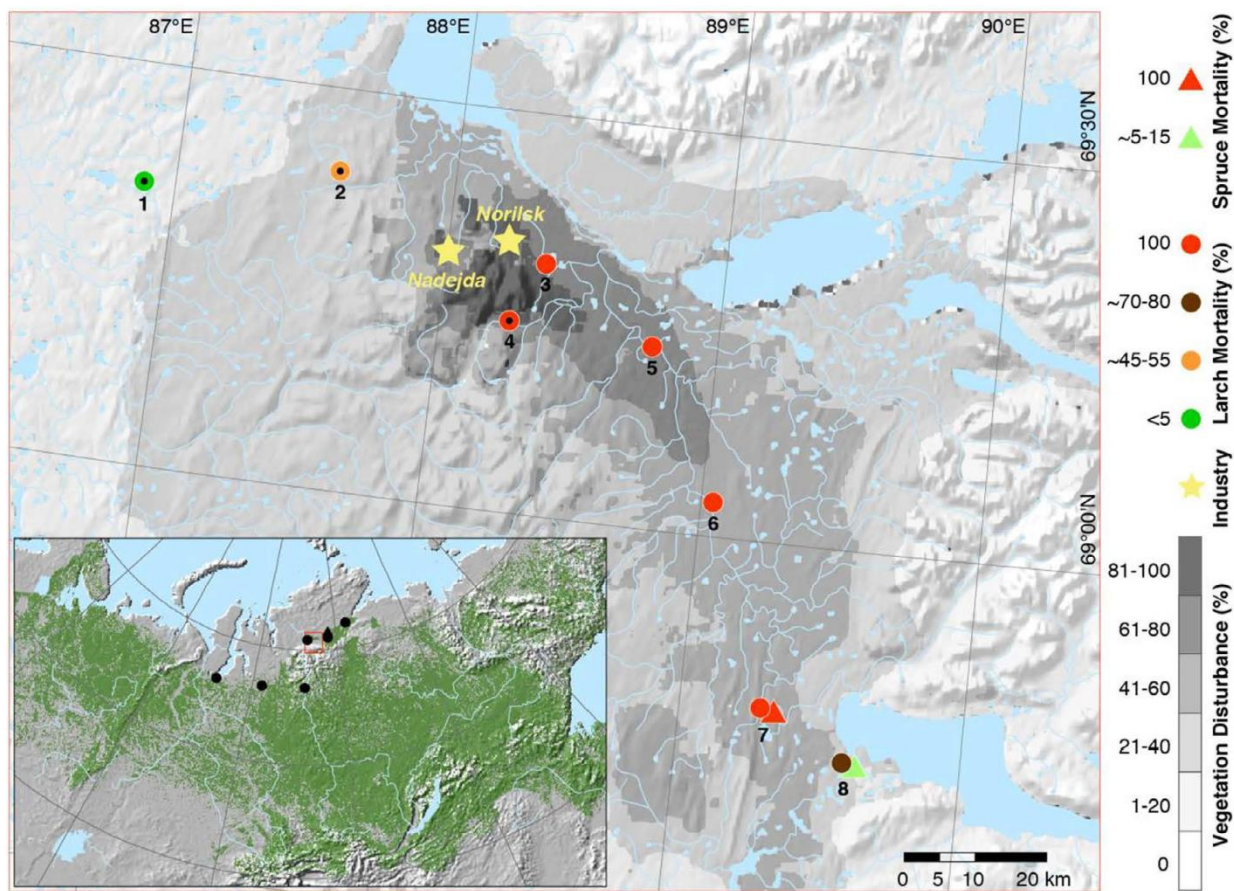


Рис. 2. Экологическая нарушенность в Норильском районе. Участки отбора проб лиственницы и ели (кружки и треугольники) наложены на районы деградации растительности (оттенки серого). Цвета и оттенки показывают % отмерших деревьев и нарушенности растительности. Кружки с черным центром: участки, где измерялся химический состав древесины. Красная рамка на карте-врезке показывает район Норильска в контексте бореальной лесной зоны России (зеленый цвет). Черные кружки (лиственница) и треугольник (ель) на врезке показывают незагрязненные эталонные участки, которые использовались в широкомасштабном моделировании процессов роста [Kirdyanov *et al.*, 2020]

Fig. 2. Environmental devastation in the Norilsk region. Larch and spruce sampling sites (dots and triangles, respectively) superimposed on different levels of vegetation degradation (grey shadings). Dots with black centres refer to the three sites for which wood chemistry was measured. The red frame in the inset map places the wider Norilsk study region in the context of Russia's boreal forest zone (green area). Black dots (larch) and one triangle (spruce) in the boreal inset map show non-polluted reference sites that have been used in the larger-scale, process-based forward modelling experiment [Kirdyanov *et al.*, 2020]

### Второе десятилетие XXI века

Выявившееся в исследованиях начала XXI в. сложное, в ряде случаев разнонаправленное взаимодействие естественных природных изменений и техногенного вторжения в них, определило особенность современных исследований второго десятилетия этого века.



При оценке изменений геосистем становится значимой проблема соотношения климатических колебаний и антропогенного воздействия. В некоторых работах высказываются даже крайние предположения, что в условиях потепления климата, особенно заметного в Арктике, физические законы природных изменений в ряде случаев могут оказаться сильнее техногенного вторжения в функционирование геосистем [Macdonald, Harner, Fyfe, 2005].

Новое соотношение благоприятного для растительности климатического потепления и губительного техногенного воздействия в Арктике проявилось в диссертационном исследовании [Nyland, 2015, Nyland et al., 2017]. В обширном районе от озера Пясино до Хантайского водохранилища по разновременным снимкам со спутника Landsat за три периода: 1985–1987; 2000–2002; 2012–2014 гг., соответствующих изменению социально-экономических условий, проведена классификация с разделением 5 основных типов поверхности: вода; пустоши; тундра/редколесье; лес; застройка (рис. 3). Выполнен анализ изменений площадей их распространения. В целом в этом районе оказалось хорошо выраженным «позеленение Арктики» – обнаружено увеличение площадей лесов с 34% до 46%, главным образом за счет уменьшения площадей тундр/редколесий с 47% до 38%. Судя по этим результатам, рост площади лесов может быть обусловлен сгущением древостоев в редколесьях.

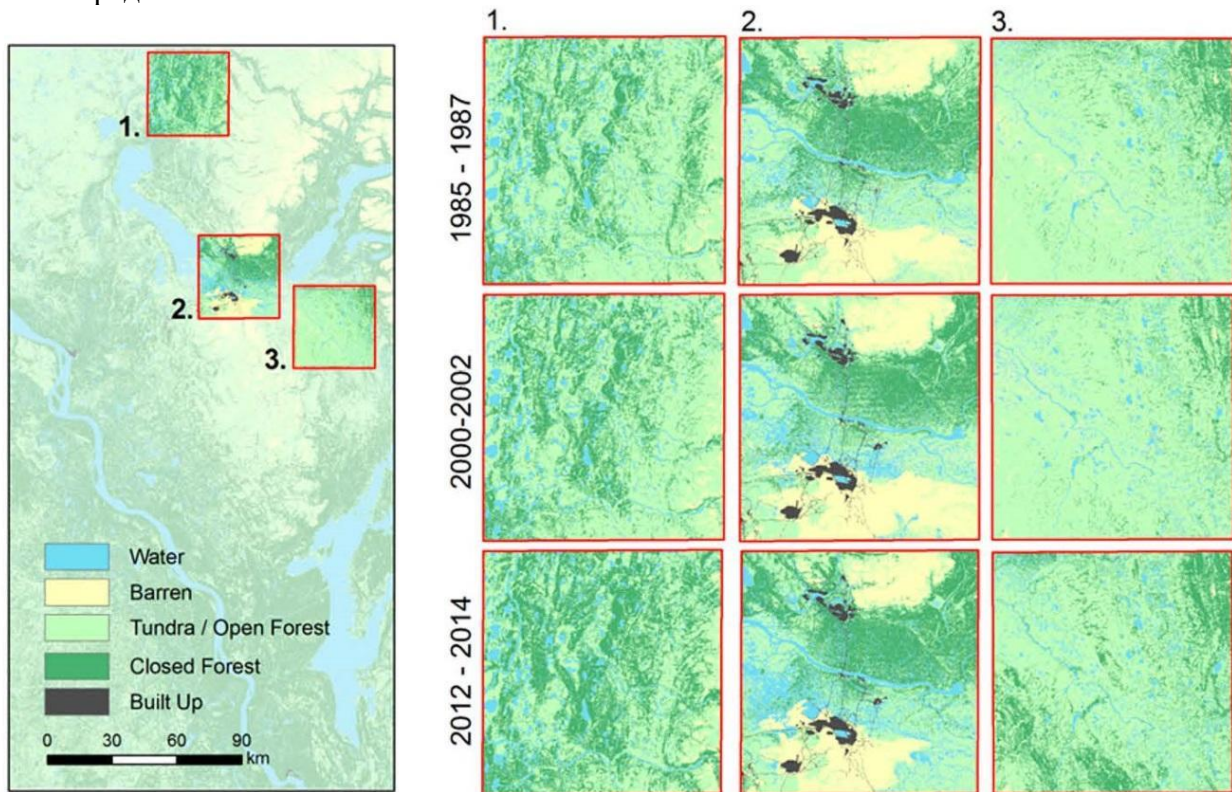


Рис. 3. Слева: карта региона исследований в низовьях Енисея и ключевые участки: 1) ненарушенная территория, 2) Норильск и его пригороды, 3) участок по основному пути загрязнения от воздушных выбросов Норильска. Справа: изменения на ключевых участках за три периода времени [Nyland et al., 2017]

Fig. 3. Left: map of the research region in the lower reaches of the Yenisei and key areas: 1) undisturbed territory, 2) Norilsk and its suburbs, 3) area along the main path of pollution from Norilsk air emissions. Right: changes at key sites over three time periods [Nyland et al., 2017]

Для выявления особенностей динамики экосистем в районах природных и техногенно обусловленных изменений такое же картографирование выполнено на трех небольших участках  $50 \times 50$  км, расположенных в разных зонах: вне сферы воздействия комбината, вокруг него и в зоне наиболее сильного воздействия в долине р. Рыбной (рис. 3). За 30 лет, когда среднегодовая температура воздуха возрастала с интенсивностью  $0,06$  °C в год, на этих участках проявилось «позеленение Арктики», но по-разному. На участке вне зоны воздействия комбината площади лесов за 30 лет выросли на 17% за счет уменьшения площадей редколесий и тундр. На втором участке, охватывающем город с промышленными объектами, изменения не столь существенны и проявляются в увеличении площадей пустошей при сокращении тундр и редколесий, что вполне объяснимо при расширении производственных объектов. На третьем участке, в зоне интенсивного аэротехногенного воздействия дымов комбината к юго-востоку от него, в долине р. Рыбной, площади лесов в первый рассматриваемый период, до 2000-х гг., сокращались, а во второй увеличились, главным образом, за счет сокращения площадей редколесий и тундр.

Все оценки распространения растительности по космическим снимкам в этой и других работах базируются на значениях вегетационного индекса, и зафиксированный снимками переход категории «лиственничное редколесье» в категорию «лес» в реальности обозначает не увеличение густоты древостоя, а увеличение зеленой массы растительности, в первую очередь нижнего яруса редколесий. Погибающие под влиянием дымов растения нижнего яруса освобождают место для заселения его видами, приспособившимися к воздействию – кустарничками, травянистыми растениями; в этом проявляется специфика вторичной сукцессии – восстановления растительности после гибели [Nyland *et al.*, 2017].

В конце второго десятилетия нашего века последовали исследования северной растительности, в частности, в районе Норильска, по российско-британскому проекту, в которых на основе данных новых суперкомпьютерных спутниковых сервисов (Google Earth Engine) и новых появившихся спутников, к изучению состояния растительности на основе вегетационного индекса удастся привлечь тысячи архивных и новых снимков, с использованием новейших технологий их обработки. Первые результаты этих работ обнаруживают позеленение растительности как за пределами, так и в зонах промышленного загрязнения и необходимость полевых, в первую очередь геоботанических, исследований происходящих изменений [Тутубалина *и др.*, 2020].

Одновременно в последние годы наблюдается интенсификация техногенных аварий на производственных предприятиях Норильска, в том числе в связи с большим износом инфраструктуры и оборудования, а также в связи с растеплением мерзлых грунтов. Так, 29 мая 2020 г. произошел масштабный разлив дизельного топлива объемом до 21 тыс. м<sup>3</sup> из поврежденного резервуара на ТЭЦ-3 на Надеждинском комбинате, в результате произошло загрязнение грунта и вод в долинах рек Далдыкан и Амбарная в их нижнем течении [Трошко *и др.*, 2020], а также озера Пясино и предположительно р. Пясино. Также в 2020 г. и ранее наблюдались утечки сточных вод из нового Талнахского хвостохранилища [Костюченко, Козырев, 2020], а в начале 2021 г. произошли обрушения на Норильской обогатительной фабрике и затопление на крупнейших рудниках «Октябрьский» и «Таймырский» [Васильчук, Одиссонова, 2021]. Ожидается продолжение этих негативных тенденций в ближайшее время. Для оценки ущерба и разработки природоохранных мер при ликвидации разлива топлива в 2020 г. была организована Большая Норильская экспедиция (<https://www.sbras.ru/ru/bne2020>). При содействии различных организаций предстоит расширение работ по ликвидации последствий аварий и исследованию долгосрочного воздействия на природу в районе Норильска; настоящий обзор предназначен для информационной поддержки этих работ.

## ВЫВОДЫ

Длительная история деятельности Норильского промышленного комплекса развивалась при разных уровнях его производственной мощности (а следовательно и воздействия на природную среду), определявшихся изменением собственности, и проходила в период потепления климата. Состояние природной среды зависит от соотношения этих изменяющихся техногенных и природных факторов.

Охарактеризованный выше первый этап изучения и картографирования повреждений растительности региона по космическим снимкам в конце XX в. пришелся на годы, когда изменение ее состояния (гибель лесов, деградация экосистем) определялось интенсивным и нарастающим техногенным воздействием, в сравнении с которым климатические колебания, уже начавшие проявляться, были не столь заметны.

Исследования, проведенные в начале XXI в., в период социально-экономических перемен и спада производства, при ускорившемся потеплении, позволили количественно охарактеризовать изменения наземных экосистем в зоне влияния Норильского комбината, где при продолжении их техногенной деградации начали проявляться процессы восстановления. Дендрохронологические исследования показали замедление роста деревьев в импактных зонах; выявлены особенности вторичных сукцессий арктической растительности под влиянием загрязнения.

Современные исследования второго десятилетия XXI в. показывают, что при действии климатического потепления, на участках вне зоны влияния комбината, наблюдается эффект позеленения, продвижение лесной растительности на север и повышение границы леса в горах. На участках в районе промышленного влияния и в подветренных зонах аэротехногенного загрязнения продолжается расширение техногенных пустошей на месте лесов, уничтоженных выбросами сернистого газа и тяжелых металлов, увеличение зон загрязнения вод и почв вблизи хвостохранилищ и промышленных объектов. Но это сопровождается маргинальным повторным восстановлением растительности, преимущественно кустарниковой, более устойчивой к загрязнению, что составляет особенность процессов вторичной сукцессии. Изучение этих процессов должно опираться на опыт и результаты предшествующих исследований; эту задачу и решает настоящий обзор.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено по проекту РФФИ 18-05-60221.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This study was carried out with support of the RFBR project 18-05-60221.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белая Е.Г., Горшков С.П., Мельников Д.В.* Эколого-географическая карта Норильского региона. Масштаб 1:500000. Пояснительная записка к научно-справочной эколого-географической карте Российской Федерации масштаба 1: 4000000. Под редакцией О.А. Евтеева и Л.Ф. Январевой. М.: Изд-во МГУ, 1996. С. 34–37.
2. *Вараксин Г.С., Кузнецова Г.В., Евграфова С.Ю., Шанченкова О.А.* Опыт биологической рекультивации техногенных ландшафтов в Норильском промышленном районе. Сибирский экологический журнал. 2014. №6. С. 1039–1047.
3. *Варенцов М.И., Константинов П.И., Самсонов Т.Е., Ретина И.А.* Изучение феномена городского острова тепла в условиях полярной ночи с помощью экспериментальных измерений и дистанционного зондирования на примере Норильска. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014. Т. 11. № 4. С. 329–337.

4. *Васильчук Т., Одиссонова В.* Период распада «Норникеля». Катастрофа длиной в 25 лет. Теперь секретны даже имена погибших. Новая газета. 2021. № 28. 17 марта.
5. *Ведрова Э.Ф., Мухортова Л.В.* Биогеохимическая оценка лесных экосистем в зоне влияния Норильского промышленного комплекса. Сибирский экологический журнал, 2014. №6. С. 933–944.
6. *Горшков С.П.* Ландшафтно-геоэкологическое картографирование Норильского района экологического бедствия. Изменение природной среды. Глобальный и региональный аспекты. Под ред. А.Н. Геннадиева и Е.В. Милановой. М.: Изд-во МГУ, 1997. С. 148–161.
7. *Гребенец В.И., Юров Ф.Д., Толманов В.А., Хайрединова А.Г.* Формирование техногенных каменных глетчеров из отвалов породы в горнодобывающих районах. Сергеевские чтения. Эколого-экономический баланс природопользования в горнопромышленных регионах. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2019. Вып. 21. С. 394–399.
8. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2003 г.». Главное управление охраны природных ресурсов и окружающей среды МПР России по Красноярскому краю. Красноярск. 2004. 218 с.
9. *Ефремова Т.Т., Ефремов С.П.* Эколого-геохимическая оценка уровней загрязнения тяжелыми металлами и серой бугристых торфяников юга Таймыра. Сибирский экологический журнал, 2014. № 6. С. 965–974.
10. *Карпенко Л.В.* Современное состояние торфяной залежи болот лесотундровой подзоны Красноярского края и геохимическая оценка ее загрязнения. Сибирский экологический журнал, 2014. №6. С. 953–964.
11. *Кирдянов А.В., Мыглан В.С., Пименов А.В., Кнорре А.А., Экарт А.К., Ваганов Е.А.* Динамика усыхания лиственницы сибирской в зоне влияния техногенных эмиссий предприятий Норильского промышленного района. Сибирский экологический журнал, 2014. № 6. С. 945–952.
12. *Ковалев Б.И.* Мониторинг состояния лесов в условиях аэротехногенного воздействия Норильского промышленного района. Лесное хозяйство, 1994. №3. С. 42–45.
13. *Корец М.А., Рыжкова В.А., Данилова И.В.* Использование ГИС для оценки состояния наземных экосистем Норильского промышленного района. Сибирский экологический журнал, 2014. №6. С. 887–902.
14. Космические методы геоэкологии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 104 с.
15. *Костюченко Е., Козырев Ю. Ржавчина.* Как «Норникель» перерабатывает Таймыр в чистую прибыль. Специальный репортаж. Новая газета. 2020. № 74. 15 июля.
16. *Онучин А.А., Буренина Т.А., Зубарева О.Н., Трофимова О.В., Данилова И.В.* Загрязнение снежного покрова в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района. Сибирский экологический журнал. 2014. № 6. С. 1025–1037.
17. *Мельников Ю.О., Ржаницын П.В., Яковлев А.О.* Геолого-экологическое картирование масштаба 1: 1000000 Норильского района, лист R-45-B, Г в 1991–1995 гг. Норильск: Норильская комплексная геолого-разведочная экспедиция, АО «Норильский горно-металлургический комбинат им. А.П. Завенягина»; Норильский Никель, 1996.
18. *Пименов А.В., Ефимов Д.Ю., Первунин В.А.* Топо-экологическая дифференциация растительности в Норильском промышленном районе. Сибирский экологический журнал. 2014. № 6. С. 923–931.
19. *Пономарева Т.В., Трофимова О.В., Богородская А.В., Шапченкова О.А.* Эколого-функциональная оценка состояния почв в зоне аэротехногенного воздействия Но-

- рильского промышленного комплекса. Сибирский экологический журнал. 2014. № 6. С. 987–996.
20. Росгидромет. Отчет о климате России в 2013 г. М.: Гидрометиздат, 2014. 68 с.
  21. *Рыжкова В.А., Данилова И.В., Корец М.А.* Классификация лесорастительных условий Норильского района и прилегающих территорий для оценки состояния и динамики растительного покрова. Сибирский экологический журнал. 2014. № 6. С. 873–885.
  22. *Сеньков А.А.* Особенности почвенного покрова подгольцового пояса плато Путорана. Сибирский экологический журнал. 2014. № 6. С. 845–854.
  23. *Филипчук А.Н., Ковалев Б.И.* Динамика усыхания предтундровых лесов в Норильском промышленном районе. Межд. симп. "Северные леса: состояние, динамика, антропогенное воздействие" (Москва, 16–26 июля 1990 г.). М.: 1990. С. 29–37.
  24. *Телятников М.Ю., Банаев Е.В., Онучин А.А., Шишкин А.С.* Характеристика природных экосистем и основных дестабилизирующих факторов севера Центральной Сибири. Сибирский экологический журнал. 2014. № 6. С. 803–806.
  25. *Телятников М.Ю., Пристяжнюк С.А.* Антропогенное влияние предприятий Норильского промышленного района на растительный покров тундры и лесотундры. Сибирский экологический журнал, 2014. №6. С. 903–922.
  26. *Трошко К.А., Денисов П.В., Лаврова О.Ю., Лулян Е.А., Медведев А.А.* Наблюдение загрязнений реки Амбарной, возникших в результате аварии на ТЭЦ-3 города Норильска 29 мая 2020 г. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2020. Т. 17. №3. С. 267–274.
  27. *Тутубалина О.В., Голубева Е.И., Зимин М.В., Кравцова В.И., Михайлов Н.В., Железный О.М.* Картографирование состояния растительного покрова в окрестностях г. Норильска с помощью Google Earth Engine. Материалы восемнадцатой Всероссийской открытой конференции с международным участием «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 16–20 ноября. 2020. ИКИ РАН, 2020. С. 373. DOI 10.21046/18DZZconf-2020a.
  28. *Шишкин А.С., Абаимов А.П., Онучин А.А.* Методология и принципы организации исследований природных экосистем в регионах с экстремальным техногенным воздействием. Сибирский экологический журнал, 2014. №6. С. 863–871.
  29. *Харук В.И., Винтерберг К., Цыбульский Г.М., Яхимович А.П., Мороз С.Н.* Техногенное повреждение притундровых лесов Норильской долины. Экология, 1996. № 6. С. 424–429.
  30. *Щелкунова Р.П.* (ред.) Карта растительности и кормовых запасов Хатангского района Таймырского национального округа на основе геоботанических исследований 1964–1967 гг. Масштаб 1:500 000. 1974. М.: Картографический филиал института Росгипрозем.
  31. *Anisimov O., Kokorev V., Zhil'tsova Y.* Temporal and spatial patterns of modern climatic warming: Case study of northern Eurasia. Climatic Change. 2013. V. 118(3–4). P. 871–883.
  32. *Eythorssona D., Gardarssona S.M., Ahmadb S.K., Hossainb F., Nijssenb B.* Arctic climate and snow cover trends – Comparing Global Circulation Models with remote sensing observations. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation. 2019. No 80. P. 71–81.
  33. *Grebenets V.I., Savchenko V.A.* Problems of Creations of Underground Constructions in Towns of Cryolitozone. Proceedings of the 6th International Conference «Underground Space and Urban Planning». Paris, 1995.
  34. *Humphreys D.* Challenges of transformation: The case of Norilsk Nickel. Resources Policy. 2011. V. 36. P. 142–148.

35. *Khokhar M.F., Frankenberg C., Van Roozendaal M., Beirle S., Kuhl S., Richter A., Platt U., Wagner T.* Satellite observations of atmospheric SO<sub>2</sub> from volcanic eruptions during the time-period of 1996–2002. *Advances in Space Research*. 2005. V. 36. P. 879–887.
36. *Kirdyanov A.V., Krusic P.J., Shishov V.V., Vaganov E.A., Fertikov A.I., Myglan V.S., Barinov V.V., Browse J., Esper J., Ilyin V.A., Knorre A.A., Korets M.A., Kukarskikh V.V., Mashukov D.A., Onuchin A.A., Piermattei A., Pimenov A.V., Prokushkin A.S., Ryzhkova V.A. Shishikin A.S., Smith K.T., Taynik A.V., Wild M., Zorita E., Bu€ntgen U.* Ecological and conceptual consequences of Arctic pollution. *Ecology Letters*, 2020.
37. *Klein D.R. Vlasova T.J.* Lichens, a unique forage resource threatened by air Pollution. *Rangifer*, 1992. No 12. P. 21–27
38. *Kozlov, M.V., Zvereva, E.L.* Industrial barrens: extreme habitats created by non-ferrous metallurgy. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 2007. No 6. P. 233–259.
39. *Luo J., Han Y., Zhao Y., Liu X., Huang, Wang L., Chen K., Tao Sh., Liu J., Ma J.* An inter-comparative evaluation of PKU-FUEL global SO<sub>2</sub> emission inventory. *Science of the Total Environment*. 2020. No 722. P. 137755.
40. *Macdonald R.W., Harnerb T.T., Fyfe J.* Recent climate change in the Arctic and its impact on contaminant pathways and interpretation of temporal trend data. *Science of the Total Environ*. 2005. No 342. P. 5–86.
41. *Nyland K.E.* Climate- and Human- Induced Land Cover Change and its Effects on the Permafrost System in the Lower Yenisei River of the Russian Arctic. A Thesis submitted to the Faculty of the Columbian College of Arts and Sciences of the George Washington University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Masters of Arts. 2015.
42. *Nyland K.E., Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A.* Climatic- and anthropogenic-induced land cover change around Norilsk, Russia. *Polar Geography*. 2017. No 40 (4). P. 257–272.
43. *Shevyrnogov A., Vysotskaya G. Sidko A. Dunaev K.* Typification of natural seasonal dynamics of vegetation to reveal impact of land surface change of environment (by satellite data). *Advances in Space Res.* 2000. V. 26. No 7. P. 1169–1172.
44. *Shevyrnogov A., Vysotskaya G., Sukhinin A., Frolikova O., Tchernetsky M.* Results of analysis of human impact on environment using the time series of vegetation satellite images around large industrial centers. *Advances in Space Research*. 2008. V. 41. 36–40.
45. *Streets D.G., Canty T., Carmichael G.R., de Foy B., Dickerson R.R., Duncan B.N., Edwards D.P., Haynes J.A., Henze D.K., Houyoux M.R., Jacob D.J., Krotkov N.A., Lamsal L.N., Liu Y., Lu Z., Martin R.V., Pfister G.G., Pinder R.W., Salawitch R.J., Wecht K.J.* Emissions estimation from satellite retrievals: A review of current Capability. *Atmospheric Environment*. 2013. V. 77. P. 1011–1042.
46. *Toutoubalina O.V., Rees W.G.* Remote sensing of industrial impact on Arctic vegetation around Noril'sk, northern Siberia: preliminary results. *International Journal of Remote Sensing*. 1999. V. 20. P. 2979–2990.
47. *Tutubalina O.V., Rees W.G.* Vegetation degradation in a permafrost region as seen from space: Norilsk 1961–1999. *Cold Regions Science and Technology*. 2001. V. 32. P. 191–203.
48. *Vlasova T.M., Kovalev B.I., Filipchuk A.N.* Effects of point source atmospheric pollution on boreal-forest vegetation of northwestern Siberia. National Park Service, Anchorage, AK, USA. No AD-P=007320/5/XAB (1992).

49. *Walter D., Heue K.-P., Rauthe-Schöch A., Brenninkmeijer C.A.M., Lamsal L.N., Krotkov N.A., Platt U.* Flux calculation using CARIBIC DOAS aircraft measurements: SO<sub>2</sub> emission of Norilsk. *Journal of Geophysical Research*. 2012. V. 117. D11305.
50. *Zotin A., Zuev D., Kashkin V., Kurako M., Simonov K.* Environmental risk zones mapping using satellite monitoring data. *Procedia Computer Science*. 2018. V. 126. P. 1597–1605.

#### REFERENCES

1. *Belaya E.G., Gorshkov S.P., Melnikov D.V.* Ecological and geographical map of the Norilsk region. Scale 1: 500000. Explanatory note to the scientific-reference ecological-geographical map of the Russian Federation at a scale of 1: 4000000. Edited by O.A. Evteev and L.F. Yanvareva. M.: Izd-vo Mosk. Un-ta, 1996. P. 34–37 (in Russian).
2. *Varaksin G.S., Kuznetsova G.V., Evgrafova S.Yu., Shanchenkova O.A.* Experience of biological reclamation of technogenic landscapes in the Norilsk industrial region. *Siberian Journal of Ecology*, 2014. V. 6. P. 1039–1047 (in Russian).
3. *Varentsov M.I., Konstantinov P.I., Samsonov T.E., Repina I.A.* Study of the phenomenon of urban heat island under polar night conditions using experimental measurements and remote sensing on the example of Norilsk. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2014. V. 11. No 4. P. 329–337 (in Russian).
4. *Vasilchuk T., Odissonova V.* Period of disintegration of "Norilsk Nickel". A catastrophe 25 years long. Now even the names of the victims are secret. *Novaya Gazeta*, No 28 of March 17, 2021 (in Russian).
5. *Vedrova E.F., Mukhortova L.V.* Biogeochemical assessment of forest ecosystems in the zone of influence of the Norilsk industrial complex. *Siberian Journal of Ecology*, 2014. No 6. P. 933–944 (in Russian).
6. *Gorshkov S.P.* Landscape-geoecological mapping of the Norilsk region of ecological disaster. *Changes in the natural environment. Global and regional aspects*. Ed. A.N. Genadiev and E.V. Milanova. M.: Izd-vo Mosk. Un-ta, 1997. P. 148–161 (in Russian).
7. *Grebenets V.I., Yurov F.D., Tolmanov V.A., Khayredinova A.G.* Formation of technogenic stone glaciers from rock dumps in mining areas. *Sergeevskie readings. Ecological and economic balance of nature management in mining regions*. Perm: Perm. un-t., 2019. V. 21. P. 394–399 (in Russian).
8. State report "On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Territory in 2003". Main Directorate for the Protection of Natural Resources and the Environment of the Ministry of Natural Resources of Russia for the Krasnoyarsk Territory. Krasnoyarsk, 2004. 218 p. (in Russian).
9. *Efremova T.T., Efremov S.P.* Ecological and geochemical assessment of the levels of pollution by heavy metals and sulfur in hilly peatlands in the south of Taimyr. *Siberian Journal of Ecology*, 2014. No 6. P. 965–974 (in Russian).
10. *Karpenko L.V.* The current state of the peat deposit of the bogs of the forest-tundra subzone of the Krasnoyarsk Territory and the geochemical assessment of its pollution. *Siberian Journal of Ecology*, 2014. No 6. P. 953–964 (in Russian).
11. *Kirdyanov A.V., Myglan V.S., Pimenov A.V., Knorre A.A., Ekart A.K., Vaganov E.A.* The dynamics of Siberian larch drying in the zone of influence of technogenic emissions from enterprises of the Norilsk industrial region. *Siberian Journal of Ecology*, 2014. No 6. P. 945–952 (in Russian).
12. *Kovalev B.I.* Monitoring of the state of forests in the conditions of aerotechnogenic impact of the Norilsk industrial region. *Forestry*, 1994. No 3. P. 42–45 (in Russian).

13. *Korets M.A., Ryzhkova V.A., Danilova I.V.* The use of GIS for assessing the state of terrestrial ecosystems of the Norilsk industrial region. *Siberian Journal of Ecology*, 2014. No 6. P. 887–902 (in Russian).
14. Space methods of geocology. M.: Izd-vo Mosk. Un-ta, 1998. 104 p. (in Russian).
15. *Kostyuchenko E., Kozyrev Y. Rzhavchina.* How Norilsk Nickel Converts Taimyr Into Net Profit. Special report. *Novaya Gazeta*. 2020. No 74. July 15 (in Russian).
16. *Onuchin A.A., Burenina T.A., Zubareva O.N., Trofimova O.V., Danilova I.V.* Pollution of the snow cover in the zone of influence of the enterprises of the Norilsk industrial region. *Siberian Journal of Ecology*, 2014. No 6. P. 1025–1037 (in Russian).
17. *Melnikov Yu.O., Rzhanitsyn P.V., Yakovlev A.O.* Geological and ecological mapping at a scale of 1: 1,000,000 of the Norilsk region, sheet R-45-B, G in 1991–1995. Norilsk: RAO Norilsk Nickel, 1996 (in Russian).
18. *Pimenov A.V., Efimov D.Yu., Pervunin V.A.* Topo-ecological differentiation of vegetation in the Norilsk industrial region. *Siberian Journal of Ecology*, 2014. V. 6. P. 923–931 (in Russian).
19. *Ponomareva T.V., Trofimova O.V., Bogorodskaya A.V., Shapchenkova O.A.* Ecological and functional assessment of the state of soils in the zone of aerotechnogenic impact of the Norilsk industrial complex. *Siberian Journal of Ecology*, 2014. No 6. P. 987–996 (in Russian).
20. Roshydromet. Russian Climate Report 2013. 2014. 68 p. (in Russian).
21. *Ryzhkova V.A., Danilova I.V., Korets M.A.* Classification of forest growing conditions of the Norilsk region and adjacent territories for assessing the state and dynamics of vegetation cover. *Siberian Journal of Ecology*, 2014. V. 6. P. 873–885 (in Russian).
22. *Senkov A.A.* Features of the soil cover of the subalpine belt of the Putorana Plateau. *Siberian Journal of Ecology*, 2014. V. 6. P. 845–854 (in Russian).
23. *Filipchuk A.N., Kovalev B.I.* The dynamics of drying out of pre-tundra forests in the Norilsk industrial region. Int. symp. "Northern forests: state, dynamics, anthropogenic impact" (Moscow, July 16–26, 1990). M.: 1990. P. 29–37 (in Russian).
24. *Telyatnikov M.Yu., Banaev E.V., Onuchin A.A., Shishikin A.S.* Characteristics of natural ecosystems and the main destabilizing factors of the north of Central Siberia. *Siberian Journal of Ecology*. 2014. V. 6. P. 803–806 (in Russian).
25. *Telyatnikov M.Yu., Pristyazhnyuk S.A.* Anthropogenic influence of the enterprises of the Norilsk industrial region on the vegetation cover of the tundra and forest-tundra. *Siberian Journal of Ecology*. 2014. V. 6. P. 903–922 (in Russian).
26. *Troshko K.A., Denisov P.V., Lavrova O.Yu., Lupyan E.A., Medvedev A.A.* Observation of pollution of the Ambarnaya River caused by the accident at CHPP-3 in the city of Norilsk on May 29, 2020. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2020. V. 17. No 3. P. 267–274 (in Russian).
27. *Tutubalina O.V., Golubeva E.I., Zimin M.V., Kravtsova V.I., Mikhailov N.V., Zhelezny O.M.* Mapping the state of vegetation in the vicinity of Norilsk using Google Earth Engine. *Materials of the Eighteenth All-Russian Open Conference with International Participation "Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space. November 16–20. 2020.* IKI RAN, 2020. P. 373. DOI 10.21046. 18DZZconf-2020a (in Russian).
28. *Shishikin A.S., Abaimov A.P., Onuchin A.A.* Methodology and principles of organizing research on natural ecosystems in regions with extreme technogenic impact. *Siberian Journal of Ecology*. 2014. No 6. P. 863–871 (in Russian).
29. *Kharuk V.I., Winterberg K., Tsybulsky G.M., Yakhimovich A.P., Moroz S.N.* Technogenic damage to the tundra forests of the Norilsk Valley. *Ecology*, 1996. No 6. P. 424–429 (in Russian).



30. *Shchelkunova R.P.* (ed.) Map of vegetation and forage reserves of the Khatanga region of the Taimyr national district based on geobotanical studies in 1964–1967. Scale 1: 500,000. 1974. M.: Cartographic branch of the Rosgiprozem Institute (in Russian).
31. *Anisimov O., Kokorev V., Zhil'tsova Y.* Temporal and spatial patterns of modern climatic warming: Case study of northern Eurasia. *Climatic Change*, 2013. 118(3–4). P. 871–883.
32. *Eythorssona D., Gardarssona S.M., Ahmadb S.K., Hossainb F., Nijssenb B.* Arctic climate and snow cover trends – Comparing Global Circulation Models with remote sensing observations. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation*. 2019. No 80. P. 71–81.
33. *Grebenets, V.I., Savchenko, V.A.* Problems of Creations of Underground Constructions in Towns of Cryolitozone. Proceedings of the 6th International Conference «Underground Space and Urban Planning». Paris, 1995.
34. *Humphreys D.* Challenges of transformation: The case of Norilsk Nickel. *Resources Policy*. 2011. No 36. P. 142–148.
35. *Khokhar M.F., Frankenberg C., Van Roozendaal M., Beirle S., Kuhl S., Richter A., Platt U., Wagner T.* Satellite observations of atmospheric SO<sub>2</sub> from volcanic eruptions during the time-period of 1996–2002. *Advances in Space Research*, 2005. No 36. P. 879–887.
36. *Kirdyanov A.V., Krusic P.J., Shishov V.V., Vaganov E.A., Fertikov A.I., Myglan V.S., Barinov V.V., Browse J., Esper J., Ilyin V.A., Knorre A.A., Korets M.A., Kukarskikh V.V., Mashukov D.A., Onuchin A.A., Piermattei A., Pimenov A.V., Prokushkin A.S., Ryzhkova V.A. Shishikin A.S., Smith K.T., Taynik A.V., Wild M., Zorita E., Bu€ntgen U.* Ecological and conceptual consequences of Arctic pollution. *Ecology Letters*, 2020.
37. *Klein, D.R. Vlasova, T. J.* Lichens, a unique forage resource threatened by air Pollution. *Rangifer*, 1992. V. 12. P. 21–27.
38. *Kozlov M.V., Zvereva E.L.* Industrial barrens: extreme habitats created by non-ferrous metallurgy. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2007. No 6: 233–259.
39. *Luo J., Han Y., Zhao Y., Liu X., Huang, Wang L., Chen K., Tao Sh., Liu J., Ma J.* An inter-comparative evaluation of PKU-FUEL global SO<sub>2</sub> emission inventory. *Science of the Total Environment*. 2020. 722, 137755.
40. *Macdonald R.W., Harnerb T.T., Fyfe J.* Recent climate change in the Arctic and its impact on contaminant pathways and interpretation of temporal trend data. *Science of the Total Environ Ment*. 2005. V. 342. P. 5–86.
41. *Nyland K.E.* Climate- and Human- Induced Land Cover Change and its Effects on the Permafrost System in the Lower Yenisei River of the Russian Arctic. A Thesis submitted to the Faculty of the Columbian College of Arts and Sciences of the George Washington University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Masters of Arts. 2015.
42. *Nyland K.E., Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A.* Climatic- and anthropogenic-induced land cover change around Norilsk, Russia. *Polar Geography*, 2017. No 40 (4). P. 257–272.
43. *Shevyrnogov A., Vysotskaya G. Sidko A. Dunaev K.* Typification of natural seasonal dynamics of vegetation to reveal impact of land surface change of environment (by satellite data). *Advances in Space Res.* 2000. V. 26. No 7. P. 1169–1172.
44. *Shevyrnogov A., Vysotskaya G., Sukhinin A., Frolikova O., Tchernetsky M.* Results of analysis of human impact on environment using the time series of vegetation satellite images around large industrial centers. *Advances in Space Research*, 2008. V. 41. P. 36–40.
45. *Streets D.G., Canty T., Carmichael G.R., de Foy B., Dickerson R.R., Duncan B.N., Edwards D.P., Haynes J.A., Henze D.K., Houyoux M.R., Jacob D.J., Krotkov N.A., Lamsal L.N., Liu Y., Lu Z., Martin R.V., Pfister G.G., Pinderm R.W., Salawitch R.J., Wecht K.J.*

- Emissions estimation from satellite retrievals: A review of current Capability. *Atmospheric Environment*. 2013. V. 77. P. 1011–1042.
46. *Toutoubalina O.V., Rees W.G.* Remote sensing of industrial impact on Arctic vegetation around Noril'sk, northern Siberia: preliminary results. *International Journal of Remote Sensing*. 1999. No 20. P. 2979–2990.
  47. *Tutubalina O.V., Rees W.G.* Vegetation degradation in a permafrost region as seen from space: Norilsk 1961–1999. *Cold Regions Science and Technology*. 2001. V. 32. P. 191–203.
  48. *Vlasova T.M., Kovalev B.I., Filipchuk A.N.* Effects of point source atmospheric pollution on boreal-forest vegetation of northwestern Siberia. National Park Service, Anchorage, AK, USA, No AD-P=007320/5/XAB (1992).
  49. *Walter D., Heue K.-P., Rauthe-Schöch A., Brenninkmeijer C.A.M., Lamsal L.N., Krotkov N.A., Platt U.* Flux calculation using CARIBIC DOAS aircraft measurements: SO<sub>2</sub> emission of Norilsk. *Journal of Geophysical Research*, 2012. V. 117. D11305.
  50. *Zotin A., Zuev D., Kashkin V., Kurako M., Simonov K.* Environmental risk zones mapping using satellite monitoring data. *Procedia Computer Science*. 2018. V. 126. P. 1597–1605.
-

УДК: 004.9:528.94

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-171-182

С.А. Антонов<sup>1</sup>, И.Ю. Каторгин<sup>2</sup>

## КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В СТАВРОПОЛЬСКОМ КРАЕ

### АННОТАЦИЯ

В настоящее время наблюдается динамичное глобальное изменение климата, подтверждающееся докладами Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Для многих сельскохозяйственных регионов, в том числе Юга России, такие изменения усиливают и без того высокие природно-климатические риски. Ставропольский край, как и большинство других регионов России имеет недостаточное покрытие территории сетью метеорологических станций, в связи с чем возникает необходимость использования современных ГИС-технологий анализа пространственных данных. В данной работе для анализа климатических данных был использован метод интерполяции «Естественная окрестность (Natural Neighbor)». Использование геоинформационных технологий позволило выявить региональные особенности изменения климата на всей территории Ставропольского края за последние 60 лет (1961–2020 гг.). В крае отмечается рост среднегодовой температуры воздуха за последние 30 лет на 0,9 °С, при сохранении текущих темпов прироста к 2050 г. среднегодовая температура может увеличиться ещё на 0,6 °С. Выявлена внутригодовая неоднородность прироста температуры, так в январе, феврале, марте и августе он колеблется от +1,8 до +2,0 °С, в октябре до +1,6 °С, а по остальным месяцам прирост не превышает 1 °С, и только в ноябре температура снижается до -0,6 °С. Одним из основных лимитирующих факторов эффективности возделывания продукции растениеводства является влагообеспеченность территории. Анализ отклонений годовой суммы осадков на территории Ставропольского края не позволяет выявить достоверной тенденции их изменения, поскольку отмечаются их значительные флуктуации по годам, что может приводить к возникновению неблагоприятных засушливых явлений. Установлено, что за период 1961–2020 гг. засухи различной продолжительности отмечаются ежегодно. При этом существует вероятность возникновения крайне неблагоприятных 5-месячных засух, которые могут провоцировать целый комплекс неблагоприятных явлений, таких как суховеи и пыльные бури. На основе геоинформационных технологий создана серия карт, описывающая климатические условия периода 1991–2020 гг., являющегося новой климатической нормой для территории Ставропольского края.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** климат, изменение, геоинформационные технологии, моделирование, сельское хозяйство

<sup>1</sup> ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», лаборатория ГИС-технологий, Никонова, д. 49, 356241, Михайловск, Ставропольский край, Россия, e-mail: santosb@mail.ru

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», кафедра картографии и геоинформатики, просп. Кулакова, 16/1, 355044, Ставрополь, Ставропольский край, Россия, e-mail: katorgin1974@mail.ru

Sergey A. Antonov<sup>1</sup>, Igor Yu. Katorgin<sup>2</sup>

## MAPPING THE CHARACTERISTICS OF CLIMATE CHANGE IN STAVROPOL REGION

### ABSTRACT

Currently, there is dynamic global climate change, as evidenced by the reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). For many agricultural regions, including the South of Russia, such changes increase the already high natural and climatic risks. The Stavropol Territory, like most other regions of Russia, has insufficient coverage of the territory with a network of meteorological stations, in connection with which it becomes necessary to use modern GIS technologies for analyzing spatial data. In this work, the interpolation method «Natural Neighbor» was used to analyze climate data. The use of geoinformation technologies made it possible to identify regional features of climate change throughout the Stavropol Territory over the past 60 years (1961–2020). In the region, there has been an increase in the average annual air temperature over the past 30 years by 0.9 °C, while maintaining the current growth rate by 2050, the average annual temperature may increase by another 0.6 °C. The intra-annual heterogeneity of the temperature increase was revealed, so in January, February, March and August it ranges from +1.8 to +2.0 °C, in October to +1.6 °C, and for the rest of the months the increase does not exceed 1 °C, and only in November, the temperature drops to -0.6 °C. One of the main limiting factors of the efficiency of crop production is the moisture supply of the territory. Analysis of the deviations of the annual precipitation amount in the Stavropol Territory does not allow us to reveal a reliable trend in their change, since there are significant fluctuations over the years, which can lead to the occurrence of unfavorable arid phenomena. It was found that for the period 1961–2020. droughts of various durations occur annually. At the same time, there is a likelihood of extremely unfavorable 5-month droughts, which can provoke a whole range of adverse events, such as dry winds and dust storms. On the basis of geoinformation technologies, a series of maps was created that describes the climatic conditions of the period 1991–2020, which is a new climatic norm for the territory of the Stavropol Territory.

**KEYWORDS:** climate, change, geographic information technologies, modeling, agriculture

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных проявлений глобального потепления климата является увеличение вероятности возникновения таких экстремальных климатических явлений, как засухи, ливни, ураганы и т.д., наносящие значительный ущерб экономике и провоцирующие усиление социальной напряжённости в подверженных их воздействию регионах.

В 1998 г. Всемирной метеорологической организацией (ВМО) и Программой ООН по окружающей среде (ЮНЕП) была основана Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК). По итогам конференции ООН по окружающей среде и развитию, была принята Рамочная Конвенция ООН по изменению климата (РКИК ООН), ратифицированная Россией. Работа РКИК ООН обеспечивается докладами МГЭИК. Всего МГЭИК было опубликовано 5 больших докладов, следующий планируется в 2022 г. Особый интерес представляет специальный отчёт «Special Report on Global Warming of

---

<sup>1</sup> FSBSI «North-Caucasian federal scientific agrarian center», laboratory GIS-technology, Nikonova str. 49, 356241, Mikhailovsk, Stavropol Region, Russia, *e-mail*: [santosb@mail.ru](mailto:santosb@mail.ru)

<sup>2</sup> North-Caucasian Federal University, Department of Cartography and Geoinformatics, prosp. Kulakova 16/1, 355044, Stavropol, Russia; *e-mail*: [katorgin1974@mail.ru](mailto:katorgin1974@mail.ru)

1.5 °C (SR15)» [Summary ..., 2018]. Он определяет в качестве основной оценки эффективности мероприятий по борьбе с изменением климата ограничение глобального потепления до 1,5 °C, что позволит снизить негативное влияние на экосистему в целом и человека в частности.

Наиболее подверженными аридизации, вследствие потепления климата, являются сельскохозяйственные регионы южной части степной зоны, в частности Ставропольский край, большая часть территории которого имеет и без того недостаточное увлажнение [Гордеев 2006]. Площадь земель сельскохозяйственного назначения на территории края превышает 6 млн га из них 2,3 млн га занято зерновыми культурами, что обеспечивало получение 8,2 млн т валовых сборов зерна в среднем за период 2010–2019 гг.

Почвенно-климатические условия Ставропольского края имеют зональные особенности. Они представлены двумя почвенными зонами чернозёмной и каштановой, и характеризуются изменением климатических условий с запада на восток с достаточно влажных (со среднегодовой температурой 9,9 °C и годовой суммой осадков 574 мм) до крайне засушливых (соответственно – 11,4 °C и 395 мм).

Современные климатические условия характеризуются высокой изменчивостью, их исследование в настоящее время немыслимо без применения геоинформационных технологий, предоставляющих широкие возможности в сфере математико-картографического моделирования и пространственного анализа [Антонов, 2009].

Одним из способов пространственного анализа является интерполяция по дискретно расположенным точкам, разработанная для восстановления непрерывного пространственного распределения показателя по значениям, измеренным в опорных точках. Методы интерполяции разнообразны и обладают неодинаковой точностью при решении тех или иных задач. Анализ и оценке методов интерполяции при моделировании климатических параметров посвящён ряд работ, в которых для значительных по площади территорий отдаётся предпочтение методам «геостатистической интерполяции (кригинга)» [Божилкина и др., 2014, 2016; Ивлиева и др., 2019; Varentsov et al., 2020]. Для меньших по размерам областей с относительно равномерным распределением опорных точек успешно применяется не только метод кригинга, но и метод «естественной окрестности (Natural Neighbor)» [Калинин и др., 2017; Крюкова, Симакина, 2018].

Цель исследования: выявить региональные особенности изменения климата в Ставропольском крае и провести их пространственное моделирование на основе геоинформационных технологий.

Научная новизна исследования состоит в том, что определены тенденции изменения климата в Ставропольском крае за последние 60 лет с учётом пространственной дифференциации основных климатических показателей по территории.

Практическая значимость. Результаты исследования могут быть использованы для адаптации сельскохозяйственного производства в Ставропольском крае к современным климатическим условиям для повышения его эффективности.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основного источника климатических данных использованы материалы Ставропольского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиал ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС» и данные автоматизированной информационной системы «АГРО-КЛИМАТ», разработанной в ФГБНУ «Северо-Кавказский ФНАЦ», которая содержит сведения по всем 16 метеостанциям Ставропольского края (рис. 1) [Антонов, 2017]. Однако, не все административно-территориальные единицы Ставропольского края охвачены сетью метеорологических станций. Недостаточное количество метеорологических станций является типичной проблемой для большинства регионов России, в свя-

зи с чем необходимо использовать математические методы (интерполяцию) для создания непрерывного покрытия территории климатическими данными.

Для статистической обработки климатических данных применялась программа MS Excel. В качестве исходных данных использованы сведения о среднемесячной температуре воздуха и месячным суммам осадков по всем действующим метеостанциям края за 1961–2020 годы. В Microsoft Excel проведена математическая обработка исходных данных – вычислены среднегодовые и среднемесячные значения температуры воздуха, среднемесячные значения осадков за выбранные периоды и величины отклонений температур от климатической нормы (30-летний период 1961–1990 гг.).

В Microsoft Excel для 16 метеостанций края построены климадиаграммы по методу Вальтера-Госсена [Walter, 1972] и рассчитана среднегодовая продолжительность засух по трём 20-летним периодам. Результаты статистической обработки и вычислений были конвертированы в формат \*.shp.

В качестве основного инструмента пространственного анализа и картографирования климатических изменений выбран хорошо зарекомендовавший себя геоинформационный пакет ArcGIS 10.4, обладающий огромным комплексом инструментов моделирования, визуализации и анализа данных. Модуль расширения Spatial Analyst позволяет решать задачи моделирования поверхностей географического распределения исследуемого показателя с помощью одной из функций модуля – интерполяции по дискретно расположенным точкам методом «Естественная окрестность (Natural Neighbor)». Данный метод определяет интерполируемые значения с использованием веса каждой точки, основываясь на пропорциональных областях (естественных окрестностях). Основным плюсом этого метода является отсутствие «рёбер», «пиков», «ям», «точки минимума» [Калинин и др., 2017], поэтому пространственное распределение характеристики достаточно «гладкое» с точным «воспроизведением» значений в опорных точках.

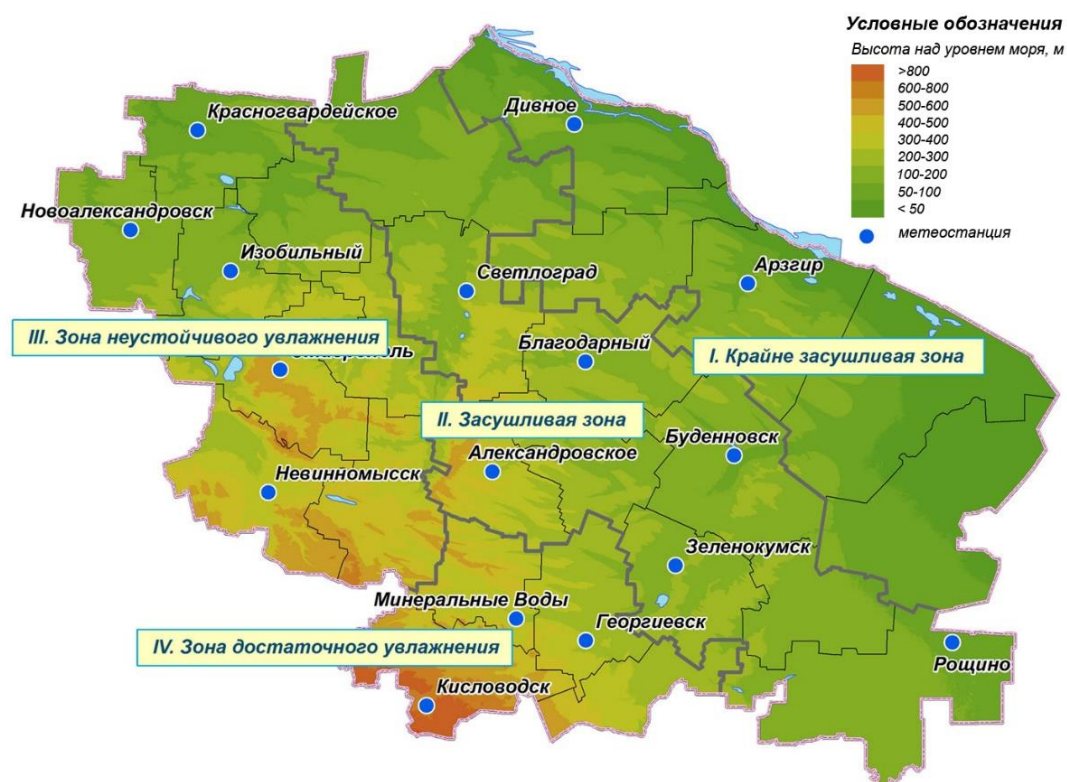


Рис. 1. Сельскохозяйственные зоны и метеостанции Ставропольского края

Fig. 1. Agricultural zones and weather stations of Stavropol region

Визуализация результатов моделирования осуществлена путём построения изолинейных карт (рис. 2, 4, 5, 7, 8).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В Ставропольском крае отмечаются региональные особенности изменения климата, схожие с глобальными тенденциями изменения климата в северном полушарии. Согласно рекомендациям Всемирной метеорологической организации (ВМО), в качестве многолетней климатической нормы рекомендуется использовать временной период не менее 30 лет [Груза, 2004]. В Ставропольском крае относительно непрерывный ряд наблюдений за климатическими параметрами начинается с 1931 г., что позволило выделить три 30-летних периода (1931–1960 гг., 1961–1990 гг., 1991–2020 гг.). С точки зрения современных тенденций изменения климата особый интерес представляют данные за последние 2 периода. Анализ отклонений среднегодовой температуры воздуха за период 1961–1990 гг. относительно предыдущего 30-летнего периода выявил потепление температуры воздуха на всей территории края в диапазоне от 0,2 до 0,6 °С, в следующем периоде 1991–2020 гг. повышение температуры воздуха ускорилось до 0,6–1,2 °С (рис. 2). За последние 30 лет только 7 раз отклонения среднегодовой температуры были ниже климатической нормы (1961–1990 гг.). В среднем по территории края за период 1991–2020 гг. она составила 10,8 °С, что на 0,9 °С выше, чем за прошлый 30-летний период (рис. 3).

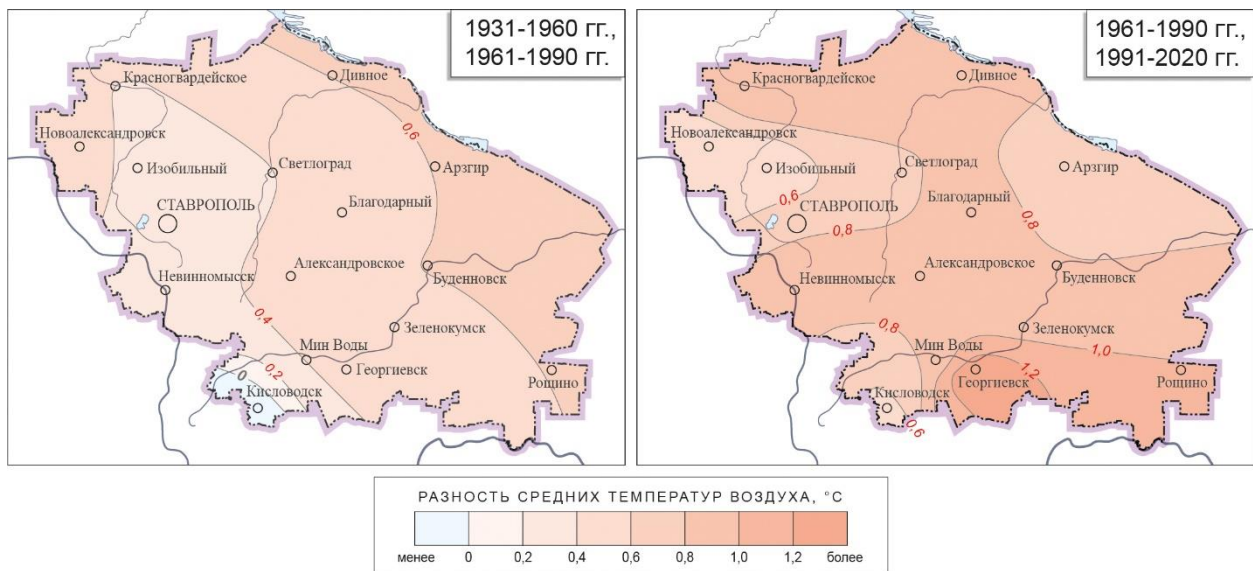
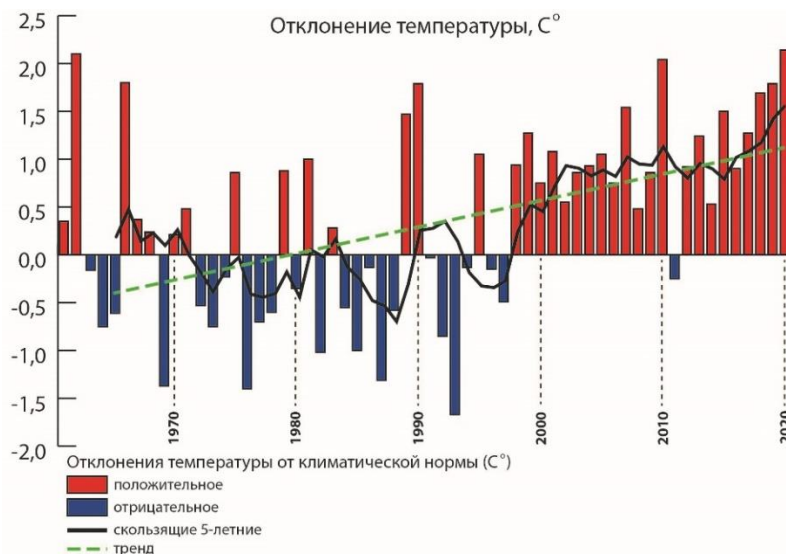


Рис. 2. Отклонение средних годовых температур воздуха относительно предыдущего 30-летнего периода: 1931–1960 гг. и 1961–1990 гг.; 1961–1990 гг. и 1991–2020 гг.

Fig. 2. Deviation of average annual air temperatures relative to the previous 30-year period: 1931–1960 and 1961–1990; 1961–1990 and 1991–2020

Рост среднегодовой температуры подтверждается формой кривой скользящих 5-летних значений и соответствующего уравнения регрессии  $y = 0,0271x - 0,4638$ , ( $R^2 = 0,5706$ ), где  $x$  – скользящее 5-летнее значение,  $y$  – расчётная годовая температура, °С). Если темпы прироста годовой температуры, отмечавшиеся за период 1961–2020 гг. сохранятся, то прирост температуры за период 2021–2050 гг. может составить +0,6 °С, относительно текущей климатической нормы (1991–2020 гг.).



*Рис. 3. Отклонение среднегодовой температуры воздуха за период 1961–2020 гг. относительно периода 1961–1990 гг.*

*Fig. 3. Deviation of the average annual air temperature for the period 1961–2020 relative to the period 1961–1990*

В Ставропольском крае отмечается неравномерное распределение внутригодового прироста температуры за последние 30 лет (рис. 4, 5). Наименьший прирост, а по многим метеостанциям и снижение температуры, наблюдается в первые два месяца холодного и тёплого периодов года. Наиболее выражен этот процесс в ноябре, когда по всем метеостанциям края наблюдается снижение температуры, местами до  $-0,6$  °С. Остальные месяцы года характеризуются выраженным приростом среднемесячной температуры, наиболее сильным в январе, феврале, марте и августе (на ряде метеостанций от  $+1,8$  до  $+2,0$  °С) и в октябре (от  $+1,4$  до  $+1,6$  °С), по остальным месяцам прирост на большей части территории края не превышает  $1$  °С.

Чёткой территориальной закономерности в распределении прироста температур не наблюдается.

Одним из основных лимитирующих факторов эффективности возделывания продукции растениеводства является влагообеспеченность территории. Осадки и специализация стали основными факторами, определяющими выделение на территории Ставропольского края 4 сельскохозяйственных зон: крайне засушливой, засушливой, неустойчивого и достаточного увлажнения (рис. 1).

Анализ отклонений годовой суммы осадков на территории Ставропольского края не позволяет выявить достоверной тенденции их изменения, поскольку отмечаются их значительные флуктуации по годам (рис. 6). При этом хорошо детектируются периоды с преобладанием как положительных отклонений (1987–1997 гг., 2009–2013 гг.), так и отрицательных (1962–1979 гг., 2018 г. по настоящее время), причём в отдельные годы недобор годовых сумм осадков в среднем по краю составляет 30 % (например, 2020 г.) (рис. 6).

Для аграрных регионов важное значение имеет не только годовая сумма осадков, но и её распределение в течение года, поскольку, количество осадков в отдельные месяцы напрямую коррелирует с продуктивностью сельскохозяйственных культур и как следствие влияет на структуру посевных площадей. За последние 30 лет отмечается незначительный (до 10–20 мм) прирост осадков за холодный период года. В тёплый период года наблюдается снижение количества осадков (на 10–20 мм) в северной и юго-восточной частях края, на остальной территории наблюдается небольшой прирост (рис. 7).



Анализ отклонения месячных сумм осадков показал, что наибольший прирост месячной суммы осадков в среднем по территории края за период 1991–2020 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. выявлен в марте (+39 %), октябре (+35 %), сентябре (+14 %). При этом значительное снижение количества осадков отмечается в августе (-20 %), июне, декабре (по -6 %) и июле (-5 %).

Выявленные особенности изменения влагообеспеченности территории Ставропольского края остаются благоприятными для возделывания озимой пшеницы, ведущей в крае сельскохозяйственной культуры, о чем свидетельствуют рекордные урожаи зерна озимой пшеницы за последние годы (2016 г. – 7,6 млн т).

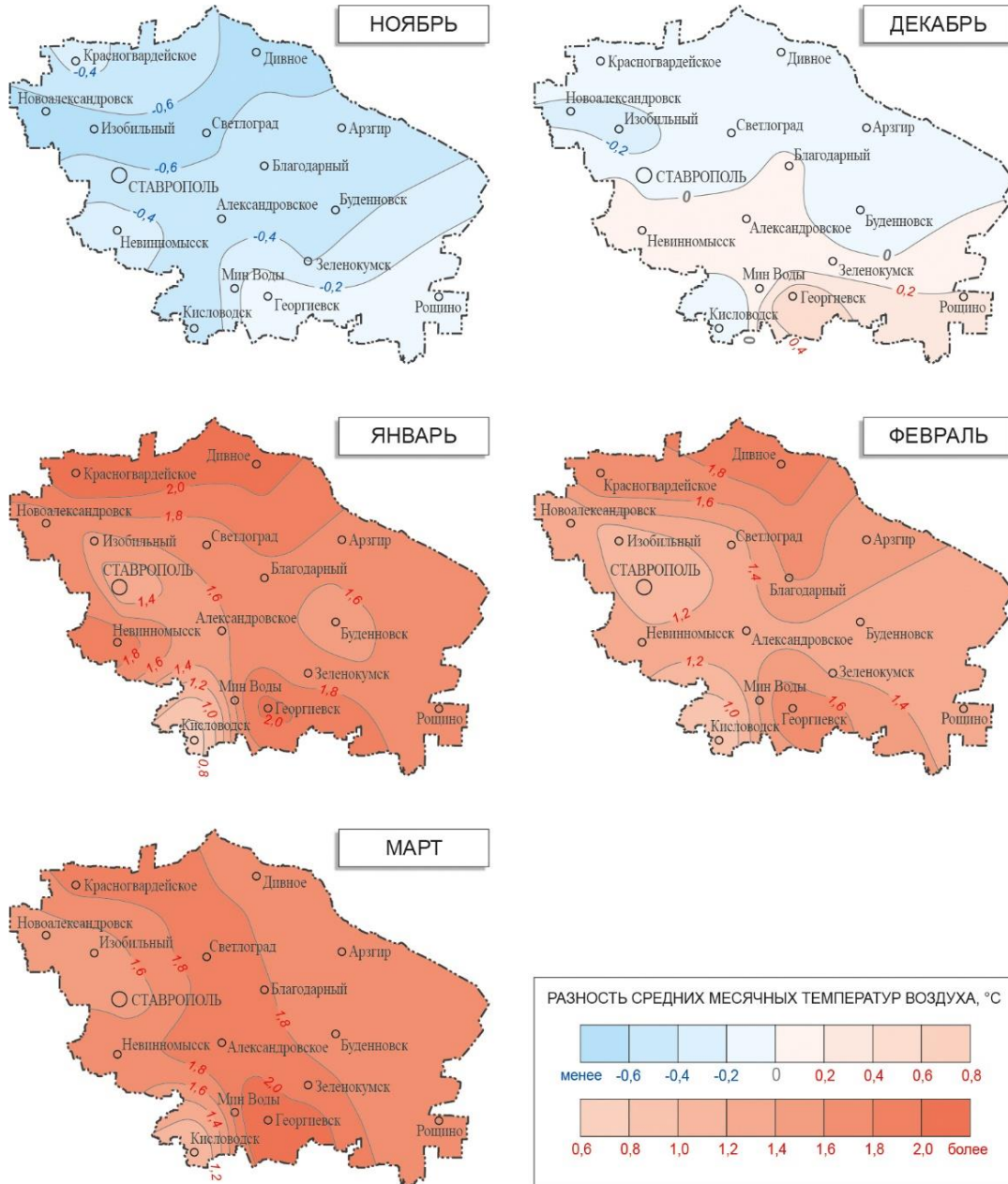


Рис. 4. Отклонение средних месячных температур воздуха за период 1991–2020 гг. относительно периода 1961–1990 гг. (холодный период года)

Fig. 4. Deviation of average monthly air temperatures for the period 1991–2020 relative to the period 1961–1990 (cold season)

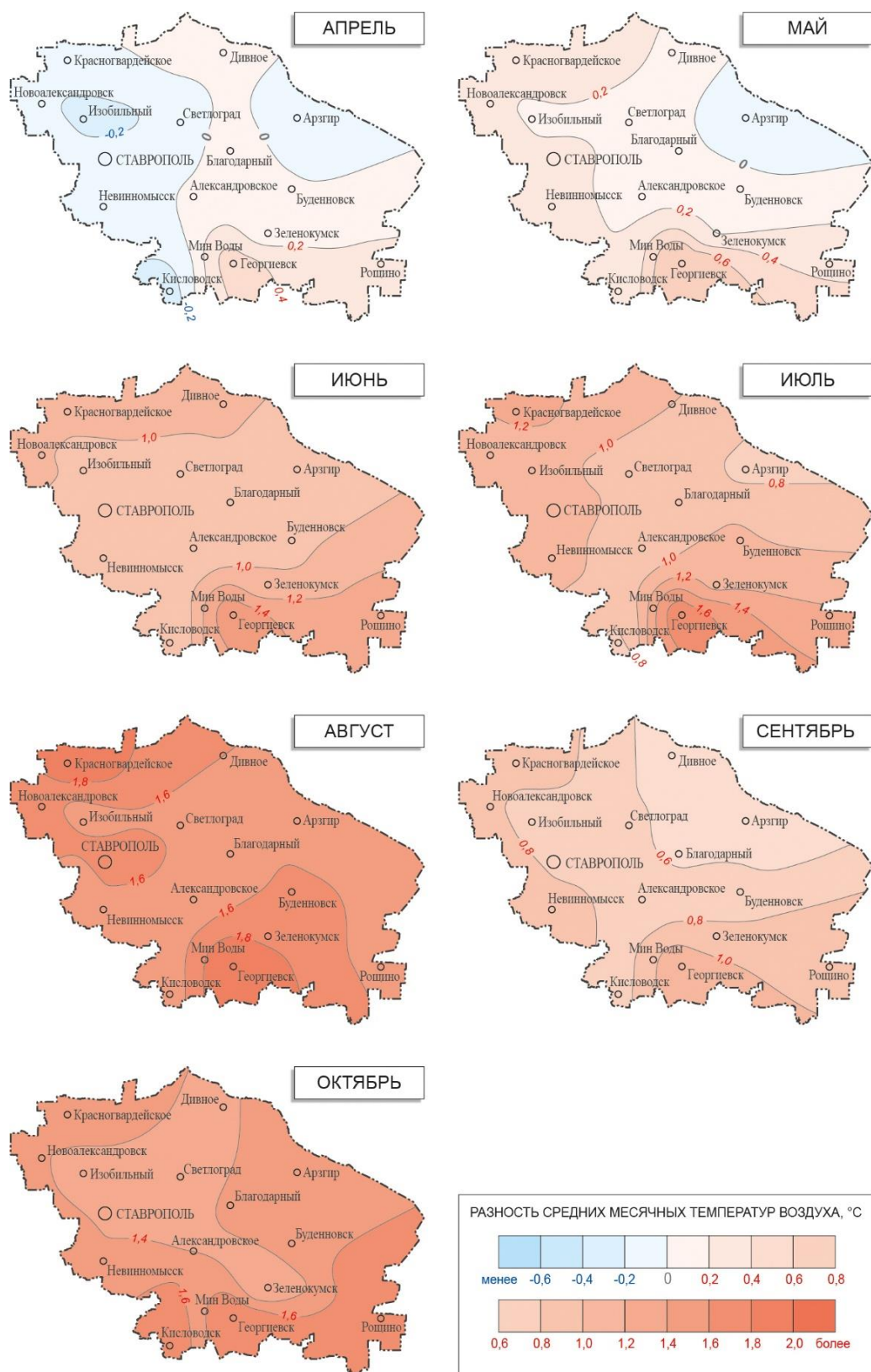


Рис. 5. Отклонение средних месячных температур воздуха за период 1991–2020 гг. относительно периода 1961–1990 гг. (тёплый период года)

Fig. 5. Deviation of average monthly air temperatures for the period 1991–2020 relative to the period 1961–1990 (warm season)

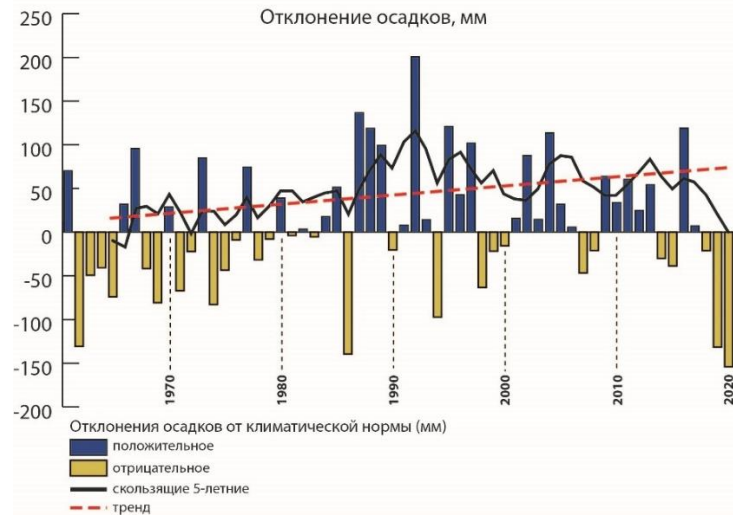


Рис. 6. Отклонение годовой суммы осадков за период 1961–2020 гг. относительно периода 1961–1990 гг.

Fig. 6. Deviation of the annual precipitation for the period 1961–2020 relative to the period 1961–1990

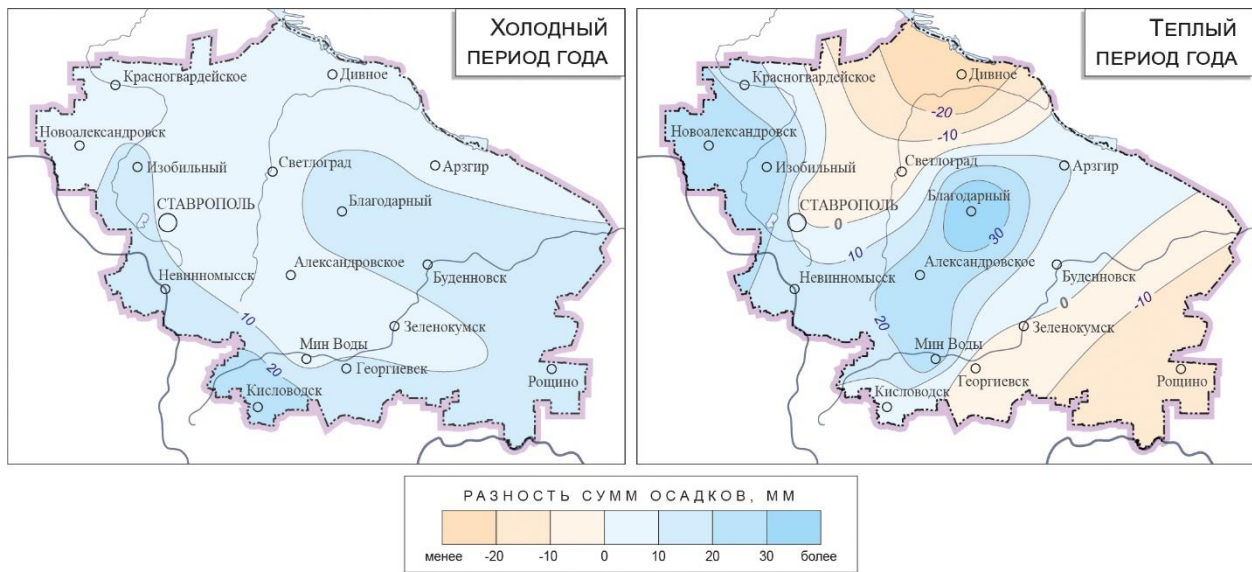


Рис. 7. Отклонение средних годовых сумм осадков за период 1991–2020 гг. относительно периода 1961–1990 гг.

Fig. 7. Deviation of average annual precipitation amounts for the period 1991–2020 relative to the period 1961–1990

По данным ООН, засухи входят в тройку крупнейших стихийных бедствий наряду с тропическими циклонами и наводнениями [Бедрицкий, 1997]. В засушливых степных районах Юга России одной из основных причин опустынивания и деградации земель являются часто повторяющиеся длительные засухи. По данным многолетних наблюдений за период 1961–2020 гг. установлено что, в 85% лет минимум на одной метеостанции Ставропольского края отмечается одномесечная засуха. Она в зависимости от времени проявления и охвату территории может нанести значительной ущерб сельскому хозяйству. Крайне неблагоприятные 5-месячные засухи случаются в отдельные годы в засушливой и крайне засушливой зонах края, и могут провоцировать целый комплекс неблагоприятных

явлений, таких как суховеи и пыльные бури. Например, в 1969 г. в Ставропольском крае отмечались сильнейшие пыльные бури, в результате которых погибло 758 тыс. га посевов. Благодаря использованию системы полезащитных лесных насаждений удалось значительно снизить их негативное влияние.

Путем анализа климадиаграмм, построенных по методу Вальтера-Госсена с помощью автоматизированной информационной системы «АГРО-КЛИМАТ» [Walter, 1972; Антонов, Барсуков, 2017], была вычислена среднегодовая продолжительность засух.

Среднегодовая продолжительность засух, осреднённая по 20-летним периодам, имеет чётко выраженный рост с юго-запада на северо-восток и восток края. За последние 22 года произошло достаточно быстрое повышение среднегодовой и большей части среднемесячных температур воздуха, что привело к значительному увеличению длительности засух в центре и особенно на востоке края (рис. 8). Засушливые явления чаще и дольше стали наблюдаться даже в предгорьях и на территории Кавказских Минеральных Вод, где в течении прошлого века отмечались крайне редко.

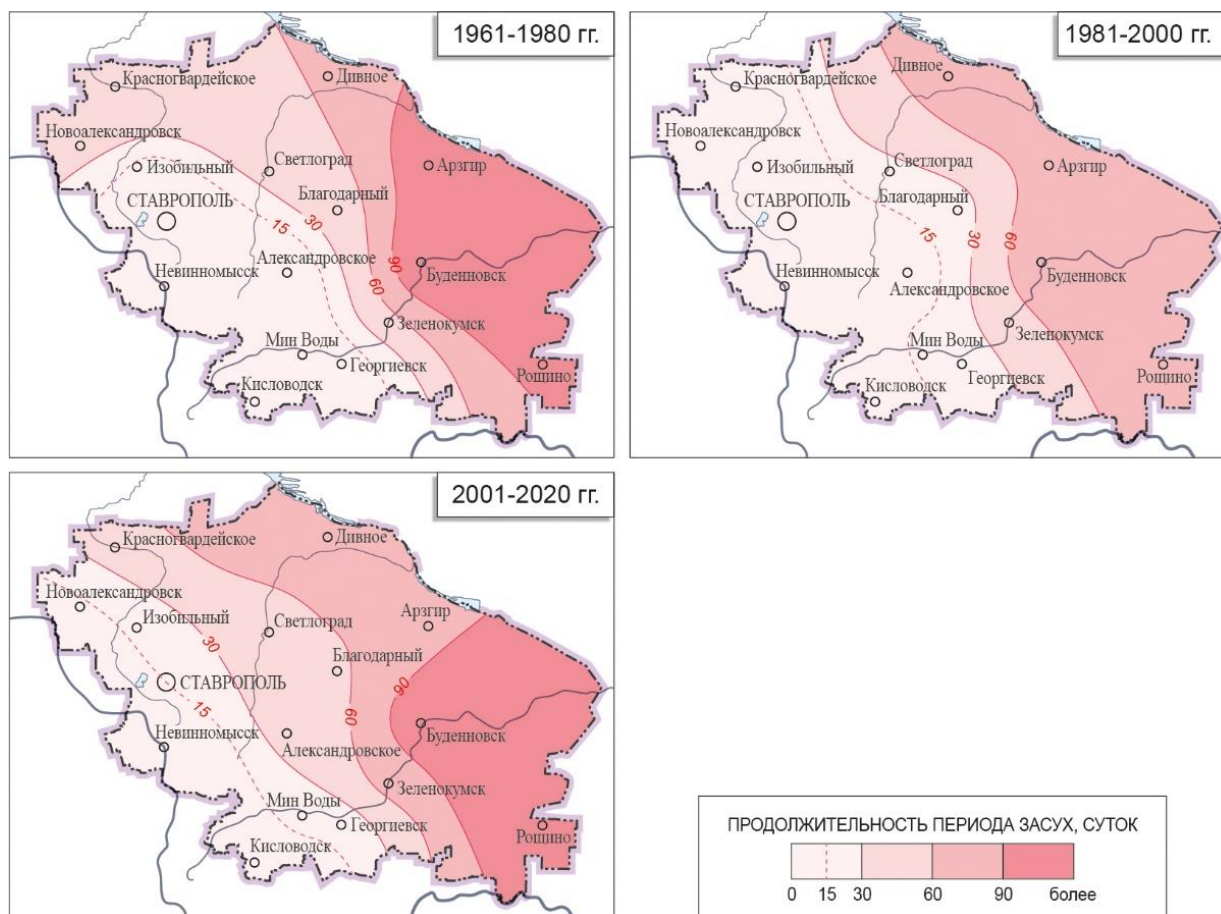


Рис. 8. Продолжительность среднегодовых периодов засух за 1961–2020 гг., усреднённые за 20-летия

Fig. 8. Duration of average annual periods of droughts for 1961–2020, 20 years periods

## ВЫВОДЫ

В Ставропольском крае отмечается региональные особенности изменения климата, характеризующиеся ростом теплообеспеченности практически по всем месяцам и значительными колебаниями влагообеспеченности, что приводит к увеличению общей засуш-

ливости климата края и росту вероятности возникновения таких неблагоприятных явлений как засухи, суховеи и пыльные бури. В связи с этим необходимо разрабатывать направления адаптации сельскохозяйственного производства к выявленным и прогнозируемым изменениям.

Климатические карты, созданные в процессе исследования с помощью метода интерполяции «Natural Neighbor», могут быть использованы в ближайшие 30 лет для поддержки принятия решений в области адаптации к климатическим изменениям на территории Ставропольского края.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов С.А. Динамика агроклиматических ресурсов агроландшафтов Ставропольского края и направления оптимизации систем земледелия: дис. ... канд. геогр. наук. Ставрополь, 2009.
2. Антонов С.А., Барсуков М.Г. Автоматизированная информационная система «АГРО-КЛИМАТ». Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017664116, 18.12.2017. Заявка № 2017660850 от 26.10.2017.
3. Бедрицкий А.И. О влиянии погоды и климата на устойчивость и развитие экономики. Метеорология и гидрология, 1997. № 10. С. 5–11.
4. Божилкина Е.А., Сорокина В.Н., Салихова Н.З. Картографирование изменений температурного режима на Европейской территории России за разные временные периоды (1881–1935 гг. и 1961–1990 гг.). Геодезия и картография, 2014. № 2. С. 27–35. DOI: 10.22389/0016-7126-2014-884-2-27-35.
5. Божилкина Е.А., Сорокина В.Н., Торопов П.А., Васильев П.В. Картографирование температурных аномалий за период 1991–2010 гг. на Европейской территории России. Геодезия и картография, 2016. № 7. С. 15–24. DOI: 10.22389/0016-7126-2016-913-7-15-24.
6. Гордеев А.В. и др. Биоклиматический потенциал России: теория и практика / под ред. А.В. Гордеева. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. 508 с.
7. Груза Г.В., Раньков Э.Я. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата. Метеорология и гидрология, 2004. № 4. С. 50–65.
8. Ивлиева Н.Г., Манухов В.Ф., Шайкунова Р.Б. Об опыте применения ГИС-технологий для изучения изменений среднегодовой температуры воздуха на территории Европейской части России ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2019. Т. 25. Ч. 2. С. 121–132. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-121-132.
9. Калинин В.Г., Суманеева К.И., Русаков В.С. Анализ методов интерполяции пространственного распределения метеорологических характеристик при расчетах весеннего снеготаяния. Географический вестник (Geographical bulletin), 2017. №2 (41). С. 126–137. DOI: 10.17072/2079-7877-2017-2-126-137.
10. Крюкова С.В., Симакина Т.Е. Оценка методов пространственной интерполяции метеорологических данных. Общество. Среда. Развитие, 2018. № 1. С. 144–151.
11. Summary for Policymakers of IPCC Special Report on Global Warming of 1.5 °C approved by governments: IPCC press release. Электронный ресурс: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/11/pr\\_181008\\_P48\\_spm\\_en.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/11/pr_181008_P48_spm_en.pdf) (дата обращения: 10.11.2020).

12. *Varentsov M., Esau I., Wolf T.* High-Resolution Temperature Mapping by Geostatistical Kriging with External Drift from Large-Eddy Simulations. *Mon. Weather Rev.* 2020. V. 148. No 3. P. 1029–1048.
13. *Walter H.* Die vegetation der Erde in öko-physiologischer Betrachtung. Band I: Die tropischen und subtropischen Zonen. VEB Gustav Verlag Jena, 1972. 592 p.

#### REFERENCES

1. *Antonov S.A.* Dynamics of the Stavropol Territory landscapes agroclimatic resources and optimization directions of farming systems: thesis PhD of geographical sciences. Stavropol, 2009 (in Russian).
2. *Antonov S.A., Barsukov M.G.* Automated information system "AGRO-CLIMATE." Certificate of program registration for computer RU 2017664116, 18.12.2017. Application No. 2017660850 dated 26.10.2017 (in Russian).
3. *Bedritsky A.I.* On the impact of weather and climate on the sustainability and development of the economy. *Meteorology and Hydrology*, 1997. No 10. P. 5–11 (in Russian).
4. *Bozhilina E.A., Sorokina V.N., Salikhova N.Z.* Mapping of temperature changes in the European territory of Russia for different time periods (1881–1935 and 1961–1990). *Geodesy and cartography*, 2014. No 2. P. 27–35. DOI: 10.22389/0016-7126-2014-884-2-27-35 (in Russian).
5. *Bozhilina E.A., Sorokina V.N., Toropov P.A., Vasilev P.V.* Mapping temperature anomalies for the period 1991–2010 years in the European territory of Russia. *Geodesy and Cartography*, 2016. No 7. P. 15–24. DOI: 10.22389/0016-7126-2016-913-7-15-24 (in Russian).
6. *Gordeev A.V. and others.* Bioclimatic potential of Russia: theory and practice. Moscow: Partnership of scientific publications KMK, 2006. 508 p. (in Russian).
7. *Gryza G.V., Rankov E.Ya.* Climate change detection: state, variability and extremity of climate. *Meteorology and Hydrology*, 2004. No 4. P. 50–65 (in Russian).
8. *Ivlieva N.G., Manukhov V.F., Shaykunova R.B.* About the experience of GIS technologies application for the study of changes of the mean annual air temperature on the territory of the European part of Russia InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press, 2019. V. 25. Part 2. P. 121–132. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-121-132 (in Russian).
9. *Kalinin V.G., Sumaneeva K.I., Rusakov V.S.* Interpolation of meteorological characteristics spatial distribution for spring snowmelt: analysis of methods. *Geographical bulletin*, 2017. No 2 (41). P. 126–137. DOI 10.17072/2079-7877-2017-2-126-137 (in Russian).
10. *Kryukova S.V., Simakina T.E.* Assessment of meteorological data spatial interpolation methods. *Obshchestvo. Sreda. Razvitiye. Society. Environment. Development*, 2018. No 1. P. 144–151 (in Russian).
11. Summary for Policymakers of IPCC Special Report on Global Warming of 1.5 °C approved by governments: IPCC press release. Электронный ресурс: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/11/pr\\_181008\\_P48\\_spm\\_en.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/11/pr_181008_P48_spm_en.pdf) (дата обращения: 10.11. 2020).
12. *Varentsov M., Esau I., Wolf T.* High-Resolution Temperature Mapping by Geostatistical Kriging with External Drift from Large-Eddy Simulations. *Mon. Weather Rev.* 2020. V. 148. No 3. P. 1029–1048.
13. *Walter H.* Die vegetation der Erde in öko-physiologischer Betrachtung. Band I: Die tropischen und subtropischen Zonen. VEB Gustav Verlag Jena, 1972. 592 p.

УДК 528.77; 551.584.2

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-183-195

М.И. Варенцов<sup>1</sup>, М.Ю. Грищенко<sup>2</sup>, П.Г. Михайлюкова<sup>3</sup>

## ИЗУЧЕНИЕ ОСТРОВА ТЕПЛА МОСКВЫ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ И МЕЗОКЛИМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

### АННОТАЦИЯ

На примере Московского региона проведено детальное сравнение термического режима сильно урбанизированной территории по данным наблюдений и разномасштабных космических снимков. Для летнего сезона показаны принципиальные различия в характеристиках пространственной изменчивости LST (land surface temperature, температура земной поверхности) и температуры воздуха в дневное время суток. Показано, что взаимосвязь между полями этих величин практически отсутствует, в первую очередь для урбанизированных территорий, для которых ярко выражен эффект острова тепла в поле LST, и практически не выражен в поле температуры воздуха. Однако, для зимнего сезона выявлены отдельные случаи с более ярко выраженной связью между этими величинами. Полученные результаты подтверждены независимым образом по результатам численных экспериментов с моделью COSMO и параметризацией TERRA\_URB с шагом расчетной сетки 1 км. При этом показана перспективность использования снимков высокого пространственного разрешения для верификации модели: они позволили получить выводы о выборе оптимальной конфигурации модельных настроек. И для летнего, и для зимнего сезонов произведено сравнение космических данных высокого пространственного разрешения Landsat с данными низкого пространственного разрешения MODIS. Показано, что несмотря на в целом неплохое согласие между двумя видами данных, в отдельных случаях между ними имеют место существенные расхождения, связанные с различиями используемых значений коэффициента излучения и другим факторами, требующими более детального анализа в дальнейших исследованиях.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** климат города, географическое дешифрирование, Москва, Landsat, MODIS, COSMO.

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, научно-исследовательский вычислительный центр, Ленинские горы, 1 стр. 4, 119234, Москва, Россия; Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. д. 3, Москва, Россия; Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Большой Предтеченский переулок, д. 13, строение 1, Москва, Россия, 123376;  
*e-mail:* [mikhail.varentsov@srcc.msu.ru](mailto:mikhail.varentsov@srcc.msu.ru)

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, 1, 119991, Москва, Россия; Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", факультет географии и геоинформационных технологий, Покровский бульвар, 11, 109028, Москва, Россия; *e-mail:* [m.gri@geogr.msu.ru](mailto:m.gri@geogr.msu.ru)

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail:* [p.mikhaylyukova@geogr.msu.ru](mailto:p.mikhaylyukova@geogr.msu.ru)

Mikhail I. Varentsov<sup>1</sup>, Mikhail Y. Grischenko<sup>2</sup>, Polina G. Mikhaylyukova<sup>3</sup>

## STUDYING MOSCOW URBAN HEAT ISLAND USING SATELLITE IMAGES AND MESOSCALE CLIMATIC MODELLING

### ABSTRACT

Using the example of the Moscow region, a detailed comparison of the thermal regime of a highly urbanized territory was carried out according to in-situ data and different-scale satellite images. For the summer season, fundamental differences in the characteristics of the spatial variability of LST and air temperature in the daytime are revealed. It is shown that the relationship between the fields of these quantities is practically absent, primarily for urbanized territories, for which the effect of the heat island in the LST field is pronounced, and is practically not expressed in the air temperature field. However, for the winter season, some cases were identified with a more pronounced relationship between these values. The results obtained are independently confirmed by the results of numerical experiments with the COSMO model and the TERRA\_URB parameterization with a 1 km grid step. At the same time, the prospects of using high spatial resolution images for model verification are shown: they made it possible to draw conclusions about the choice of the optimal configuration of model settings. For both summer and winter seasons, a comparison was made of high spatial resolution satellite data from Landsat with low spatial resolution data from MODIS. It is shown that, in spite of the generally good agreement between the two types of data, in some cases there are significant discrepancies between them due to differences in the values of the emissivity used and other factors that require more detailed analysis in further studies.

**KEYWORDS:** city climate, geographical images interpretation, Moscow, Landsat, MODIS, COSMO.

### ВВЕДЕНИЕ

Москва является крупнейшим мегаполисом Европы. Для неё, как и для других крупных городов, характерно формирование своеобразного городского местного климата и ярко выраженного городского острова тепла [Oke et al., 2017]. Далеко не все особенности городского климата Москвы хорошо изучены, несмотря на значительную актуальность этой проблемы. Тем не менее, острову тепла Москвы и другим местным климатическим особенностям посвящено значительное число работ [Климат..., 1969; Климат..., 2017; Lokoshchenko et al., 2017; Kuznetsova et al., 2017; Varentsov et al., 2019], в отличие от большинства других российских городов. Это обстоятельство, в сочетании с достаточно хорошей оснащённостью города гидрометеорологическими данными, позволяет рассматривать Москву в нашем исследовании как базовый модельный город для отработки методов и закономерностей.

---

<sup>1</sup> M.V. Lomonosov MSU, Research Computing Center, Leninskiye Gory, 1-4, 119991, Moscow, Russia; A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, 3 Pyzhyovskiy Pereulok, 119017 Moscow, Russia; Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, 13/1, Bolshoy Predtechenskiy Pereulok, 123376 Moscow, Russia;

*e-mail:* [mikhail.varentsov@srcc.msu.ru](mailto:mikhail.varentsov@srcc.msu.ru)

<sup>2</sup> M.V. Lomonosov MSU, Faculty of Geography, Leninskiye Gory, 1, 119991, Moscow, Russia; HSE University, Faculty of Geography and Geoinformatics, Pokrovsky blvd, 11, 109028, Moscow, Russia;

*e-mail:* [m.gri@geogr.msu.ru](mailto:m.gri@geogr.msu.ru)

<sup>3</sup> M.V. Lomonosov MSU, Faculty of Geography, Leninskiye Gory, 1, 119991, Moscow, Russia,

*e-mail:* [p.mikhaylyukova@geogr.msu.ru](mailto:p.mikhaylyukova@geogr.msu.ru)



Климат Москвы умеренно-континентальный, с четко выраженной сезонностью. Средняя многолетняя годовая температура за период 1971–2020 гг. по данным Метеорологической обсерватории МГУ составляет 6,0°C. Среднее количество осадков 714 мм за период 1981–2010 гг. Меньше всего осадков выпадает марте-апреле (38–39 мм за период 1981–2010 гг.), больше всего – летом и в начале осени. Относительная влажность ниже всего в мае (64%), выше – в декабре (85%). Средняя температура самого жаркого месяца (июль) составляет 19,9°C за период 1991–2020 гг. Средняя температура самого холодного месяца (январь) составляет –6,2°C за период 1991–2020 гг. [World Meteorological..., 2019].

Для Москвы характерна комбинация застройки различных типов и исторических периодов, которая является предметом отдельного исследования [Грищенко и др., 2020] и в значительной степени обуславливает характерные черты местного климата города. На климат Москвы значительное влияние оказывает и комплекс городских зелёных зон. Районы города озеленены в разной степени: для центра города характерно практически полное отсутствие зелёных насаждений; в новых районах массовой жилой застройки озеленение подчас не справляется с возложенными на него рекреационными и средообразующими задачами как в силу небольшого возраста высаживаемых деревьев, так и в связи с высокой плотностью населения.

Несмотря на сравнительно активный вывод промышленных предприятий за границы Москвы с целью освобождения территорий для формирования жилых и общественно-деловых пространств, промышленные зоны продолжают играть важную роль в формировании городского климата, в первую очередь, как территории, для которых характерна низкая степень озеленения.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа по Москве была направлена на сопоставление данных о температуре, полученных по спутниковым снимкам высокого (серия спутников Landsat, 60 м и 100 м) и низкого (съёмочная система MODIS, 1000 м) пространственного разрешения, данных контактных наблюдений за температурой воздуха и результатов регионального климатического моделирования. Сперва осуществлён отбор сцен со спутников серии Landsat, т.к. частота пролёта этих спутников над Москвой меньше. Для анализа выбрано 10 снимков Landsat, включая 10 снимков за теплые сезоны 2018 и 2019 гг. и 5 снимков за холодные сезоны 2017–2020 гг. Затем для этих же дат проанализированы снимки съёмочной системы MODIS (спутники Terra и Aqua), время пролёта которых над Москвой наиболее близко к времени пролёта спутников Landsat (разница во времени между пролётами спутников составляет до 40 минут). Для всех снимков осуществлён отбор данных о температуре земной поверхности – для снимков съёмочной системы MODIS такой отбор описан в статье [Varentsov et al., 2019]; для снимков со спутников серии Landsat методика расчёта температуры земной поверхности описаны в статье [Грищенко и др., 2019]. Снимки съёмочной системы MODIS поставляются конечному пользователю по итогам предобработки, которая включает выделение облаков и исключение соответствующих им пикселей из дальнейшего анализа. Такая предобработка отсутствует для снимков со спутников серии Landsat, поэтому исключение пикселей, соответствующих облакам, произведено вручную, что определило наличие нижнего порога значений, который хорошо виден на графиках на рис. 1.

Проведена работа по подготовке данных наблюдений в Московском регионе, необходимых для сравнения со значениями LST (land surface temperature, температура земной поверхности) для выбранных дат. База данных наблюдений на метеостанциях Московского региона, поддерживаемая авторами (см. описание в [Климат..., 2017], наполнена данными, полученными из различных источников, включая архив метеорологической обсерватории

МГУ, данные с веб-сайта «Погода и климат» (pogodaiklimat.ru), архив Гидрометцентра России. В базу данных были также включены данные наблюдений на автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) ГПБУ «Мосэкомониторинг». Впрочем, они не использовались при сравнении с космическими данными, так как ранее было показано, что наблюдения температуры воздуха на АСКЗА для дневных условий подвержены значительным погрешностям [Климат Москвы..., 2017].

Для дополнительного подтверждения полученных результатов проведена серия численных экспериментов с моделью COSMO и параметризацией TERRA\_URB [Wouters et al., 2016] с шагом расчетной сетки 1 км. Расчеты проводились для января 2017 г., января 2017 г. и июня 2019 г. в режиме динамической детализации (даунскейлинга) полей глобального метеорологического анализа по модели ICON с шагом сетки 13 км. Для расчетов использовались суперкомпьютеры «Ломоносов-2» МГУ и Cray-XC40 Росгидромета. Важно отметить, что в расчетах сравнивались различные способы задания внешних параметров городской среды в модели: способы их задания по используемым в модели по умолчанию грубым глобальным базам данных (эксперимент DEF); на основе концепции локальных климатических зон по методологии WUDAPT [Bechtel et al., 2015] (эксперименты LCZ), либо на основе совместного ГИС-анализа данных о застройке OpenStreetMap, данных о растительности и типах земельного покрова (эксперименты REF). Более подробно методика моделирования и задания параметров городской среды описана в работе [Varentsov et al., 2020].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для Московского региона путем сравнения значений LST, полученных по космическим данным высокого пространственного разрешения со снимков со спутников серии Landsat, космическим данным низкого пространственного разрешения съёмочной системы MODIS и данных метеорологических наблюдений в Москве и окрестностях, показаны выраженные различия между взаимосвязью LST и температурой воздуха в летний и зимний период. Летом пространственная структура полей LST и температуры воздуха в дневное время суток (для которого доступны снимки со спутников серии Landsat) принципиально различается и практически не скоррелирована. Эффект городского острова тепла Москвы ярко выражен в поле LST (различия температуры между городом и фоном достигают десятков °C), но практически не выражен в поле температуры воздуха. Для зимы же, по крайней мере на примере большинства рассмотренных случаев, выявлена более тесная связь между пространственной изменчивостью рассматриваемых параметров.

В рамках верификации данных высокого пространственного разрешения со спутников серии Landsat произведено их сравнение с данными низкого пространственного разрешения съёмочной системы MODIS. Для этого данные LST высокого разрешения Landsat были осреднены в пределах ячеек сетки MODIS (в каждую ячейку MODIS попадало до 960 пикселей снимка Landsat). Сравнение проводилось для территории площадью около 10 000 км<sup>2</sup>, ограниченной координатами 55,35–56,07 с.ш. и 36,68–38,73 в.д. и включающей основную часть Московской агломерации и значительные по площади незастроенные территории. Такая же территория использовалась в работе [Varentsov et al., 2019]. В зависимости от условий облачности, для такой территории было доступно от 2700 до 12 000 значений LST по сетке MODIS для каждой из сцен.

Результаты сравнения показали, что теснота связи между двумя видами данных непостоянна и сильно варьирует во времени. Коэффициент корреляции R меняется 0,3 до 0,88 для летних сцен, от 0,64 до 0,93 для зимних сцен, со средними значениями 0,63 и 0,73 для лета и зимы соответственно. Графики на рис. 1 показывают примеры случаев

с более или менее тесной связью. Во всех случаях LST по данным Landsat несколько завышена относительно данных MODIS (в среднем на 1 К), особенно для урбанизированных территорий (рис. 2). Отчасти это можно объяснить использованием разных значений коэффициента изучения: так, по данным MODIS (растры emis31, emis32 продукта MOD11A1) он всегда больше 0,97, тогда как в расчете LST по данным Landsat используются меньшие значения. С учетом имеющихся литературных данных об излучательной способности для различных типов поверхностей [Oke et al., 2017], значения по данным MODIS представляются менее реалистичными, по крайней мере для урбанизированных территорий. Полученный результат демонстрирует неопределенность в оценке LST по спутниковым данным, устранение которой требует дальнейших детальных исследований.

Сравнение данных LST с данными наблюдений за температурой воздуха на метеостанциях Росгидромета и АСКЗА Мосэкомониторинга подтвердило сделанное ранее предположение о принципиально различном характере взаимосвязи между температурой воздуха и поверхности в дневное время суток летом и зимой [Varentsov et al., 2019]. Для летнего сезона связь между двумя видами данных практически отсутствует, что показывают примеры для отдельных сцен на рис. 3 (а, б, в). На фоне изменчивости LST в десятки °С в пределах региона исследования (главным образом за счет различий между городскими и загородными территориями) изменчивость температуры не превышает первых °С. Зимой взаимоотношение двух величин кардинально отличаются от летних. Для всех зимних сцен порядок разброса значений температуры воздуха и LST оказывается соизмерим, и в некоторых случаях выявлена пространственная значимая взаимосвязь между этими величинами (например, рис. 3 г, е), хотя в других случаях связь отсутствует (например, рис. 3д). Один из наиболее ярких примеров взаимосвязи между двумя величинами демонстрирует случай 7 января 2017 г. на фоне аномально холодной погоды (рис. 3). В остальных зимних случаях, даже при отсутствии значимой корреляции по всей выборке данных, взаимосвязь прослеживается для отдельных групп точек. Тем не менее, приведенные примеры наглядно показывают, что взаимосвязь между температурой воздуха и поверхности в условиях мегаполиса даже в зимних условиях достаточно сложная и не может быть описана простыми регрессионными зависимостями.

Принципиально новым результатом стало сравнение LST по данным Landsat с данными контактных наблюдений температуры поверхности почвы. К сожалению, получить такие данные удалось только по двум метеостанциям в пределах региона исследования – для МГУ и ВДНХ. По итогам сравнения показано, что в данном случае согласована только временная динамика для отдельно взятых точек измерений, а не пространственные различия температуры между точками (рис. 4). Это не удивительно, так как на метеорологических станциях и постах термометры для измерения температуры поверхности почвы устанавливаются на открытой площадке размером 4 × 6 м [Наставление..., 1985]. Предварительно с площадки удаляют растительный покров и взрыхляют ее. Не удивительно, что поверхность вспаханных оголенных площадок на метеорологических станциях в дневные часы сильно перегрета и не отражает реальную температуру поверхности окружающей станции [Локощенко и др., 2020]. Соответственно, измеренная температура поверхности почвы не характеризует температуру окружающей поверхности, регистрируемую по снимкам Landsat.

Для интерпретации различий между температурой воздуха и поверхности использовались результаты численных экспериментов серии REF1. Детальная верификация по данным наблюдений на метеостанциях и АСКЗА ранее показала, что способ задания параметров городской среды в данном эксперименте позволяет получить наиболее адекватные результаты по сравнению с двумя другими, рассмотренными в работе [Varentsov et al., 2020].

Это же показали и результаты сравнения воспроизведенных моделью значений температуры поверхности со средними по ячейкам расчетной сетки значениями LST по данным Landsat, что иллюстрирует пример на рис. 5. Данный пример демонстрирует ценность космических температурных данных высокого пространственного разрешения для верификации результатов детализированного метеорологического и климатического моделирования для урбанизированных территорий, особенно в условиях дефицита данных контактных наблюдений.

Сопоставление значений температуры поверхности, воспроизведенных моделью, со средними по ячейкам расчетной сетки значениями LST по данным Landsat для летнего сезона показало разумное согласие по средним значениям и порядку характерной пространственной изменчивости (в том числе по разности температуры поверхности между городом и фоном), что иллюстрируют примеры на рис. 6. При это какая-либо связь между LST и воспроизводимой моделью температурой воздуха отсутствует. Для зимы же закономерности пространственного распределения температуры воздуха и поверхности по модели близки, и показывают примерно одинаковый уровень согласия с данными Landsat. При этом, для рассмотренных зимних сцен имеет место систематическое смещение результатов модельной температуры поверхности и воздуха относительно данных Landsat. Оно выражено, в том числе, в существенном занижении интенсивности поверхностного острова тепла в модели (рис. 6 в, г).

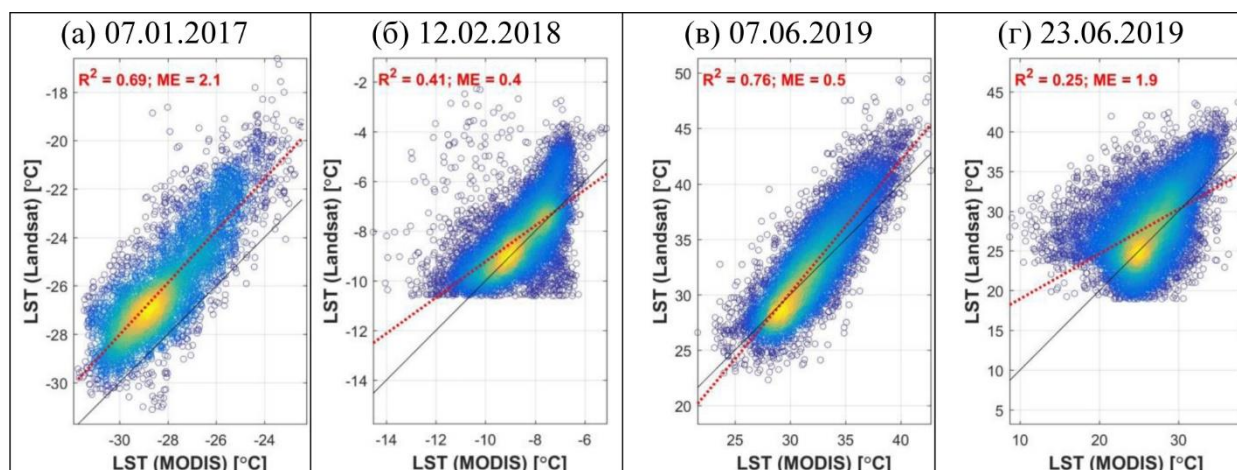
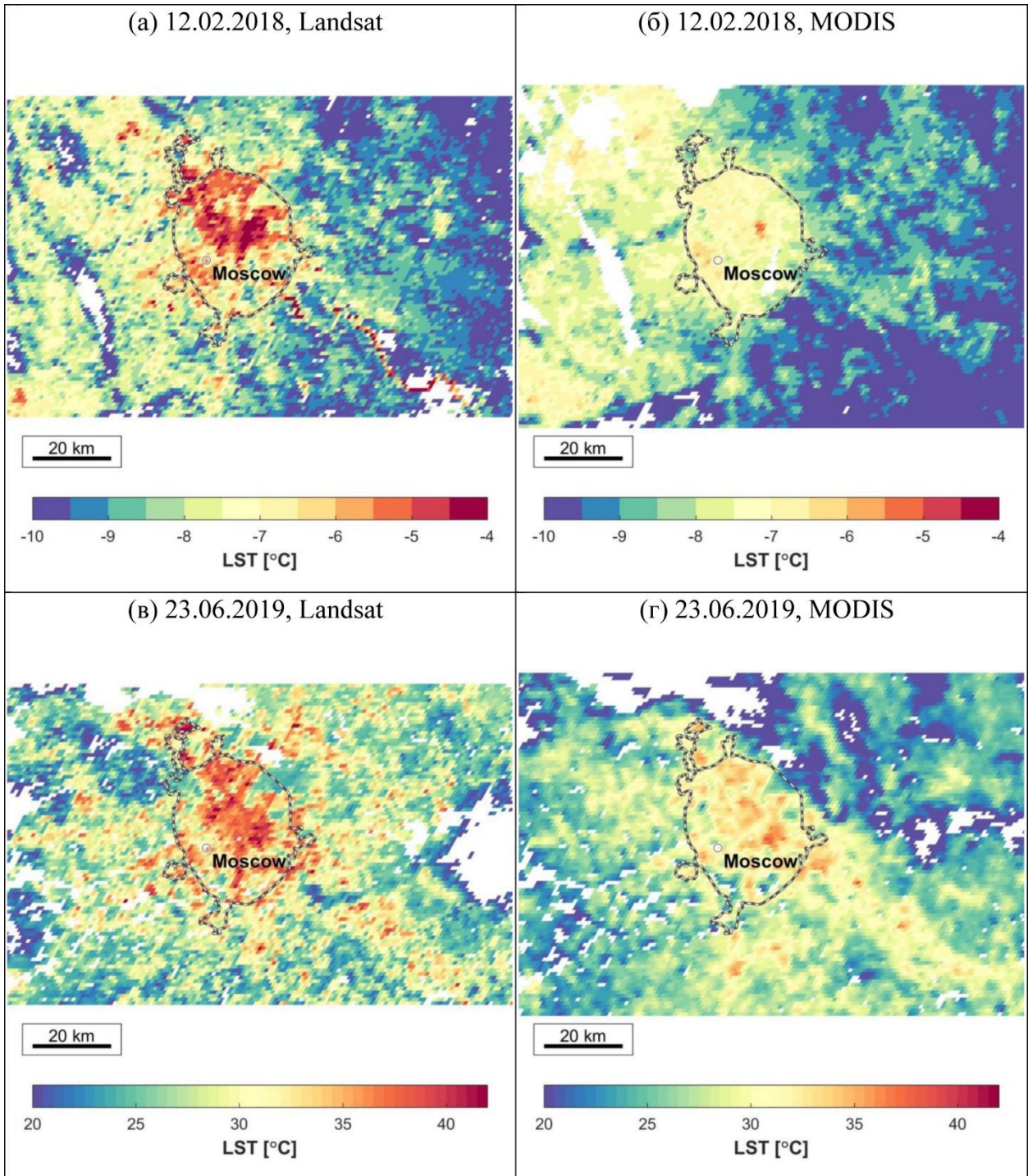


Рис. 1. Сравнение значений LST по данным Landsat и MODIS для двух зимних (а, б) и двух летних (в, г) сцен. Значения LST по данным Landsat осреднены по ячейкам сетки MODIS. Красной линией показан линейный тренд. Приведены коэффициенты детерминации тренда ( $R^2$ ), средняя ошибка (ME), уравнение линейного тренда

Fig. 1. Comparison of LST values according to Landsat and MODIS data for two winter (a, б) and two summer (в, г) scenes. LST values from Landsat data are averaged over MODIS grid cells. Red line indicates a linear trend. Trend determination coefficients, mean error (ME) and trend equations are given



*Рис. 2. Сравнение значений LST по данным Landsat и MODIS для зимней (а, б) и летней (в, г) сцен. Значения LST по данным Landsat осреднены по ячейкам сетки MODIS*

*Fig. 2. Comparison of LST values according to Landsat and MODIS data for winter (a, б) and summer (в, г) scenes. LST values from Landsat data are averaged over MODIS grid cells*

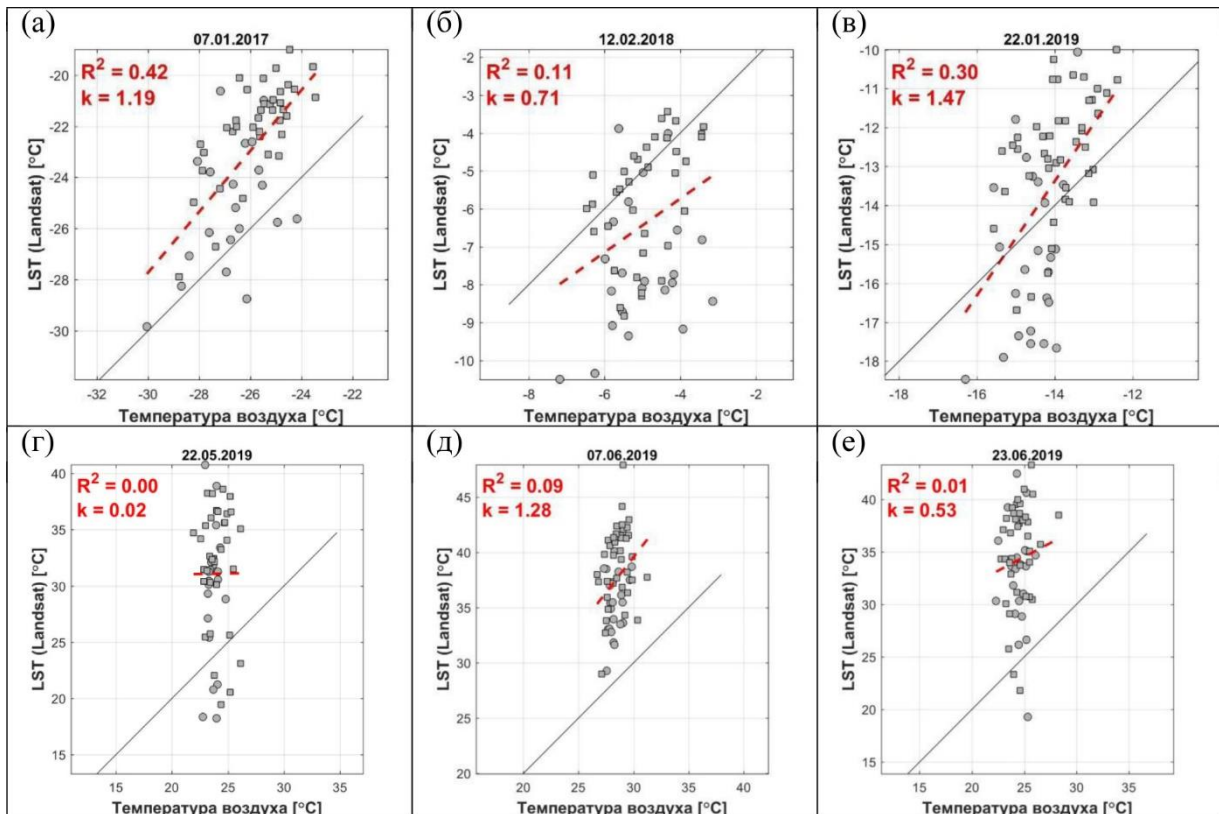


Рис. 3. Сравнение LST и температуры воздуха по данным измерений метеостанций и АСКЗА для отдельных зимних (а – в) и летних (г – е) сцен Landsat

Fig. 3. Comparison of LST and air temperature according to the data of meteorological stations and ASKZA measurements for specific winter (a – в) and summer (г – е) Landsat scenes

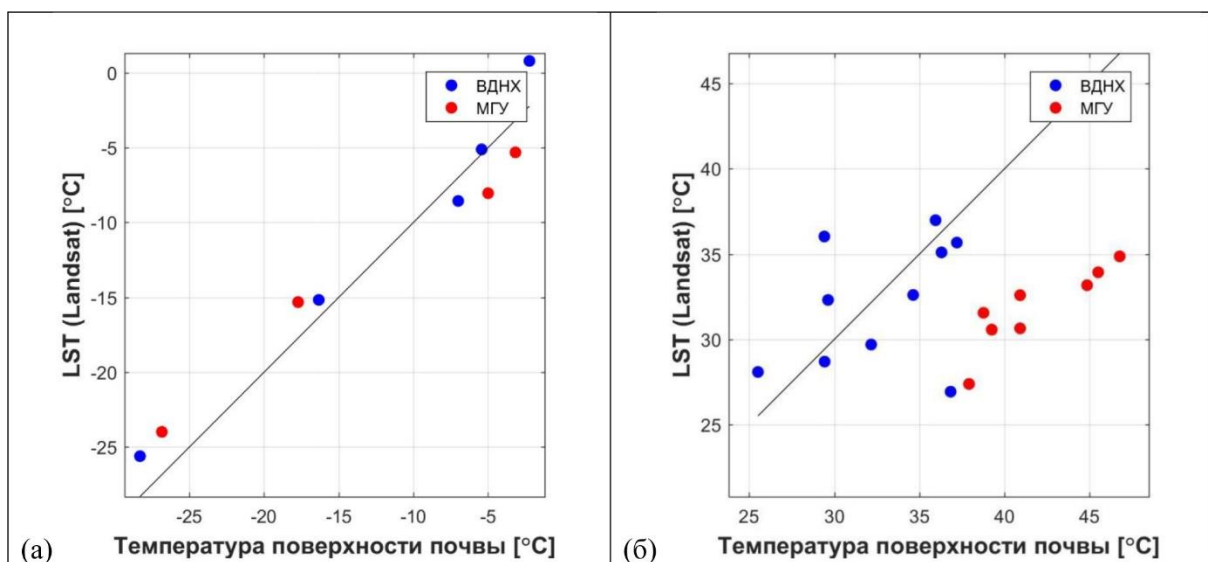


Рис. 4. Сравнение LST и измеряемой контактным образом температуры поверхности на метеостанциях ВДНХ и МГУ для всех рассмотренных зимних (а) и летних (б) сцен Landsat

Fig. 4. Comparison of LST and surface temperature in-situ measurements at VDNKh and Moscow State University meteorological stations for all considered winter (а) and summer (б) Landsat scenes

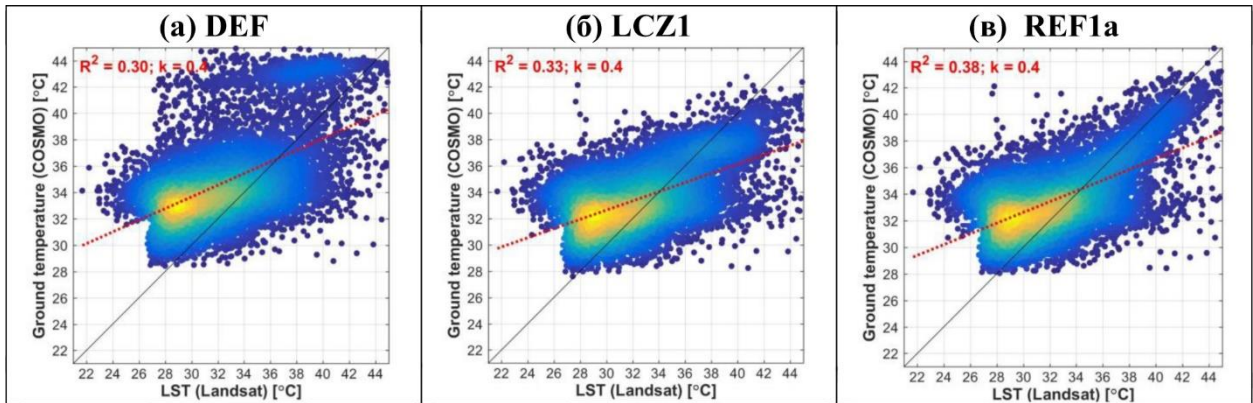


Рис. 5. Пример сравнения LST по данным Landsat за 6 июня 2019 г. с результатами расчетов по модели COSMO для экспериментов DEF, LCZ1 и REF1a с различными способами задания параметров городской среды

Fig. 5. An example of comparing LST according to Landsat data for June 6, 2019 with the results of calculations using the COSMO model for experiments DEF, LCZ1 and REF1a with different methods of setting the parameters of the urban environment

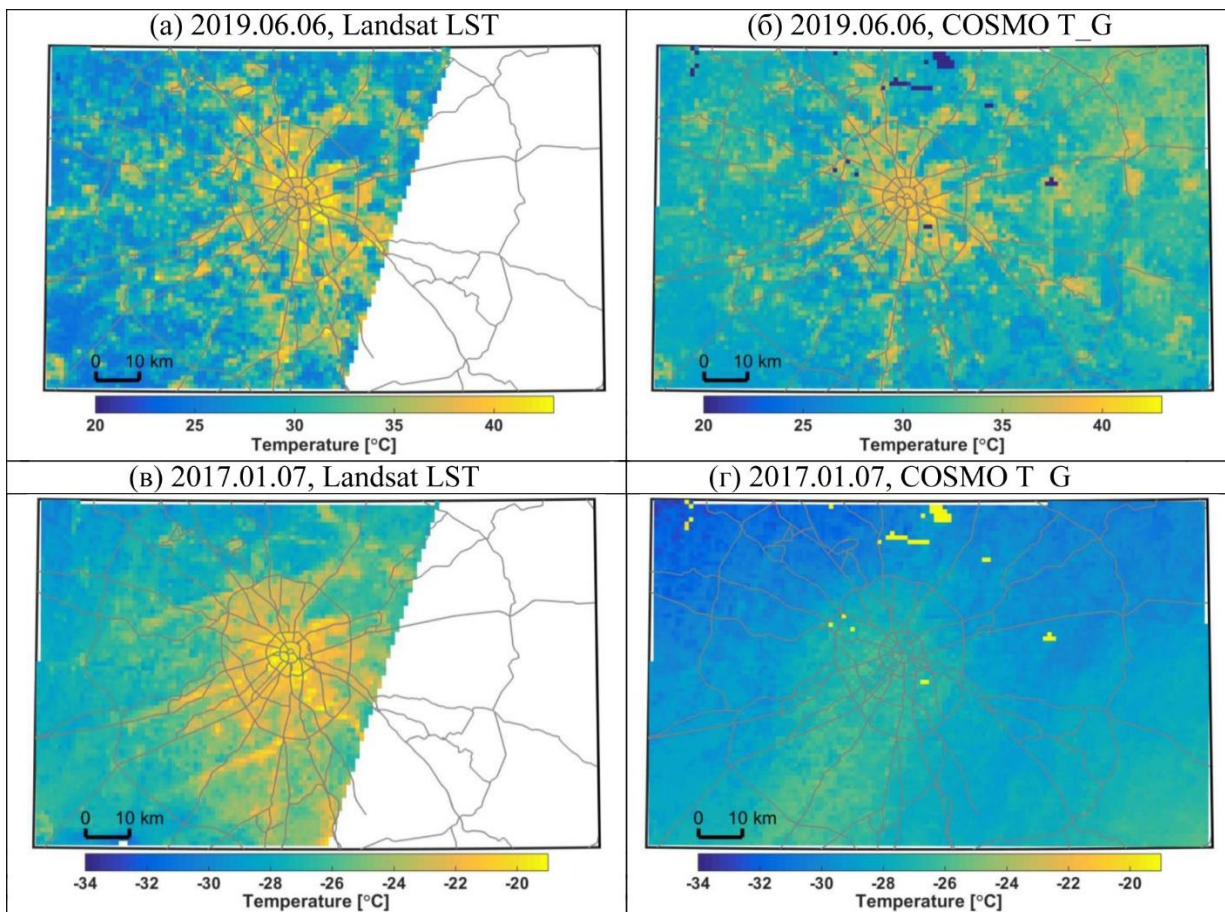


Рис. 6. Пример сравнения LST по данным Landsat (а, в) со значениями температуры поверхности по данным расчетов модели COSMO для эксперимента REF1a из статьи (Varentsov et al., 2020) (б, г) для летних и зимних условий

Fig. 6. An example of comparing LST according to Landsat data (a, в) with surface temperature values according to the calculations of the COSMO model experiment REF1a from (Varentsov et al., 2020) (б, г) for summer and winter conditions.

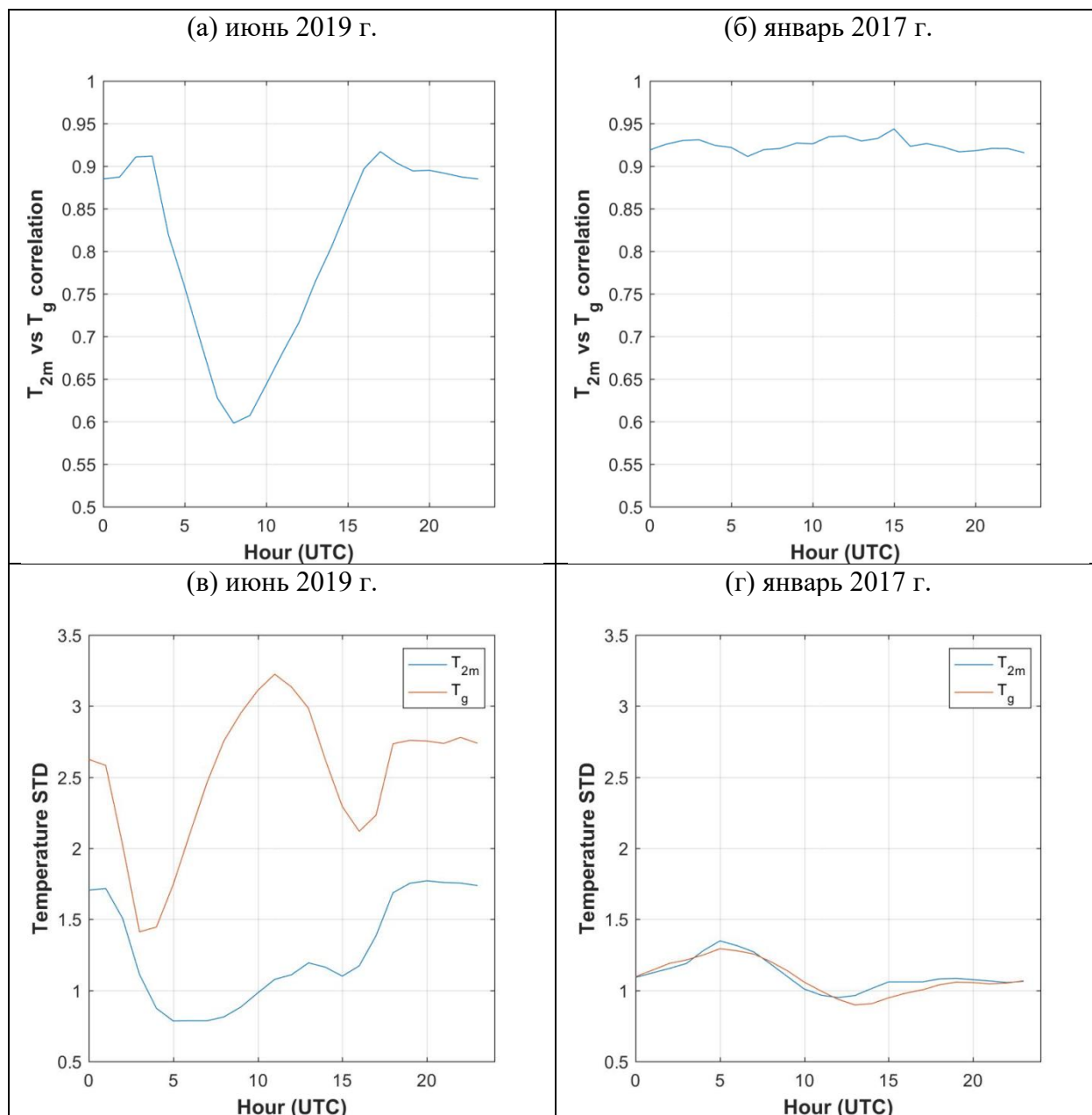


Рис. 7. Суточный ход коэффициента корреляции между пространственными полями температуры приземного воздуха ( $T_{2m}$ ) и поверхности ( $T_g$ ) по данным расчетов с моделью COSMO для июня 2019 г. (а) и января 2017 г. (б), а также стандартного отклонения этих величин (в, г)

Fig. 7. Diurnal variation of the correlation coefficient between the spatial fields of the surface air and surface temperature according to COSMO-CLM simulations for June 2019 (a) and January 2017 (б), and the standard deviation of these values (в, г)

## ВЫВОДЫ

Можно предположить, что это связано с различием значений коэффициента излучения, используемых в модели и при обработке космических снимков, а также с неточностями модельной параметризации снежного покрова в городских условиях (в модели не учитывается уборка снега на городских улицах и крышах зданий).



Для понимания фундаментальных причин различий между температурным режимом по большей выборке данных (по результатам моделирования за январь 2017 г. и июнь 2019 г.) рассмотрен суточный ход динамики коэффициента корреляции между полями температуры поверхности и воздуха в Московском регионе, а также стандартного отклонения этих величин по данным расчетов с моделью COSMO. Для это использовались результаты модельных расчетов за 1 летний месяц (июнь 2019 г.) и 1 зимний месяц (январь 2017 г.) с временной дискретностью 1 час. Для каждого момента времени рассчитывался коэффициент пространственной корреляции между температурой воздуха и поверхности, определенных на расчетной сетке модели ( $200 \times 200$  ячеек с шагом 1 км). Также рассчитываются стандартные отклонения каждой из величин. Далее путем осреднения за период модельных расчетов строился суточный ход полученных статистических показателей, представленный на рис. 7. Такой вид анализа позволил наглядно проиллюстрировать принципиальную проблему использования космических данных LST для картографирования температуры воздуха: видно, что летом в дневное время суток коэффициент корреляции между двумя величинами падает до 0,6 (что соответствует коэффициенту тесноты связи  $R^2 = 0,36$ ), а стандартное отклонение этих величин различается в 3 раза. Зимой же закономерности пространственной изменчивости этих величин связаны гораздо теснее. Таким образом, как показывают и примеры для арктических городов [Варенцов и др., 2021], использование космических температурных данных напрямую в задаче в климатического картографирования для урбанизированных территорий представляется перспективным именно для зимних условий.

Выполнено исследование наглядно продемонстрировало сложность и нелинейность связи городскими аномалиями температуры воздуха, регистрируемой на метеостанциях, и диагностируемой по спутниковым данным температурой поверхности (LST). Неоднозначность взаимосвязи этих величин связана с особенностями взаимодействия атмосферы и подстилающей поверхности, динамики пограничного слоя атмосферы и неоднородностью свойств подстилающей поверхности на различных масштабах. При работе со спутниковыми данными дополнительные источники неопределенности создает проблема точного определения излучательной способности различных типов поверхности. Таким образом, даже при использовании спутниковых снимков высокого разрешения, пространственная структура LST не будет однозначно отражать закономерности пространственного распределения аномалий температуры подстилающей поверхности. Тем не менее, опыт исследований для других регионов позволяет считать LST одним из предикторов в задачах картирования температуры воздуха и термического комфорта. Особую актуальность использование LST приобретает для зимнего периода, когда связь между температурой воздуха и поверхности существенно теснее, чем летом (что в данной работе показано с привлечением результатов моделирования). Параллельно, показана ценность данных LST высокого разрешения для верификации расчетов с региональной климатической модели COSMO с шагом сетки 1 км. В нашем исследовании использование спутниковых снимков Landsat позволило независимым образом подтвердить выводы об оптимальном способе задания параметров городской среды в модели, ранее полученные по результатам ее верификации по данным контактных измерений. В перспективе разрешение моделей прогноза атмосферы, применяемых для городских территорий в задачах прогноза погоды и исследования климата, будет повышаться, и использование детализированная спутниковая информация будет все более востребована для их верификации.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Обработка и анализ спутниковых данных выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-05-

00715 А. Численные эксперименты с моделью COSMO проведены при поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта 17-77-20070-П.

## ACKNOWLEDGEMENTS

Processing and analysis of satellite data was funded by the Russian Foundation of Basic Research, project 18-05-00715 А. Numerical simulations with COSMO model were funded by Russian Science Foundation, project No. 17-77-20070-П.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Варенцов М.И., Грищенко М.Ю., Константинов П.И.* Сопоставление наземных и космических разномасштабных температурных данных на примере городов российской Арктики для зимних условий. *Исследование Земли из космоса*. 2021. № 1. С. 1–13.
2. *Грищенко М.Ю., Сарычев Е.Ю., Варенцов М.И., Самсонов Т.Е.* Опыт определения площади городской застройки по космическим снимкам для задач метеорологического моделирования (на примере Москвы). *ИнтерКарто. ИнтерГИС*. 2020. Т. 26. № 2. С. 298–312.
3. *Грищенко М.Ю., Чернулич К.К.* Исследование связи наземных и космических температурных данных на примере островов Врангеля и Кунашир. *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2019. Т. 63. № 5. С. 566–575.
4. *Климат Москвы (особенности климата большого города)*. Под ред. А.А. Дмитриев, Н.П. Бессонов. Ленинград: Гидрометеиздат, 1969. 323 с.
5. *Климат Москвы в условиях глобального потепления*. Под ред. А.В. Кислов. Москва: Издательство Московского университета, 2017. 288 с.
6. *Локощенко М.А., Енукова Е.А.* Остров тепла в московском регионе по спутниковым данным. *Метеорология и гидрология*. 2020. №7. С. 50–63.
7. *Наставление гидрометеорологическим станциям и постам*. Вып. 3, ч. 1. Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. 296 с.
8. *Bechtel B., Alexander P.J., Böhner J., Ching J., Conrad O.* Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2015. V. 4. P. 199–219.
9. *Kuznetsova I.N., Brusova N.E., Nakhaev M.I.* Moscow Urban Heat Island: Detection, boundaries, and variability. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2017. V. 42. No 5. С. 305–313.
10. *Lokoshchenko M.A.* Urban Heat Island and Urban Dry Island in Moscow and Their Centennial Changes. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2017. V. 56. No 10. С. 2729–2745.
11. *Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A.* Urban climates. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 509 p.
12. *Varentsov M.I., Grishchenko M.Y., Wouters H.* Simultaneous assessment of the summer urban heat island in Moscow megacity based on in situ observations, thermal satellite images and mesoscale modeling. *Geogr. Environ. Sustain.* 2019. V. 12. No 4. С. 74–95.
13. *Varentsov M., Samsonov T., Demuzere M.* Impact of urban canopy parameters on a megacity's modelled thermal environment. *Atmosphere*. 2020. V. 11. № 12. P. 1–31.
14. *World Meteorological Organization.* Weather. Climate. Water. URL: <http://worldweather.wmo.int/en/city.html?cityId=206> (дата обращения: 27.03.2021).
15. *Wouters H., Demuzere M., Blahak U., Fortuniak K., Maiheu B., Camps J., Tielemans D., Lipzig N.P.M. van.* The efficient urban canopy dependency parametrization (SURY) v1.0 for atmospheric modelling: description and application with the COSMO-CLM model for a Belgian summer. *Geosci. Model Dev.* 2016. V. 9. No 9. P. 3027–3054.

## REFERENCES

1. *Bechtel B., Alexander P.J., Böhner J., Ching J., Conrad O.* Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2015. V. 4. P. 199–219.
2. *Climate of Moscow (Climate features of the big city)*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1969. 323 p. (in Russian).
3. *Climate of Moscow under global warming*. Moscow: Moscow University Press, 2017. 288 p.
4. *Grishchenko M.Y., Chernulich K.K.* Investigation of the relationship between ground-based and space temperature data on the example of the Wrangel and Kunashir islands. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotos"yemka*. 2019. V. 63. No 5. P. 566–575 (in Russian).
5. *Grishchenko M.Y., Sarychev E.Y., Varentsov M.I., Samsonov T.E.* Experience in determining the area of urban development from satellite images for the tasks of meteorological modeling (case study of Moscow). *InterKarto. InterGIS*. 2020. V. 26. No. 2. P. 298–312 (in Russian).
6. *Kuznetsova I.N., Brusova N.E., Nakhaev M.I.* Moscow urban heat island: Detection, boundaries, and variability. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2017. V. 42. No 5. P. 305–313 (in Russian).
7. *Lokoshchenko M.A.* Urban heat island and urban dry island in Moscow and their centennial changes. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2017. V. 56. No 10. P. 2729–2745.
8. *Lokoshchenko M.A., Yenukova E.A.* Heat island in the Moscow region according to satellite data. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2020. V. 7. P. 50–63 (in Russian)
9. *Manual for hydrometeorological stations and posts*. Vyp. 3, ch. 1. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. 296 p. (in Russian).
10. *Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A.* *Urban climates*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 509 p.
11. *Varentsov M., Samsonov T., Demuzere M.* Impact of urban canopy parameters on a megacity's modelled thermal environment. *Atmosphere*. 2020. V. 11. No 12. P. 1–31.
12. *Varentsov M.I., Grishchenko M.Y., Konstantinov P.I.* Comparison of ground-based and satellite-based different-scale temperature data on the example of cities in the Russian Arctic for winter conditions. *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. 2021. No 1. P. 1–13 (in Russian).
13. *Varentsov M.I., Grishchenko M.Y., Wouters H.* Simultaneous assessment of the summer urban heat island in Moscow megacity based on in situ observations, thermal satellite images and mesoscale modeling. *Geography, Environment, Sustainability*, 2019. V. 12. No 4. P. 74–95.
14. World Meteorological Organization. *Weather. Climate. Water*. URL: [http:// worldweather.wmo.int/en/city.html?cityId=206](http://worldweather.wmo.int/en/city.html?cityId=206) (access: 27.03.2021).
15. *Wouters H., Demuzere M., Blahak U., Fortuniak K., Maiheu B., Camps J., Tielemans D., Lipzig N.P.M. van.* The efficient urban canopy dependency parametrization (SURY) v1.0 for atmospheric modelling: description and application with the COSMO-CLM model for a Belgian summer. *Geosci. Model Dev*. 2016. V. 9. No 9. P. 3027–3054.

УДК: 911.9

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-196–209

В.А. Добрякова<sup>1</sup>, Л.Д. Сулкарнаева<sup>2</sup>

## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ ЭКОСИСТЕМНОЙ УСЛУГИ «ОХЛАЖДАЮЩИЙ ЭФФЕКТ» НА ПРИМЕРЕ Г. ТЮМЕНЬ

### АННОТАЦИЯ

Главной задачей данной статьи является выявление основных факторов, влияющих на предоставление важной для создания комфортной городской среды, экосистемной услуги «Охлаждающий эффект».

Для построения математической регрессионной модели изучаемого процесса, параметры экосистемной услуги «Охлаждающий эффект» (спрос и предложение) выражены количественно как разность температур поверхности и максимальной температуры комфорта для летнего периода (23 °С).

По результатам полевых наблюдений и анализа космоснимков была верифицирована картографическая основа Open Street Map, организованы тематические данные для моделирования: природные объекты отсортированы по площади (выбраны с площадью не менее 1 га), здания по критерию многоэтажности, дороги – по критерию количества полос. Для определения зависимости температур от выбранных показателей городская территория была накрыта гексагональной сеткой, с радиусом шестиугольника 500 м. Операционными единицами исследования выбраны ячейки (бины) построенной гексагональной сетки. Показатели площади рассчитаны в процентах в пределах бина, расстояния – как ближайшие в метрах от бина до указанных объектов по прямой.

Вычисления выполнены в программном комплексе ArcGIS Pro с помощью инструментов из набора «Пространственная статистика – Моделирование пространственных отношений». Алгоритм построения модели включает последовательный запуск двух инструментов анализа: «Исследовательская регрессия» и «Метод наименьших квадратов» (МНК).

По результатам работы инструментов выполнены: интерпретация и анализ отчетов, сообщений и карт. В результате проведенного исследования определены основные факторы, влияющие на распределение температуры. Самые «сильные» переменные – площадь многоэтажных зданий и расстояние до основных автодорог. Третий по значимости фактор – площадь лесов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** городской остров тепла, экосистемные услуги, пространственный анализ, географические информационные системы.

---

<sup>1</sup> Тюменский государственный университет, Институт наук о Земле, Володарского, д.6, 625003, Тюмень, Россия, *e-mail*: [v.a.dobryakova@utmn.ru](mailto:v.a.dobryakova@utmn.ru)

<sup>2</sup> Тюменский государственный университет, Институт наук о Земле, Володарского, д.6, 625003, Тюмень, Россия, *e-mail*: [sulkarnaeva1992@mail.ru](mailto:sulkarnaeva1992@mail.ru)

Valentina A. Dobryakova<sup>1</sup>, Liliia D. Sulkarnaeva<sup>2</sup>

## MODELLING OF ECOSYSTEM SERVICES «COOLING EFFECT» SUPPLY IN THE CITY OF TYUMEN

### АННОТАЦИЯ

This article aims to identify the main factors influencing the supply of the “Cooling Effect” ecosystem service, which is important for creating a comfortable urban environment. The parameters of the ecosystem service “Cooling effect” (supply and demand) are expressed quantitatively as the difference between the surface temperatures and the maximum comfort temperature for the summer period (23 °C) for the mathematical regression model of the process.

The results of field observations and analysis of space images allowed us to verify the cartographic basis of the Open Street Map and organize thematic data for modeling: we sorted natural objects by area (selected with an area of at least 1 hectare), buildings by the criterion of multi-story, roads by the criterion of the number of lanes. To determine the dependence of temperatures on the selected indicators, the urban area was covered with a hexagonal grid with a hexagon radius of 500 m. The cells (bins) of the constructed hexagonal grid were selected as the operational research units. Areas are calculated as a percentage within the bin, distances – as the nearest in meters from the bin to the specified objects in a straight line.

Calculations were performed in ArcGIS Pro software using tools from the Spatial Statistics – Spatial Relationship Modeling toolbox. The model building algorithm includes sequential launch of two analysis tools: Exploratory Regression and Ordinary Least Squares (OLS).

Based on the results of the work of the tools, the following were performed: interpretation and analysis of reports, messages and maps. As a result of the study, the main factors influencing the temperature distribution have been identified. The strongest variables are the area of multi-storey buildings and the distance to major roads. The third most important factor is the forest area.

**KEYWORDS:** urban heat island, ecosystem services, spatial analysis, geographic information systems.

### ВВЕДЕНИЕ

Городские территории характеризуются особыми климатическими условиями, формирующими городской остров тепла: более низкой влажностью и силой ветра, более высокой температурой по сравнению с неурбанизированными территориями [Arnfield, 2003; Kuttler *et al.*, 2007].

Городская среда представляет собой сочетание водно-зеленой (леса, парки, аллеи, водные объекты, водно-болотные угодья, болота и прочие природные объекты городской среды) и серой (территории с твердым покрытием, жилые и административные здания, промышленные зоны, торговые центры, теплоэлектростанции, дорожная и инженерная инфраструктура) инфраструктуры [Mell *et al.*, 2013]. Городской остров тепла зависит главным образом от характеристик водно-зеленой инфраструктуры (влияние на альbedo, транспирацию и направление потоков воздуха), характеристик серой инфраструктуры (плотность и цвет материалов, использованных для зданий и твердых покрытий,

<sup>1</sup> University of Tyumen, Institute of Earth Sciences, Volodarsky str., 6, 625003, Tyumen, Russia, e-mail: v.a.dobryakova@utmn.ru

<sup>2</sup> University of Tyumen, Institute of Earth Sciences, Volodarsky str., 6, 625003, Tyumen, Russia, e-mail: sulkarnaeva1992@mail.ru

конфигурация и высота зданий и прочие антропогенные источники теплового загрязнения) [Larsen, 2015].

Объекты серой инфраструктуры (территории с твердым покрытием, жилые и административные здания, промышленные зоны, торговые центры, теплоэлектростанции), как правило, приводят к повышению температуры воздуха и усилению городского острова тепла, в то время как объекты водно-зеленой инфраструктуры (леса, парки, аллеи, водные объекты, водно-болотные угодья, болота и прочие природные объекты городской среды)<sup>1</sup> предоставляют экосистемную услугу «Охлаждающий эффект» [Kowarik et al., 2016].

Процессы урбанизации – роста и развития городов – вместе с глобальным изменением климата усиливают эффект городского острова тепла [Oke, 1973], [Streutker, 2003], что может существенно ухудшить качество городской среды [Stocker et al., 2013; Kowarik et al., 2016]: увеличение продолжительности и частоты (почти в два раза) волн жары, числа дней теплового стресса, вероятности чрезвычайных ситуаций [Schär et al., 2004; Schär, Jendritzky, 2004].

Тепловой стресс и волны жары приводят к росту числа смертей и обострений заболеваний сердечно-сосудистой системы. Так называемые «тропические ночи» с температурой воздуха выше 20 °С приводят к недостаточному восстановлению после дневного теплового стресса [Höppe, 1999], что еще больше обостряет медицинскую ситуацию, особенно среди людей с хроническими заболеваниями и пожилых [Burkart et al., 2013; Scherber et al., 2013]. Данный факт особенно важен в условиях современной демографической ситуации в России (рост среднего возраста и рост продолжительности жизни)<sup>2</sup>.

Оценка «Охлаждающего эффекта» для городской среды проводится, как правило, методами, доказывающими, что объекты водно-зеленой инфраструктуры способствуют смягчению городского острова тепла: измерением разницы температур между температурой воздуха или поверхности на территории объектов водно-зеленой инфраструктуры и соседних участках [Chang et al., 2007]. Однако, вклад различных типов объектов водно-зеленой инфраструктуры в предоставление экосистемной услуги «Охлаждающий эффект» почти не рассматривается.

Таким образом была поставлена следующая цель: провести регрессионный анализ спроса и предложения экосистемной услуги «Охлаждающий эффект» в зависимости от конфигурации, характеристик и расположения объектов водно-зеленой и серой инфраструктуры города Тюмени.

Водно-зеленая и серая инфраструктура города Тюмени была выбрана в качестве объекта исследования в связи с 1) ростом населения города, 2) активным строительством новых жилых кварталов и увеличением площадей с твердым покрытием, 3) продолжительным периодом (более двух недель) высокой суточной температурой и теплового стресса в июле-августе 2020 года.

Оценка вклада объектов водно-зеленой инфраструктуры разного типа (парки, леса, водные объекты, болота) будет востребована для целей городского планирования с целью повышения качества жизни жителей города.

<sup>1</sup> Сайт проекта “Связность зеленой и синей инфраструктур: сосулы для биоразнообразия” (Web-site of the Project “Connectivity of green and blue infrastructures: living veins for biodiversity”). Электронный ресурс: <http://bioveins.eu/> (дата обращения 02.04.2021).

<sup>2</sup> Щербакова Е.М. Старшие поколения населения России. Демоскоп Weekly. 2019. № 797-798. Электронный ресурс: <http://demoscope.ru/weekly/2019/0797/barom01.php> (дата обращения 02.04.2021).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Картографическая основа: векторные слои Open Street Maps (слои административные границы, здания, дороги, леса и т.д.) за сентябрь 2016 года. Данные векторные слои были верифицированы с использованием космических снимков Landsat-8 (от 08.06.2016 и 03.09.2016) и полевых наблюдений, проведённых летом (июль и август) 2016 года.

Тематические данные:

1. Зависимая переменная: параметры экосистемной услуги «Охлаждающий эффект» (Разность температур поверхности и максимальной комфорта для летнего периода (23 °C)).

Данные получены в результате агрегирования значений температуры поверхности, определённых на основе обработки космических снимков Landsat-8 (в данном исследовании мы использовали снимки Landsat-8, сделанные 22.06.2015, 10.07.2016, 14.08.2017, 16.07.2018, 19.07.2019). Выбор изображений основывался на критериях минимальной облачности (до 5%) и наличия пройденной геометрической и радиометрической коррекции.

Извлечение из космических снимков температур земной поверхности проводилась по алгоритму «одного канала» (single-channel method)<sup>1</sup>. Для извлечения температуры земной поверхности был выбран десятый канал (Band 10). Расчет температуры земной поверхности выполнялся по формуле<sup>2</sup>:

$$T = \frac{TB}{1 + \frac{\lambda \cdot TB}{h \cdot \frac{c}{s}} \cdot \ln(e)} - 273,15 \quad (1)$$

где TB – температура чёрного тела на поверхности атмосферы (top of atmosphere brightness temperature);

$\lambda$  – длина волны излучаемого излучения (для 10 канала составляет 10,8);

$h$  – постоянная Планка ( $6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж с);

$s$  – постоянная Больцмана ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);

$c$  – скорость света ( $2,998 \cdot 10^8$  м/с);

$e$  – излучательная способность земной поверхности (emissivity), в данном случае была использована константа 0,98);

273,15 – коэффициент для перевода из Кельвинов в градусы Цельсия.

2. Независимые переменные включённые в модель для выявления характера влияния на температуру поверхности, делятся на два типа: «площади» и «расстояния».

2.1. Тип переменных «площади» включает данные по площадям:

- лесов;
- зелёных насаждений;
- лесопарков и парков;
- водных объектов (открытая вода);

<sup>1</sup> Практический алгоритм «одного канала» для определения температуры поверхности земли : применение к данным серии Landsat (A Practical Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval: Application to Landsat Series Data) [https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018JD029330#:~:text=The%20single%E2%80%90channel%20\(SC\),Planck's%20function%20and%20atmospheric%20correction.](https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018JD029330#:~:text=The%20single%E2%80%90channel%20(SC),Planck's%20function%20and%20atmospheric%20correction.)

<sup>2</sup> Документация плагина полуавтоматической классификации 5.3.6.1. (Semi-Automatic Classification Plugin 5.3.6.1 Documentation) <https://semiautomaticclassificationmanual-v5.readthedocs.io/en/latest/re mote sensing.Html #conversion-to-temperature.>

- болот;
- зданий (всего);
- многоэтажных зданий.

2.2. В тип «расстояния» входят данные о расстояниях до:

- автодорог;
- основных автодорог;
- водных объектов (всего);
- водных объектов (открытая вода);
- болот.

Исследуемая территория: г. Тюмень в границах городского округа.

Городская территория была накрыта гексагональной сеткой, с радиусом шестиугольника 500 м. Операционными единицами исследования являются ячейки (бины) построенной гексагональной сетки.

Перечисленные выше показатели площади рассчитывались в процентах в пределах бина, расстояния – как ближайшие в метрах от бина до указанных объектов по прямой.

Анализ температуры поверхности с использованием спутниковых снимков LANDSAT 8 позволил выделить области с более высокими температурами (области с тепловым стрессом) и с температурами ниже максимальной комфортной температуры (области с «охлаждающим эффектом»).

В качестве основного инструмента для расчётов, анализа и визуализации результатов использовалась программа ArcGIS Pro.

Исходные данные распределения температур на исследуемой территории представлены на рис. 1.

«Остров тепла» формируется из-за неоднородности городских поверхностей, что приводит к изменению энергетического баланса. Изменения в энергетическом балансе вызваны различием теплоёмкости и теплопроводности и радиационных свойств поверхностей (альbedo, излучательная способность): например, тёмные поверхности поглощают значительно больше солнечного излучения (городские дороги, заасфальтированные автостоянки вблизи офисов, торговые центры, жилые дома) положительные аномалии температуры отмечаются над многоэтажными жилыми домами, промышленными и энергетическими объектами, плоскими крышами торговых центров. Температура над этими поверхностями выше 23 °С. В целом поверхности над зелёными насаждениями (парки, скверы, зелёные зоны малоэтажных частных жилых домов) и водные поверхности (объекты) остаются «холодными». Эти территории обеспечивают «Охлаждающий эффект»; температура над этими поверхностями ниже 23 °С.

Бины с отрицательными значениями предоставляют услугу «Охлаждающий эффект» в достаточном объеме, а бины с положительным – в недостаточном.

На карте (рис. 1) заметны выраженные и хорошо локализуемые 4 зоны с повышенной температурой:

1. Самая большая и горячая область, на высоком правом берегу протянувшаяся в длину от ул. Перекопская до ул. Воровского и в ширину от реки до объездной дороги. Это область плотной городской застройки с минимумом зеленых зон.

2. Вторая по размеру область на левом низком берегу соответствует зоне интенсивно застраивающихся старых и новых заречных микрорайонов от ул. Луговая 2-я



до ул. Алебашевская у самой реки. На удалении от реки эта зона сужается и вытягивается по ул. Дружбы в обход Алебашевского болота до объездной дороги. Это также область плотной городской застройки, но более узкая и вытянутая вдоль реки с прилегающими объектами водно-зеленой инфраструктуры большой площади: Алебашевское болото, парк им. Гагарина.

3. Третья область продолжает вторую и начинается за объездной дорогой на левом берегу Туры. Это поля и кустарник, причина перегрева не выяснена.

4. Наиболее удаленная от других западная зона, которая накрывает аэропорт Рошино с прилегающим поселком и большой площадью полей. Во многом соответствует области 3.

Подбор модели проводился инструментами из набора «Пространственная статистика – Моделирование пространственных отношений».

Алгоритм построения модели включает последовательный запуск двух инструментов анализа:

1. «Исследовательская регрессия». Инструмент позволяет изучить большое число линейных моделей, описывая отношения и определяя комбинации потенциальных независимых переменных.

Для каждой комбинации переменных рассчитываются статистические показатели: выровненный  $R^2$  ( $AdjR^2$ ), информационный критерий Акаике (AICc), р-значение Жака-Бера (JB), статистическое р-значение Кенкера  $K(BP)$ , максимальный фактор увеличения дисперсии (VIF), глобальное р-значение Морана I (SA). Первые два оценивают эффективность модели, статистика Жака-Бера (JB) и глобальное р-значение Морана I – распределение невязок, т. е. отклонений исходных данных от значений, рассчитанных по модели.

Поиск комбинации независимых переменных, соответствующей заданным критериям (минимальный допустимый скорректированный  $R^2$ , максимальное предельное р-значение коэффициента, максимальный порог значения VIF и минимально допустимое р-значение Жака-Бера) выполняется методом наименьших квадратов (МНК), оценка невязок модели – с помощью глобального индекса Морана I.

Если ни одна из моделей не соответствует указанным критериям, тестирование с помощью глобального индекса Морана I применяется к невязкам для трех моделей с наибольшими скорректированными значениями  $R^2$  и трем моделям с наибольшими р-значениями Жака-Бера.

В результате работы инструмента мы должны получить описания корректных моделей МНК. Если проходящие модели отсутствуют, в отчете будут представлены результаты диагностических тестов, по результатам которых можно определить стратегию работы над улучшением модели.

2. «Метод наименьших квадратов» (МНК). Наиболее известный метод регрессионного анализа. В результате работы инструмента получаем: слой объектов-невязок МНК, уравнение регрессии, оценки каждой независимой переменной, диагностику модели (производительность, значимость, стационарность и смещение)<sup>1</sup>.

Далее, выполнялись интерпретация и анализ отчетов, сообщений и карт, использовались дополнительные инструменты для корректировки, выбранной модели.

<sup>1</sup> Сайт компании ESRI. Как работает регрессия МНК. Электронный ресурс: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/how-ols-regression-works.htm> (дата обращения 03.04.2021).

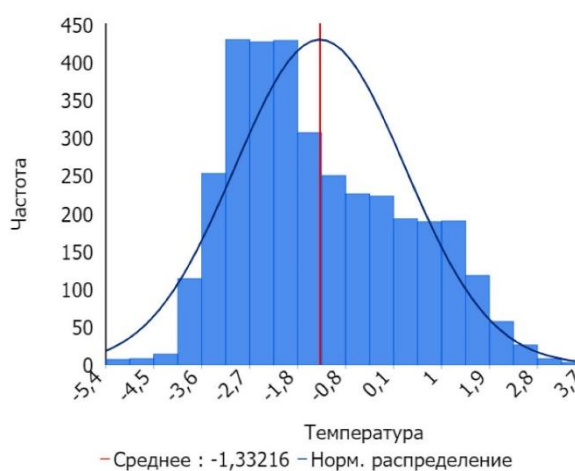
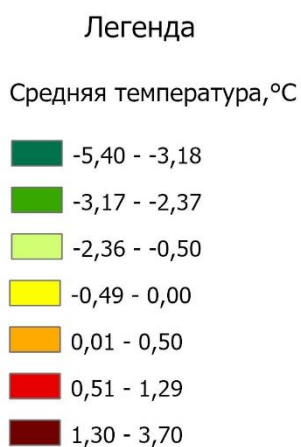
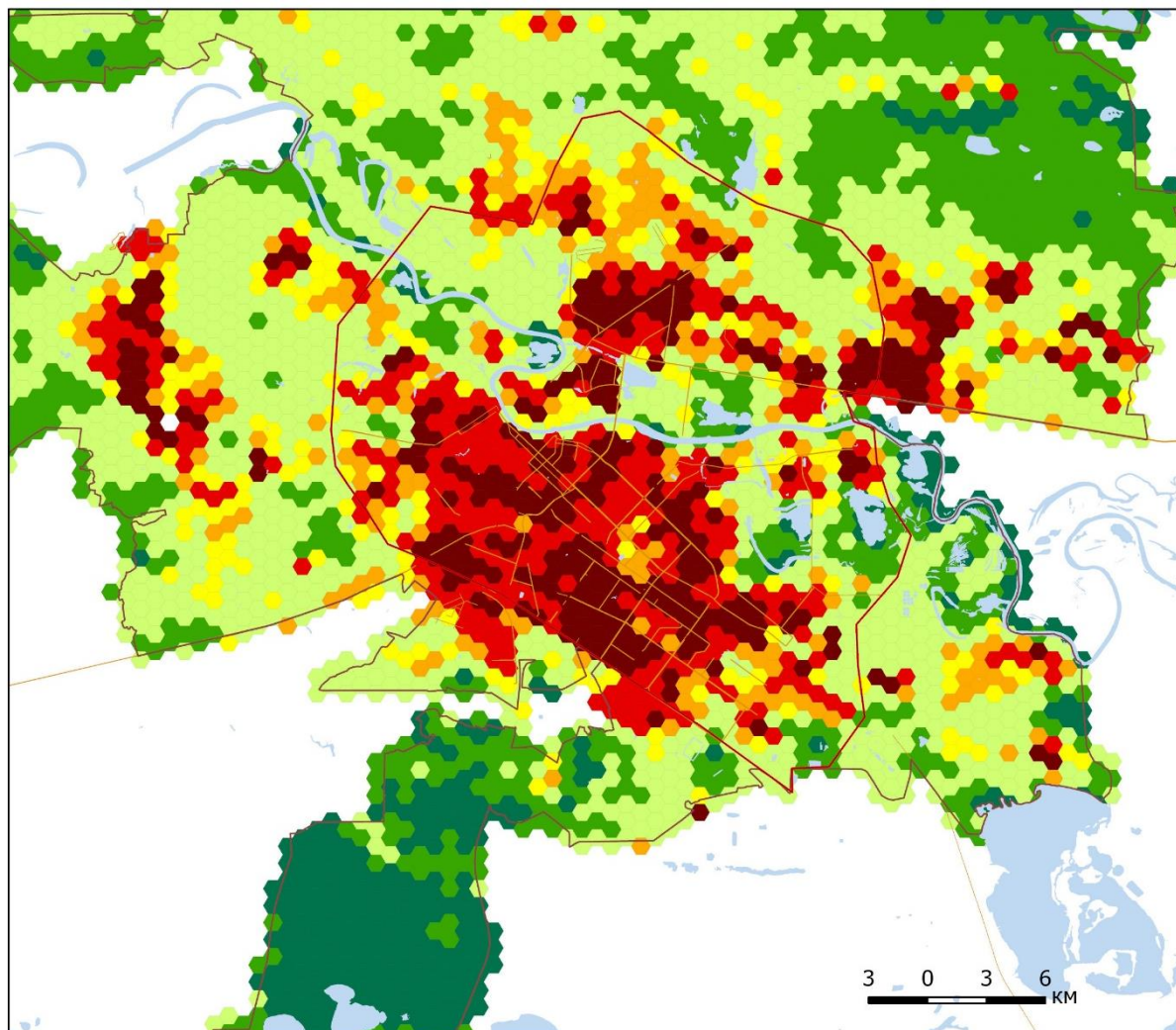


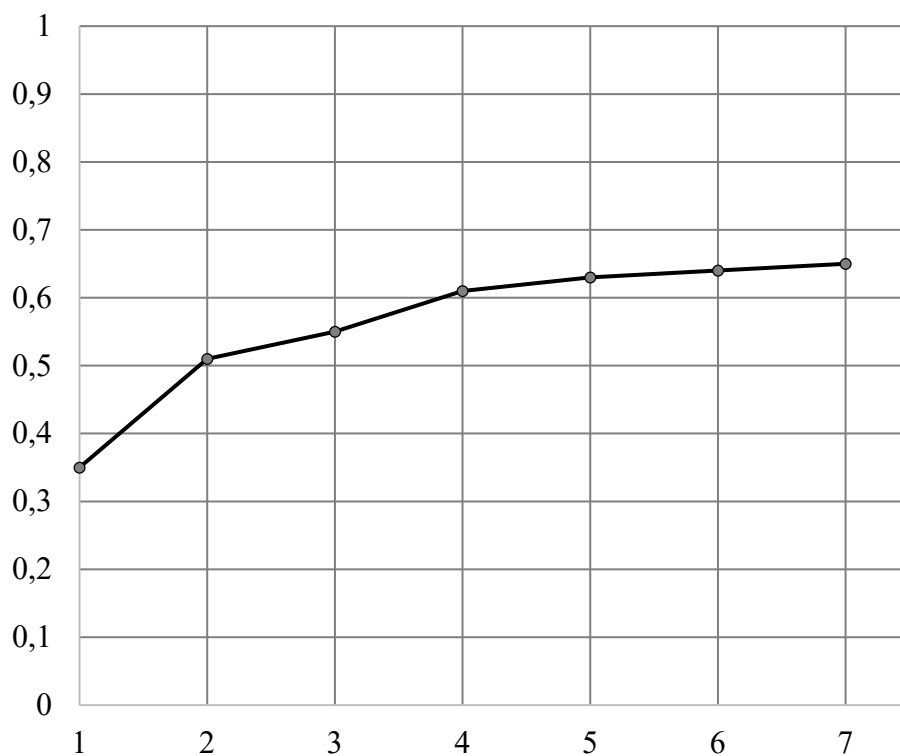
Рис. 1. Распределение расчетной разницы температур от максимальной комфортной температуры (23 °C)

Fig. 1. Distribution of the calculated temperature difference from the maximum comfortable temperature (23 °C)

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По наибольшему показателю выровненный  $R^2$ , с учетом его изменений при увеличении количества переменных (рис. 2) принято решение остановиться на 7 независимых переменных.

$R^2$



Количество независимых переменных

Рис. 2. Изменение  $R^2$  при увеличении количества независимых переменных

Fig. 2. Dependence of  $R^2$  from independent variables

По результатам работы инструмента «Исследовательская регрессия» корректных моделей МНК, соответствующих заданным на входе критериям (максимальное число независимых переменных равно 7, минимальный допустимый скорректированный  $R^2$  – 0,5, максимальное предельное р-значение коэффициента – 0,05, максимальный порог значения  $VIF < 7,5$  и минимально допустимое р-значение Жака-Бера (JB) – 0,1) не найдено.

Не пройдены диагностические тесты глобального индекса Морана I для пространственной автокорреляции (SA) и Жака-Бера (JB).

Причина связана с выявлением высокой кластеризации невязок и проблемой со смещенностью модели.

Реализована следующая последовательность действий:

1. По наибольшему показателю выровненный  $R^2$ , с учетом его изменений при увеличении переменных (рис. 2), с исключением мультиколлинеарности, были отобраны комбинации независимых переменных (табл. 1).

Табл. 1. Отобранные комбинации независимых переменных по результатам работы инструмента «Исследовательская регрессия»

Table 1. Selected combinations of independent variables based on the Exploratory Regression tool results

№	Модель	Кол-во переменных	Выровненный R <sup>2</sup> (AdjR <sup>2</sup> )	Критерий Акаике (AICc)
1.	Площади (%) лесов, рек и озер, многоэтажных зданий; расстояние до основных автодорог	4	0,6	9988,42
2.	Площади (%) лесов, рек и озер, зданий (всего); расстояние до основных автодорог	4	0,61	9948,06
3.	Площади (%) лесов, рек и озер, болот, многоэтажных зданий; расстояние до основных автодорог	5	0,62	9808,80

2. С помощью инструмента «МНК» изучены три отобранные модели. В результате по каждой модели получили: уравнение регрессии, оценки каждой независимой переменной, диагностику модели в целом, слой объектов-невязок МНК.

Результаты моделирования оказались весьма схожими.

Все модели значимы. В каждой модели отобранные независимые переменные значимы, моделируемые отношения линейны, переменные не являются избыточными. Зависимости между температурой и переменными отрицательные, за исключением связи между температурой и площадью многоэтажных зданий. Основная проблема – распределение невязок во всех трёх моделях не является нормальным.

Для дальнейшей работы по наибольшему значению выровненного R<sup>2</sup> выбрана модель № 3.

Множественный коэффициент корреляции R = 0,79.

Уравнение модели:

$$y = -0,017x_1 - 0,03x_2 - 0,014x_3 + 0,1x_4 - 0,0001x_5 - 0,4 \quad (2)$$

y – разность температур поверхности и максимальной комфорта для летнего периода;

x<sub>1</sub> – площадь лесов;

x<sub>2</sub> – площадь водных объектов (открытая вода);

x<sub>3</sub> – площадь болот;

x<sub>4</sub> – площадь многоэтажных зданий;

x<sub>5</sub> – расстояние до основных автодорог.

3. Проанализированы отклонения между рассчитанными и наблюдаемыми значениями зависимой переменной.

Наблюдается пространственная кластеризация в отклонениях (рис. 3, 4). Пространственные процессы, создавшие данную структуру, носят неслучайный характер. Вероятно, существуют неизвестные, не учтенные нами факторы, определившие рисунок отклонений модели от наблюдаемых значений. Анализируя (рис. 3.) мы видим, что наибольшие области отклонений связаны с уже обсуждаемыми нами ранее областями 3 и 4 (рис. 1).

Кроме того, распределение невязок не является нормальным (рис. 4.).

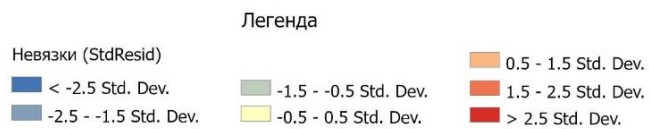
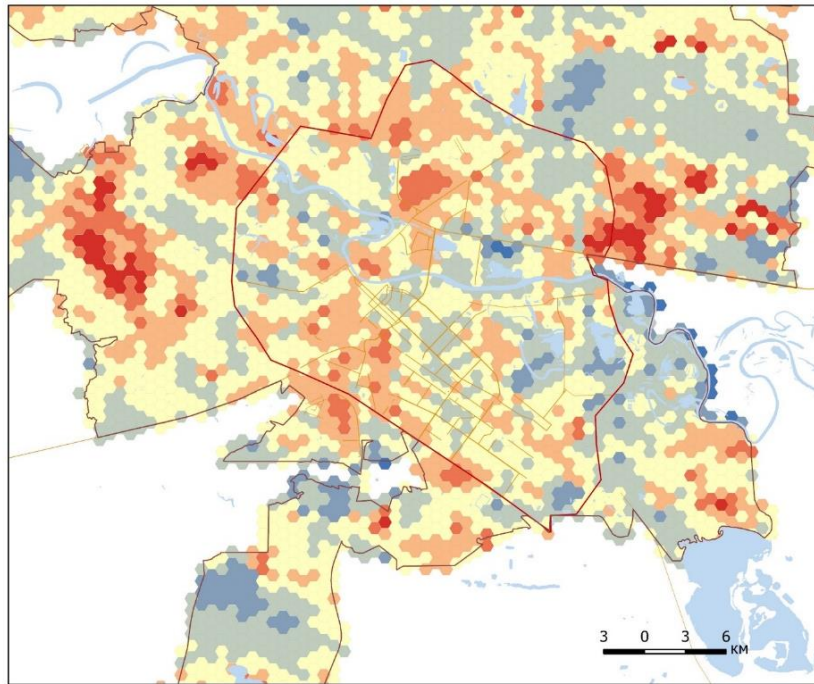


Рис. 3. Результаты МНК: слой невязок между рассчитанной и наблюдаемой значениями зависимой переменной.

Fig. 3. OLS results: layer of residuals between the calculated and observed values of the dependent variable

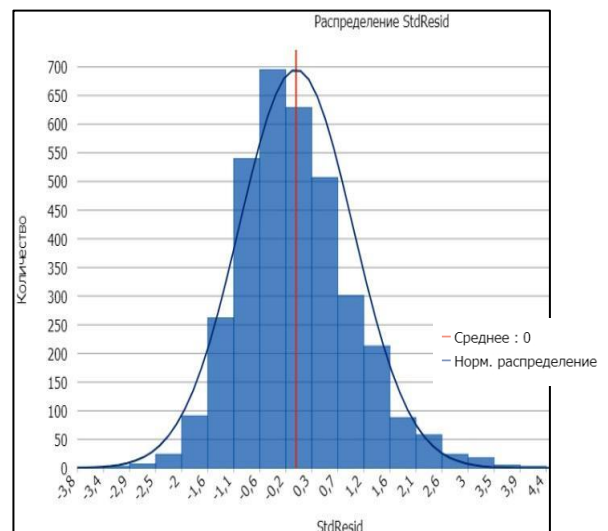
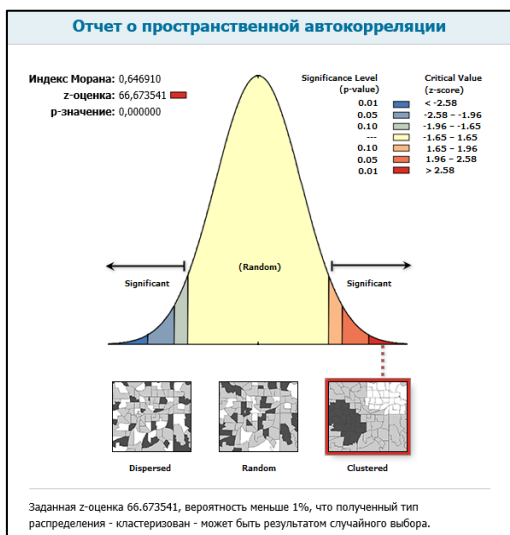


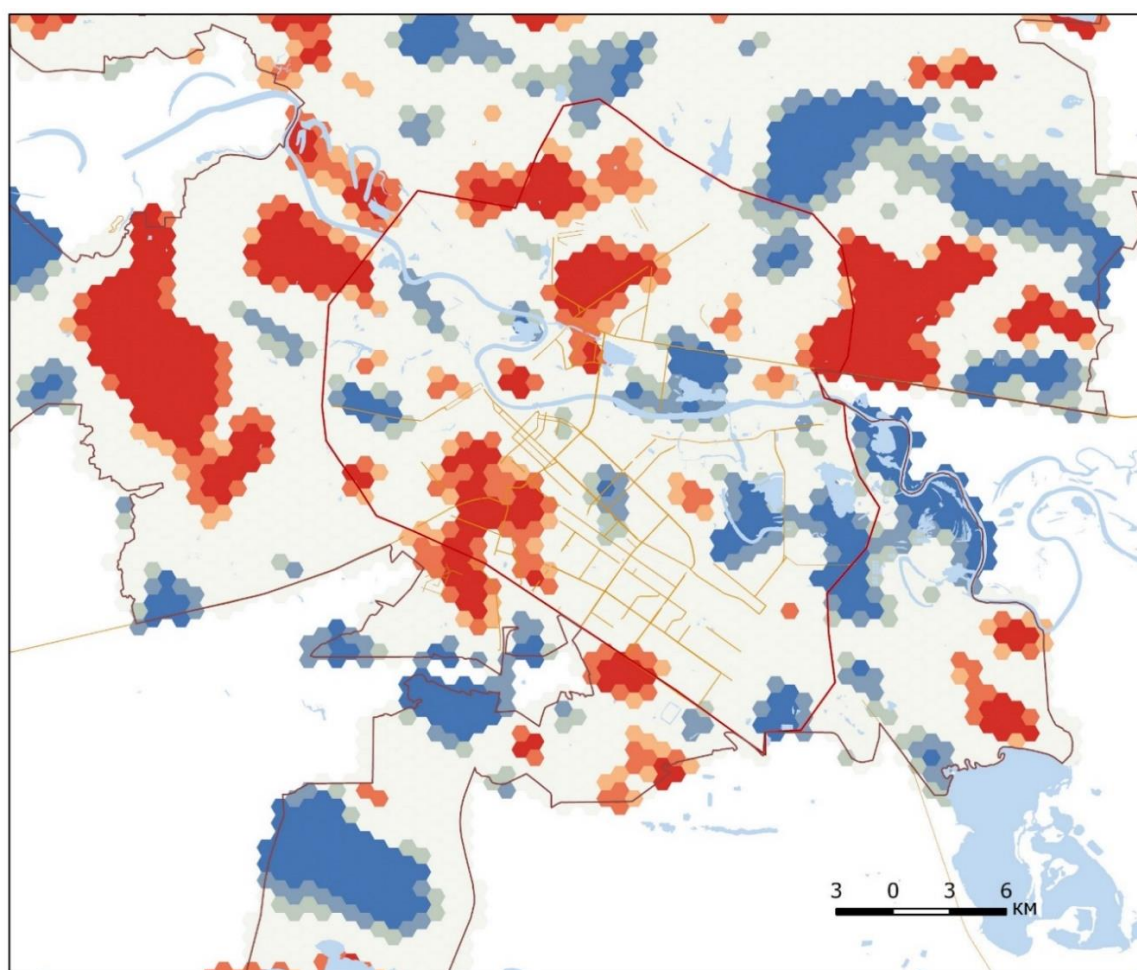
Рис. 4. Оценка структурных закономерностей в распределении невязок: а – результаты работы инструмента «Пространственная автокорреляция»; б – гистограмма распределения невязок

Fig. 4. Assessment of structural regularities in the distribution of residuals: а – the results of the tool "Spatial autocorrelation"; б – histogram of residual distribution

Для идентификации и визуализации пространственной кластеризации невязок использовался анализ горячих точек (рис. 5), в основе которого – расчёт локального индекса Getis-Ord  $G_i^*$  [Getis, 1992].

Главное преимущество статистики Getis-Ord  $G_i^*$  состоит в том, что она учитывает значение всех соседних объектов и выявляет горячие и холодные точки с различными уровнями статистической значимости. Локальная статистика Getis-Ord  $G_i^*$  сравнивает локальную сумму отклонений от среднего для окрестности объекта с аналогичными суммами других объектов. Метод рассчитывает z- и p-оценку каждой суммы в исследуемой области, показывая статистически значимы или нет различия между локальными и глобальными средними значениями [Haque et al., 2012].

Скорее всего в нашей модели отсутствует ключевой показатель (показатели) или некоторые отношения, которые мы моделируем, являются нелинейными.



Легенда

Анализ горячих точек

Достоверность, % ( $G_i$ \_Bin)

Холодная точка - 99%

Холодная точка - 95%

Холодная точка - 90%

Не значима

Горячая точка - 90%

Горячая точка - 95%

Горячая точка - 99%

Рис. 5. Результаты анализа горячих точек

Fig. 5. Hot Spot Analysis Results

## ВЫВОДЫ

1. Распределение параметров экосистемной услуги «Охлаждающий эффект» представляет весьма неоднородную картину, тем не менее, в результате проведенного исследования определена линейная зависимость от ряда факторов (перечислены ниже).

2. Для сравнительной оценки влияния каждого фактора на результат уравнение (2) приводим к стандартизированному виду:

$$y = -0,275x_1 - 0,222x_2 - 0,143x_3 + 0,334x_4 - 0,314x_5 \quad (3)$$

Формулы перехода от натурального уравнения множественной регрессии к стандартизированному подробно описаны в учебниках по статистике [Теория, 2005; Колде, 1991].

Отобранные независимые переменные значимы, переменные не являются избыточными. Согласно уравнению (3) самые «сильные» переменные – площадь многоэтажных зданий ( $x_4$ ) и расстояние до основных автодорог ( $x_5$ ). Третий по значимости фактор – площадь лесов ( $x_1$ ).

3. Однако полученный результат не является окончательным, поскольку наблюдается значимая кластеризация невязок. Полученную локализацию горячих точек следует рассматривать как основу для поиска, расчета и включения новых эффективных независимых переменных.

Результаты данного исследования можно использовать для целей жизнестойкого городского планирования – на территориях с высоким спросом на экосистемную услугу «Охлаждающий эффект» следует создавать, ревитализировать или улучшать объекты водно-зеленой инфраструктуры, с наибольшим охлаждающим эффектом (водные объекты).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колде Я.К. Практикум по теории вероятностей и математической статистике. М.: Высшая школа, 1991. 157 с.
2. Теория статистики: учебник. Под ред. Г.Л. Громыко. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Инфра, 2005. 476 с.
3. Arnfield A. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology: a Journal of the Royal Meteorological Society*, 2003. V. 23.1 (2003). P. 1–26.
4. Burkart K., Canário P., Breitner, S., Schneider A., Scherber K., Andrade H., Alcoforado M.J., Endlicher W. Interactive short-term effects of equivalent temperature and air pollution on human mortality in Berlin and Lisbon. *Environmental pollution*, 2013. V. 183. P. 54–63.
5. Chang C.R., Li M.H., Chang S.D. A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and urban planning*, 2007. V. 80(4). P. 386–395.
6. Getis A., Ord J. K. The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. *Geographical analysis*, 1992. V. 24. P. 191–206.
7. Haque U., Scott L.M., Hashizume M., Fisher E., Haque R., Yamamoto T., Glass G.E. Modelling malaria treatment practices in Bangladesh using spatial statistics. *Malar Journal*, 2012. V. 11. P. 11–63. DOI: 10.1186/1475-2875-11-63.

8. *Höppe, P.* The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International journal of Biometeorology*, 1999. V. 43(2). P. 71–75.
9. *Kowarik I., Bartz R., Brenck M.* Ökosystemleistungen in der Stadt: Gesundheit Schützen und Lebens-Qualität Erhöhen. Berlin, Leipzig, 2016. 300 p.
10. *Kuttler W., Weber S., Schonnefeld J., Hesselschwerdt A.* Urban/rural atmospheric water vapour pressure differences and urban moisture excess in Krefeld, Germany. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007. V. 27(14). P. 2005–2015.
11. *Larsen L.* Urban climate and adaptation strategies. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2015. V. 13(9). P. 486–492.
12. *Mell I.C., Henneberry J., Hehl-Lange S., Keskin B.* Promoting urban greening: Valuing the development of green infrastructure investments in the urban core of Manchester, UK. *Urban forestry & urban greening*, 2013. V 12.3. P. 296–306.
13. *Oke T. R.* City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, 1973 (1967). V. 7(8). P. 769–779.
14. *Schär C., Jendritzky G.* Hot news from summer 2003. *Nature*, 2004. V. 432 (7017). P. 559–560.
15. *Schär C., Vidale P.L., Lüthi D., Frei C., Häberli C., Liniger M. A., Appenzeller C.* The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 2004. V. 427 (6972). P. 332–336.
16. *Scherber K., Langner M., Endlicher W.* Spatial analysis of hospital admissions for respiratory diseases during summer months in Berlin taking bioclimatic and socio-economic aspects into account. *DIE ERDE–Journal of the Geographical Society of Berlin*, 2013. V. 144 (3–4). P. 217–237.
17. *Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M.* IPCC: Summary for Policymakers. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 28 p.
18. *Streutker D.R.* Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. *Remote Sensing of Environment*, 2003. V. 85(3). P. 282–289.

## REFERENCES

1. *Arnfield A.* Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology: a Journal of the Royal Meteorological Society*, 2003. V. 23.1 (2003). P. 1–26.
2. *Burkart K., Canário P., Breitner, S., Schneider A., Scherber K., Andrade H., Alcoforado M.J., Endlicher W.* Interactive short-term effects of equivalent temperature and air pollution on human mortality in Berlin and Lisbon. *Environmental pollution*, 2013. V. 183. P. 54–63.
3. *Chang C.R., Li M.H., Chang S.D.* A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and urban planning*, 2007. V. 80(4). P. 386–395.
4. *Getis A., Ord J. K.* The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. *Geographical analysis*, 1992. V. 24. P. 191–206.
5. *Haque U., Scott L.M., Hashizume M., Fisher E., Haque R., Yamamoto T., Glass G.E.* Modelling malaria treatment practices in Bangladesh using spatial statistics. *Malar Journal*, 2012. V. 11. P. 11–63. DOI: 10.1186/1475-2875-11-63.



6. *Höppe P.* The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International journal of Biometeorology*, 1999. V. 43(2). P. 71–75.
7. *Kolde Ya. K.* Training materials on the theory of probability and mathematical statistics. Moscow: Vysshaja shkola, 1991. 157 p. (in Russian).
8. *Kowarik I., Bartz R., Brenck M.* Ökosystemleistungen in der Stadt: Gesundheit Schützen und Lebens-Qualität Erhöhen. Berlin, Leipzig, 2016. 300 p.
9. *Kuttler W., Weber S., Schonfeld J., Hesselschwerdt A.* Urban/rural atmospheric water vapour pressure differences and urban moisture excess in Krefeld, Germany. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*. 2007. V. 27(14). P. 2005–2015.
10. *Larsen L.* Urban climate and adaptation strategies. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2015. V. 13(9). P. 486–492.
11. *Mell I.C., Henneberry J., Hehl-Lange S., Keskin B.* Promoting urban greening: Valuing the development of green infrastructure investments in the urban core of Manchester, UK. *Urban forestry & urban greening*, 2013. V 12.3. P. 296–306.
12. *Oke T. R.* City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, 1973 (1967). V. 7(8). P. 769–779.
13. *Schär C., Jendritzky G.* Hot news from summer 2003. *Nature*, 2004. V. 432(7017). P. 559–560.
14. *Schär C., Vidale P.L., Lüthi D., Frei C., Häberli C., Liniger M.A., Appenzeller C.* The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 2004. V. 427 (6972). P. 332–336.
15. *Scherber K., Langner M., Endlicher W.* Spatial analysis of hospital admissions for respiratory diseases during summer months in Berlin taking bioclimatic and socio-economic aspects into account. *DIE ERDE—Journal of the Geographical Society of Berlin*, 2013. V. 144 (3–4). P. 217–237.
16. *Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M.* IPCC: Summary for Policymakers. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 28 p.
17. *Streutker D.R.* Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. *Remote Sensing of Environment*, 2003. V. 85(3). P. 282–289.
18. *Theory of statistics: textbook / ed. Gromyko G.L.* 2nd edition, rev. M.: Infra, 2005. 476 p. (in Russian).

УДК: 528.94

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-210-220

Г.С. Титов<sup>1</sup>, А.И. Прасолова<sup>2</sup>, П.Е. Каргашин<sup>3</sup>

## ВЕБ-КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РЕСУРСОВ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ЯКУТИИ

### АННОТАЦИЯ

Развитие возобновляемых источников энергии экономически и экологически оправдано на территориях децентрализованного энергоснабжения, так как позволяет заменить дизельную генерацию электроэнергии. Якутия, 64 % территории которой находится в зоне децентрализованного энергоснабжения, обладает высоким потенциалом для развития солнечной энергетики. При региональной инвентаризации больших объёмов многовременных данных о солнечных ресурсах полезны характерные особенности веб-картографирования – интерактивность, мультимасштабность, общедоступность. Для Якутии выполняется веб-картографирование суммарной солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность, с учётом облачности в день на квадратный метр. Этот показатель позволяет охарактеризовать потенциал ресурсов солнечной энергии на территории. Источником исходных данных является архив Surface meteorology and Solar Energy проекта NASA Prediction of Worldwide Energy Resource – SSE NASA POWER. Он содержит ежемесячные и среднегодовые глобальные сетки за каждый год с 1984 по 2018. Данные картографируются по узлам регулярной сетки, по муниципальным районам и по бассейнам рек. Пользователь может в интерактивном режиме задавать временной период с точностью до месяца и территориальное деление для составления карты. Всего созданное картографическое веб-приложение позволяет создать порядка 50 000 веб-карт по количеству вариантов запросов, доступных пользователю. Большой объём данных для веб-картографирования требует создания информационной системы для динамической поставки данных по запросам пользователей. Для эффективной динамической агрегации данных по различным территориальным единицам применяется оригинальный алгоритм предварительной обработки. Быстрота визуализации больших объёмов пространственных данных в браузере пользователя решается использованием картографической библиотеки DeckGL. Информационная система формируется на основе PostgreSQL и Flask. Применение веб-картографирования целесообразно для инвентаризации ресурсов солнечной энергии на региональном уровне. Оно позволяет углубить аналитическое содержание картографического произведения путём предоставления пользователю интерактивных инструментов работы с картой. Отличия в проектировании картографических веб-приложений по сравнению с обычными картами проявляются в подготовке исходных данных для картографирования.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** веб-картографирование, ресурсы солнечной энергии, Якутия.

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: [gberman.s.titov@gmail.com](mailto:gberman.s.titov@gmail.com)

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: [prasolova.geo@yandex.ru](mailto:prasolova.geo@yandex.ru)

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: [p.e.kargashin@mail.ru](mailto:p.e.kargashin@mail.ru)

German S. Titov<sup>1</sup>, Anna I. Prasolova<sup>2</sup>, Pavel E. Kargashin<sup>3</sup>

## WEB-MAPPING OF SOLAR ENERGY POTENTIAL IN YAKUTIA

### ABSTRACT

It is cost effective and environmentally rational to develop renewable energy sources in the territories of decentralized energy supply, since it allows replacing diesel power generation. Yakutia has a high potential for the development of solar energy and 64% of its area is in the zone of decentralized energy supply. The features of web mapping – interactivity, multiscale and availability — are useful for assessment of big multi-temporal data on solar resources at the regional scale.

Web mapping shows one parameter for Yakutia – all sky insolation incident on a horizontal surface per day per square meter. The parameter is used to assess the potential of solar energy resources in the territory. Initial data comes from the Surface meteorology and Solar Energy archive of the NASA Prediction of Worldwide Energy Resource – SSE NASA POWER project. It includes monthly and annual average global grids for each year from 1984 to 2018. The web application allows users to map the data by grid points, by administrative units and by watersheds. Users can interactively set a period with an accuracy of a month and a territorial division for drawing up a map. The web-based mapping application allows users to create about 50,000 web maps in total. The number based on query combinations available to the user.

A large amount of data used for web mapping requires the development of an information system for the dynamic delivery of data at the user’s request. Data preprocessing algorithm helps efficiently aggregate data “on-the-fly” for various territorial units. The DeckGL cartographic library gives high-performance visualization of big spatial data in the browser. We use PostgreSQL and Flask software to develop the information system.

Web mapping is useful for the assessment of solar energy resources specifically at the regional level. Interactive tools provided by the web-based mapping applications deepen the analytical content of the cartographic work. There are notable changes in the data preparation through the design of web-based mapping applications in comparison with regular maps.

**KEYWORDS:** web mapping, solar energy potential, Yakutia.

### ВВЕДЕНИЕ

Прогнозы ведущих коммерческих, научных и общественных организаций указывают на существенный рост возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в глобальном энергетическом балансе. В краткосрочной перспективе их использование будет целесообразно на территориях децентрализованного энергоснабжения, где ВИЭ могут частично заменить дорогостоящее дизельное топливо [Elistratov et al., 2014, с. 29–30; Remap..., 2017, с. 22–25]. Высоким потенциалом использования ВИЭ обладают северные и дальневосточные территории. По оценкам некоторых исследователей, в Якутии уже в 2013 году солнечная энергетика стала дешевле дизельной [Гречухина, 2016, с. 154–155].

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: [gberman.s.titov@gmail.com](mailto:gberman.s.titov@gmail.com)

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: [prasolova.geo@yandex.ru](mailto:prasolova.geo@yandex.ru)

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: [p.e.kargashin@mail.ru](mailto:p.e.kargashin@mail.ru)

В зоне децентрализованного энергоснабжения, которая составляет 64 % территории Якутии, проживает 15 % населения республики. Предпосылками развития солнечной энергетики в Якутии являются 1) устойчивая антициклональная деятельность и континентальность климата, обеспечивающие высокую продолжительность солнечного сияния в году и низкое влагосодержание атмосферы, которые увеличивают поступление энергии солнечного излучения на поверхность; 2) труднодоступность территорий, порождающая проблему транспортировки топлива для автономных энергогенераторов; 3) устаревание используемого электрогенерирующего оборудования, повышающее риск аварий и снижающее эффективность производства энергии; 4) нецелесообразность расширения зоны централизованного энергоснабжения; 5) необходимость диверсификации энергоснабжения для обеспечения энергетической безопасности; 5) планы по снижению выбросов углекислого газа.

Понимание объёмов доступных ресурсов обеспечивает информированное принятие решений, стимулирует инвестиционную активность, является драйвером технологического развития, увеличивает доверие населения к возобновляемой энергетике. Соответственно растёт потребность в количественной оценке ресурсов солнечной энергии. Инвентаризационное картографирование является базовым этапом такой оценки.

Возможности геоинформационного картографирования в настоящий момент расширяются за счет веб-технологий. Формируется направление веб-картографирования, особенностями которого являются интерактивность, мультимасштабность и общедоступность картографических произведений. Веб-картографирование может активно использоваться для оценки потенциала солнечной энергии [Титов, Прасолова, 2019; Dean et al., 2009, с. 1–2]. При этом сложности обобщения практического опыта создания картографических веб-приложений [Манёров и др., 2020, с. 230–231] следует связывать с динамичным развитием веб-технологий.

В настоящее время картографирование ресурсов возобновляемых источников энергии, в том числе с использованием веб-технологий, проводится на глобальном, макрорегиональном уровнях для решения научных задач и на локальном – в прикладных исследованиях. Однако в географических исследованиях значимым, наряду с вышеперечисленными, является региональный уровень [Каргашин и др., 2018, с. 262–264]. В то же время он часто не обеспечен картографическим материалом по возобновляемым источникам энергии. Ставится задача разработки картографического произведения, учитывающего специфику региональных исследований ресурсов солнечной энергии путём привлечения веб-технологий для картографирования.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Показателем, который позволяет охарактеризовать ресурсы солнечной энергии, доступные на конкретной территории, и их потенциал, является суммарная солнечная радиация, приходящая на горизонтальную поверхность с учётом облачности в день на квадратный метр [Попель и др., 2010, с. 33–34]. Для создаваемого картографического решения были использованы значения этого показателя за период с 1984 по 2018 год на территорию Якутии.

Источником этих данных служит архив Surface meteorology and Solar Energy проекта NASA Prediction of Worldwide Energy Resource – SSE NASA POWER. Он содержит ежемесячные и среднегодовые данные за каждый год с 1984 по 2018. Эти данные покрывают территорию всего земного шара сеткой с пространственным разрешением  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ , рассчитанной по результатам спутниковых измерений. Достоверность данных NASA SSE на территорию России приемлема для инженерных расчетов эффективности использования солнечных установок [Попель и др., 2010, с. 32–

33]. Источником данных о границах муниципальных районов является Публичная кадастровая карта Росреестра. Границы бассейнов рек построены на основе данных цифровой модели рельефа GMTED2010 и векторной гидрографической сети цифровой географической основы ВСЕГЕИ по методике, описанной А.Л. Энтиным, Т.Е. Самсоновым, И.К. Лурье [2019] (Рис. 1).

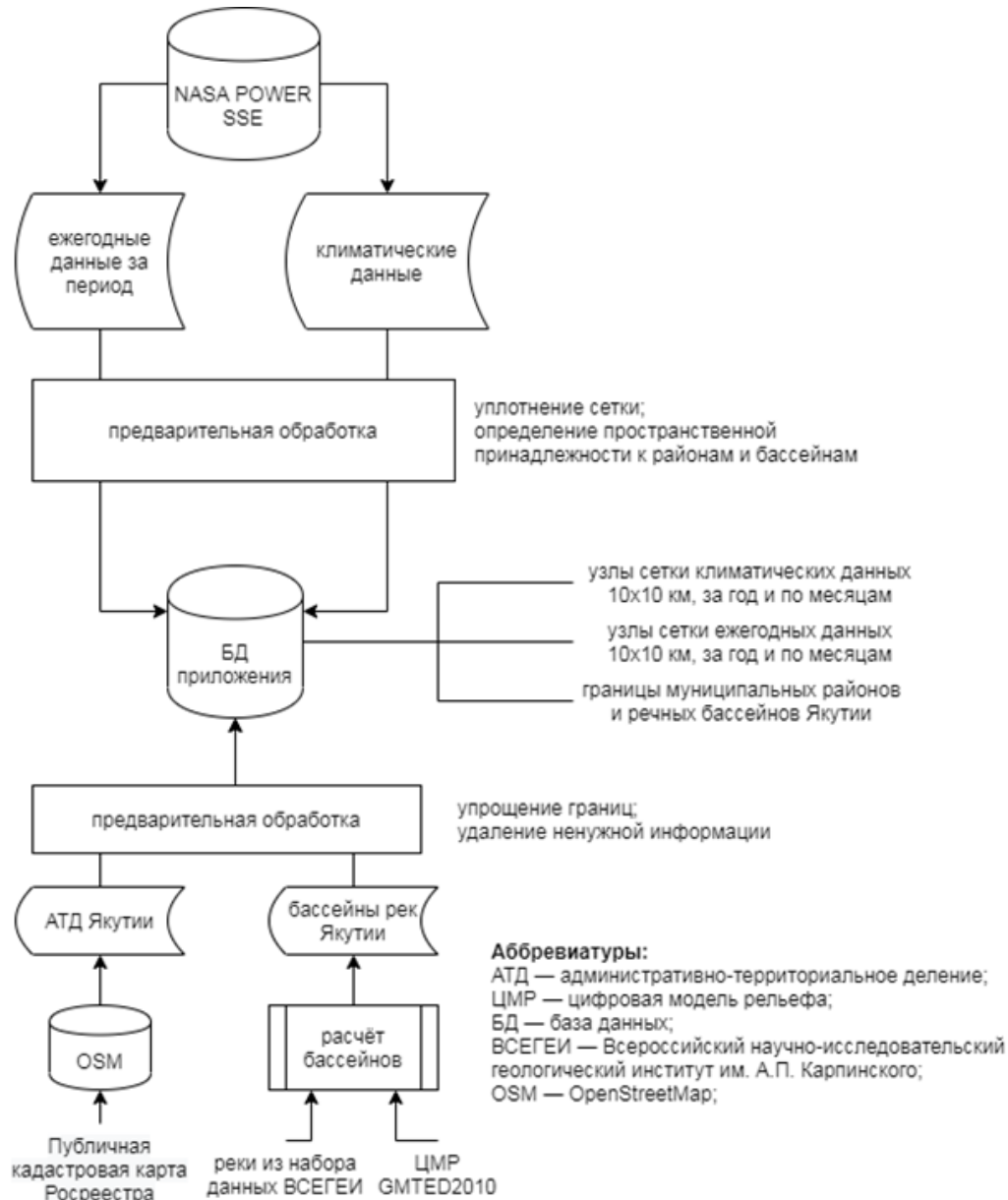


Рис. 1. Наполнение базы данных

Fig. 1. Filling of the database

Ключевой задачей предварительной обработки является обеспечение возможности эффективной динамической агрегации данных. Основными этапами обработки являются «уплотнение» сетки и определение принадлежности узлов сетки муниципальным районам и бассейнам рек<sup>1</sup> (Рис. 2). По «плотной» сетке возможна быстрая агрегация данных на

<sup>1</sup> Программный код предварительной обработке данных доступен по ссылке [https:// gist.github.com/gtitov/d430f96c537d93ddd6f8cd697cb2376c](https://gist.github.com/gtitov/d430f96c537d93ddd6f8cd697cb2376c).

сетку с более крупными ячейками. Эта агрегация выполняется в браузере. По «плотной» сетке со сведениями о принадлежности узлов к району и бассейну возможна быстрая агрегация данных по этим территориальным единицам. Быстрота обеспечивается тем, что для агрегации после предварительной обработки могут применяться стандартные запросы к базе данных, а не пространственные, которые работают на порядок медленнее. «Плотная» сетка со значениями о поступлении солнечной радиации и известной принадлежностью узлов к территориальным выделам является основным содержательным элементом базы данных.



Рис. 2. Схема предварительной обработки данных

Fig. 2. Flowchart of data preprocessing

Данные, используемые для построения карты, присутствуют на карте не статически, а динамически изменяются в зависимости от действий пользователя. Поэтому для обращения к базе создаётся информационная система [Яблоков, Тукунов, 2016, с. 13], фактически, программируемый интерфейс для работы с базой данных. Информационная система поддерживает все запросы, необходимые для составления карт в веб-интерфейсе приложения (Табл. 1).

Табл. 1. Наборы данных, доступные через информационную систему

Table 1. Datasets available in information system

	<b>регулярная сетка</b>	<b>районы</b>	<b>бассейны</b>
<b>климатические данные</b>	климатические данные по регулярной сетке	климатические данные по районам	климатические данные по бассейнам
<b>отдельный год</b>	данные за отдельный год по регулярной сетке	данные за отдельный год по районам	данные за отдельный год по бассейнам
<b>период в несколько лет</b>	данные за период в несколько лет по регулярной сетке	данные за период в несколько лет по районам	данные за период в несколько лет по бассейнам

Веб-интерфейс (Рис. 3) включает веб-карту (1) и легенду к ней (2), график суммарных значений инсоляции по месяцам (3), панель запросов к данным по времени (4), панель параметров визуализации (5). Панель запросов к данным по времени даёт возможность запрашивать климатические данные, данные за отдельный год, данные за период в несколько лет. График суммарных значений инсоляции позволяет внутри заданного периода выбирать значения за отдельный месяц. Панель параметров визуализации содержит варианты границ для отображения явления, переключатель для перехода в трёхмерный режим, бегунок для задания нижнего процента показываемых данных (например, при значении нижнего процента 90 будет показано только 10 % ячеек с наиболее высокими значениями).

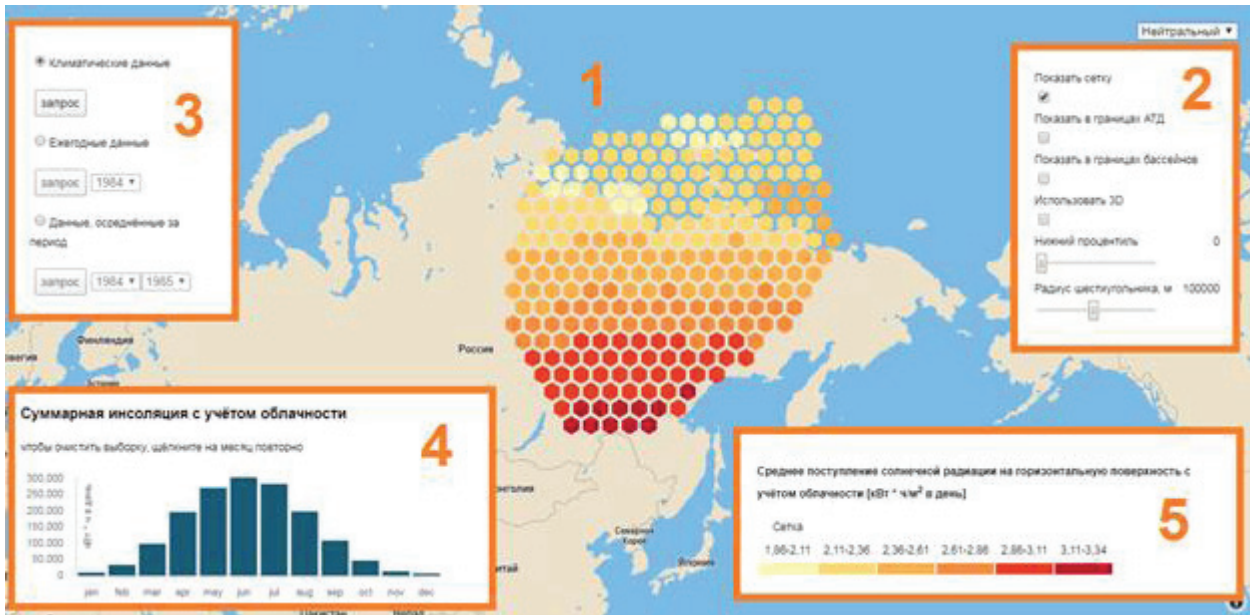


Рис. 3. Элементы веб-интерфейса

Fig. 3. Elements of the web interface

Предварительная обработка данных выполнялась в среде программирования RStudio. Информационная система создана с использованием сервера баз данных PostgreSQL, Python-модуля Flask. JavaScript-библиотека React применена для управления веб-интерфейсом и DeckGL – для картографирования. При создании веб-приложения используется только открытое и свободное программное обеспечение.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Картографическое веб-приложение является аналитическим и инвентаризационным. Оно подробно рассматривает один тематических сюжет – поступление суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность на кв. м с учётом облачности в сутки на территорию Якутии<sup>1</sup>.

Картографическое веб-приложение предоставляет на выбор три варианта пространственных единиц картографирования и 631 вариант по временному параметру (климатические данные + отдельные года + варианты сочетаний начального и конечного годов временных интервалов), то есть картографическое веб-приложение предоставляет 1 893 варианта по временному и пространственному параметрам. Так как при заданных временных и пространственных параметрах можно построить либо карту среднегодовых значений, либо значений за конкретный месяц, то число карт уже составляет 24609. Учитывая, что радиус ячейки регулярной сетки имеет 4 варианта значений в зависимости от масштаба карты, число карт, которые можно получить в веб-приложении, достигает 49218.

Такой набор карт обеспечивает исчерпывающую информацию о ресурсах солнечной энергии Якутии. Эта информация является основой разработки и эксплуатации объектов солнечной энергетики [Попель и др., 2010, с. 9]. Она применима на этапах обоснования инвестиций и проектирования энергоустановок, при оценке эффективности и безопасности их эксплуатации.

<sup>1</sup> Картографическое веб-приложение доступно по ссылке <http://autolab.geogr.msu.ru/solarsaha/>

Поступление суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность на кв. м с учётом облачности в сутки ожидаемо демонстрирует широтную зональность и рост показателя к летним месяцам и падение к зимним. Однако, обращаясь к значениям показателя за «солнечные» месяцы (с апреля по июль), когда в регион приходит наибольшее количество киловатт-часов солнечной радиации на квадратный метр в день, видим, что широтная зональность нарушается (Рис. 4). Эта ситуация подтверждается данными ГГО имени А.И. Воейкова и объясняется длительным световым днём в северных широтах в летний период, прозрачностью воздуха и высокими значениями рассеянной солнечной радиации [Попель и др., 2010, с. 38]. Такие особенности пространственного распределения показателя доказывают полезность предоставления пользователю удобных инструментов работы с временной вариацией явления. Эти инструменты предоставляет веб-картографирование.

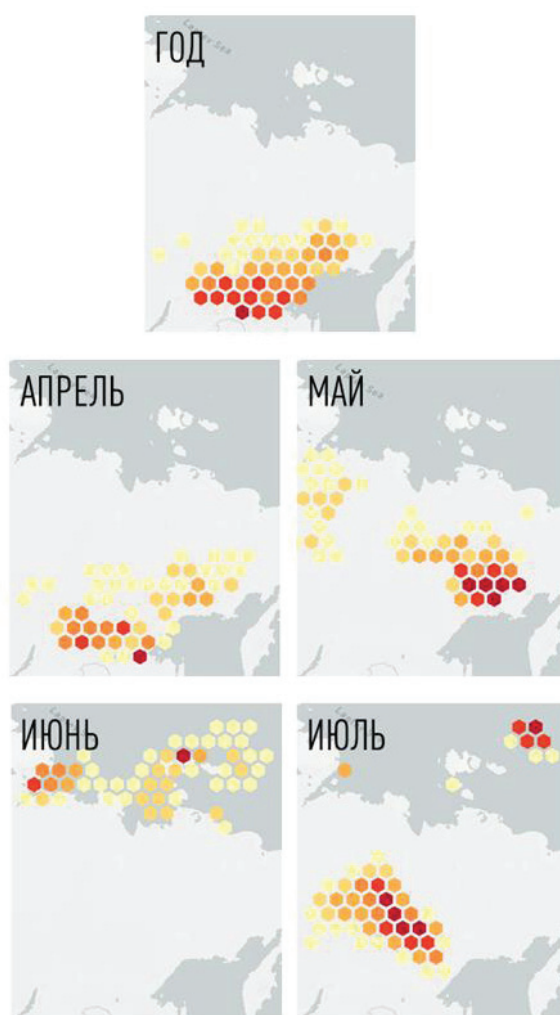


Рис. 4. 20 % ячеек с наибольшими значениями поступления солнечной радиации за период с 2008 по 2018 (темнее цвет — выше значение)

Fig. 4. 20 % of hexagons with highest values of insolation averaged over the period from 2008 to 2018 (the darker the color — the higher the value)

Выбор территориальной единицы картографирования влияет на пространственное распределение показателя (Рис. 5). Картографирование поступления солнечной радиации по природным территориальным выделам, например бассейнам рек, необходимо для



сопоставления потенциала ресурсов ВИЭ с природными свойствами территории. По административным – для увязки с социально-экономическими характеристиками. Прогнозировать воздействие от строительства и эксплуатации объектов возобновляемой энергетики корректно в границах природных выделов, а оценивать экономическую целесообразность — в административных границах. Интерактивность картографического веб-приложения даёт возможность показывать распределение показателя в границах разных территориальных выделов в рамках одного картографического произведения, что позволяет пользователю получить адекватное представление о пространственных особенностях явления.



Рис. 5. Климатические значения поступления солнечной радиации по муниципальным районам (слева) и бассейнам рек (справа)

Fig. 5. Climatic values of insolation by administrative units (left) and watersheds (right)

Основными компонентами картографического веб-приложения являются информационная система и веб-интерфейс (Рис. 6). Информационная система может использоваться независимо для получения исходных данных, которые применяются в веб-приложении для построения карт. Такой подход не только следует принципам открытости в науке, но и повышает степень доверия к картографическому произведению, так как пользователь может изучить и использовать данные самостоятельно [McGrath, 1999].

Предобработка данных решает вопрос быстроты их агрегации. Быстрота при визуализации больших объёмов пространственных данных в браузере пользователя решается использованием картографической библиотеки DeckGL, использующей технологию WebGL для высокопроизводительной отрисовки объектов на карте.

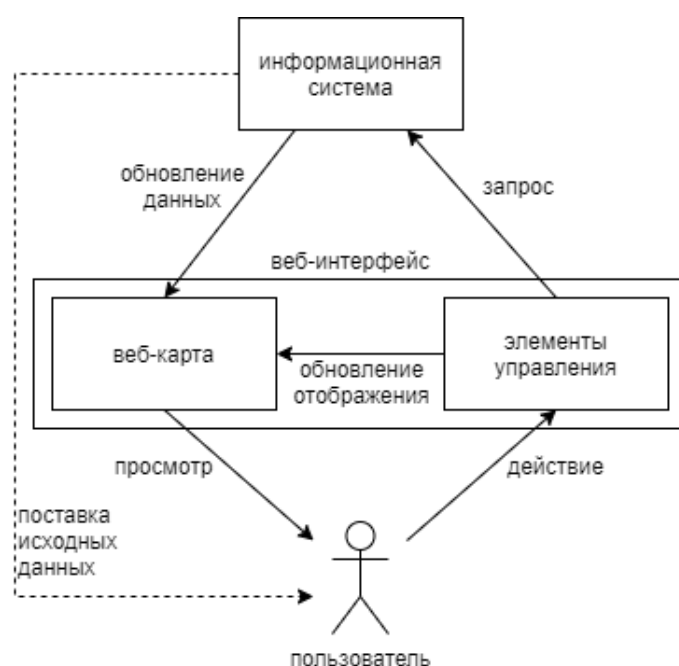


Рис. 6. Взаимодействие компонентов картографического веб-приложения

Fig. 6. Interconnection of web map application components

## ВЫВОДЫ

Характерные особенности веб-картографирования – интерактивность, мультимасштабность, общедоступность – важны при региональной инвентаризации ресурсов солнечной энергии. Общедоступность расширяет круг пользователей и способствует информированию населения о потенциале ВИЭ. Использование мультимасштабности пока затруднено недостатком исходных данных. Интерактивность картографического веб-приложения предоставляет пользователям возможность работы с большими объемами данных о ресурсах солнечной энергии в понятном (user-friendly) интерфейсе, для использования которого не требуется специализированного программного обеспечения и профессиональных навыков.

Региональное картографическое веб-приложение о ресурсах солнечной энергии по сравнению с глобальными использует меньший объем исходной информации. Это позволяет расширить спектр функций взаимодействия пользователя с картографическим содержанием без ущерба быстрдействию. Высокая интерактивность веб-карты увеличивает число картографических образов, которые могут сформироваться у пользователя [Берлянт, 1986, с. 62–65, 87]. За счёт этого картографическая информативность при региональном веб-картографировании солнечных ресурсов может быть больше, чем при глобальном.

Веб-картографирование углубляет аналитическое содержание произведения, предоставляя возможность отображения явления в его пространственной (по разным территориальным выделам) и временной (за разные периоды) вариации. Возможность сопоставления объемов энергетических ресурсов с природными и социально-экономическими характеристиками территории, возможность отслеживания динамики доступного объема ресурсов ВИЭ повышают надёжность оценки территории с точки зрения её перспективности для возобновляемой энергетики.

При проектировании картографических веб-приложений модифицируются традиционные подходы к проектированию картографических произведений. Существенное от-

личие обнаруживается на этапе подготовки данных для картографирования. Карты в веб-приложении не статичны, поэтому создаётся информационная система, которая возвращает необходимые для составления карты данные в зависимости от действий пользователя. При проектировании должны учитываться свойства интерактивности и мультимасштабности веб-карт.

Перспективы развития исследования можно связать с масштабированием приложения, например, на всю территорию России, и с обеспечением интероперабельности. Расширение потребует переработки технической стороны приложения для обеспечения производительной работы с увеличивающимся объёмом данных. Интероперабельность позволит приложению обмениваться данными со внешними ресурсами. Это свойство обеспечивается использованием стандартов обмена картографической информацией в Интернете, которые разрабатываются, например, Open Geospatial Consortium (OGC).

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного задания № 121051400061–9.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This study was conducted under the state project № 121051400061–9.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Берлянт А.М.* Образ пространства: карта и информация. М.: Мысль, 1986. 240 с.
2. *Гречухина И.А.* Экономические механизмы развития возобновляемой энергетики. Дис. ... канд. экон. н. М., 2016. 194 с.
3. *Каргашин П.Е., Новаковский Б.А., Прасолова А.И.* Разработка регионального атласа ресурсов возобновляемой энергетики Крымского полуострова. Материалы международной конференции «ИнтерКарто/ИнтерГИС», 2018. Т. 24. Ч. 1. С. 262–272. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-262-272
4. *Манёров М.Р., Сюсюмов А.А., Тюрин С.В.* Методические принципы разработки интерактивных веб-карт на примере объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО «Геодезическая дуга Струве». ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Издательство Московского университета, 2020. Т. 26. Ч. 4. С. 228–241. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-4-26-228-241.
5. *Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Киселева С.В., Терехова Е.Н.* Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. Москва: Объединённый институт высоких температур РАН, 2010.
6. *Титов Г.С., Прасолова А.И.* Возможности веб-картографирования для исследования солнечных ресурсов. Сборник III Всероссийской научно-практической конференции «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Наука и образование», 2019. С. 273–275.
7. *Энтин А.Л., Самсонов Т.Е., Лурье И.К.* Согласование цифровых моделей рельефа и гидрографической сети для определения границ бассейнов. Геодезия и картография, 2019. № 1. С. 94–101. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-943-1-94-101.
8. *Яблоков В.М., Тикунов В.С.* Атласные информационные системы для устойчивого развития территорий. Материалы Международной конференции «ИнтерКарто/ИнтерГИС», 2016. Т. 22. Ч. 1. С. 13–33. DOI: 10.24057/2414-9179-2016-1-22-13-33.
9. *Dean J., Kandt A., Burman K., Lisell L., Helm C.* Analysis of Web-Based Solar Photovoltaic Mapping Tools. ASME 2009 3rd International Conference on Energy

- Sustainability, Volume 1. San Francisco, California, USA: ASMEDC, 2009. P. 85–96. DOI: 10.1115/ES2009-90461.
10. *Elistratov V., Knezevic M., Denisov R., Konishchev M.* Problems of constructing wind-diesel power plants in harsh climatic conditions. *Journal of Applied Engineering Science*, 2014. T. 12. № 1. P. 29–36. DOI: 10.5937/jaes12-5632.
  11. *McGranaghan M.* The Web, cartography and trust. *Cartographic Perspectives*, 1999. № 32. P. 3–5. DOI: 10.14714/CP32.624.
  12. *REmap 2030 Renewable Energy Prospects for Russian Federation.* Abu Dhabi: IRENA, 2017. 92 p.

## REFERENCES

1. *Berliant A.M.* An image of space: map and information. Moscow: Mysl', 1986. 240 p. (in Russian).
2. *Dean J., Kandt A., Burman K., Lisell L., Helm C.* Analysis of Web-Based Solar Photovoltaic Mapping Tools. ASME 2009 3rd International Conference on Energy Sustainability, Volume 1. San Francisco, California, USA: ASMEDC, 2009. P. 85–96. DOI: 10.1115/ES2009-90461.
3. *Elistratov V., Knezevic M., Denisov R., Konishchev M.* Problems of constructing wind-diesel power plants in harsh climatic conditions. *Journal of Applied Engineering Science*, 2014. T. 12. No 1. P. 29–36. DOI: 10.5937/jaes12-5632.
4. *Entin A.L., Samsonov T.E., Lurie I.K.* Harmonization of digital elevation models and hydrographic network for basin delineation. *Geodesy and cartography = Geodezia i Kartografia*, 2019. No 943(1). P. 94–101 (in Russian). DOI: 10.22389/0016-7126-2019-943-1-94-101.
5. *Grechukhina I.A.* Economic mechanisms for the development of renewable energy. PhD dissertation. Moscow, 2016. 194 p. (in Russian).
6. *Kargashin P.E., Novakovskiy B.A., Prasolova A.I.* Development of a regional renewable energy atlas of the Crimean Peninsula. *Proceedings of the International conference «InterCarto. InterGIS»*, 2018. V. 24. Part 1, P. 262–272 (in Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-262-272.
7. *Manerov M.R., Syuzumov A.A., Tyurin S.V.* Methodical framework for developing interactive web maps based on the example of Struve Geodetic Arc UNESCO World Heritage Site *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference.* Moscow: Moscow University Press, 2020. V. 26. Part 4. P. 228–241 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2020-4-26-228-241.
8. *McGranaghan M.* The Web, cartography and trust. *Cartographic Perspectives*, 1999. No 32. P. 3–5. DOI: 10.14714/CP32.624.
9. *Popel O.S., Frid S.E., Kolomiets Y.G., Kiseleva S.V., Terekhova E.N.* Atlas of solar energy resources in Russia. Moscow: Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, 2010 (in Russian).
10. *Remap 2030 Renewable Energy Prospects for Russian Federation.* Abu Dhabi: IRENA, 2017. 92 p.
11. *Titov G.S., Prasolova A.I.* Possibilities of web mapping for the study of solar resources. *Proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference “Geodesy, Cartography, Geoinformatics and Cadastres. Science and education”*, 2019. P. 273–275 (in Russian).
12. *Yablokov V.M., Tikunov V.S.* Atlas information systems for sustainable development of territories *Proceedings of the International conference «InterCarto. InterGIS»*, 2016. V. 22. Part 1. P. 13–33 (in Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2016-1-22-13-33.

УДК: 551.589.6

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-221–229

Е.Е. Лемешко<sup>1</sup>

## ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЦИКЛОНОВ НАД ЧЕРНЫМ МОРЕМ ПО ДАННЫМ АТМОСФЕРНЫХ РЕ-АНАЛИЗОВ

### АННОТАЦИЯ

Исследуются особенности развития циклонов, которые могут вызывать генерацию штормовых нагонов в зависимости от траектории движения и параметров циклонов в Азово-Черноморском бассейне. В качестве тестовой ситуации взят экстремальный штормовой нагон в Таганрогском заливе и устье реки Дон 24.09.2014 г. По данным метеорологических наблюдений на постах и данных ре-анализа ERA5 об атмосферном давлении, скорости ветра и относительной завихренности на уровне 850 гПа изучаются особенности движения циклона, вызвавшего экстремальные повышения уровня моря: траектория движения, скорость движения циклона, диаметр, атмосферное давление в его центре, скорость ветра. Выделенные таким образом параметры данного циклона использовались для выделения треков циклонов по данным атмосферных ре-анализов (ERA-Interim и ERA-5)<sup>2</sup> за 2014–2020 гг. над Азово-Черноморским бассейном для исследования пространственно-временной изменчивости траекторий циклонов и её влияния на характеристики уровня моря в прибрежной зоне Крыма и Азовского моря. Предложен метод расчета треков движения циклонов, основанный на анализе относительной завихренности атмосферных полей ре-анализа на уровне 850 гПа. Далее для каждого циклона выделялась характерная область, для которой определялся минимум приземного атмосферного давления и максимум скорости ветра. Затем по координатам центра этой области строился путь (трек) движения циклона для Азово-Черноморского региона. В результате сформулированы критерии выделения циклонов, которые потенциально способны вызвать экстремальные штормовые нагоны, получены оценки пространственных характеристик циклонов и закономерности изменчивости уровня моря в прибрежной зоне Крыма при различных фазах движения циклонов над регионом.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** циклоны, уровень моря, атмосферный ре-анализ, Черное море.

Egor E. Lemeshko<sup>3</sup>

## TRAJECTORIES OF CYCLONE PROPAGATION OVER THE BLACK SEA ACCORDING TO ATMOSPHERIC RE-ANALYSIS DATA

### ABSTRACT

The features of the development of cyclones, which can cause the generation of storm surges, depending on the trajectory and parameters of cyclones in the Azov-Black Sea basin, are

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр "Морской гидрофизический институт РАН", ул. Капитанская, 2, 299011, Севастополь, Российская Федерация, *e-mail*: [e.lemeshko@mhi-ras.ru](mailto:e.lemeshko@mhi-ras.ru)

<sup>2</sup> Copernicus. Электронный ресурс: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=form> (дата обращения 30.04.2021)

<sup>3</sup> Federal State Budget Scientific Institution Federal Research Center "Marine Hydrophysical Institute of RAS", Kapitanskaya Str. 2, 299011, Sevastopol, Russian Federation, *e-mail*: [e.lemeshko@mhi-ras.ru](mailto:e.lemeshko@mhi-ras.ru)

investigated. An extreme storm surge in the Taganrog Bay and the mouth of the Don River on September 24, 2014 was taken as a test situation. Based on the data of meteorological observations at the posts and ERA5 re-analysis data on atmospheric pressure, wind speed and relative vorticity at the level of 850 hPa, the peculiarities of the movement of the cyclone that caused extreme sea level rise are studied: the trajectory of movement, the speed of the cyclone, diameter, atmospheric pressure in its center, wind speed.

The parameters of this cyclone identified in this way were used to identify the tracks of cyclones according to the data of atmospheric re-analyses (ERA-Interim and ERA-5) for 2014–2020 over the Azov-Black Sea basin to study the spatio-temporal variability of cyclone trajectories and its influence on the characteristics of sea level in the coastal zone of the Crimea and the Azov Sea. A method for calculating of the cyclones movement tracks is proposed, based on the analysis of the relative vorticity of the atmospheric fields of re-analysis at the level of 850 hPa. Further, for each cyclone, a characteristic region was identified, for which the minimum surface atmospheric pressure and the maximum wind speed were determined. Then, according to the coordinates of the center of this area, the path (track) of the cyclone movement for the Azov-Black Sea region was calculated.

As a result, criteria for identifying cyclones that are potentially capable of causing extreme storm surges were formulated, estimates of the spatial characteristics of cyclones and patterns of sea level variability in the coastal zone of the Crimea were obtained at different phases of cyclone movement over the region.

**KEYWORDS:** cyclones, sea level, atmospheric re-analysis, Black Sea.

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проводимого исследования обуславливается необходимостью изучения физических закономерностей формирования различных типов интенсивной атмосферной циркуляции над акваторией Азово-Черноморского бассейна для задач диагноза и прогноза динамики приземной атмосферы и ее влияния на процессы в прибрежной зоне моря, а также установление взаимосвязи на межгодовых масштабах частоты сгонно-нагонных явлений в зависимости от повторяемости различных типов синоптических ситуаций.

Влияние климата сказывается на увеличении температуры воздуха, увеличении уровня Мирового океана, изменении количества осадков и влажности рек, на изменении частоты повторяемости типичных синоптических ситуаций над Азово-Черноморским бассейном, в том числе штормовой активности, что связано с межгодовой изменчивостью количества и интенсивности проходящих циклонов. Классификация синоптических ситуаций в условиях климатической изменчивости над восточно-европейским регионом, приводящих к сильным и устойчивым ветрам, представляется необходимой для выяснения связей между аномальными изменениями уровня моря, генерацией штормовых нагонов с конкретными типами атмосферных процессов.

В последнее время развиваются оригинальные подходы для типизации синоптических ситуаций, при которых возможны штормовые нагоны, их районирование и сопоставление с данными измерений уровня моря на постах, оценке интенсивности сгонно-нагонных явлений в уязвимых участках побережья в зависимости от характерных траекторий циклонов [Flaounas *et al.*, 2014; Lemeshko *et al.*, 2018; Rudeva *et al.*, 2014]. Результаты этих исследований затем активно используются для проведения численных экспериментов по моделированию ветрового волнения и сгонно-нагонных явлений, при оценке вероятности экстремальных повышений уровня моря в прибрежной зоне, при прогностических расчетах для проектирования гидротехнических и берегозащитных сооружений [Flaounas *et al.*, 2021; Bromwich *et al.*, 2008; Ulbrich *et al.*, 2009].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При определенных скоростях и направлениях движения атмосферные циклоны становятся эффективными генераторами значительных повышений уровня моря. Проведена оценка интенсивности ветрового волнения и штормовых нагонов в Азовском море в зависимости от траектории движения циклонов. Для задач численного моделирования разработан алгоритм оценки и параметризации характеристик движения циклонов [Flaounas, 2014]. Предложен метод расчета треков движения циклонов, основанный на анализе относительной завихренности атмосферных полей ре-анализа ERA-Interim и ERA-5 на уровне 850 гПа. На каждом временном шаге (использовались данные с шагом в 1 час) идентифицировались центры циклонов, выделенные по максимумам относительной завихренности и окруженные замкнутыми контурами изолиний со значениями не менее  $3 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}$  (рис. 1, 2). Далее для каждого циклона выделялась характерная область, для которой определялся минимум приземного атмосферного давления и максимум скорости ветра. Затем по координатам центра этой области строился путь (трек) движения циклона для региона, охватывающего Азово-Черноморский бассейн.

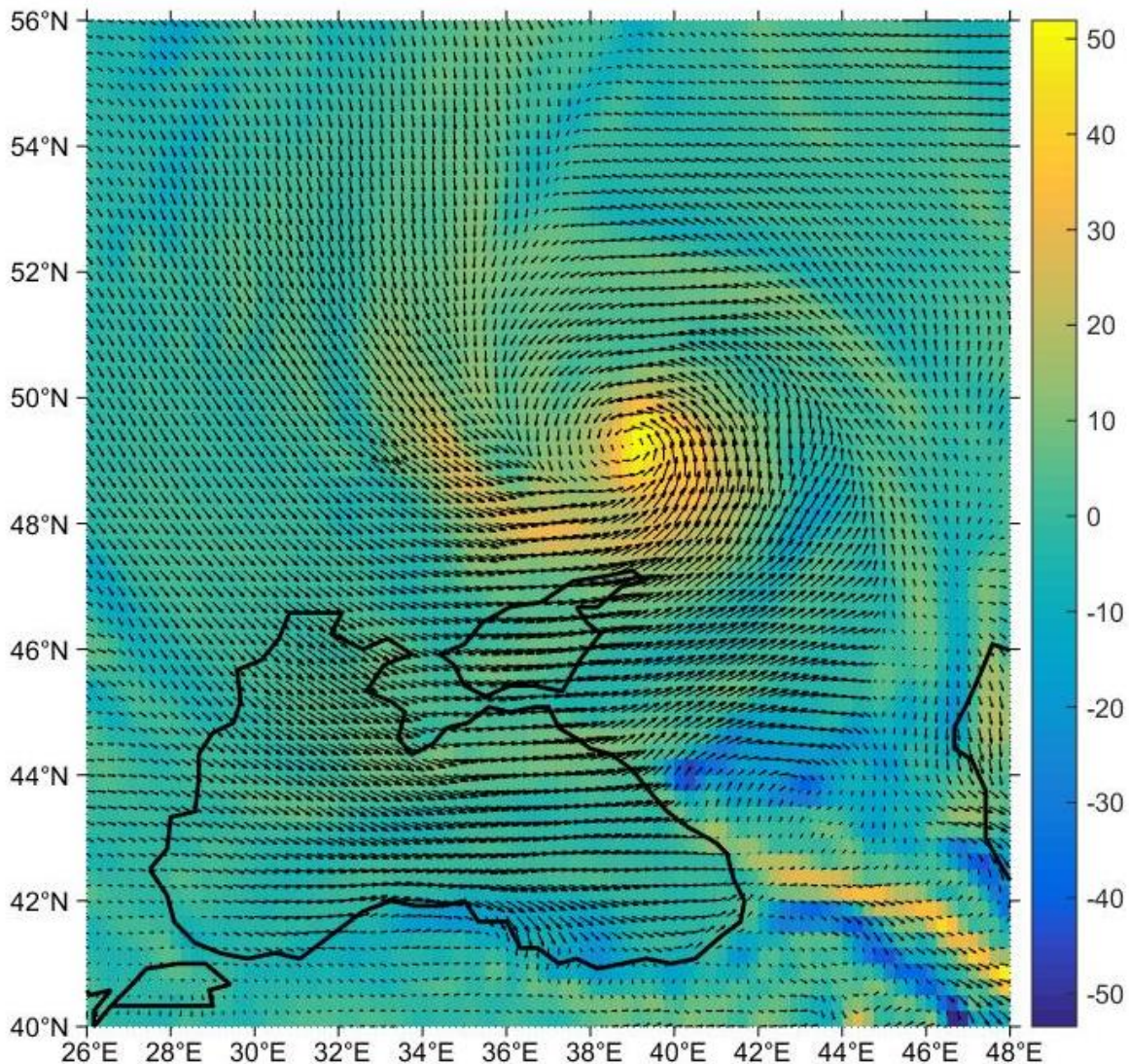


Рис. 1. Относительная завихренность на уровне 850 гПа и ветер на 10м 24.09.2014 в 12 ч.  
 Fig. 1. Relative vorticity at the level of 850 hPa and the wind at 10m on September 24, 2014 at 12h

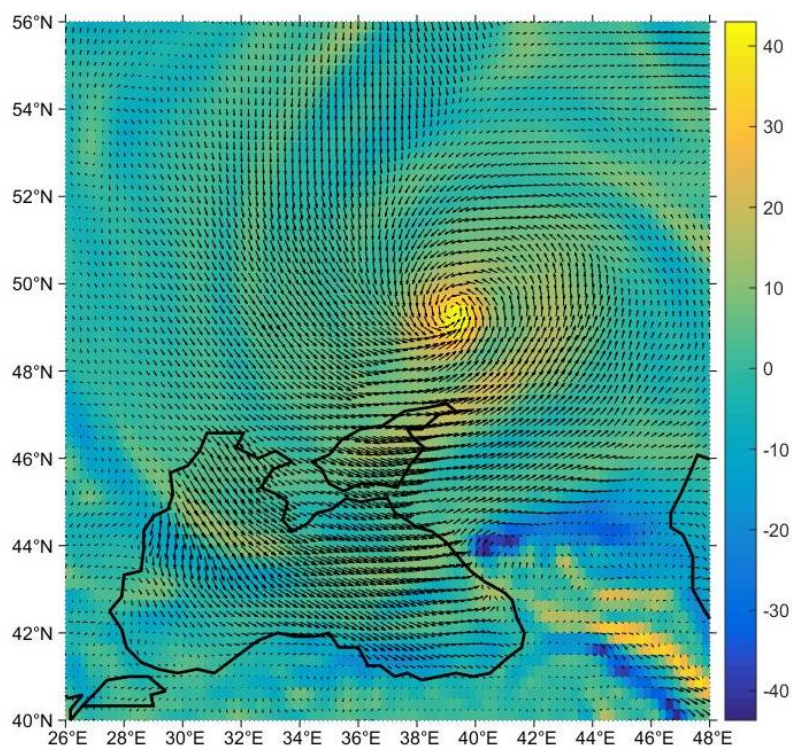


Рис. 2. Относительная завихренность на уровне 850 гПа и ветер на 10м 24.09.2014 в 21 ч.  
 Fig. 2. Relative vorticity at the level of 850 hPa and the wind at 10m on September 24, 2014 at 21h

Приведена относительная завихренность на уровне 850 гПа за период 16-30.09.2014 (рис. 3), завихренность достигала максимальных значений 23–26.09.2014, когда был зарегистрирован экстремальный штормовой нагон в Таганрогском заливе. Для фильтрации «шумовых» циклонических образований применялся критерий – величина завихренности более  $50 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}$  и время жизни циклона более 1 суток.

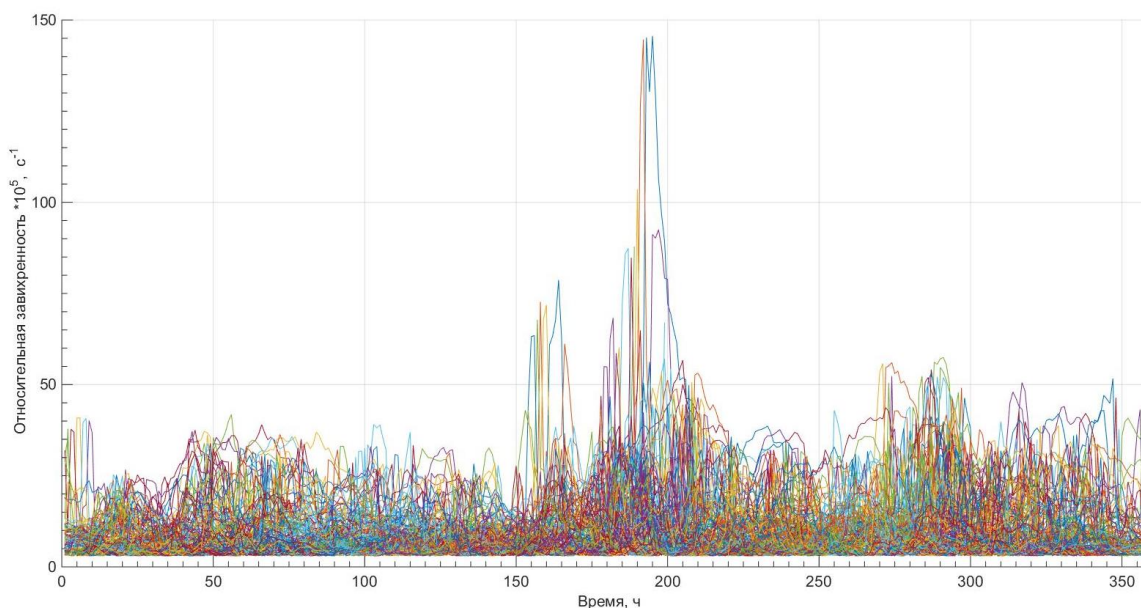


Рис. 3. Относительная завихренность на уровне 850 гПа за период 16–30.09.2014  
 Fig. 3. Relative vorticity at the level of 850 hPa for the 16–30 September, 2014



## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По обозначенному критерию был выделен трек движения циклона, приведшего к экстремальному штормовому нагону 24.09.2014 в Таганрогском заливе и устье Дона, скорость ветра составила 25 м/с, в порывах до 37 м/с, атмосферное давление в центре составило 990 гПа. Центр циклона 23.09.2014 находился над Крымом, траектория движения была направлена на северо-восток (рис. 4), 24.09.2014 циклон приостановил свое движение в течение 12 часов, что привело к усилению штормового нагона. В Таганрогском заливе уровень моря поднялся на 280 см и превысил отметку особо опасного явления 705 см (рис. 5).

За период 2014–2017 гг. были проанализированы поля приземного давления и относительной завихренности на уровне 850 гПа, рассчитаны характеристики циклонов и построены траектории их движения (табл. 1, рис. 6). Результаты систематизированы для задания полей ветра для численного моделирования штормовых нагонов.

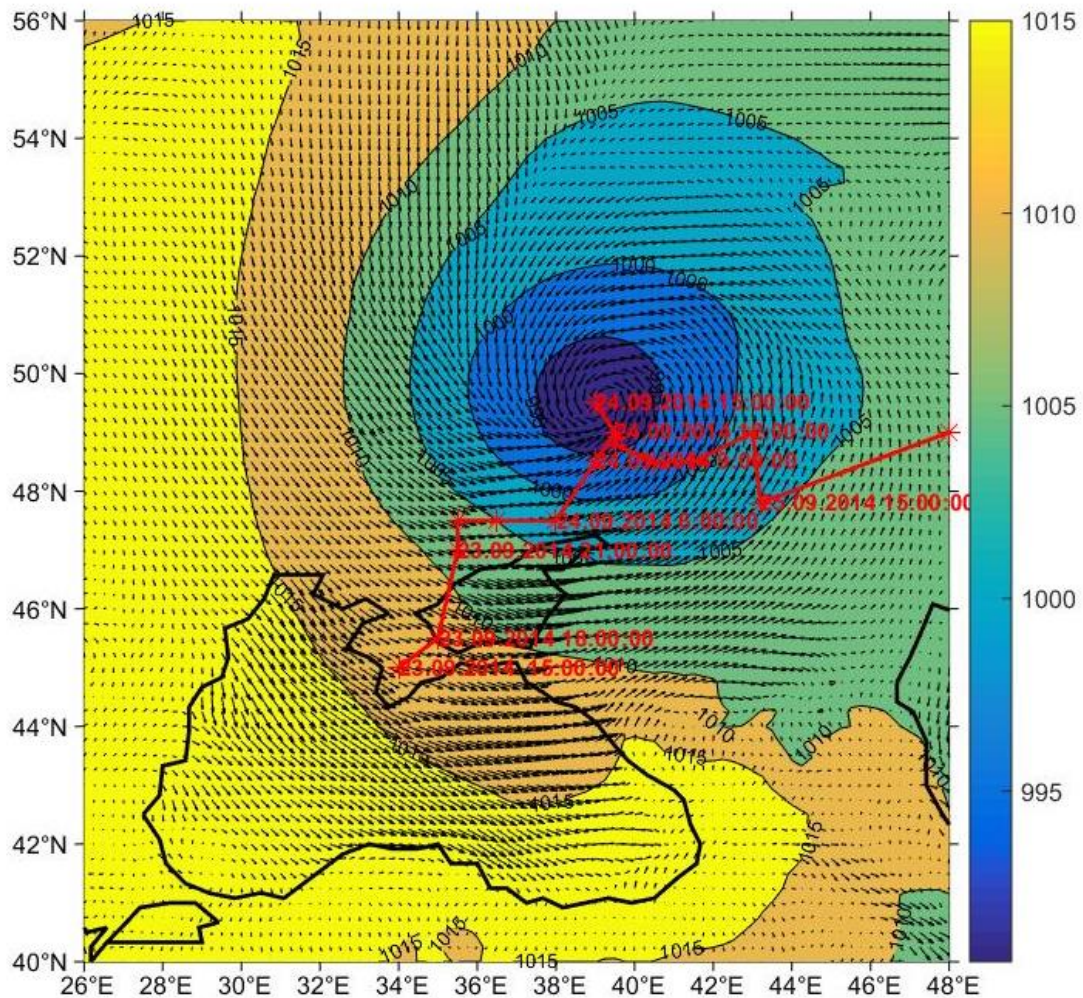


Рис. 4. Трек движения циклона, вызвавшего экстремальный штормовой нагон в Таганрогском заливе и устье Дона за период 23.09.2014–24.09.2014; приземное атмосферное давление (гПа) и скорость ветра

Fig. 4. Track of the cyclone movement that caused an extreme storm surge in the Taganrog Bay and the mouth of the Don for 09/23/2014–09/24/2014; surface atmospheric pressure (hPa) and wind speed

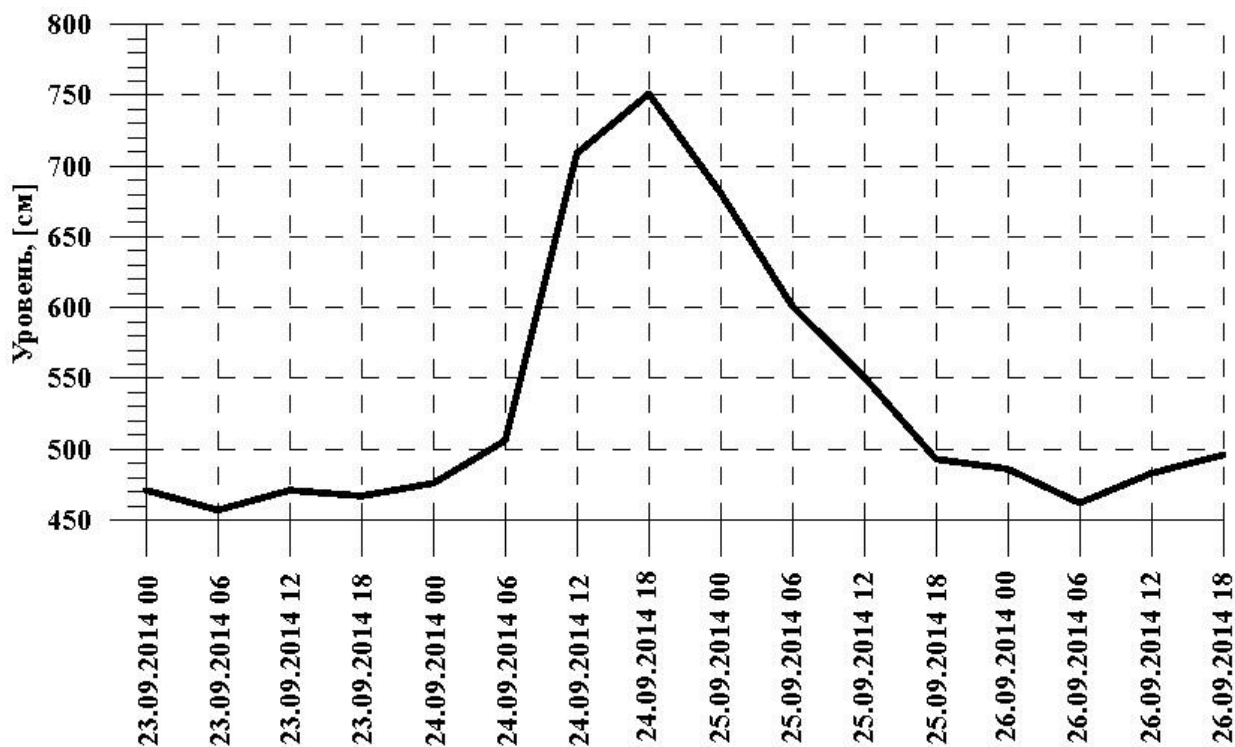


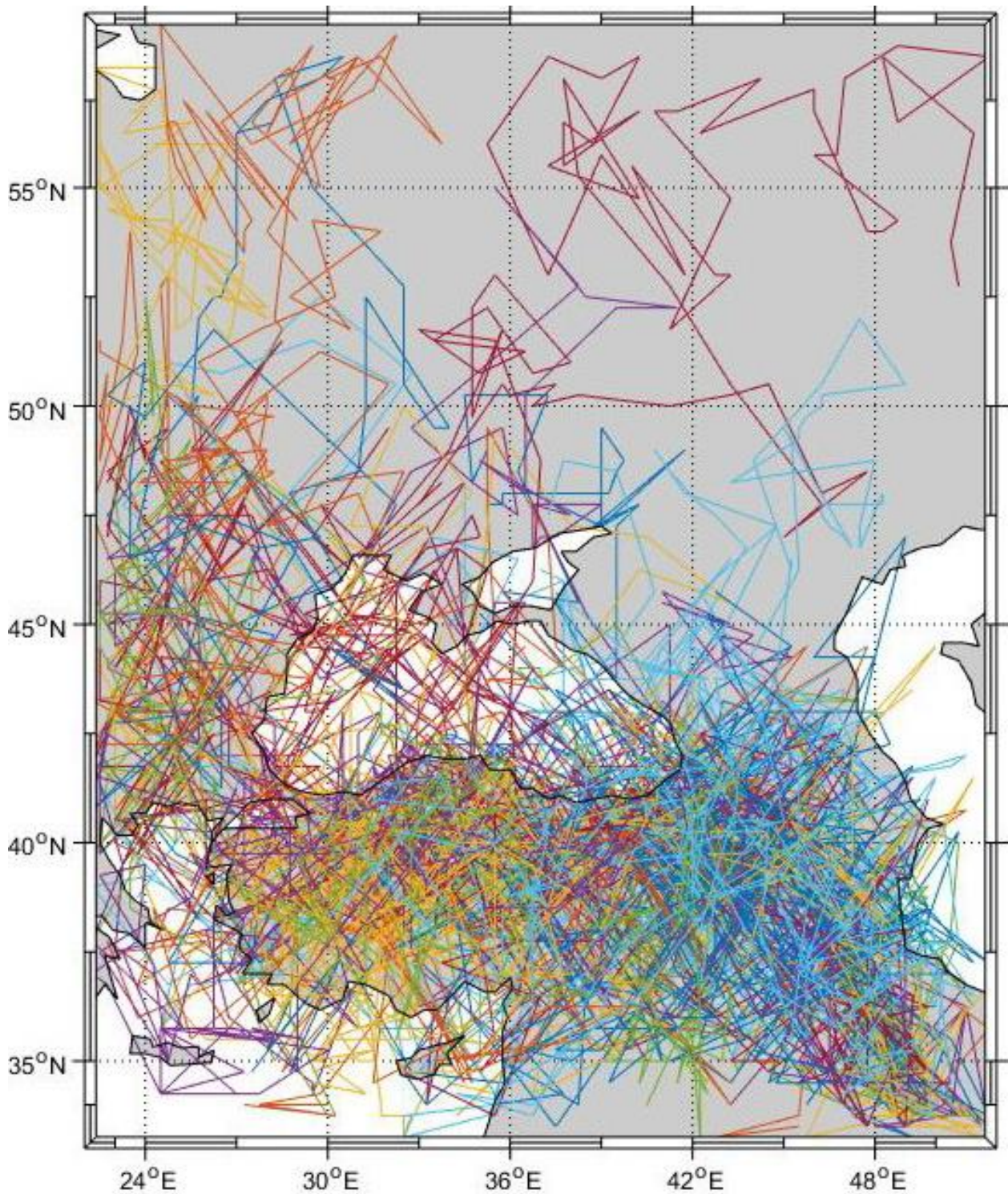
Рис. 5. Повышения уровня моря за период 23.09.2014–26.09.2014 в Таганрогском заливе, пост Таганрог относительно Балтийской системы высот

Fig. 5. Sea level rise for the period 09.23.2014–26.09.2014 in the Taganrog Bay, Taganrog tide-gauge regarding Baltic height system

Табл. 1. Траектории движения центра циклона (T1 □ T5) при радиусе циклона 300 км, скорости перемещения циклона 40 км/ч, перепаде давления между периферией и центром циклона 20 гПа

Table 1. Trajectories of the cyclone center (T1 □ T5) with a cyclone radius of 300 km, a cyclone movement speed of 40 km / h, and a pressure drop between the periphery and the cyclone center of 20 hPa

Тип траектории движения циклона	Начальная широта центра циклона, ° с. ш.	Начальная долгота центра циклона, ° в. д.	Угол наклона траектории, °
T1	46,25	29,25	0
T2	48,25	29,25	0
T3	44,25	29,25	0
T4	48,50	29,25	330
T5	44,25	29,25	30



*Рис. 6. Композитная карта треков движения циклонов, вызвавших штормовые сгоны/нагоны в Крыму и в Таганрогском заливе и устье Дона за период 2014–2017 гг.*

*Fig. 6. Composite map of the tracks of the movement of cyclones that caused storm surges / surges in Crimea and in Taganrog Bay and the mouth of the Don for the period 2014–2017*

## ВЫВОДЫ

Таким образом, на основании предложенного метода расчета треков движения циклонов, основанного на анализе относительной завихренности атмосферных полей ре-анализа ERA-Interim и ERA-5 на уровне 850 гПа были рассчитаны характеристики циклонов и классифицированы траектории их движения как сценарии для задания полей ветра для численного моделирования штормовых нагонов при различных фазах прохождения циклона. Для исследования подъемов уровня в Азовском море при различных типах ветрового воздействия анализировались данные береговых измерителей уровня моря.

Основой выбора параметров циклона являлись представленные оценки, согласно которым возникающие над Азово-Черноморским бассейном циклонические образования имеют характерный диаметр порядка 500–700 км, перепад давления составляет от 10 до 20 гПа, а скорость перемещения циклонов изменяется от 5 до 10 м/с.

Результаты работы могут быть использованы для численного моделирования штормовых нагонов для расчета особенностей пространственного распределения характеристик штормовых нагонов и ветрового волнения в Азовском море для различных траекторий перемещения циклона. Основные сведения о траекториях перемещения центра циклона, полученные в результате типизации синоптических полей и выделения треков движения циклонов, представлены в табл. 1. Угол наклона траектории отсчитывался относительно оси X, которая направлена против часовой стрелки на восток. Выбор начальной долготы центра циклона основан на допущении, что в начальный момент времени при любом значении начальной координаты по широте центра циклона зона пониженного давления располагалась за пределами Азовского моря. Выбранные траектории соответствуют варианту перемещения циклона с запада на восток в широтном направлении.

После анализа траектории прохождения циклона становится понятным развитие экстремального штормового нагона 24.09.2014 в Таганрогском заливе и дельте Дона: центр циклона находился севернее дельты на широте  $\varphi_0 = 48,50$  °с.ш., имел характеристики близкие к сценарию T5: скорость ветра над дельтой была 25 м/с (в порывах до 37 м/с) и кроме того, циклон существенно замедлил скорость своего перемещения 24.09.2014, что привело к усилению штормового нагона.

В заключение, в работе была проведена оценка интенсивности ветрового волнения и штормовых нагонов в Крыму и Азовском море в зависимости от траектории движения циклонов. Для задач численного моделирования разработан алгоритм оценки и параметризации характеристик движения циклонов. Предложен метод расчета треков движения циклонов, основанный на анализе относительной завихренности атмосферных полей ре-анализа.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке Государственного задания № 0555-2021-0005. Автор выражает благодарность Dr. Emmanouil Flaounas за предоставленное программное обеспечение CycloTRACK (v1.0).

## ACKNOWLEDGEMENTS

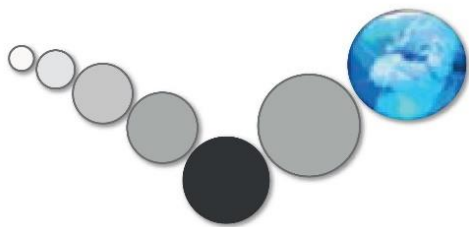
The study was funded by the State Assignment No 0555-2021-0005. The author is grateful to Dr. Emmanouil Flaounas for the provided CycloTRACK software (v1.0).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bromwich D.H., Sheng-Hung Wang.* A review of the temporal and spatial variability of Arctic and Antarctic atmospheric circulation based upon ERA-40. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2008. V. 44. No 3–4. P. 213–243. DOI: 10.1016/j.dynatmoce.2007.09.001.
2. *Flaounas E., Kotroni V., Lagouvardos K., Flaounas I.* CycloTRACK (v1.0): tracking winter extratropical cyclones based on relative vorticity: sensitivity to data filtering and other relevant parameters. *Geosci. Model Dev*, 2014. V. 7. No 4. P. 1841–1853. DOI: 10.5194/gmd-7-1841-2014.
3. *Flaounas E., Gray S.L., Teubler F.* A process-based anatomy of Mediterranean cyclones: from baroclinic lows to tropical-like systems. *Weather Clim. Dynam*, 2021. V. 2. No 1. P. 255–279. DOI: 10.5194/wcd-2-255-2021.
4. *Lemeshko E.E., Surkova G.V., Lemeshko E.M.* Structure and long-term dynamics of surface atmosphere of Azov-Black Sea region on the base of self-organizing map analysis. 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics Proc. SPIE, 2018. V. 10833. No 108337V. DOI: 10.1117/12.2504291.
5. *Rudeva I., Gulev S.K., Simmonds I., Tilinina N.* The sensitivity of characteristics of cyclone activity to identification procedures in tracking algorithms. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2014. V. 66. No 1. DOI: 10.3402/tellusa.v66.24961.
6. *Ulbrich U., Leckebusch, G.C., Pinto J.G.* Extra-tropical cyclones in the present and future climate: a review. *Theor Appl Climatol*, 2009. V. 96. P. 117–131. DOI: 10.1007/s00704-008-0083-8.

### REFERENCES

1. *Bromwich D.H., Sheng-Hung Wang.* A review of the temporal and spatial variability of Arctic and Antarctic atmospheric circulation based upon ERA-40. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2008. V. 44. No 3–4. P. 213–243. DOI: 10.1016/j.dynatmoce.2007.09.001.
2. *Flaounas E., Kotroni V., Lagouvardos K., Flaounas I.* CycloTRACK (v1.0): tracking winter extratropical cyclones based on relative vorticity: sensitivity to data filtering and other relevant parameters. *Geosci. Model Dev*, 2014. V. 7. No 4. P. 1841–1853. DOI: 10.5194/gmd-7-1841-2014.
3. *Flaounas E., Gray S.L., Teubler F.* A process-based anatomy of Mediterranean cyclones: from baroclinic lows to tropical-like systems. *Weather Clim. Dynam*, 2021. V. 2. No 1. P. 255–279. DOI: 10.5194/wcd-2-255-2021.
4. *Lemeshko E.E., Surkova G.V., Lemeshko E.M.* Structure and long-term dynamics of surface atmosphere of Azov-Black Sea region on the base of self-organizing map analysis. 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics Proc. SPIE, 2018. V. 10833. No 108337V. DOI: 10.1117/12.2504291.
5. *Rudeva I., Gulev S.K., Simmonds I., Tilinina N.* The sensitivity of characteristics of cyclone activity to identification procedures in tracking algorithms. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2014. V. 66. No 1. DOI: 10.3402/tellusa.v66.24961.
6. *Ulbrich U., Leckebusch, G.C., Pinto J.G.* Extra-tropical cyclones in the present and future climate: a review. *Theor Appl Climatol*, 2009. V. 96. P. 117–131. DOI: 10.1007/s00704-008-0083-8.



# **КАРТОГРАФИЧЕСКИЕ И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ КОМПЛЕКСОВ И ИССЛЕДОВАНИЙ БИОРАЗНООБРАЗИЯ**

## **CARTOGRAPHIC AND GEOINFORMATION METHODS FOR ENVIRONMENTAL CONSERVATION AND RESEARCH OF BIODIVERSITY**

УДК 504.06

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-230–241

Е.А. Боровичёв<sup>1</sup>, М.Н. Кожин<sup>2,3</sup>, Д.Р. Ахмерова<sup>4</sup>, Н.Е. Королёва<sup>2</sup>, О.В. Петрова<sup>1</sup>

### **ОХРАНЯЕМЫЕ ВИДЫ СОСУДИСТЫХ РАСТЕНИЙ В ХИБИНАХ: НАСКОЛЬКО РЕПРЕЗЕНТАТИВНЫ ГЕРБАРНЫЕ КОЛЛЕКЦИИ**

#### **АННОТАЦИЯ**

Хибинские горы – это территория с высоким уровнем ботанического разнообразия и большой эволюционной значимости. На основании анализа репрезентативности гербарных коллекций Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН (КРАВГ) и Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН (ИПЕР) было выявлено 34 из 49 охраняемых видов, известных по данным литературы. В ходе работы полная информация с этикеток гербарных сборов была переведена в электронный формат и подготовлена для включения в базу данных «Флора Русской Лапландии». В случае отсутствия на этикетках точных географических координат была выполнена географическая привязка по стандартизованному протоколу с использованием топографических карт Хибин масштаба 1:100000, архивных материалов (полевых дневников и отчетов) и спутниковых изображений земной поверхности высокого разрешения. Было установлено, что большая часть образцов охраняемых видов собраны в южной, наиболее доступной части Хибин, в непосредственной близости к антропогенно трансформированным территориям и вдоль дороги через Хибинские горы. Региональные ботанические памятники природы в Хибинах и охраняемая территория ПАБСИ детально изучены: в гербариях хранятся репрезентативные коллекции большинства охраняемых видов, собранные в разное время. Современные гербарные коллекции практически не содержат образцов охраняемых видов с территории национального парка «Хибинь». Показана необходимость проведения специальных ботанических исследований на территории национального парка с целью выявления и фиксации новых местонахождений охраняемых видов.

<sup>1</sup> Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН, ул. Ферсмана, д. 14А, 184209, Апатиты, Россия, *e-mail*: [borovichyok@mail.ru](mailto:borovichyok@mail.ru)

<sup>2</sup> Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина Кольского НЦ РАН, ул. Ферсмана, д. 18А, 184209, Апатиты, Россия

<sup>3</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1–12, г. Москва, 119234, Россия, *e-mail*: [mnk\\_umba@mail.ru](mailto:mnk_umba@mail.ru)

<sup>4</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет», ул. Воронежская, д. 79, 192007, Санкт-Петербург, Россия, *e-mail*: [diana.008@mail.ru](mailto:diana.008@mail.ru)

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** геоинформационные технологии, гербарные коллекции, особо охраняемые природные территории, редкие виды, Арктическая зона Российской Федерации.

**Evgeny Borovichev<sup>1</sup>, Mikhail Kozhin<sup>2,3</sup>, Diana Akhmerova<sup>4</sup>, Natalia Koroleva<sup>2</sup>, Olga Petrova<sup>1</sup>**

## **PROTECTED SPECIES OF VASCULAR PLANTS IN Khibiny MOUNTAINS: HOW MANY REPRESENTATIVE HERBAR COLLECTIONS?**

### **ABSTRACT**

The Khibiny Mountains are a territory with a high botanic diversity and include value habitat types. We analyzed the representativeness of the herbaria of the Polar-Alpine Botanical Garden-Institute (KPABG) and the Institute of Industrial Ecology Problems of the North (INEP) in relation to protected species of vascular plants in the Khibiny. The collections include 34 of 49 protected species recorded in literature. In the course of the analysis, the complete information from the herbarium labels was converted into electronic format and prepared to include into the database of the 'Flora of Russian Lapland'. In the absence of precise geographic coordinates on the labels, geo-referencing was performed according to a standardized protocol using topographic maps of the Khibiny Mts at a scale of 1: 100000, archival materials (field diaries and reports) and high-resolution satellite images of the earth's surface. Most of the regionally protected species in herbaria were collected in the most accessible southern part of the Khibiny, near by the human transformed territories and along a dirt road through the mountain pass. Regional botanical Natural Monuments and federal Protected Area Polar-Alpine Botanical Garden-Institute are among the best studied. The herbaria include specimens collected over almost hundred-of-years periods and almost no specimens of protected species from the 'Khibiny' National Park.

**KEYWORDS:** geo-information technologies, herbaria collections, protected areas, rare species, the Arctic zone of the Russian Federation.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Хибинские горы — это один из наиболее промышленно освоенных районов не только Мурманской области, но и Арктической зоны РФ в целом. Здесь расположены крупные горно-перерабатывающие предприятия с развитой инфраструктурой (Кировский филиал АО «Апатит», АО «Северо-Западная Фосфорная Компания») и два города (Кировск и Апатиты) с населением свыше 81 тыс. человек. При этом Хибины являются уникальной природной территорией, где представлено исключительное разнообразие ландшафтов и растительного покрова и высокая концентрация мест находжений редких и охраняемых видов растений [Сохранение..., 2011; Красная..., 2014; Кожин и др., 2020; Кутенков и др., 2019], для сохранения которых создана сеть особо охраняемых природных территорий (ООПТ).

Исследования растительного покрова Хибин началось задолго до их промышленного освоения. Первым в Хибинах побывал финский ботаник Я. Фелльман (J. Fellman) в 1829 году [Väre, 2011], в последующие десятилетия XIX в. эти горы также посещали финские ботаники Ф. Ниландер (F. Nylander), Г. Селин (G. Selin), Н.И. Фелльман (N.I. Fellman), П.А. Карстен (P.A. Karsten), Н. И. Лаурин (N.J. Laurin). В конце XIX в. в Хибинах в

<sup>1</sup> Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, 184209, Fersmana str. 14A, Apatity, Russia, *e-mail*: [borovichyok@mail.ru](mailto:borovichyok@mail.ru)

<sup>2</sup> Polar Alpine Botanical Garden Institute Kola SC RAS, 184209, Fersmana str. 18A, Apatity, Russia.

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Leninskiye Gory, 1-12, 119234, Russian Federation, *e-mail*: [mnk\\_umba@mail.ru](mailto:mnk_umba@mail.ru)

<sup>4</sup> Federal State Budget Educational Institution of higher education «Russian State Hydrometeorological University, 192007, Voronezhskaya St. 79, Saint Petersburg, Russia, *e-mail*: [diana.008@mail.ru](mailto:diana.008@mail.ru)

составе Великой Кольской экспедиции работали известные ботаники В.Ф. Бротерус (V.F. Brotherus) и А.О. Чильман (A.O. Kihlman) [Brotherus, 1890; Kihlman, 1890; Uotila, 2013]. Первые русские ботаники побывали в Хибинах в начале XX в. Это были Р.Ф. Ниман, Р. Поле и К.В. Регель [Мишкин, 1953].

Систематические работы по изучению растительного покрова Хибин начались в XX в. после работ отряда Северной научно-промысловой экспедиции под руководством профессоров Н.И. Прохорова и В.Н. Сукачева, ботанического отряда Кольской комплексной экспедиции под руководством С.С. Ганешина и Н.А. Аврорина и организации Полярно-альпийского ботанического сада в 1931 году [Полярно-альпийский..., 2021].

Первая обобщающая работа по растительности Хибинских гор была опубликована Н.А. Аврориным с соавторами [1936], в ней содержатся помаршрутные описания растительных сообществ, ценные флористические замечания и первая карта растительности этой территории. В монографии Б.А. Мишкина [1953] проведено первое и до сих пор единственное обобщение всей информации о флоре сосудистых растений Хибин. К концу прошлого века по флоре Хибин был накоплен новый обширный материал, однако, как указывал Г.Н. Андреев [Крючков и др., 1988], ощутимым пробелом является отсутствие современных и более поздних обобщающих работ, особенно в условиях интенсивного хозяйственного использования территории. Этот пробел так и остался не восполненным в последующие десятилетия.

Особое место среди ботанических работ XX в. занимали исследования по охране растительного мира. Наиболее детально была изучена территория ПАБСИ и его ближайшие окрестности [Костина, 1988, 2001; Красная..., 2014]. В настоящее время на территории ПАБСИ зафиксировано около 425 видов сосудистых растений [Константинова и др., 2011], из них 15 видов включены в Красную книгу Мурманской области [2014] и четыре вида – в Красную книгу РФ [2008]. В 1980 г. были созданы несколько ботанических (видоохранных) памятников природы регионального значения, предназначенных для точечной охраны редких видов и мест их концентрации – «Эвтрофное болото южного Прихибинья», «Ущелье Айкуайвенчорр», «Криптограммовое ущелье» и «Юкспоррлак» [Крючков и др., 1988]. В границах трех горных памятников зафиксировано 128, 175 и 106 видов соответственно [Кожин и др., 2019, 2020]. Флора памятника природы «Эвтрофное болото южного Прихибинья» насчитывает 156 видов [Кутенков и др., 2019]. В 2018 г. был создан национальный парк «Хибины», одной из важнейших его задач является сохранение редких и угрожаемых видов растений и животных. Согласно последней редакции материалов, обосновывающих создание национального парка [2014], в границах его проектирования известен 451 вид сосудистых растений. Из них 43 являются чуждыми аборигенной флоре, т.е. адвентивными; когда-то они были занесены с фуражом, продовольствием, строительными материалами в ныне исчезнувшие поселения геологов, места отдыха рыбаков и продолжают удерживаться в составе растительных сообществ.

Несмотря на столь длительную историю изучения, нельзя сказать, что Хибины исследованы с достаточной полнотой. Для оценки репрезентативности флористической информации необходимо проведение тщательных инвентаризаций, поэтому цель настоящей статьи – оценка репрезентативности крупнейших гербарных коллекций в Мурманской области – Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН (ПАБСИ, КРАВГ) и Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН (ИППЭС, INEP) в отношении охраняемых видов сосудистых растений Хибин.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом для работы послужили гербарные образцы охраняемых видов сосудистых растений из Хибинских гор, хранящихся в коллекциях КРАВГ и INEP.



Полная информация с этикеток была переведена в электронный формат и подготовлена для включения в базу данных «Флора Русской Лапландии / Flora of Russian Lapland» [Флора..., 2021]. В подавляющем большинстве этикеток образцов, собранных до 2010-х гг., не было географических координат. Для них была выполнена географическая привязка по стандартизованному протоколу [Zermoglio et al., 2020] с использованием топокарт Хибин масштаба 1:100000, архивных материалов (полевых дневников и отчётов) и спутниковых изображений земной поверхности высокого разрешения.

Для подготовки перечня охраняемых видов на ООПТ и остальной территории Хибинских гор были использованы литературные данные [Мишкин, 1953; Костина, 1988, 2001; Красная..., 2014; Кожин и др., 2019, 2020; Кутенков и др., 2019]. Кроме того, использованы результаты полевых наблюдений охраняемых видов, хорошо узнаваемых в полевых условиях и вошедших в обоснование создания национального парка «Хибины» [Сохранение..., 2011]. Латинские названия растений приведены согласно Красной книге Мурманской области [2014].

Тематические карты созданы с использованием векторной топоосновы масштаба 1:200000 ГлавНИВЦ, МПР, 1998 г. Визуализацию информации о распространении видов и расположении ООПТ и подготовку карт-схем проводили в ArcGIS 10.7.1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

За всю историю изучения в Хибинах было зарегистрировано 49 краснокнижных видов, что составляет более 1/4 от числа охраняемых сосудистых растений в Мурманской области; в гербариях КРАВГ и INEP в настоящее время 34 вида из федеральной и региональной Красных книг (табл. 1). Большинство сборов были сделаны в середине XX в. Во второй половине XX в. лишь единичные образцы пополняли фонды. В начале XXI в. в коллекции были добавлены образцы с ботанических памятников природы и окрестностей г. Кировска. Большая часть образцов охраняемых видов собраны в южной, наиболее доступной части Хибин, в непосредственной близости к антропогенно трансформированным территориям и вдоль грунтовой дороги на перевале Кукисвум (рис. 1). В последние десятилетия среди ботаников устоялось мнение, что Хибины изучены полно и по ним очень много сборов. В реальности, в исследованных коллекциях оказались многочисленными лишь образцы мака лапландского *Papaver lapponicum* s. l. (включая *Papaver chibinense*, *P. hujareuse*, *P. tolmachevii*), их почти 250. Это было связано с исследованиями изменчивости мака лапландского и состава микровидов, опубликованных во «Флоре Мурманской области». Более чем тремя десятками образцов представлены *Salix arbuscula* и *Beckwithia glacialis*; более чем двумя десятками — *Saxifraga tenuis*, *Cassiope tetragona*, *Cotoneaster cinnabarinus*, *Cryptogramma crispa*, *Polystichum lonchitis*, более одного десятка – *Arnica fennoscandica*, *Carex glacialis*, *Erigeron borealis*, *Trisetum spicatum*, *Veronica fruticans*, *Pseudorchis albida*, *Taraxacum nivale* и *Thymus subarcticus*. Остальные 18 видов представлены единичными гербарными образцами. В настоящее время, как и в конце 1980-х гг., Хибины невозможно характеризовать как полно изученную территорию с ботанической точки зрения [Андреев и др., 1988]: картина с тех пор практически не изменилась.

Наиболее репрезентативны в изученных гербариях образцы с охраняемой территории ПАБСИ – ООПТ федерального значения. В разные годы, начиная с 1930-х гг., гербарий пополнялся редкими видами с этой территории, и к настоящему времени их 19 видов. В коллекциях хорошо представлены сборы с памятников природы регионального значения: «Эвтрофное болото южного Прихибинья», «Ущелье Айкуайвенчорр», «Криптограммовое ущелье» и «Юкспоррлак», где в 2017 г. проводились комплексные инвентаризационные ботанические работы [Кожин и др., 2019, 2020]. Большинство известных местонахождений редких видов здесь подтверждено гербарными сборами (табл. 1).

Табл. 1. Указания охраняемых видов сосудистых растений, зафиксированных в Хибинах и в границах ООПТ, по гербарным и литературным данным  
Table 1. Occurrence of Red Data Book species of vascular plants in Khibiny and within protected areas based on herbarium and literature data

Вид	Категория ККМО/К КРФ	Хибиньы	НП	ПАБСИ	Юкс	Айк	Крипт	Эвтр
<i>Alchemilla transpolaris</i> Juz. (Манжетка заполярная)	3	•	—	•	—	—	—	—
<i>Alchemilla alpina</i> L. (Манжетка альпийская)	3	•	—	—	—	—	—	—
<i>Anthyllis kuzenevae</i> Juz. (Язвенник Кузенева)	0	†	—	—	—	—	—	—
<i>Arnica fennoscandica</i> Jurtz. & Korobkov (Арника фенноскандская)	16/2	•	•	—	•	○	•	—
<i>Asplenium viride</i> Huds. (Костенец зеленый)	3	—	—	—	—	○	—	—
<i>Beckwithia glacialis</i> (L.) Á.Löve & D.Löve (Беквития ледяная)	2/3	•	•	—	•	•	•	—
<i>Calypso bulbosa</i> (L.) Oakes (Калипсо луковичная)	16/3	○	○	—	—	—	—	—
<i>Carex glacialis</i> Mack. (Осока ледниковая)	3	—	—	•	•	—	•	—
<i>Carex holostoma</i> Drej. (Осока цельноротая)	3	?	—	—	—	—	—	—
<i>Carex tenuiflora</i> Wahlenb. (Осока тонкоцветковая)	3	?	—	—	—	—	—	—
<i>Cassiope tetragona</i> (L.) D. Don (Кассиопея четырехгранная)	3	•	•	•	•	•	•	—
<i>Cotoneaster cinnabarinus</i> Juz. (Кизильник киноварно-красный)	3/3	•	•	•	—	•	•	—
<i>Cryptogramma crista</i> (L.) R.Br. ex Hook. (Криптограмма курчавая)	3	•	—	—	•	•	•	—
<i>Dactylorhiza incarnata</i> (L.) Soó (Пальчатокоренник мясо-красный)	2	—	—	—	—	—	—	•
<i>Deschampsia glauca</i> Hartm. (Щучка сизая)	3	?	—	—	—	—	—	—
<i>Diplazium sibiricum</i> (Turcz. ex Kunze) Sa. Kurata (Диплазиум сибирский)	3	?	—	—	—	—	—	—
<i>Draba alpina</i> L. (Крупка альпийская)	3	?	—	—	—	—	—	—
<i>Draba fladnizensis</i> Wulf. (Крупка фладницийская)	3	—	•	—	•	—	•	—
<i>Draba lactea</i> Adams (Крупка молочнобелая)	2	○	•	—	—	—	—	—
<i>Eriophorum gracile</i> W.D.J. Koch (Пушица стройная)	3	?	—	—	—	—	—	—
<i>Epilobium alsinifolium</i> Vill. (Кипрей мокричиколистый)	3	•	—	—	—	—	—	•
<i>Epilobium davuricum</i> Fisch. ex Hornem (Кипрей даурский)	3	?	—	—	—	—	—	•

Вид	Категория ККМО/К КРФ	Хибины	НП	ПАБСИ	Юкс	Айк	Кригг	Эвтр
<i>Epilobium lactiflorum</i> Hausskn. (Кипрей белоцветковый)	3	●	—	●	●	●	●	—
<i>Epipactis atrorubens</i> (Hoffm. ex Bernh.) Bess. (Дремлик темно-красный)	16	—	—	●	—	—	—	—
<i>Erigeron borealis</i> (Vierh.) Simmons (Мелколепестник северный)	2	●	●	○	●	—	—	—
<i>Eriophorum brachyantherum</i> Trautv. et С.А. Меу. (Пушица короткопыльниковая)	3	—	—	○	—	—	—	—
<i>Gentiana nivalis</i> L. (Горечавка снежная)	2	●	—	—	—	—	—	—
<i>Gypsophila fastigiata</i> L. (Качим пучковатый)	2	○	○	—	—	—	—	—
<i>Isoetes lacustris</i> L. (Полушник озерный)	3	○	—	—	—	—	—	—
<i>Hieracium furvescens</i> (Dahlst.) Omang (Ястребинка буроватая)	4	○	—	●	—	—	—	—
<i>Papaver lapponicum</i> (Tolm.) Nord. (Мак лапландский)	2/3	●	●	●	●	●	●	—
<i>Pilosella arctogena</i> (Norrl.) Schljak. (Ястребиночка арктическая)	4	—	—	●	—	—	—	—
<i>Pinguicula villosa</i> L. (Жирянка волосистая)	3	○	—	—	—	—	—	—
<i>Platanthera bifolia</i> (L.) Rich. (Любка двулистная)	2	○	—	—	—	—	—	—
<i>Polystichum lonchitis</i> (L.) Roth (Многорядник копьевидный)	3	●	●	●	○	●	●	—
<i>Potentilla chamissonis</i> Hultén (Лапчатка Шамиссо)	3	●	—	—	—	—	●	—
<i>Potentilla nivea</i> L. (Лапчатка снежная)	3	○	—	—	—	—	—	—
<i>Pseudorchis albida</i> (L.) Á. Löve & D. Löve (Псевдорхис беловатый)	2	●	●	●	—	—	○	—
<i>Ranunculus sulphureus</i> C.J. Phipps (Лютик серножелтый)	2	●	—	—	—	—	—	—
<i>Salix arbuscula</i> L. (Ива деревцевидная)	3	●	●	●	●	—	—	—
<i>Salix arctica</i> Pall. (Ива арктическая)	3	●	.	○	—	—	—	—
<i>Saxifraga hieracifolia</i> Waldst. et Kit. (Камнеломка ястребинколистная)	2	—	●	—	—	—	—	—
<i>Saxifraga tenuis</i> (Wahlenb.) H. Smith (Камнеломка тонкая)	2	●	●	●	●	—	—	—
<i>Taraxacum nivale</i> Lange ex Kihlm. (Одуванчик снежный)	3	●	●	—	—	—	—	—
<i>Taraxacum simulum</i> Brenn (Одуванчик подражающий)	3	●	—	○	—	—	—	—
<i>Thymus subarcticus</i> Klokov & Des.-Shost. (Тимьян субарктический)	3	●	—	—	●	●	●	—

Вид	Категория ККМО/К КРФ	Хибины	НП	ПАБСИ	Юкс	Айк	Крипт	Эвтр
<i>Trisetum spicatum</i> (L.) K.Richt. (Трищетинник колосистый)	3	●	●	—	●	—	●	—
<i>Veronica fruticans</i> Jacq. (Вероника кустящаяся)	3	●	●	●	●	—	●	—
<i>Woodsia glabella</i> R.Br. (Вудсия гладковатая)	3	●	●	—	●	—	●	—
Всего		38	19	18	16	9	16	3

Обозначения: ● – указание подкреплено гербарным образцом; ○ – указание основано на данных литературы; † – местонахождение вида уничтожено; ? – литературное указание сомнительно. Хибины – вне существующих ООПТ; НП – национальный парк «Хибины»; ПАБСИ – Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН; Юкс – памятник природы «Юкспоррлак»; Айк – памятник природы «Ущелье Айкуайвенчорр»; Крипт – памятник природы «Криптограммовое ущелье»; Эвтр – памятник природы «Эвтрофное болото южного Прихлебья».

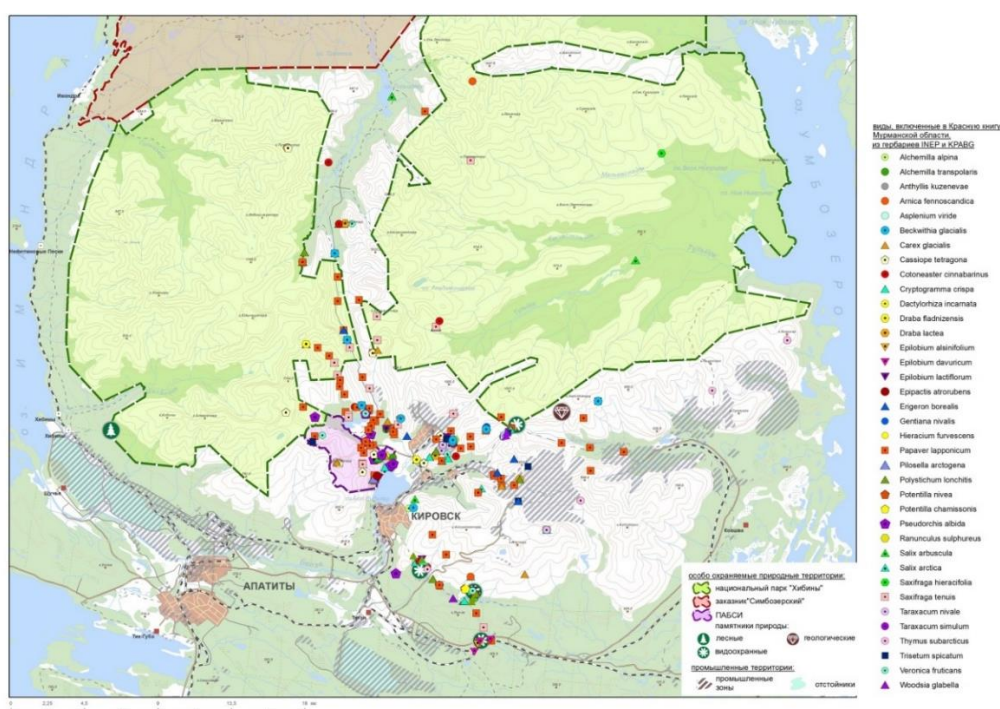


Рис. 1. Распределение охраняемых видов по территории Хибин на основании гербарных образцов

Fig. 1. Distribution of Red Data Book species in the Khibiny based on herbaria specimens

Самую слабую репрезентативность по гербарным коллекциям сосудистых растений имеет национальный парк «Хибины», несмотря на его большую площадь. Немногочисленные образцы (табл. 1) были собраны на территории ныне существующего парка в середине прошлого в. В настоящее время национальный парк «Хибины» является почти «белым пятном» на ботанической карте, и мы не располагаем актуальной информацией о нахождении большинства охраняемых видов в пределах парка, даже таких обычных в Хибинах, как мак лапландский, беквичия ледниковая, многорядник копьевидный и др., подтвержденных гербарными образцами. Поэтому необходимо продолжение поиска и фиксации местонахождений краснокнижных видов как на территории НП «Хибины», так и за его пределами.

Представленные на карте (рис. 1) и в табл. 1 значительное число местонахождений охраняемых видов и компактных мест их концентрации, задокументированных в гербар-

ных образцах, в настоящее время не охраняются и подвержены высокой угрозе уничтожения. Часть из них уже уничтожена в результате горных разработок. Язвенник Кузенева (*Anthyllis kuzenevae*), известный только из Хибинских гор, вероятно, вымер как биологический вид: уже более 70 лет его не удается найти [Красная..., 2014]. В районе рудников на плато Расвумчорр и горе Юкспорр уничтожены отдельные местонахождения *Carex glacialis*, *Cassiope tetragona*, *Cotoneaster cinnabarinus*, *Cryptogramma crispa*, *Draba lactea*, *Erigeron borealis*, *Papaver lapponicum*, *Polystichum lonchitis*, *Ranunculus sulphureus*, *Salix arctica*, *Saxifraga tenuis*, *Taraxacum nivale*, *Thymus subarcticus*, *Trisetum spicatum* и *Veronica fruticans*

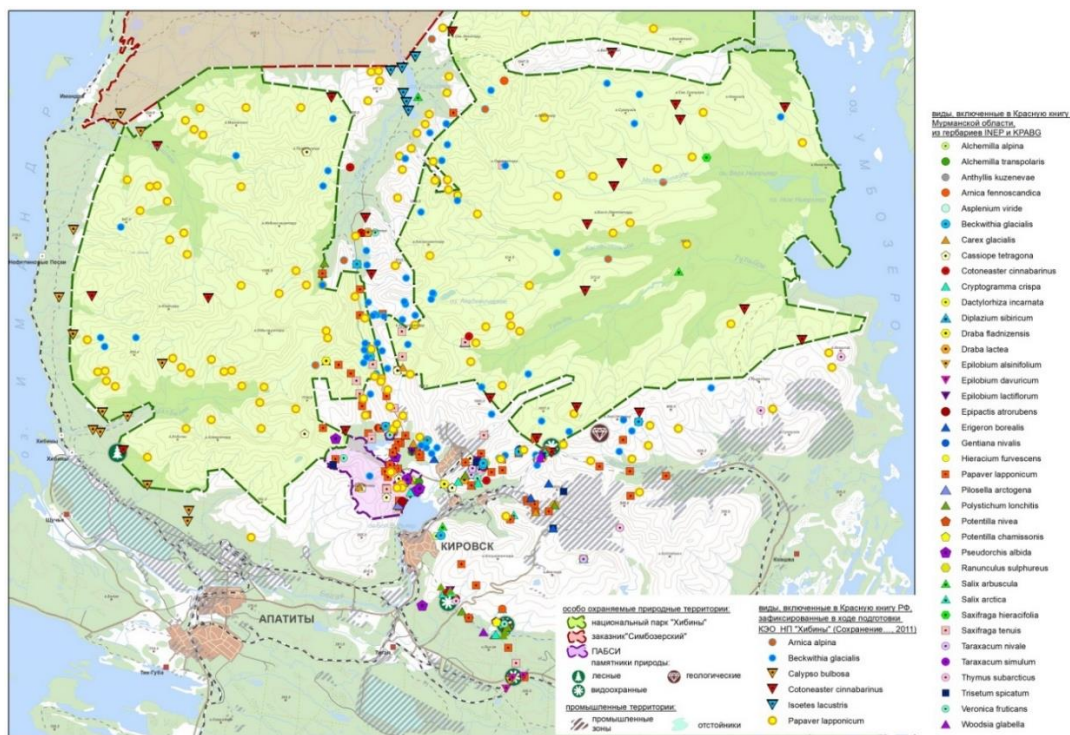


Рис. 2. Распространение охраняемых видов по территории Хибин на основании полевых наблюдений [Сохранение..., 2011] и гербарных образцов

Fig. 2. Distribution of Red Data Book species in the Khibiny based on field observations and herbaria specimens [Conservation..., 2011]

Дополнительно были привлечены данные полевых наблюдений охраняемых видов на территории национального парка и в его окрестностях, таких как арника фенноскандская (*Arnica fennoscandica*), беквичия ледниковая (*Beckwithia glacialis*), калипсо луковичное (*Calypso bulbosa*), кизильник киноварнокрасный (*Cotoneaster cinnabarinus*), мак лапландский (*Papaver lapponicum*) и полушник озерный (*Isoetes lacustris*) [Сохранение..., 2011]. Учет наблюдений привел к увеличению указаний охраняемых видов в Хибинах, и ситуация с распространением этих видов сильно изменилась (рис. 2). Очевидно, что для получения более полной картины распространения охраняемых видов растений в изучаемом районе необходимо вовлечение полевых наблюдений, в т.ч. данных гражданской науки в рамках проекта iNaturalist. С другой стороны, необходимо проведение специальных ботанических исследований в национальном парке и документирование местонахождений.

Для сохранения охраняемых видов и недопущения уничтожения их местообитаний необходимо создание новых ООПТ, таких, как, например, «Урочище «Городская щель»».

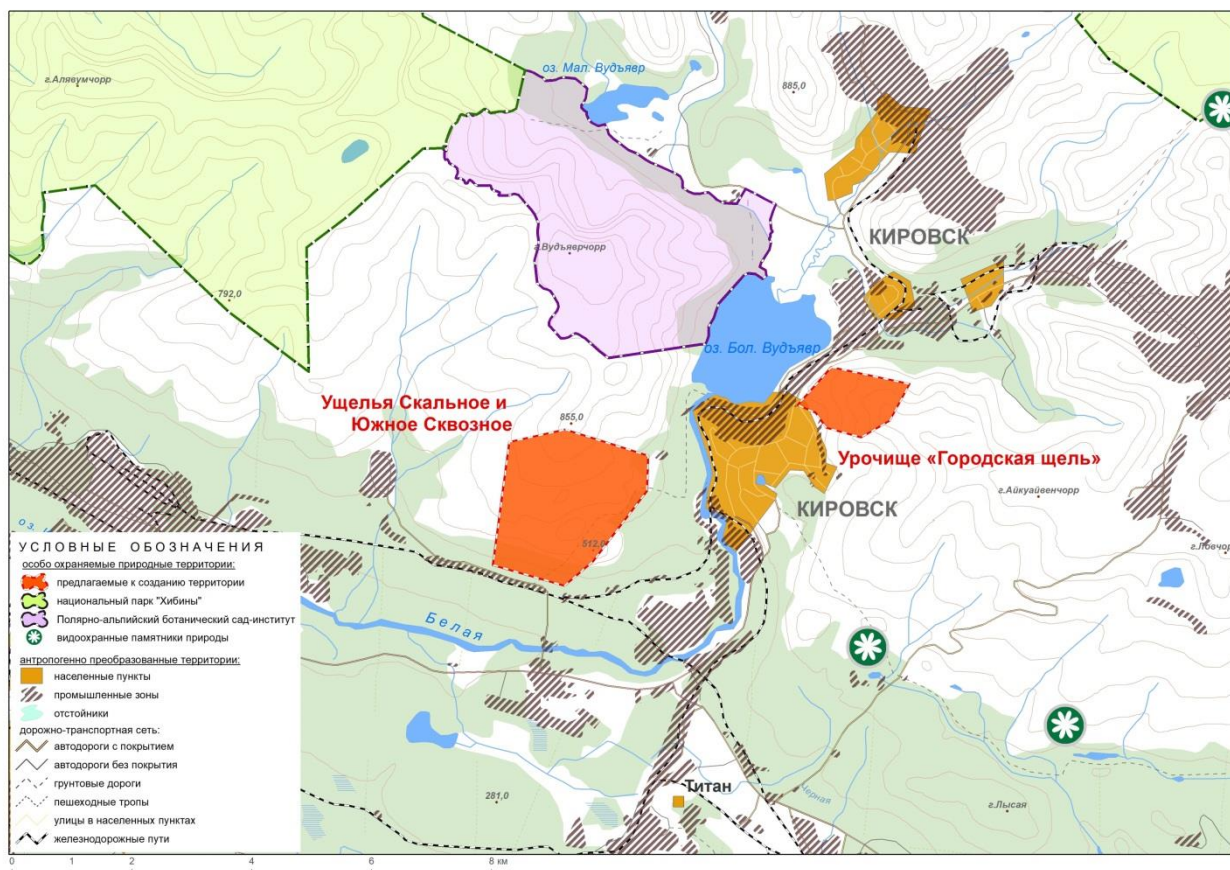


Рис. 3. Расположение проектируемых памятников природы в окрестностях г. Кировска

Fig. 3. Location of planned natural monuments in the vicinity of Kirovsk

Эта территория расположена на южном склоне горы Айкуайвенчорр, в границах города Кировска с подведомственной территорией, является популярным местом отдыха жителей города, здесь проходит один из природно-познавательных маршрутов. Здесь зарегистрировано семь охраняемых видов растений, в т.ч. единственная в Хибинах популяция манжетки альпийской (*Alchemilla alpina*) [Koroleva, Kopeina, 2020]. Перспективно для создания ООПТ место концентрации охраняемых видов в ущельях Скальное и Южное на южном склоне горы Вудъяврчорр (рис. 2, 3).

## ВЫВОДЫ

1. Вовлечение и актуализация исторических гербарных данных по краснокнижным растениям является частью процесса оцифровки и создания современной информационной системы по флоре Мурманской области.

2. Инвентаризация коллекций охраняемых видов сосудистых растений из района Хибинских гор в гербариях КРАВГ и INEP показала их низкую современную репрезентативность. Большинство сборов представлено с южной, наиболее освоенной и антропогенно трансформированной части Хибин.

3. Почти полное отсутствие сборов охраняемых видов сосудистых растений отмечено для национального парка «Хибинь», тогда как точечные ООПТ – региональные ботанические памятники природы и охраняемая территория ПАБСИ – довольно детально изучены, и для них в гербариях хранятся репрезентативные коллекции разных временных периодов.

4. С целью выявления новых местонахождений охраняемых видов и документирование часто встречаемых в горном массиве краснокнижных видов необходимо проведе-

ние специальных ботанических исследований национального парка «Хибины», а для получения более полной картины ботанической изученности Хибинских гор необходимо привлечение гербарных коллекций Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН и МГУ имени М.В. Ломоносова, а также данных гражданской науки в рамках проекта iNaturalist.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственных заданий ПАБСИ КНЦ РАН и ИППЭС КНЦ РАН, при частичной поддержке РФФИ 18-05-60142. Исследование М.Н. Кожина выполнено за счет гранта Российского научного фонда 19-77-00025.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This study was carried out as part of government contracts with PABGI KSC RAS and INEP KSC RAS, as well as with the support of the Russian Foundation for Fundamental Research (project no. 18-05-60142). The work of M. Kozhin was supported by Russian Science Foundation (project no. 19-77-00025).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аврорин Н.А., Качурин М.Х., Коровкин А.А. Материалы по растительности Хибинских гор. Труды Совета по изучению производительных сил. Сер. Кольская, 1936. Т. 11. С. 3–93; карта.
2. Андреев Г.Н., Домбровская А.В., Константинова Н.А., Костина В.А., Лукьянова Л.М., Никонов В.В., Похилько А.А., Сдобникова Н.В., Филиппова Л.Н., Шаврова Л.А. Состояние и задачи ботанического изучения Хибинских гор. Растительный мир высокогорных экосистем СССР, 1988. С. 6–21.
3. Кожин М.Н., Боровичев Е.А., Белкина О.А., Мелехин А.В., Давыдов Д.А., Костина В.А., Константинова Н.А. К флоре памятников природы «Ущелье Айкайвенчорр», «Криптограммовое ущелье» и «Юкспорлак» (Мурманская область). Труды Карельского научного центра РАН. Серия Биogeография, 2019. № 8. С. 62–79.
4. Кожин М.Н., Боровичев Е.А., Белкина О.А., Мелехин А.В., Костина В.А., Константинова Н.А. Редкие и охраняемые виды растений и лишайников памятников природы «Ущелье Айкуайвенчорр», «Криптограммовое ущелье» и «Юкспорлак» (Мурманская область). Труды Карельского научного центра РАН, 2020. № 1. С. 34–48.
5. Константинова Н.А., Белкина О.А., Боровичев Е.А., Давыдов Д.А., Костина В.А., Лихачев А.Ю., Мелехин А.В., Шалыгин С.С. Обзор разнообразия растений, лишайников и цианопрокариот на особо охраняемых природных территориях Мурманской области. Вестник Кольского научного центра РАН, 2011. № 2 (5). С. 63–73.
6. Костина В.А. Аннотированный список сосудистых растений. Мохообразные и сосудистые растения территории Полярно-альпийского ботанического сада (Хибинские горы, Кольский полуостров). Апатиты: Изд. КНЦ РАН. 2001. С. 45–76.
7. Костина В.А. Каталог сосудистых растений территории Полярно-альпийского ботанического сада. Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1988. 31 с.
8. Красная книга Мурманской области. Изд. 2-е. Кемерово: Азия-принт, 2014. 584 с.
9. Красная книга Российской Федерации (Растения и грибы). М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. 855 с.
10. Крючков В.В., Кондратович И.И., Андреев Г.Н. Красная книга экосистем Кольского Севера. Апатиты: КФАН СССР, 1988. 105 с.
11. Кутенков С.А., Боровичев Е.А., Королева Н.Е., Копеина Е.И., Другова Т.П., Костина В.А., Петрова О.В. Флора и растительность охраняемого эвтрофного болота в

- южном Прихилибинье (Мурманская область). Труды КНЦ РАН, 2019. № 8. С. 80–96.
12. *Мишкин Б.А.* Флора Хибинских гор, ее анализ и история. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1953. 113 с.
  13. *Мохообразные* и сосудистые растения территории Полярно-альпийского ботанического сада (Хибинские горы, Кольский полуостров). Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2001. 91 с.
  14. Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина. Путеводитель. СПб.: Лесник, 2021. 75 с.
  15. Сохранение ценных природных территорий Северо-Запада России. Анализ репрезентативности сети ООПТ Архангельской, Вологодской, Ленинградской и Мурманской областей, Республики Карелии, Санкт-Петербурга. СПб: Кольский центр охраны дикой природы. 2011. 506 с.
  16. Флора Мурманской области. Вып. 5. М.-Л.: Наука, 1965. 550 с.
  17. Флора Русской Лапландии. Flora of Russian Lapland. Электронный ресурс: <https://laplandflora.ru/> (дата обращения: 23.04.2021).
  18. Эколого-экономическое обоснование национального парка «Хибины». Научный отчет. Апатиты: ИППЭС КНЦ РАН, 1999. Т. 1. 210 с. Т. 2. 172 с.
  19. *Brotherus V.F., Saelan T.* Musci Lapponia Kolaensis. Acta Soc. Fauna et Flora Fenn, 1890. V. 6. P. 1–100.
  20. *Kihlman A.O.* Bericht einer naturwissenschaftlichen Reise durch Russisch Lappland im Jahre 1889. Fennia, 1890. V. 3. No 6. P. 1–40.
  21. *Koroleva N.E., Kopeina E. I.* Rare and endangered vegetation and vascular plants in canyon “Gorodskaya shchel’ (Town Crack)” in southern part of Khibiny Mountains (Murmansk Region, Russia). Arctic Environmental Research, 2020. V. 20. No 1. P. 17–28.
  22. *Uotila P.* Finnish botanists on the Kola Peninsula (Russia) up to 1918. Memoranda Soc. Fauna Flora Fennica, 2013. V. 89. P. 75–104.
  23. *Väre H.* Jacob Fellman – the botanising priest. Memoranda – Societatis pro Fauna et Flora Fennica, 2011. V. 87. P. 1–20.
  24. *Zermoglio P.F., Chapman A.D., Wieczorek J.R., Luna M.C., Bloom D.A.* Georeferencing Quick Reference Guide. Copenhagen: GBIF Secretariat, 2020. Web resource: <https://doi.org/10.35035/e09p-h128> (дата обращения: 26.04.2021).

#### REFERENCES

1. *Andreev G.N., Dombrovskaya A.V., Konstantinova N.A., Kostina V.A., Lukyanova L.M., Nikonov V.V., Pokhilko A.A., Sdobnikova N.V., Filippova L.N., Shavrova L.A.* The state and tasks of the botanical study of the Khibiny Mts. Plants world of alpine ecosystems of the USSR, 1988. P. 6–21 (in Russian).
2. *Avrorin N.A., Kachurin M.Kh., Korovkin A.A.* Materials on the vegetation of the Khibiny mountains. Proceedings of the Council for the Study of Productive Forces. Kola Series, 1936. V. 11. P. 3–93 + map (in Russian).
3. *Brotherus V.F., Saelan T.* Musci Lapponia Kolaensis. Acta Soc. Fauna et Flora Fenn, 1890. V. 6. P. 1–100.
4. Bryophytes and vascular plants of the Polar-Alpine Botanical Garden (Khibiny Mountains, Kola Peninsula). Apatity: Kola Science Centre, 2001. 91 p. (in Russian).
5. Conservation of valuable natural areas of north-western Russia. The analysis of the representation of the specially protected natural areas network in the Arkhangelsk, Vologda, Leningrad, and Murmansk Regions, the Republic of Karelia, Saint-Petersburg. St. Petersburg, 2011. 506 p.



6. Ecological and economic substantiation of the Khibiny National Park. Scientific report. Apatity: IPPES KNTs RAN, 1999. V. 1; 210 p. V. 2. 172 p. <http://www.biodiversity.ru/kola/html/khibiny/khibiny.html> (accessed 23.04.2021) (in Russian).
7. Web resource: Flora of Murmansk Region. V. 5. Moscow-Leningrad: «Nauka», 1965. 550 с. (in Russian).
8. Web resource: Flora of Russian Lapland. <https://laplandflora.ru/> (accessed 23.04.2021). (accessed 26.04.2021).
9. *Kihlman A.O.* Bericht einer naturwissenschaftlichen Reise durch Russisch Lapland im Jahre 1889. Fennia, 1890. V. 3. No 6. P. 1–40.
10. *Konstantinova N.A., Belkina O.A., Borovichev E.A., Davydov D.A., Kostina V.A., Likhachev A.Yu., Melekhin A.V., Shalygin S.S.* A review of the plant, lichen, and cyanoprokaryota diversity in the protected natural areas of the Murmansk Region. Herald of the Kola Science Centre RAS, 2011. No 2. P. 63–73 (in Russian).
11. *Koroleva N.E., Kopeina E.I.* Rare and endangered vegetation and vascular plants in canyon “Gorodskaya shchel’ (Town Crack)” in southern part of Khibiny Mountains (Murmansk Region, Russia). Arctic Environmental Research. 2020. V. 20. № 1. P. 17–28.
12. *Kostina V.A.* Annotated list of vascular plants. Bryophytes and vascular plants of the Polar-Alpine Botanical Garden (Khibiny Mountains, Kola Peninsula). 2001. P. 45–76 (in Russian).
13. *Kostina V.A.* Catalog of vascular plants of the territory of the Polar-Alpine Botanical Garden. Apatity: Kola Science Centre, 1988. 31 p. (in Russian).
14. *Kozhin M.N., Borovichev E.A., Belkina O.A., Melekhin A.V., Kostina V.A., Konstantinova N.A.* Rare and red-listed plants and lichens of the nature monuments Aikuaivenchorr gorge, Kriptogrammoev gorge, and Juksporrlak (Murmansk Region). Trans. KarRC RAS, 2019. No 8. P. 62–79. DOI: 10.17076/bg936 (in Russian).
15. *Kozhin M.N., Borovichev E.A., Belkina O.A., Melekhin A.V., Kostina V.A., Konstantinova N.A.* Rare and red-listed plants and lichens of the nature monuments Aikuaivenchorr gorge, Kriptogrammoev gorge, and Juksporrlak (Murmansk Region). Trans. KarRC RAS, 2020. No 1. P. 34–48. DOI: 10.17076/bg939 (in Russian).
16. *Kryuchkov V.V., Kondratovich I.I., Andreev G.N.* Ecosystems Red Data Book of the Kola North. Apatity: Kola Science Centre, 1988. 105 p. (in Russian).
17. *Kutenkov S.A., Borovichev E.A., Koroleva N.E., Kopeina E.I., Drugova T.P., Kostina V.A., Petrova O.V.* Flora and vegetation of a protected eutrophic fen at the southern foothills of the Khibiny Mts (Murmansk Region). Trans. KarRC RAS, 2019. №. 8. P. 80–96 (in Russian).
18. *Mishkin B.A.* Flora of the Khibiny Mts: analysis and history. Moscow-Leningrad: Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR. 1953. 113 p. (in Russian).
19. Polar-Alpine Botanical Garden-Institute. Guide. Saint Petersburg: Lesnik. 2021. 75 p. (in Russian).
20. Red Data Book of the Murmansk Region. Kemerovo: Aziya-Print, 2014. 578 p. (in Russian).
21. Red Data Book of the Russian Federation (plants and fungi). Moscow: KMK, 2008. 855 p. (in Russian).
22. *Uotila P.* Finnish botanists on the Kola Peninsula (Russia) up to 1918. Memoranda Soc. Fauna Flora Fennica, 2013. V. 89. P. 75–104.
23. *Väre H.* Jacob Fellman – the botanising priest. Memoranda – Societatis pro Fauna et Flora Fennica, 2011. V. 87. P. 1–20.
24. *Zermoglio P.F., Chapman A.D., Wieczorek J.R., Luna M.C., Bloom D.A.* Georeferencing Quick Reference Guide. Copenhagen: GBIF Secretariat, 2020. Web resource: <https://doi.org/10.35035/e09p-h128> (accessed 26.04.2021).

А.А. Новиков<sup>1</sup>, Е.С. Каширина<sup>2</sup>, Т.В. Панкеева<sup>3</sup>, М.Д. Анкудинова<sup>4</sup>

## ГИС-АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОХРАНЯЕМЫХ ВИДОВ РАСТЕНИЙ НА КРЫМСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

### АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты анализа распространения охраняемых видов растений на Крымском полуострове с использованием ГИС-технологий. В качестве источника информации использованы данные глобального информационного фонда по биоразнообразию (GBIF), объединяющего такие крупные базы данных о биоразнообразии России, как оцифрованную гербарную коллекцию МГУ и портал INaturalist. Полученный датасет включает в себя 5187 записей 196 таксонов охраняемых видов Крымского полуострова. Массив включает данные о 58 семействах.

Определено, что максимальное число находок отмечено для деревьев, особенно хвойных – можжевельника высокого (198) и можжевельника дельтовидного (286). Относительно много находок имеется для красивоцветущих растений – пион крымский (157), ятрышник пурпурный (161), ирис карликовый (161). Выявлено, что около 100 видов охраняемых растений Крымского полуострова не отмечены в GBIF, что требует проведения специальных исследований.

Максимальное число видов, для которых в использованных базах отсутствуют данные, являются очень редкими, причем произрастающими в отдалённых частях полуострова. Они часть представлены реликтами, стенотопными видами, единичными популяциями, что затрудняет их поиск. Определено, что высокая концентрация находок охраняемых видов растений отмечается в юго-западной части Крыма, на Южном берегу и в горной части. Отдельные локальные участки с охраняемыми видами растений отмечены вдоль морского побережья.

Рассчитано, что наибольшее количество обнаруженных охраняемых видов растений приходится на среднегорный ландшафтный уровень, наименьший – на плакорный. Полученные результаты могут быть использованы для мониторинга охраняемых видов растений, территориального планирования, экологических изысканий на этапе проектирования новых жилых и инфраструктурных объектов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** базы данных, ГИС-технологии, охраняемые виды, флора, Крымский полуостров.

<sup>1</sup> Филиал МГУ в г. Севастополе, отделение географии, ул. Героев Севастополя, 7, г. Севастополь, Россия; Институт природно-технических систем, ул. Ленина д. 28, Севастополь, Россия, *e-mail:* [a\\_novik@bk.ru](mailto:a_novik@bk.ru)

<sup>2</sup> Филиал МГУ в г. Севастополе, отделение географии, ул. Героев Севастополя, 7, Севастополь, Россия; Севастопольский государственный университет, Институт развития города, наб. Корнилова, 1, Севастополь, Россия, *e-mail:* [e\\_katerina.05@mail.ru](mailto:e_katerina.05@mail.ru)

<sup>3</sup> Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, пр. Нахимова, 2, г. Севастополь, Россия, *e-mail:* [tatyanapankeeva@yandex.ru](mailto:tatyanapankeeva@yandex.ru)

<sup>4</sup> Филиал МГУ в г. Севастополе, отделение географии, ул. Героев Севастополя, 7, г. Севастополь, Россия, *e-mail:* [mapuha\\_2000@mail.ru](mailto:mapuha_2000@mail.ru)

Anton A. Novikov<sup>1</sup>, Ekaterina S. Kashirina<sup>2</sup>, Tatyana V. Pankeeva<sup>3</sup>, Marina D. Ankudinova<sup>4</sup>

## GIS ANALYSIS OF THE PROTECTED PLANT SPECIES DISTRIBUTION IN THE CRIMEA

### ABSTRACT

The article presents the results of the analysis of the protected plant species distribution on the Crimean peninsula using GIS technologies. The mapping of protected species is an important scientific and conservation task. The knowledge of the protected species location allows us to effectively select environmental protection measures, to introduce restrictions in the schemes of economic use and territorial planning. As a source of information, we used data from the Global Biodiversity Information Fund (GBIF), which unites such large databases of Russian biodiversity as the Moscow State University Digital Herbarium and the INaturalist portal. The resulting dataset includes 5187 records of 196 taxa of protected Crimean species. The dataset includes 58 plant families. It was determined that the maximum number of observations was noted for trees, especially conifers – high juniper (198) and deltoid juniper (286). Many observations are available for flowering plants – Crimean peony (157), purple orchis (161), dwarf iris (161). It is shown that a high concentration of finds of protected plant species is noted in the southwestern part of Crimea, on the southern coast and in the mountainous part. Separate local areas with protected plant species are noted along the sea coast. It is calculated that the largest number of detected protected plant species falls on the mid-mountain landscape level, the smallest – on the upland level. It was revealed that about 100 species of protected plants of Crimea are not registered in GBIF, which requires special research. The maximum number of species for which there are no data in the databases used are very rare and grow in remote parts of the peninsula. They are partly represented by relics, stenotopic species, single populations, which complicates their search. The obtained results can be used for monitoring protected plant species, territorial planning, environmental studies at the design stage of new residential and infrastructure facilities.

**KEYWORDS:** databases, GIS technologies, protected species, flora, Crimean peninsula.

### ВВЕДЕНИЕ

Картирование охраняемых видов является важной научной и природоохранной задачей. Знание местоположения того или иного охраняемого вида позволяет эффективно подобрать природоохранные мероприятия, внести ограничения в схемы хозяйственного использования и территориального планирования.

Крымский полуостров отличается высоким биологическим разнообразием. Особенно выделяется флористическое и ландшафтное разнообразие Крыма. Полуостров расположен на границе умеренного и субтропического климата. Рельеф представлен степными равнинами на севере и средневысотными Крымскими горами на юге. Горы покрыты широколиственными и хвойными лесами из дуба пушистого и дуба скального, бука восточного, граба обыкновенного; хвойными лесами их можжевельника высокого и дельтовидного, сосны пицундской и Палласовой (крымской). На территории площадью

<sup>1</sup> Branch of Moscow State University in Sevastopol, Department of Geography, Heroes of Sevastopol, 7, Sevastopol, Russia; Institute of Natural Technical Systems, Lenin, 28, Sevastopol, Russia, *e-mail: a\_novik@bk.ru*

<sup>2</sup> Branch of Moscow State University in Sevastopol, Department of Geography, Heroes of Sevastopol, 7, Sevastopol, Russia; Sevastopol State University, City Development Institute, Kornilova, 1, Sevastopol, Russia; *e-mail: e\_katerina.05@mail.ru*

<sup>3</sup> A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia, *e-mail: tatyapankeeva@yandex.ru*

<sup>4</sup> Branch of Moscow State University in Sevastopol, Department of Geography, Heroes of Sevastopol, 7, Sevastopol, Russia, *e-mail: mapuha\_2000@mail.ru*

26 тыс. км<sup>2</sup> отмечено 2573 видов высших растений [Ена, 2018] и 124 ландшафта на уровне типов местности, объединенных в 19 ландшафтных поясов [Современные..., 2009]. Самобытность флоры определяется высоким уровнем эндемизма – 4,2% видов не встречаются за пределами полуострова [Ена, 2006].

Охрана природы на региональном и локальном уровнях требует особо тщательного подхода к инвентаризации объектов живой природы. История изучения флоры Крыма насчитывает более двух столетий и связана с именами известных исследователей. В разное время на полуострове работали П.С. Паллас, М. фон Биберштейн, Х.Х. Стевен и др. Несмотря на длительный период исследований инвентаризация растений полуострова еще далека от завершения. Особое внимание уделяется анализу пространственного распространения охраняемых видов, занесенных в Красные книги Крыма, Севастополя и Российской Федерации.

Для отображения распространения охраняемых видов в региональных Красных книгах используется метод сеточного картирования: для Севастополя с квадратом 5×5 км [Красная книга..., 2018], для Республики Крым – 10×10 км [Красная..., 2015]. Необходимо отметить, что выбранная сеточная основа не сопоставима, что затрудняет анализ распространения многих охраняемых видов по полуострову. Более точные данные о местонахождении охраняемых видов семейства орхидные приведено точечным способом на ландшафтной основе [Фатырыга и др., 2019]. При геопривязке листов Цифрового гербария МГУ координаты места сбора гербарного образца дополняются сведениями о точности.

В последние годы в нашей стране активно развивается «гражданская наука» особенно в области документации данных об объектах живой природы. Накопленные массивы данных дополняют сведения гербарных коллекций, позволяют получить более точные данные о распространении видов, их фенологических особенностях, динамике [Флора..., 2019; Flora..., 2020].

Цель статьи – проведение анализа распространения охраняемых видов растений по территории Крымского полуострова с использованием ГИС-технологий на основе ландшафтного подхода.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве источника информации использованы данные глобального информационного фонда по биоразнообразию (GBIF), объединяющего такие крупные базы данных о биоразнообразии России, как Цифровой гербарий МГУ, портал iNaturalist и др.<sup>1</sup> Указанные источники являются крупнейшими по объему и качеству цифровых данных о флоре Крыма, в том числе охраняемых видах. Кроме Цифрового гербария МГУ и iNaturalist данные получены из United States Department of Agriculture's National Plant Germplasm System (USDANPGS) и Биобазы [http://biobase.179.ru/link.html?id=http://biobase.179.ru/flora/2011-krim-flora/DSC52820\_1-.jpg], сгенерированных на GBIF. Другие электронные базы вносят незначительный вклад в данные об охраняемых растениях Крыма.

Среди традиционных коллекций важнейшими источниками данных о флоре Крыма являются гербарии Никитского ботанического сада (YALT) и Агротехнологической академии КФУ им. В.И. Вернадского (CSAU), крымские отделы которых включают 88 и 100 тыс. образцов. Работу с коллекциями затрудняет необходимость личного доступа, т.к. фонды еще не оцифрованы, созданные базы этикеток не имеют геопривязок и открытой Интернет-версии. В настоящее время идет сканирование фондов гербария Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина (МНА), крымский отдел которого включает не менее – 15 тыс. листов. Данные из перечисленных коллекций позволят уточнить полученные карты охраняемых растений Крыма.

<sup>1</sup> The Global Biodiversity Information Facility. Web resource: <https://www.gbif.org> (accessed 20.12.2020).

С целью оценки распределения охраняемых видов растений, а также для проведения пространственного анализа их распространения выбраны данные для территории Республики Крым и города Севастополя, которые представлены более 5 тысячами находок (точек). Каждая из точек содержит информацию о царстве, отделе, классе, порядке, семействе, роде, виде, научном названии, коде страны, местонахождении, широте, долготе, высоте, о дате фиксации находки (день, месяц, год), коде коллекции, дате опознания (определения вида), правообладателе, кем был зарегистрирован и так далее.

Латинские названия охраняемых видов приведены согласно Красной книги Республики Крыма [Красная..., 2015], а их координаты и прочая информация (царство, класс, отряд, семейство, дата обнаружения и так далее) получены из данных международной базы GBIF.

Однако следует отметить, что данные о пространственном распределении наблюдений охраняемых видов растений являются не полными. В Красную книгу Республики Крыма занесено 297 видов сосудистых растений, однако в международной базе GBIF на конец 2020 г. имелись данные о находках 196 видов с геопривязкой к местности. К середине 2021 г. GBIF содержит данные о 226 видах охраняемых растений Крыма. Список сосудистых растений в Красной книге Севастополя состоит из 176 таксонов, из которых 141 представлены в базах данных.

Датасет включает 5187 записей 196 таксонов охраняемых видов растений Крыма. По источникам информации 5% получено из Цифрового гербария МГУ, 93% – из INaturalist и 2% из других цифровых коллекций. Одним из соавторов настоящей статьи (Е.С. Кашириной) в INaturalist сделано 138 наблюдений 61 вида на территории Республики Крым и 969 наблюдений 107 видов на территории Севастополя, т.е. 21% данных используемого массива является авторским. Геопривязка крымского отдела Цифрового гербария МГУ выполнена Е.С. Кашириной.

Полученный массив содержит данные о 58 семействах (табл. 1).

Табл. 1. Распределение растений датасета по семействам

Table 1. Distribution of dataset plants by families

№	Семейство	Число наблюдений	№	Семейство	Число наблюдений
1	<i>Amaranthaceae</i>	10	30	<i>Heliotropiaceae</i>	35
2	<i>Amaryllidaceae</i>	141	31	<i>Iridaceae</i>	278
3	<i>Anacardiaceae</i>	172	32	<i>Juncaginaceae</i>	4
4	<i>Apiaceae</i>	193	33	<i>Lamiaceae</i>	55
5	<i>Apocynaceae</i>	367	34	<i>Liliaceae</i>	98
6	<i>Asphodelaceae</i>	264	35	<i>Malvaceae</i>	1
7	<i>Aspleniaceae</i>	19	36	<i>Nitrariaceae</i>	7
8	<i>Asteraceae</i>	26	37	<i>Ophioglossaceae</i>	22
9	<i>Betulaceae</i>	4	38	<i>Orchidaceae</i>	833
10	<i>Boraginaceae</i>	53	39	<i>Orobanchaceae</i>	2
11	<i>Brassicaceae</i>	147	40	<i>Paeoniaceae</i>	258
12	<i>Capparaceae</i>	64	41	<i>Papaveraceae</i>	56
13	<i>Caprifoliaceae</i>	42	42	<i>Pinaceae</i>	8
14	<i>Caryophyllaceae</i>	243	43	<i>Plantaginaceae</i>	15
15	<i>Celastraceae</i>	3	44	<i>Plumbaginaceae</i>	3
16	<i>Cistaceae</i>	44	45	<i>Poaceae</i>	116
17	<i>Colchicaceae</i>	58	46	<i>Polygonaceae</i>	21
18	<i>Convolvulaceae</i>	11	47	<i>Primulaceae</i>	57
19	<i>Crassulaceae</i>	4	48	<i>Pteridaceae</i>	19
20	<i>Cucurbitaceae</i>	83	49	<i>Ranunculaceae</i>	147

21	<i>Cupressaceae</i>	500	50	<i>Rosaceae</i>	73
22	<i>Cystopteridaceae</i>	3	51	<i>Ruppiaceae</i>	1
23	<i>Dryopteridaceae</i>	3	52	<i>Saxifragaceae</i>	68
24	<i>Ericaceae</i>	40	53	<i>Scrophulariaceae</i>	28
25	<i>Euphorbiaceae</i>	29	54	<i>Solanaceae</i>	59
26	<i>Fabaceae</i>	273	55	<i>Taxaceae</i>	86
27	<i>Frankeniaceae</i>	5	56	<i>Thelypteridaceae</i>	4
28	<i>Gentianaceae</i>	6	57	<i>Thymelaeaceae</i>	2
29	<i>Geraniaceae</i>	19	58	<i>Violaceae</i>	8

Выявлено, что около 15 % массива данных составляют находки растений семейства орхидные – 833 единицы. Орхидеи привлекают внимание наблюдателя. На втором месте растения семейства кипарисовые – это вечнозеленые можжевельники, которые наблюдаются во все сезоны года. Минимальное число наблюдений отмечено для растений семейства мальвовые, руппиевые и тимелеевые, на которые приходится 1–2 находки (табл. 2).

Табл. 2. Число находок видов охраняемых растений полученного датасета  
Table 2. Number of finds of protected plant species from the obtained dataset

Вид (лат.)	Кол-во	Вид (лат.)	Кол-во	Вид (лат.)	Кол-во
<i>Aconitum anthora</i>	8	<i>Crithmum maritimum</i>	54	<i>Minuartia hirsuta</i>	13
<i>Aconitum lasiostomum</i>	3	<i>Crocus biflorus</i>	1	<i>Neotostema apulum</i>	2
<i>Adiantum capillus-veneris</i>	15	<i>Crocus pallasii</i>	14	<i>Neottia nidus-avis</i>	
<i>Adonis vernalis</i>	52	<i>Crocus speciosus</i>	63	<i>Nitraria schoberi</i>	7
<i>Ajuga salicifolia</i>	4	<i>Cyclamen coum</i>	9	<i>Onobrychis pallasii</i>	23
<i>Allium nathaliae</i>	3	<i>Cypripedium calceolus</i>	1	<i>Onosma polyphyllum</i>	38
<i>Allium regelianum</i>	1	<i>Dactylorhiza incarnata</i>	3	<i>Ophioglossum vulgatum</i>	15
<i>Allium tarkhankuticum</i>	2	<i>Dactylorhiza romana</i>	18	<i>Ophrys scolopax</i>	2
<i>Allocetraria madreporiformis</i>	1	<i>Daphne taurica</i>	2	<i>Orchis punctulata</i>	34
<i>Amanita caesarea</i>	2	<i>Delphinium fissum</i>	81	<i>Orchis purpurea</i>	157
<i>Anacamptis morio</i>		<i>Dryopteris carthusiana</i>	1	<i>Orchis simia</i>	52
<i>Anacamptis pyramidalis</i>	113	<i>Dryopteris villarii</i>	2	<i>Paeonia daurica</i>	161
<i>Androsace villosa</i>	47	<i>Ecballium elaterium</i>	83	<i>Paeonia tenuifolia</i>	97
<i>Anthemis sterilis</i>	7	<i>Elymus panormitanus</i>	2	<i>Paragymnopteris marantae</i>	2
<i>Anthericum liliago</i>	3	<i>Elymus reflexiaristatus</i>	4	<i>Parapholis incurva</i>	16
<i>Apocynum venetum</i>	2	<i>Elymus stipifolius</i>	8	<i>Paronychia cephalotes</i>	167
<i>Arbutus andrachne</i>	40	<i>Epipactis helleborine</i>	92	<i>Pinus brutia</i>	8
<i>Asparagus pallasii</i>	1	<i>Epipactis leptochila</i>	1	<i>Pistacia mutica</i>	199
<i>Asphodeline lutea</i>	111	<i>Epipactis microphylla</i>	13	<i>Platanthera bifolia</i>	16
<i>Asphodeline taurica</i>	135	<i>Epipactis palustris</i>	7	<i>Platanthera chlorantha</i>	57
<i>Asplenium adiantum-nigrum</i>	4	<i>Eremurus spectabilis</i>	16	<i>Polyporus umbellatus</i>	2
<i>Asplenium billotii</i>	1	<i>Eryngium maritimum</i>	59	<i>Prangos trifida</i>	23
<i>Asplenium scolopendrium</i>	14	<i>Euonymus nanus</i>	3	<i>Pulsatilla halleri</i>	2
<i>Asterolinon linum-stellatum</i>	1	<i>Euphorbia paralias</i>	6	<i>Ramalina pontica</i>	1
<i>Astragalus arnacantha</i>	56	<i>Euphorbia rigida</i>	23	<i>Rindera tetraspis</i>	2
<i>Astragalus ponticus</i>	7	<i>Euphrasia taurica</i>	2	<i>Rumex hastifolius</i>	3
<i>Astragalus reduncus</i>	10	<i>Euscorpius tauricus</i>	3	<i>Rumex scutatus</i>	10
<i>Astragalus setosulus</i>	4	<i>Ferula caspica</i>	2	<i>Rumia crithmifolia</i>	14

<i>Astragalus suprapilosus</i>	13	<i>Frankenia pulverulenta</i>	5	<i>Ruppia cirrhosa</i>	1
<i>Astragalus varius</i>	10	<i>Fumana laevis</i>	1	<i>Ruscus aculeatus</i>	121
<i>Astrodaucus littoralis</i>	18	<i>Galanthus plicatus</i>	112	<i>Ruscus hypoglossum</i>	28
<i>Atraphaxis replicata</i>	6	<i>Genista albida</i>	114	<i>Salvia pratensis</i>	4
<i>Atropa belladonna</i>	59	<i>Geranium tuberosum</i>	19	<i>Salvia scabiosifolia</i>	30
<i>Avena barbata</i>	4	<i>Gladiolus imbricatus</i>	3	<i>Satureja montana</i>	2
<i>Bellevalia speciosa</i>	55	<i>Glaucium flavum</i>	57	<i>Saxifraga irrigua</i>	68
<i>Betula pendula</i>	4	<i>Globularia trichosantha</i>	15	<i>Scabiosa praemontana</i>	42
<i>Blackstonia perfoliata</i>	6	<i>Glycyrrhiza glabra</i>	1	<i>Scilla bifolia</i>	98
<i>Botrychium lunaria</i>	7	<i>Goniolimon rubellum</i>	3	<i>Scrophularia exilis</i>	5
<i>Brassica elongata</i>	7	<i>Gymnocarpium dryopteris</i>	3	<i>Secale sylvestre</i>	11
<i>Cakile maritima</i>	7	<i>Heracleum ligusticifolium</i>	9	<i>Seseli lehmannii</i>	15
<i>Calystegia soldanella</i>	9	<i>Hericum coralloides</i>	2	<i>Sideritis syriaca</i>	5
<i>Capparis herbacea</i>	54	<i>Hericum erinaceus</i>	3	<i>Silene jailensis</i>	1
<i>Caragana scythica</i>	1	<i>Hesperis steveniana</i>	6	<i>Silene supina</i>	3
<i>Centaurea comperana</i>	2	<i>Himantoglossum caprinum</i>		<i>Sobolewskia sibirica</i>	4
<i>Cephalanthera damasonium</i>	89	<i>Himantoglossum comperianum</i>	70	<i>Solenanthus dubius</i>	10
<i>Cephalanthera longifolia</i>	46	<i>Hippocrepis ciliata</i>	1	<i>Sternbergia colchiciflora</i>	23
<i>Cephalanthera rubra</i>	56	<i>Iris pseudacorus</i>	30	<i>Steveniella satyrioides</i>	3
<i>Cerastium biebersteinii</i>	52	<i>Iris pumila</i>	161	<i>Stipa capillata</i>	49
<i>Cheilanthes persica</i>	2	<i>Iris sibirica</i>	6	<i>Stipa lessingiana</i>	15
<i>Cistus tauricus</i>	42	<i>Isatis littoralis</i>	5	<i>Stipa pennata</i>	2
<i>Clavariadelphus pistillaris</i>	2	<i>Juniperus communis</i>	2	<i>Stipa pontica</i>	1
<i>Colchicum triphyllum</i>	6	<i>Juniperus deltoides</i>	286	<i>Stipa pulcherrima</i>	1
<i>Colchicum umbrosum</i>	52	<i>Juniperus excelsa</i>	198	<i>Stipa tirsia</i>	5
<i>Convallaria majalis</i>	59	<i>Juniperus foetidissima</i>	1	<i>Taxus baccata</i>	86
<i>Convolvulus sericocephalus</i>	2	<i>Juniperus sabina</i>	12	<i>Thelypteris palustris</i>	8
<i>Corallorhiza trifida</i>	3	<i>Krascheninnikovia ceratoides</i>	9	<i>Tilia dasystyla</i>	1
<i>Cota jailensis</i>	1	<i>Lamium glaberrimum</i>	6	<i>Tournefortia sibirica</i>	35
<i>Crambe aspera</i>	19	<i>Lathyrus saxatilis</i>	4	<i>Tulipa biflora</i>	21
<i>Crambe koktebelica</i>	14	<i>Lathyrus setifolius</i>	7	<i>Tulipa suaveolens</i>	28
<i>Crambe maritima</i>	80	<i>Lens ervoides</i>	26	<i>Tulipa sylvestris</i>	3
<i>Crambe pinnatifida</i>	4	<i>Lepidium turczaninowii</i>	5	<i>Verbascum orientale</i>	2
<i>Crambe tataria</i>	1	<i>Leymus racemosus</i>	2	<i>Verbascum phoeniceum</i>	21
<i>Crataegus orientalis</i>	69	<i>Linum pallasianum</i>	46	<i>Viola oreades</i>	8
<i>Crataegus sphaenophylla</i>	3	<i>Medicago marina</i>	9	<i>Vitex agnus-castus</i>	4
<i>Crataegus taurica</i>	1	<i>Medicago saxatilis</i>	2	<i>Zostera marina</i>	2
<i>Crepis purpurea</i>	14	<i>Minuartia euxina</i>	2		

В таблице 2 показано, что максимальное число находок отмечено для деревьев, особенно хвойных – можжевельника высокого (*Juniperus excelsa*, 198 точек) и можжевельника дельтовидного (*Juniperus deltoides*, 286). Точек наблюдений фисташки туполистной (*Pistacia mutica*) отмечено 199 единиц. Относительно много находок имеется для красивоцветущих растений – пион крымский (*Paeonia daurica*, 157), ятрышник пурпурный (*Orchis purpurea*, 161), ирис карликовый (*Iris pumila*, 161). Они привлекают ученых и наблюдателей-любителей, что объясняет их высокую долю в массиве полученных данных. Многие цветы привлекают и браконьеров для массового сбора на букеты. Знание о распространении красивоцветущих растений позволит повысить эффективность их охраны.

Единично отмечены находки 24 видов, среди которых спаржа Палласа (*Asparagus pallasii*), катран татарский (*Crambe tataria*), боярышник крымский (*Crataegus taurica*), воровейник апулейский (*Neotostema apulum*) и другие. Для идентификации многих единично отмеченных растений требуются макросъемка того или иного органа, что не всегда делается любителями. Более половины (109) отмеченных видов растений имеют менее десяти находок. Еще 47 видов отмечены от 10 до 49 раз. Более 50 наблюдений имеется всего лишь для 40 видов охраняемых растений.

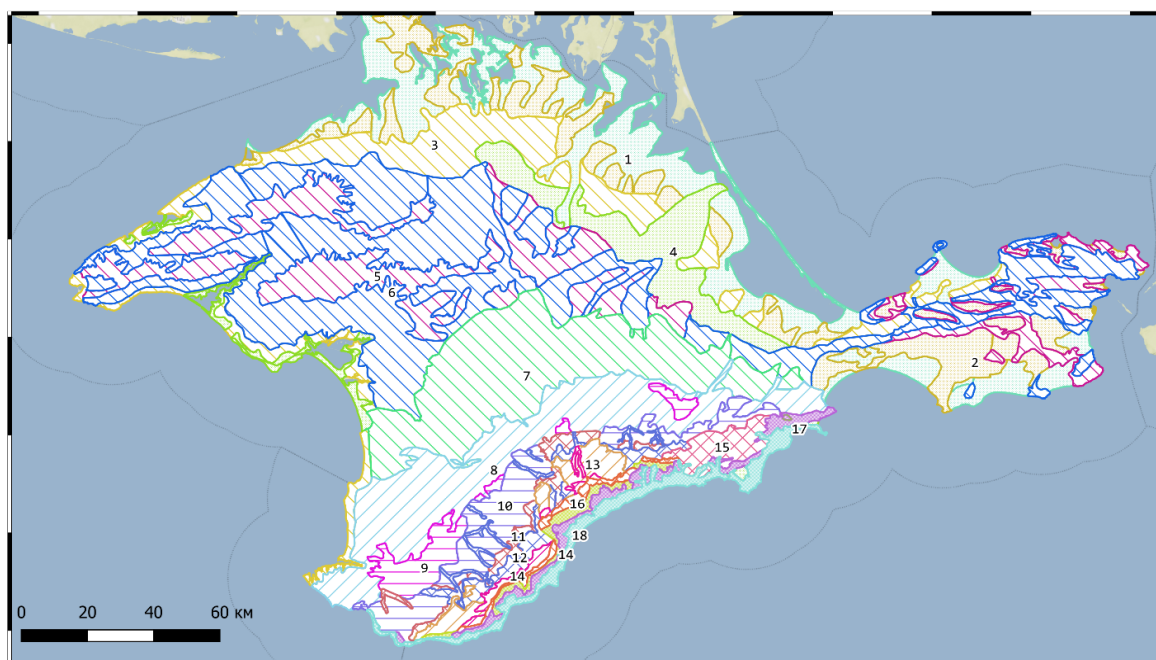
Основным источником информации о распространении охраняемых растений, еще не представленных в GBIF, является Красная книга, в которой интегрированы данные гербарных коллекций и личные наблюдения исследователей. Так, в GBIF для территории Крымского полуострова не представлены сведения примерно о 100 видах растений.

Максимальное число видов, для которых в использованных базах отсутствуют данные, являются очень редкими, причем произрастающими в отдаленных частях полуострова. Здесь стоит выделить реликты, дисперсно сохранившиеся в горах после схода плейстоценового ледника. К таким видам относятся хвощ речной (*Equisetum fluviatile*), надбродник безлистный (*Epipogium aphyllum*), гудайера ползучая (*Goodyera repens*) и др.

Более того, известна единственная популяция костенца Хаусскнехта (*Asplenium lepidum* subsp. *hausknechtii*). Краекучник орляковый (*Cheilanthes acrosticha*) отмечен в одном локалитете на Аю-Даге.

Вторая группа редких охраняемых видов – это стенотопные растения засоленных местообитаний побережья Сиваша, Каркинитского залива и Азовского моря. Сильная антропогенная трансформация этих районов привела к утрате местообитаний и необходимости сохранения видов. С другой стороны, это малоизученные районы, интерес к которым повысился в связи с созданием особо охраняемых природных территорий (природный парк Караларская степь, Калиновский парк и др.) и проведением комплексных исследований. К таким видам относится триостренник морской (*Triglochin maritimum*), цанникеллия большая (*Zannichellia palustris* subsp. *major*), руппия морская (*Ruppia maritima*) и др.

Для таких видов, занесенных в Красную книгу Севастополя, как гаудиния ломкая (*Gaudinia fragilis*) и схеноплектус Ипполита (*Schoenoplectus hippolyti*) имеются старые сборы, а современные находки с фотофиксацией отсутствуют. Для анализа распределения охраняемых видов растений оцифрована ландшафтная карта Крыма (рис. 1).























Ландшафтный уровень	Зона	№	Пояс
Гидроморфный	Низменных недренированных и слабодренированных аккумулятивных и денудационных равнин с типчаково-ковыльковыми, полынно-типчаковыми, полынно-житняковыми степями в комплексе с галофитными лугами и степями	1 	Прибрежных недренированных низменностей, пляжей и кос с галофитными лугами, солончаками и сообществами и псаммофитной растительности
		2 	Аккумулятивных и денудационных недренированных и слабодренированных низменностей с полынно-типчаковыми, полынно-житняковыми и типчаково-ковыльными степями
		3 	Аккумулятивных и денудационных слабодренированных равнин с ковыльно-типчаковыми и полынно-типчаковыми степями
		4 	Аккумулятивных дренированных и слабодренированных низменностей с ковыльно-типчаковыми степями в комплексе с ковыльно-разнотравным
Плакорный	Типичных ковыльно-типчаковых и бедно-разнотравно-ковыльно-типчаковых степей в комплексе с петрофитными и кустарниковыми степями	5 	Верхний денудационный ковыльно-типчаковых, петрофитных и кустарниковых степей
		6 	Нижний денудационно-аккумулятивный с ковыльно-типчаковыми, кустарниково-разнотравными и петрофитными степями
Предгорный	Предгорных аккумулятивных, останцово-денудационных и структурных денудационных равнин и куэстовых возвышенностей с разнотравными степями, кустарниковыми зарослями, лесостепью и низкорослыми дубовыми лесами	7 	Бородачаево-разнотравных и асфоделино-разнотравных степей на аккумулятивных и денудационных равнинах
		8 	Лесостепи на останцово-денудационных, структурных денудационных и аккумулятивных равнинах, куэстовых возвышенностях
		9 	Дубовых лесов и кустарниковых зарослей на останцово-денудационных и наклонных структурных денудационных равнинах и куэстовых возвышенностей
Среднегорный	Северного макросклона гор, буковых, дубовых и смешанных широколиственных лесов	10 	Котловин и эрозионного низкогорья, дубовых, смешанных широколиственных и сосновых лесов
		11 	Среднегорно-склоновый, дубовых, можжевельно-дубовых и смешанных широколиственных лесов
		12 	Среднегорно-склоновый, буковых, буково-грабовых, смешанных широколиственных лесов
	Яйлинских плато, горных лугов и горной лесостепи	13 	Лесных и лугово-лесостепных плато
		14 	Луговых и лугово-лесных плато
		15 	Низкогорно-склоновый, дубовых и смешанных широколиственных лесов
Южного макросклона гор, дубовых, сосновых и смешанных широколиственных лесов	16 	Среднегорно-склоновый, дубовых, сосновых и смешанных широколиственных лесов	
	Низкогорный	Южного макросклона гор, полусубтропических дубовых, фисташково-дубовых, можжевельно-сосновых лесов и шибляковых зарослей	17 
18 			Сосновых, дубовых и смешанных широколиственных лесов и шибляковых зарослей

Рис. 1. Ландшафтная карта Крыма [Современные ландшафты..., 2009]

Fig. 1. Landscape map of Crimea [Modern landscapes..., 2009]

В результате оцифровки ландшафтной карты Крыма нанесено 5 ландшафтных уровней и 19 поясов. К ландшафтным уровням относятся: гидроморфный ландшафтный уровень, плакорный ландшафтный уровень, предгорный ландшафтный уровень, среднегорный ландшафтный уровень, низкогорный ландшафтный уровень (ЮБК). Ландшафтный уровень – это планетарные геоморфологические уровни, относительно однородные по рельефу и грунтовому увлажнению. Каждому ландшафтному уровню соответствует свой набор природных зон и иных единиц пространственной дифференциации ландшафтов, что обусловлено разной совокупностью факторов. На гидроморфном уровне внутризональная дифференциация связана в первую очередь с изменением уровня грунтовых вод, на плакорном – с наличием высотных ступеней, на предгорном и среднегорном – с высотой над уровнем моря и позицией по отношению к радиационным и циркуляционным потокам [Позаченюк, 2015]. Зоны и пояса отмечены в легенде (рис. 1).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для территории Крыма получено более 5 тысяч точек наблюдения охраняемых растений, которые крайне неравномерно распределены по полуострову (рис. 2).

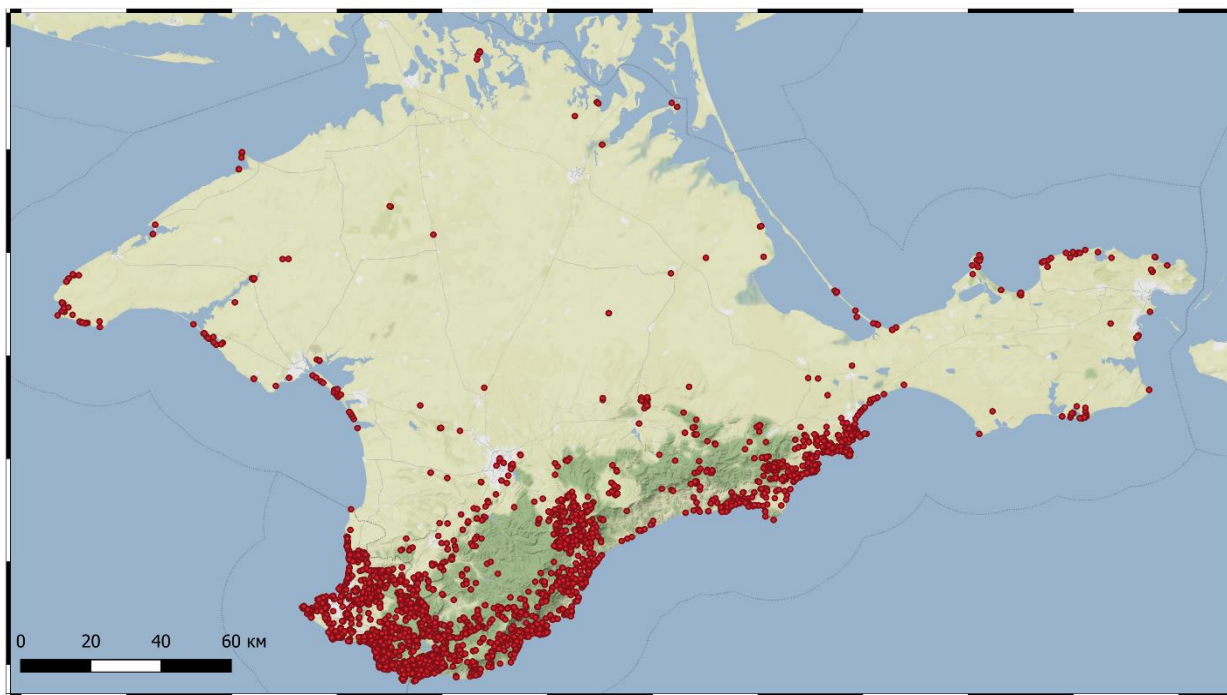


Рис. 2. Распределение наблюдений охраняемых видов растений Крымского полуострова  
Fig. 2. The distribution of protected plant species observations on the Crimean Peninsula

Как видно, максимальная концентрация находок охраняемых видов растений отмечается в юго-западной части Крыма, на Южном берегу и в горной части. Отдельные локальные участки с охраняемыми видами растений отмечены вдоль морского побережья.

Высокая концентрация наблюдений отражает несколько особенностей. Во-первых, районы сбора данных на первых этапах тяготеют к автотрассам и доступным территориям. Во-вторых, горы и морское побережье отличаются высокой локализацией охраняемых растений. Многие растения прибрежных местообитаний занесены в охраняемые списки

для снижения рисков их уничтожения в связи с массовым освоением побережья. Концентрация охраняемых видов растений в юго-западной части полуострова, с одной стороны, отражает уровень изученности, с другой – своеобразие и богатство локальной флоры.

Точки наблюдений охраняемых видов были сопоставлены с оцифрованной ландшафтной картой Крымского полуострова (рис. 3).

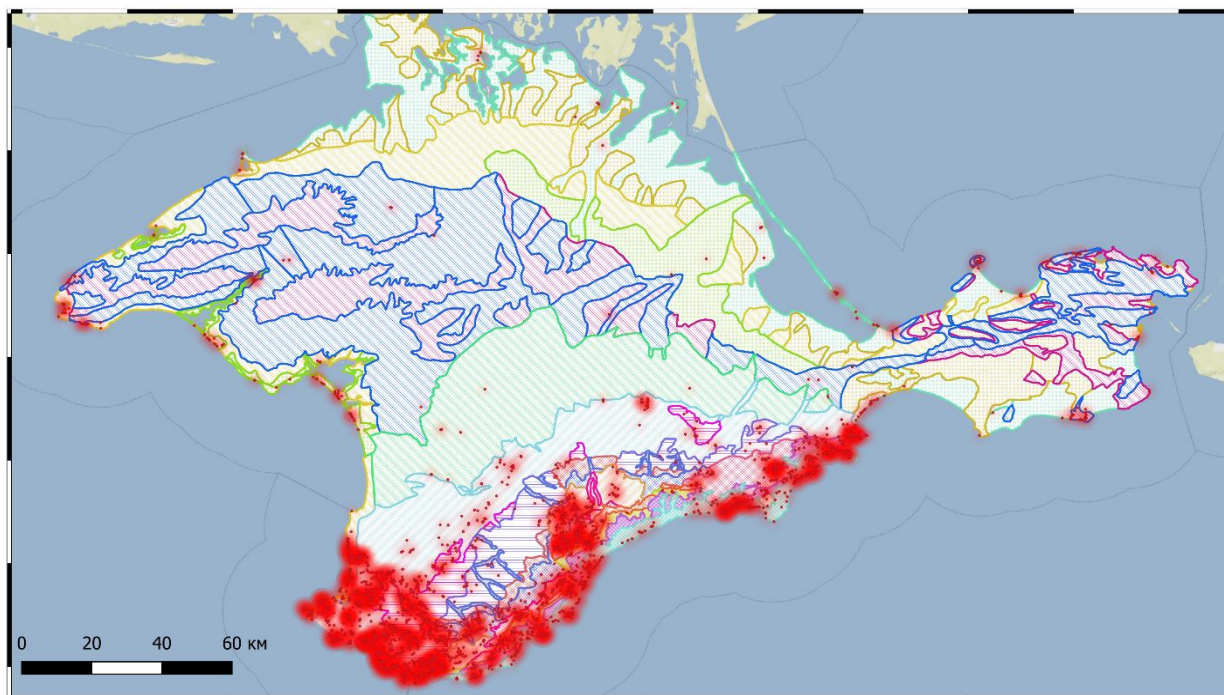


Рис. 3. Распределение находок охраняемых видов относительно ландшафтной структуры

Fig. 3. Distribution of finds of protected species in relation to the landscape structure

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что точки обнаружения охраняемых видов растений приурочены, преимущественно, к горной и предгорной местности, а также распределены вдоль береговой линии.

На основе оцифрованной ландшафтной карты Крыма рассчитана площадь для каждого ландшафтного пояса и количество точек охраняемых видов растений. Для анализа распределения точек обнаружения охраняемых видов растений была составлена таблица 3.

Табл. 3. Количество находок охраняемых видов растений, приуроченных к разным ландшафтам

Table 3. Number of finds of protected plant species confined to different landscapes

Уровень	Пояс	Площадь, км кв.	Кол-во точек
Гидроморфный	Прибрежных недренированных низменностей, пляжей и кос с галофитными лугами, солончаками и сообществами и псаммофитной растительности	2721,522	61
	Аккумулятивных и денудационных недренированных и слабодренированных низменностей с полынно-типчачковыми, полынно-житняковыми и типчачково-ковыльными степями	2027,030	20
	Аккумулятивных и денудационных слабодренированных равнин	2164,415	372

	с ковыльно-типчаковыми и полынно-типчаковыми степями		
	Аккумулятивных дренированных и слабодренированных низменностей с ковыльно-типчаковыми степями в комплексе с ковыльно-разнотравным	1383,704	85
Итого			<b>538</b>
Плакорный	Верхний денудационный ковыльно-типчаковых, петрофитных и кустарниковых степей	2868,238	13
	Нижний денудационно-аккумулятивный с ковыльно-типчаковыми, кустарниково-разнотравными и петрофитными степями	5486,864	72
Итого			<b>85</b>
Предгорный	Бородачаево-разнотравных и асфоделино-разнотравных степей на аккумулятивных и денудационных равнинах	2718,463	11
	Лесостепи на останцово-денудационных, структурных денудационных и аккумулятивных равнинах, куэстовых возвышенностях	2205,730	925
	Дубовых лесов и кустарниковых зарослей на останцово-денудационных и наклонных структурных денудационных равнинах и куэстовых возвышенностей	427,652	272
Итого			<b>1208</b>
Среднегорный	Котловин и эрозионного низкогорья, дубовых, смешанных широколиственных и сосновых лесов	950,847	676
	Среднегорно-склоновый, дубовых, можжевельново-дубовых и смешанных широколиственных лесов	274,151	327
	Среднегорно-склоновый, буковых, буково-грабовых, смешанных широколиственных лесов	407,969	182
	Лесных и лугово-лесостепных плато	310,860	347
	Луговых и лугово-лесных плато	121,799	171
	Низкогорно-склоновый, дубовых и смешанных широколиственных лесов	163,494	169
	Среднегорно-склоновый, дубовых, сосновых и смешанных широколиственных лесов	271,625	139
	Котловин и эрозионного низкогорья, дубовых, смешанных широколиственных и сосновых лесов	114,689	212
Итого			<b>2223</b>
Низкогорный	Дубово-фисташковых, можжевельново-сосновых лесов и шибляковых зарослей	290,135	217
	Сосновых, дубовых и смешанных широколиственных лесов и шибляковых зарослей	465,287	905
Итого			<b>1122</b>

Полученные результаты позволяют судить о неравномерности распределения охраняемых видов растений в разных ландшафтных уровнях и поясах Крыма. Максимальные значения характерны для среднегорного ландшафтного уровня. Отмечены незначительные изменения встречаемости охраняемых видов в пределах ландшафтных поясов

данного уровня, что обусловлено сохранностью естественных ландшафтов и природоохранным режимом. Минимальные значения выявлены для поясов плакорного ландшафтного уровня, что связано с высокой антропогенной преобразованностью данной территории. Высокие значения встречаемости охраняемых видов отмечены для предгорного и низкогорного ландшафтного уровня. Своеобразие данных ландшафтных уровней состоит в том, что на их формирование оказывают переходные природные условия, что обуславливает биологическое и ландшафтное разнообразие. Однако, отмечена неравномерность распределения видов охраняемых растений, что связано с разной антропогенной нагрузкой на ландшафтные пояса.

На основе полученных данных о площади и количестве точек рассчитана плотность распределения находок охраняемых видов растений для каждого ландшафтного пояса (рис. 4).

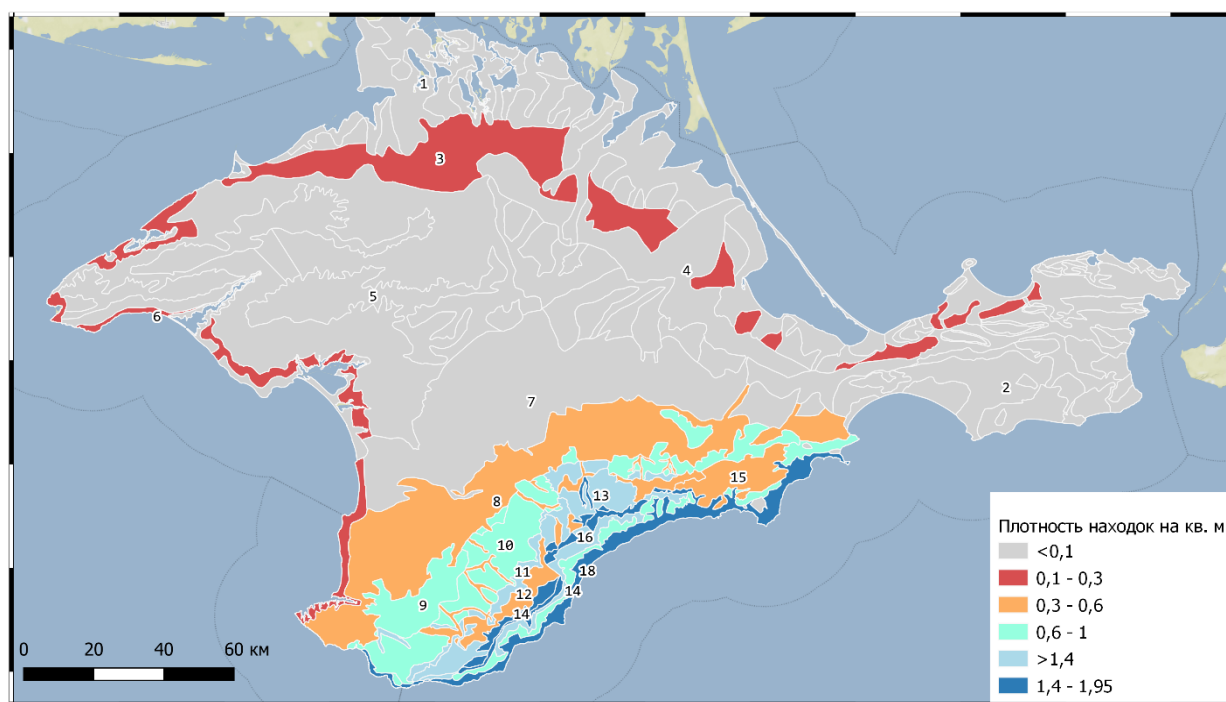


Рис. 4. Плотность находок охраняемых видов растений по ландшафтным поясам, единицы

Fig. 4. Density of finds of protected plant species in landscape belts, units

Полученные результаты разделены на десять классов, где значение от 0 до 0,01 отмечено белым цветом и обозначает наименьший коэффициент плотности, а значения от 1,8 до 1,95 отмечены красным цветом и обозначают наибольшую плотность распределения точек на площадь ландшафтного пояса.

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что охраняемые виды растений имеют крайне неравномерное распределение. Более того, их изучение также неравномерно, ограничивается, главным образом, маршрутными работами. Системное изучение флоры Крыма на основе регулярной сетки не завершено. Наибольшая плотность наблюдений приурочена к Южному берегу Крыма, горной и предгорной территории, а наименьшая плотность приходится на равнинную часть Крымского полуострова. Это связано, прежде всего, с пространственным покрытием данных и со значительной хозяйственной трансформацией степных ландшафтов. Так, равнинная часть Крыма практически полностью распахана и преобразована в сельскохозяйственные угодья.

## ВЫВОДЫ

1. Определено, что максимальное число находок отмечено для деревьев, особенно хвойных – можжевельника высокого (198) и можжевельника дельтовидного (286). Относительно много находок имеется для красивоцветущих растений – пион крымский (157), ятрышник пурпурный (161), ирис карликовый (161).
2. Показано, что высокая концентрация находок охраняемых видов растений отмечается в юго-западной части Крыма, на Южном берегу и в горной части полуострова. Отдельные локальные участки с охраняемыми видами растений отмечены вдоль морского побережья. Указанные особенности, по нашему мнению, отражают не только факторы произрастания того или иного вида растений, но и изученность территории. Степные и прибрежные участки требуют дополнительных исследований.
3. Наибольшее количество наблюдений охраняемых видов растений приходится на пояса среднегорного ландшафтного уровня, что обусловлено высокой сохранностью естественных ландшафтов и их аттрактивностью для исследований. Минимальные значения выявлены для поясов плакорного ландшафтного уровня, что связано с высокой антропогенной преобразованностью данной территории.
4. Выявлено, что около 100 видов охраняемых растений Крымского полуострова не отмечены в GBIF, что требует проведения специальных исследований. Максимальное число видов, для которых в использованных базах отсутствуют данные, являются очень редкими, причем произрастающими в отдалённых частях полуострова. Они часть представлены реликтами, стенотопными видами, единичными популяциями, что затрудняет их поиск.

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы для мониторинга охраняемых видов растений, территориального планирования, экологических изысканий на этапе проектирования новых жилых и инфраструктурных объектов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ (№ гос. регистрации 121030300149-0); при поддержке РФФИ, грант № 18-45-920045 р\_а.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This work was carried out within the framework of the government task in A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of the Russian Academy of Sciences (No. 121030300149-0)). The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, grant No 18-45-920045 p\_a.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ена А.В. Флора Крыма 9.2. Ботаника в современном мире. Труды XIV Съезда русского ботанического общества и конференции. Русское ботаническое общество; Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН; Дагестанский научный центр РАН; Горный ботанический сад ДНЦ РАН; Дагестанский государственный университет. Махачкала: Алеф. 2018. С. 125–127.
2. Ена А.В. Новые данные об эндемиках Крыма. Український ботанічний журнал. 2006. Т. 63. № 2. С. 143–152.
3. Красная книга Республики Крым. Растения, водоросли и грибы. Симферополь: АРИАЛ, 2015. 480 с.

4. Красная книга Севастополя. Калининград: «Издательский Дом «РОСТ-ДООАФК», 2018. 432 с.
5. Позаченюк Е.А. Ландшафтное разнообразие Крыма. Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. Т. 1 (67). №4. 2015. С. 37–50.
6. Современные ландшафты Крыма и сопредельных акваторий. Под ред. Е.А. Позаченюк. Симферополь: Бизнес-Информ, 2009. 672 с.
7. Фатерыга А.В., Ефимов П.Г., Свириг С.А. Орхидеи Крымского полуострова Симферополь: Ариал, 2019. 224 с.
8. Флора России на платформе INaturalist: большие данные о биоразнообразии большой страны. А.П. Серегин, Д.А. Бочков, Ю.В. Шнер и др. Журнал общей биологии. 2020. Т. 81. № 3. С. 223–233. DOI: 10.31857/S0044459620030070.
9. Flora of Russia on INaturalist: a dataset A.P. Seregin, D.A. Bochkov, J.V. Shner et al. Biodiversity Data Journal. 2020. V. 8. P. e59249. DOI: 10.3897/BDJ.8.e59249.

#### REFERENCES

1. *Ena A.V.* Flora of Crimea 9.2. Botany in the modern world. Proceedings of the XIV Congress of the Russian Botanical Society and Conference. Russian Botanical Society; Botanical Institute. V.L. Komarov RAS; Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; Mountain Botanical Garden, DSC RAS; Dagestan State University. Makhachkala: Alef. 2018. P. 125–127 (in Russian).
  2. *Ena A.V.* New data on the endemics of Crimea. Ukrainian botanic magazine. 2006. T. 63. No 2. P. 143–152.
  3. Red Book of the Republic of Crimea. Plants, algae and mushrooms. Simferopol: LLC «IT» ARIAL», 2015. 480 p. (in Russian).
  4. Red Book of Sevastopol. Kaliningrad: «Publishing House» ROST-DOAFK». 2018. 432 p. (in Russian).
  5. *Pozachenyuk E.A.* Landscape diversity of the Crimea. Scientific notes of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky. Geography. Geology. V. 1 (67). No 4. 2015. P. 37–50 (in Russian).
  6. Modern landscapes of Crimea and adjacent water areas. Ed. E.A. Pozachenyuk. Simferopol: Business-Inform, 2009. 672 p. (in Russian).
  7. *Fateryga A.V., Efimov P.G., Svirin S.A.* Orchids of the Crimean Peninsula. Simferopol: Arial, 2019. 224 p. (in Russian).
  8. Flora of Russia on the INaturalist platform: big data on the biodiversity of a large country. A.P. Seregin, D.A. Bochkov, Yu.V. Schner et al. Journal of General Biology. 2020. V. 81. No 3. P. 223–233. DOI: 10.31857 / S0044459620030070 (in Russian).
  9. Flora of Russia on INaturalist: a dataset. A.P. Seregin, D.A. Bochkov, J.V. Shner et al. Biodiversity Data Journal. 2020. V. 8. P. e59249. DOI: 10.3897/BDJ.8.e59249.
-

А.В. Коросов<sup>1</sup>, Н.М. Калинин<sup>2</sup>, Е.В. Теканова<sup>3</sup>,  
М.Т. Сярки<sup>4</sup>, К.В. Исакова<sup>5</sup>

## РАЗРАБОТКА ИНДЕКСОВ ТРОФНОСТИ ДЛЯ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА С ПОМОЩЬЮ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

### АННОТАЦИЯ

Использованы ГИС-технологии для изучения пространственного распределения зон трофности на акватории Онежского озера. Основой для построения карт послужили эмпирические данные, отражающие трофность вод, собранные в 1982–2020. Для оценки влияния изменений климата отдельно рассмотрели два периода – до и после 2000 г. В качестве показателей трофности использовали количество сапрофитного бактериопланктона, биомассу рачкового зоопланктона, концентрацию хлорофилла «а» и прозрачность воды. Все характеристики были приведены к нормальному распределению, а значения в отдельных точках интерполированы на всю акваторию озера, которую представили как сеть из 544 квадратов. Каждая ячейка акватории несла четыре значения изучаемых показателей. Для оценки трофности использована многомерная статистика (анализ главных компонент) и экспертная система (байесовский классификатор). Первая главная компонента может рассматриваться как интегральное значение трофности в данной части акватории. Метод классификации по формуле Байеса позволяет получить оценку вероятности отнесения каждой ячейки акватории к классу «высокая трофность» и «низкая трофность» и назначить порог значимости ( $p = 0,05$ ). Картограммы, построенные на основе обоих методов, в основных чертах совпали. Большая часть акватории Онежского озера характеризуется низким уровнем трофии. В северо-западной части, где на побережье расположены крупные города (Петрозаводск и Кондопога) в прошлом веке обнаруживается обширная область с высокой трофностью, связанная с активным антропогенным загрязнением онежских вод. В последние годы из-за падения производства трофность в этой зоне резко снизилась, за исключением Кондопожской губы, в которой наблюдается увеличение загрязнения воды в результате деятельности форелевых хозяйств.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Онежское озеро, ГИС, анализ главных компонент, трофность водоема, экспертная система.

---

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр "Карельский научный центр РАН" Институт водных проблем Севера Россия, Республика Карелия, 185030 г. Петрозаводск, просп. А. Невского, 50 *e-mail:* korosov@mail.ru

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр "Карельский научный центр РАН" Институт водных проблем Севера Россия, Республика Карелия, 185030 г. Петрозаводск, просп. А. Невского, 50 *e-mail:* cerioda@mail.ru

<sup>3</sup> Федеральный исследовательский центр "Карельский научный центр РАН" Институт водных проблем Севера Россия, Республика Карелия, 185030 г. Петрозаводск, просп. А. Невского, 50 *e-mail:* etekanova@mail.ru

<sup>4</sup> Федеральный исследовательский центр "Карельский научный центр РАН" Институт водных проблем Севера Россия, Республика Карелия, 185030 г. Петрозаводск, просп. А. Невского, 50 *e-mail:* msyarki@mail.ru

<sup>5</sup> Федеральный исследовательский центр "Карельский научный центр РАН" Институт водных проблем Севера Россия, Республика Карелия, 185030 г. Петрозаводск, просп. А. Невского, 50 *e-mail:* ksusha\_isakova@mail.ru



Andrey V. Korosov<sup>1</sup>, Nataliia M. Kalinkina<sup>2</sup>, Elena V. Tekanova<sup>3</sup>, Mariya T. Syarki<sup>4</sup>,  
Kseniya V. Isakova<sup>5</sup>

## DEVELOPMENT OF TROPHIC INDICES FOR LAKE ONEGO USING OF THE ECOLOGICAL INFORMATION SYSTEM

### ABSTRACT

GIS technologies were used to study the spatial distribution of zones with different trophic conditions in the water area of Lake Onego. Empirical data on the trophic conditions of waters sampled in 1982–2020 were as the basis for the map development. Two periods, before and after 2000, were considered separately to assess the impact of climate change. As indicators of trophic conditions, the number of saprophytic bacterioplankton, biomass of crustacean zooplankton, concentration of chlorophyll "a" and water transparency were used. All characteristics were converted to a normal distribution, and the values at individual points were interpolated for the entire water area of the lake, which was presented as a network of 544 squares. Each cell of the water area was characterized by four values of indicators. To assess trophic conditions, multivariate statistics (principal component analysis) and an expert system (Bayesian classifier) were used. The first principal component can be considered as the integral value of trophic conditions in a given part of the water area. The Bayesian classification method allows to get an estimate of the probability of classifying each cell in the water area as "high trophic conditions" and "low trophic conditions" and assign a significance threshold ( $p = 0.05$ ). The cartograms built on the basis of both methods are basically the same. Most of Lake Onego area is characterized as low trophic conditions. The vast area with high trophic conditions was identified in the northwestern part of Lake Onego where on the coast large cities are located (Petrozavodsk and Kondopoga), which is associated with active anthropogenic pollution in the last century. In recent years, due to industry recession, trophic conditions in this area has sharply decreased, with the exception of Kondopozhskaya Bay, where there is an increase in water pollution as a result of trout farms.

**KEY WORDS:** Lake Onego, GIS, principal component analysis, trophic conditions of water body, expert system.

### ВВЕДЕНИЕ

Онежское озеро относится к Великим озерам мира [*Ladoga, Onego...*, 2010] и обладает вековыми запасами чистой пресной воды (295 км<sup>3</sup>). В свете возрастающей проблемы дефицита пресной воды в мире это в значительной степени определяет социально-экономическую значимость Онежского озера для устойчивого развития северо-западного региона России. Как и большинство пресных водоемов, озеро испытывает негативное воздействие антропогенных факторов, что проявляется, главным образом, в возрастании уровня трофии. Это определяет необходимость разработки современных подходов для

<sup>1</sup> Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences Northern Water Problems Institute, Republic of Karelia, 185030 Petrozavodsk, prosp. A. Nevsky, 50 *e-mail: korosov@mail.ru*

<sup>2</sup> Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences Northern Water Problems Institute, Republic of Karelia, 185030 Petrozavodsk, prosp. A. Nevsky, 50 *e-mail: cerioda@mail.ru*

<sup>3</sup> Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences Northern Water Problems Institute, Republic of Karelia, 185030 Petrozavodsk, prosp. A. Nevsky, 50 *e-mail: etekanova@mail.ru*

<sup>4</sup> Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences Northern Water Problems Institute, Republic of Karelia, 185030 Petrozavodsk, prosp. A. Nevsky, 50 *e-mail: msyarki@mail.ru*

<sup>5</sup> Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences Northern Water Problems Institute, Republic of Karelia, 185030 Petrozavodsk, prosp. A. Nevsky, 50 *e-mail: ksusha\_isakova@mail.ru*

контроля за состоянием его экосистемы, дающих возможность для оперативного анализа происходящих в ней изменений.

На протяжении нескольких лет в лаборатории гидробиологии Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН разрабатывается экологическая информационная система Онежского озера, включающая в себя базы экологических данных, геоинформационную систему, экспертную систему [Калинкина и др., 2018]. С ее помощью исследуются процессы, протекающие в озере. В настоящей работе представлены возможности практического использования геоинформационной системы по оценке экологического состояния Онежского озера и его изменению в последние 30 лет.

Вследствие изрезанности береговой линии и больших перепадов глубин Онежское озеро очень неоднородно в гидрологическом и гидробиологическом отношении [Онежское озеро. Атлас, 2010]. Отдельные части акватории сильно различаются по уровню продуктивности – от среднепродуктивных (Кондопожская губа) до низкопродуктивных (открытый плес) [Экосистема..., 1990; Онежское озеро..., 1999; Крупнейшие..., 2015]. Помимо топографических факторов на продуктивность озерной экосистемы влияют и другие причины. В 1980-е годы велико было воздействие на экосистему Онежского озера антропогенных факторов, главным образом, загрязнение промышленными и коммунальными сточными водами [Тимакова и др., 2014]. В настоящее время появился новый антропогенный фактор, влияющий на экосистему озера – отходы товарного форелеводства [Крупнейшие..., 2015]. Из природных факторов наиболее интересен новый – потепление климата, достаточно серьезно проявляющийся в Карелии в последние 20 лет [Диагноз..., 2020]. Теплые зимы приводят к росту объема зимнего стока речных вод, насыщенных гумусовыми веществами, поступающих с незамерзающих болот, и тем самым – к «браунификации», т.е., к увеличению цветности воды и содержания в ней растворенного органического углерода, а также росту концентраций сопутствующих, небезвредных веществ [Kalinkina et al., 2020]. Для изучения влияния этих факторов на уровень трофии Онежского озера были сформированы два блока данных за периоды 1982–2000 гг. и 2001–2020 гг., которые были проанализированы отдельно.

Об изменении трофности озерной экосистемы можно судить по многим показателям [Китаев, 1984; Алимов, 1989; Менишуткин и др., 2009а; 2009б; Алимов и др., 2013]. Выбор в настоящей работе критериев оценки трофии Онежского озера (сапрофитные бактерии, хлорофилл «а», биомасса зоопланктона, прозрачность воды) был определен тем, что на фоне природной олиготрофии водоема даже небольшое повышение концентраций биогенных веществ и доступного в качестве трофического ресурса органического вещества в воде Онежского озера вызовет быструю реакцию сапрофитного бактериопланктона, фитопланктона, зоопланктона и скажется на прозрачности воды. Используемая нами процедура объединяет эти показатели в интегральную оценку, усиливая диагностический эффект для каждой части акватории Онежского озера.

Цель исследований состояла в разработке индексов трофности для Онежского озера и оценке многолетних изменений трофического состояния разных районов водоема.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для разработки индексов трофности Онежского озера были использованы традиционно применяемые для оценки трофности водных экосистем показатели – хлорофилл «а» и биомасса зоопланктона [Винберг, 1960; Бульон, 1983; Китаев, 1984; Андроникова, 1996; Carlson, 1977]. Кроме того, для оценки трофности различных районов озера были применены такие показатели как количество сапрофитных бактерий и прозрачность воды, предложенные О.П. Оксийюк и соавторами (1993) в комплексной экологической классификации качества поверхностных вод суши в качестве трофо-сапробиологических характе-

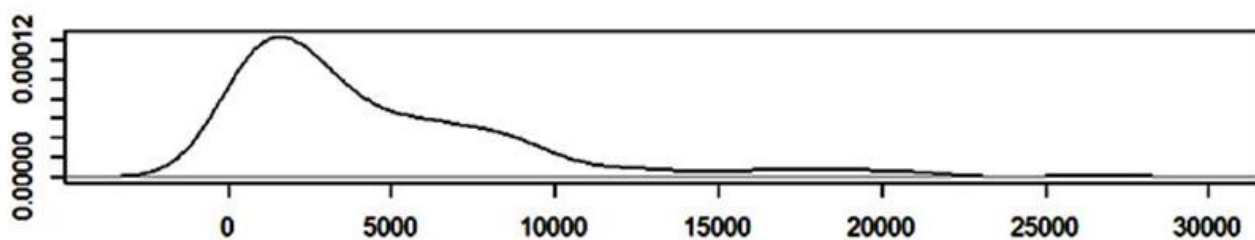
ристик состояния водной экосистемы. Выборки по этим показателям извлечены из зарегистрированных баз данных Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр РАН».

Использованы следующие слои ГИС: слой области акватории (береговой линии), четыре слоя сети точек отбора проб разных показателей, слой сети прямоугольных выделов для экстраполяции данных. Существенными моментами обработки количественной информации выступают три этапа: извлечение выборок из баз данных и предварительная их подготовка для обработки, экстраполяция локальных данных на всю акваторию водоема, анализ данных методами многомерной статистики и пространственная экстраполяция результатов, применение элементов экспертной системы: расчет индексов и их пространственная экстраполяция на акваторию Онежского озера.

#### *Формирование выборок данных*

Для унификации показателей, которые подвержены сезонной изменчивости, в анализ были вовлечены пробы из поверхностного слоя, отобранные в летний период (июль–август). В это время для большинства водных сообществ характерны максимальные показатели численности и биомассы, поэтому такие оценки оказываются наиболее точными. Единицы измерений были следующие: численность сапрофитного бактериопланктона – КОЕ/мл, концентрация хлорофилла «а» – мкг/л, прозрачность – м, биомасса зоопланктона – мг/куб. м.

Предварительный анализ показал (рис. 1), что все показатели, кроме прозрачности, имеют логнормальное распределение, поэтому они были предварительно прологарифмированы и в такой форме включены в анализ.



*Рис. 1. Правосторонняя асимметрия распределения биомассы зоопланктона; по оси абсцисс – биомасса, мг/куб.м, по оси ординат – относительная частота*

*Fig. 1. Right-sided asymmetry of the distribution of zooplankton biomass; on the abscissa axis – biomass, mg / cubic meter, on the ordinate axis – relative frequency*

Ограничение периода отбора проб существенно сказалось на количестве данных, а также на числе точек отбора проб. Если всего на акватории озера за весь период исследований пробы многократно отбирались в 319 точках, то для летнего периода их число сократилось в некоторых случаях до 22 (табл. 1, рис. 2).

Табл. 1. Число проб / число точек отбора проб для разных показателей  
 Table 1. Number of samples / number of sampling points for different indicators

Период	Численность бактериопланктона	Хлорофилл «а»	Прозрачность	Биомасса зоопланктона
До 2000 г.	131 / 53	94 / 48	53 / 32	178 / 71
После 2000 г.	272 / 84	324 / 84	135 / 41	61 / 22

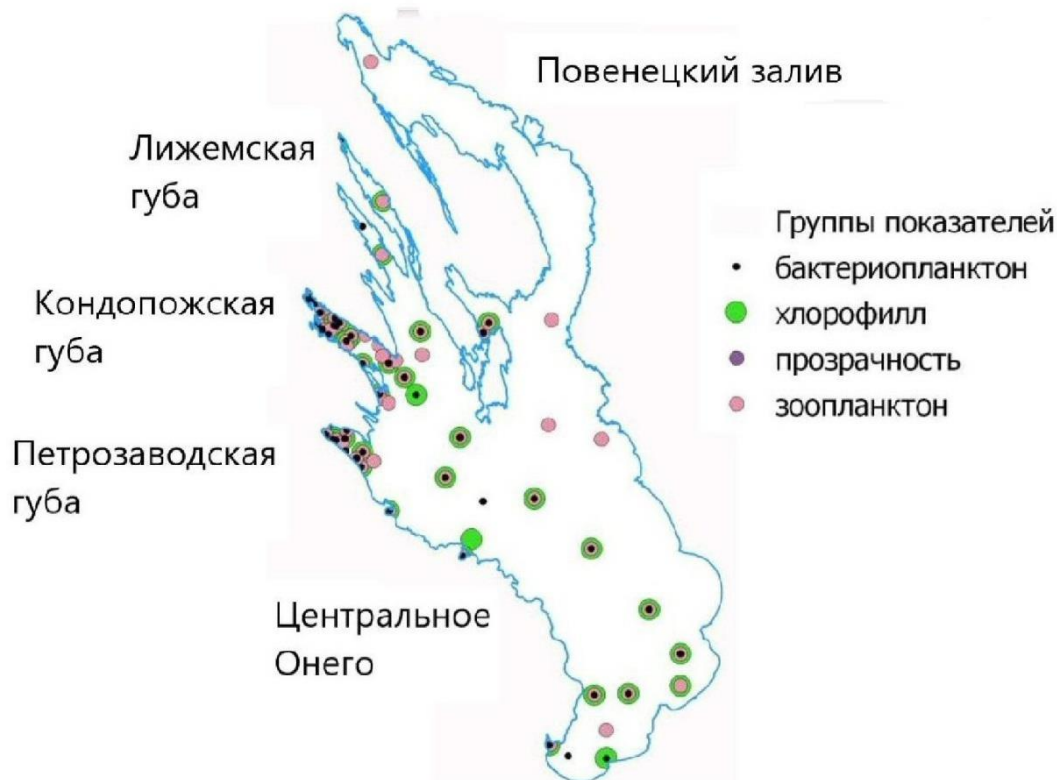


Рис. 2. Точки отбора проб для оценки выбранных показателей  
 Fig. 2. Sampling points for evaluating of selected indicators

Для изучения пространственного распределения показателей по акватории Онежского озера, необходимо было получить один слой данных (в терминах ГИС «слой» – это карта, отражающая расположение в пространстве изучаемых объектов), т.е. для каждой станции данные необходимо было обобщить по серии лет. Как можно судить по таблице 1, в среднем на одну станцию приходилось по 3–4 пробы. В реальности число повторных проб варьировало от 1 до 17, поэтому в качестве обобщающего показателя приняли медиану, как реальное, наиболее характерное значение, имеющее смысл и при  $n = 1$ .

Поскольку отбор проб в разные годы выполнялся разными исследователями с различными целями и в разных точках, в базе данных оказалось небольшое число точек, которые имеют оценки всех четырех изучаемых показателей. Для периода до 2000 г. их 19, для периода после 2000 г. – 21 (это менее половины от имеющихся точек). Эти выборки далее использовались для проведения анализа зависимостей между показателями.

В то же время, несмотря на географическое несовпадение точек отбора проб при изучении разных показателей, зачастую они брались в сходных зонах и вполне могут быть использованы для совместного анализа, если использовать процедуру пространственной интерполяции показателей, полученных в одной точке, на соседнюю акваторию и на соседние точки, в которых отбирались пробы других показателей. В этом случае появляется возможность «совместить» точки отбора проб и увеличить выборку для анализа. В качестве основы для совмещения ближних точек отбора проб была выбрана квадратная ячейка размером  $5 \times 5$  км. Процедура интерполяции имеющихся показателей на всю акваторию позволяет получить обширные искусственные выборки этих показателей для тех частей акваторий, в которых вовсе не проводился отбор проб.

Интерполяция показателей выполняется на полный охват (экстент) слоя отбора проб, который имеет прямоугольную форму, общее число ячеек оказалось равно 1470, часть из них, естественно, выходит за границы береговой линии и исключается из дальнейшего рассмотрения; остается 544 ячейки, для которых и проводился анализ.

Таким образом, основой для анализа выступали два типа выборок. Во-первых, это две небольшие выборки точек отбора проб, для которых имеются все четыре изучаемых показателя: одна выборка для периода до 2000 г. ( $n = 21$ ), вторая выборка для периода после 2000 г. ( $n = 19$ ). Во-вторых, две обширные выборки (для двух периодов) с четырьмя значениями интерполированных показателей для 544 ячеек, покрывающих всю акваторию Онежского озера.

Для оправданной интерполяции необходимо соблюдать два условия – репрезентативность данных в точке отбора проб и относительную однородность лимнологических характеристик каждой ячейки акватории, на которую выполняется интерполяция.

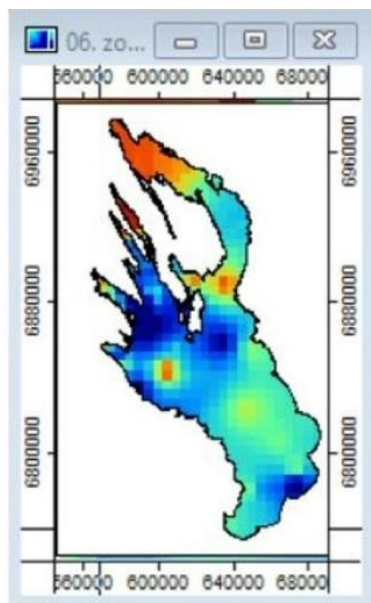
Следует отметить, что изучаемые нами показатели характеризовали поверхностный слой воды высотой один метр, характеризующийся наибольшим обилием планктона в условиях холодноводного Онежского озера. С этих позиций все ячейки относительно однородны, что позволяет выполнять для них интерполяцию показателей из соседних ячеек. В нашем случае была выбрана процедура Multilevel B-Spline Interpolation, которая дает гибкое, но полное пространственное распространение показателя (рис. 3). В дальнейшем на основе интерполированных значений для каждой ячейки акватории были рассчитаны интегральные показатели трофности.

Два участка Онежского озера (вершина Лижемской губы и большая часть Повенецкого залива) имели очень малое число точек отбора проб, так как регистрировались не все изучаемые показатели; эти ячейки были исключены из окончательных иллюстраций и на диаграммах обозначены как зона «нет данных».

### *Программные средства*

Использованы следующие программные средства. Для организации баз данных – MS Access, MS Excel; для ведения ГИС – QGIS (<https://qgis.org/ru/site/>), для работы с растрами – SAGA (<http://www.saga-gis.org/>), для статистических расчетов – пакет R (R Core Team, 2012<sup>1</sup>). Метод главных компонент и метод диагностических баллов применялся по известным алгоритмам [Коросов, 2007].

<sup>1</sup> R Core Team (2012). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, Электронный ресурс: <http://www.R-project.org/> (дата обращения 18.02.2021).



*Рис. 3. Интерполяция показателя «численность бактериопланктона» с помощью процедуры Multilevel B-Spline Interpolation; по осям даны координаты в системе WGS84 / UTM (zone 36N)*

*Fig. 3. The interpolation of the indicator "bacterioplankton number" using the Multilevel B-Spline Interpolation procedure; coordinates are given along the axes in the WGS84 / UTM system (zone 36N)*

#### *Количественный анализ (анализ главных компонент)*

Все имеющиеся в нашем распоряжении данные выражены в форме чисел и могут быть обработаны количественными методами. Смысл анализа состоит в поиске сопряженного изменения всех четырех показателей на акватории озера, которое может быть интерпретировано как изменение трофности озерных вод. Таким образом, стоит задача дифференциации разных частей акватории по степени выраженности изученных свойств. Если есть возможность придать изучаемым объектам (частям акватории) определенный статус, т.е. априорно разделить их множество на определенные классы, уместно использовать дискриминантный анализ. Когда же изначально дискретные классы задать нельзя, для решения задачи классификации подходит анализ главных компонент. Его суть состоит в том, чтобы на основе имеющихся корреляций между изучаемыми переменными сформировать новые искусственные характеристики, линейные индексы с участием всех переменных, которые выражали бы направления сопряженной изменчивости всех исходных признаков. Для четырех переменных первый индекс примет вид:

$$PC1 = a \times x1 + b \times x2 + c \times x3 + d \times x4;$$

где коэффициенты  $a, b, c, d$  – «факторные нагрузки», которые выражают степень корреляции между исходными переменными.

Сами же индексы («главные компоненты»), выражают некие факторы, заставляющие изучаемые переменные сопряженно варьировать. Зачастую содержательную интерпретацию имеет один первый индекс (первая главная компонента).

Существенным моментом является разделение совокупности исходных данных на две группы. Одна группа образована данными по всем четырем показателям (бактериопланктон, хлорофилл «а», прозрачность, зоопланктон), собранными на одних и тех же станциях. Их объем составляет 19 записей для периода до 2000 г. и 21 запись – для перио-

да после 2000 г. Эти материалы использованы для анализа связей между переменными. Вторая группа представляет совокупность из 544 значений, собранных по всей акватории озера из центров ячеек пространственной интерполяции показателей. Эти данные использованы для создания карты пространственного распределения первой главной компоненты как интегральной характеристики разных частей акватории.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### *Изучение зависимостей*

Раскрыть содержание главных компонент еще до выполнения анализа позволяет изучение корреляций между переменными (табл. 2). Прозрачность имеет высокую отрицательную корреляцию со всеми прочими компонентами, которые связаны положительными связями, но разной силы. Наиболее отчетливо и сильно коррелирует пара хлорофилл-зоопланктон, бактериопланктон связан с ними менее определенно в разные периоды.

*Табл. 2. Коэффициенты корреляции между изучаемыми показателями за период 1982–2000 гг. (верхняя правая часть) и период 2000–2020 гг. (нижняя левая часть)*

*Table 2. Correlation coefficients between the studied indicators for the period 1982–2000 (upper right part) and the period 2000–2020 (lower left part)*

Показатели	Численность бактериопланктона	Хлорофилл «а»	Прозрачность	Биомасса зоопланктона
Численность бактериопланктона	1,00	0,15	<b>-0,47</b>	<b>0,45</b>
Хлорофилл «а»	0,04	1,00	<b>-0,55</b>	0,39
Прозрачность	-0,25	-0,31	1,00	<b>-0,84</b>
Биомасса зоопланктона	0,05	<b>0,49</b>	<b>-0,53</b>	1,00

Примечание:

жирным шрифтом выделены достоверные ( $p < 0,05$ ) коэффициенты корреляции.

Анализ главных компонент также в качестве лидирующей взаимно коррелирующей группы выделил показатели прозрачности, зоопланктона и хлорофилла, а бактериопланктон обрел более высокую нагрузку во второй компоненте (табл. 3). Структура связей между показателями сохраняется примерно одинаковой для обоих изучаемых периодов (рис. 4). Прозрачность противопоставлена зоопланктону, хлорофиллу и бактериопланктону, который, однако, несколько отстоит от прямого противостояния. Распределение дисперсий главных компонент похоже: первая забирает примерно 45 % общей дисперсии, вторая – 30 %.

На основании найденных оценок факторных нагрузок были рассчитаны значения главных компонент для всех 544 ячеек акватории Онежского озера (рис. 5). Картина пространственного распределения значений первых компонент в разные периоды, во-первых, выявляет общее – низкий уровень рассматриваемых показателей на большей части района Центральное Онего. С другой стороны, картограммы демонстрируют отличие в распределениях показателей в сравниваемые периоды времени. В прошлом веке в западной части озера изучаемые характеристики имели повышенные значения, в целом, водоем можно было охарактеризовать как более продуктивный, чем он стал в XXI веке.

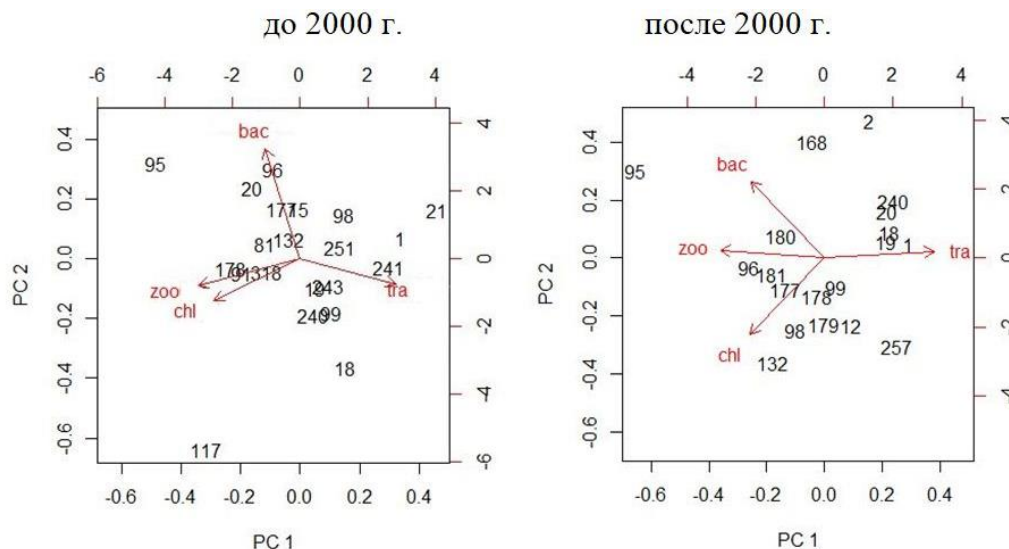


Рис. 4. Биplot по результатам анализа главных компонент (PC1 - первая главная компонента; PC2 - вторая главная компонента; bac – численность бактериопланктона, chl – хлорофилл «а», tra – прозрачность воды, zoo – биомасса зоопланктона)

Fig. 4. Biplot by the results of principal component analysis (PC1 – the first principal component; PC2 is the second principal component; bac - bacterioplankton number, chl - chlorophyll «a», tra - water transparency, zoo - zooplankton biomass)

Табл. 3. Факторные нагрузки в первой и второй главных компонентах для показателей в изучаемые периоды

Table 3. Factor loadings in the first and second principal components for indicators in the studied periods

Показатель	1982–2000 гг.		2000–2020 гг.	
	Первая компонента	Вторая компонента	Первая компонента	Вторая компонента
Численность бактериопланктона	-0,21	0,89	-0,40	0,71
Хлорофилл «а»	-0,51	-0,34	-0,41	-0,70
Прозрачность	0,57	-0,21	0,60	-0,27
Биомасса зоопланктона	-0,61	-0,22	-0,57	0,53

Очевидная причина – высокая антропогенная нагрузка, связанная с работой промышленных предприятий Петрозаводска и Кондопоги, коммунальные сточные воды этих городов, стоки удобрений с сельскохозяйственных угодий. В конце 20 века произошел спад промышленного производства, деградация сельского хозяйства, улучшение очистки сточных вод, что привело к существенному снижению антропогенной нагрузки и, как следствие, к снижению уровня изучаемых показателей, росту прозрачности воды. Однако в локальных областях – в Петрозаводской и Кондопожской губе экологическая ситуация не улучшилась, а напротив, усугубилась. На картограмме (рис. 5) отчетливо видно повышение значений первой компоненты в 2000–2020 гг., что отражает совместный рост показателей зоопланктона и хлорофилла «а» и снижение прозрачности воды. При внешней наглядности результатов компонентного анализа, за ней скрываются три содержательных



аспекта, усложняющих интерпретацию картограмм. Во-первых, значения компонент носят относительный характер и поэтому их нельзя сопоставлять напрямую на картограммах для разных периодов. Высокие значения компоненты за первый период времени могут соответствовать высоким значениям показателей, а такие же значения для второго периода – средним уровням показателей; компоненты отображают только относительный размах значений признаков.

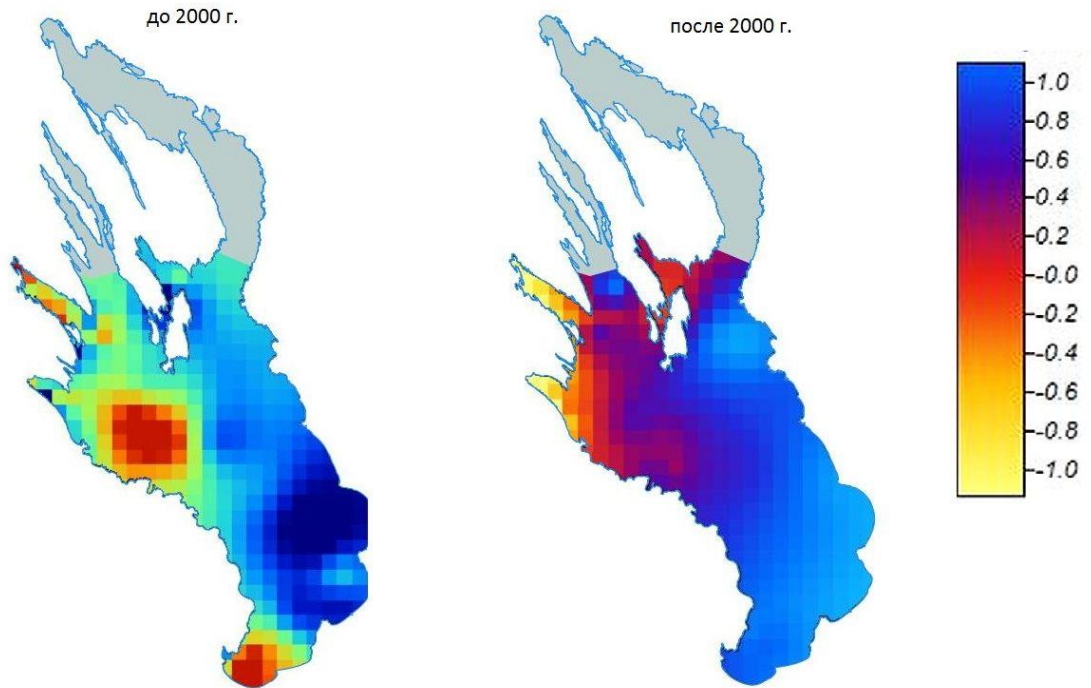


Рис. 5. Картограммы распределения значений первой главной компоненты по акватории Онежского озера (серая зона – нет данных)

Fig. 5. Cartograms of the first principle component distribution over Lake Onega area (gray zone – no data)

Во-вторых, полученные компоненты дают основания говорить о трендах, но они не позволяют непосредственно с картограммы получить критические значения; требуется специальное исследование таких уровней. Третья проблема состоит в том, что главная компонента рассчитывается, исходя из степени корреляции между исходными показателями, основанной на метрике взаимной сопряженности и сильно зависящей от состава конкретной выборки. В разных выборках направления изменчивости (и факторные нагрузки) неизбежно отличаются. Следовательно, казалось бы, однотипные главные компоненты все же имеют разное содержание для двух изученных периодов времени.

Таким образом, при всей наглядности анализ главных компонент дает довольно неопределенные результаты. Необходимо так унифицировать технологию, чтобы: а) для сравниваемых объектов был введен общий критерий их «трофности»; б) метрика учитывала бы не количественную зависимость между переменными, но соответствие их значений априорным «нормальным» и «отклоняющимся» значениям. В этом случае объекты (картограммы) могут непосредственно сопоставляться для выявления отличий и приводить к однозначным выводам.

Названными свойствами обладает экспертная система, привлекающая в свой аппарат внешние (часто неформализованные) идеи для формирования критериев оценки «трофности» объекта исследований по каждому из изучаемых компонентов.

### Экспертная система (метод диагностических баллов)

Цель экспертной системы состоит в вовлечении вербальных, неформализованных, качественных, размытых, оценочных суждений экспертов в строгий количественный, формализованный анализ всей имеющейся информации. В одних случаях суждения экспертов могут носить строгий дискретный характер, когда совокупность изучаемых объектов можно априорно разбить на два или несколько классов и затем выявлять их специфику с помощью строгих многомерных методов (таких как дискриминантный, канонический анализ и пр.). В других случаях эксперты могут указать только некие границы значений изучаемых характеристик, которые соответствуют тому или иному статусу объектов исследования. Зачастую эти границы для разных классов объектов перекрываются, и в зону неопределенности попадает немало объектов неопределенного статуса. Именно такова ситуация с распределением вод по классам трофности.

Выходом из этой ситуации является исследование нескольких показателей, каждый из которых в состоянии вносить свой вклад в уточнение статуса данного объекта. Среди технологий объективизации вербальных знаний следует назвать метод нечеткой логики, логистической регрессии и байесовскую классификацию [Менишуткин и др., 2009а, 2009б]. В нашей работе мы использовали метод, основанный на классификаторе Байеса в форме диагностических таблиц, применяемых в медицине [Гублер, Генкин, 1973]. Цель анализа состоит в оценке трофности всех частей акватории Онежского озера. Поскольку по общепринятым шкалам [Винберг, 1960; Кумаев, 1984; Carlson, 1977], экосистема Онежского озера соответствует низкому уровню трофии (олиготрофная, а в отдельных частях – мезотрофная), то в этих пределах были назначены два класса величин, достаточных для оценочного выявления и динамики «горячих» точек на акватории Онежского озера. Первый класс был назван «низкая трофность», второй класс – «высокая трофность» именно для условий Онежского озера.

Смысл метода состоит в том, чтобы на основе имеющейся априорной информации (в форме распределения исходных признаков) определить сначала вероятность для каждого  $i$ -го интервала распределения принадлежности к первому ( $p_{1i}$ ) или второму ( $p_{2i}$ ) заданному классу, а затем определить шансы значения из данного интервала быть отнесенным к первому или второму классу. Шансы определяются как отношения вероятностей. Для удобства использования шансы переводят в форму десятичных логарифмов и умножают на 5; тогда они приобретают целочисленные значения и становятся «диагностическими баллами»:

$$d_i = 5 \times \lg (p_{1i} / p_{2i});$$

где  $d_i$  – диагностический балл;  
 $p_{1i}$  – вероятность принадлежности к первому классу;  
 $p_{2i}$  – вероятность принадлежности ко второму классу.

Диагностика соответствия объекта (в нашем случае – это ячейки акватории размером  $5 \times 5$  км) первому или второму классу трофности состоит в последовательном определении диагностического балла по каждому показателю и суммировании этих баллов для каждого объекта.

Существенным моментом оказывается возможность точно задать уровень значимости соответствия конкретного объекта данному классу. Приняв уровень значимости, равным 0.05, задаем вероятность отклонить гипотезу «объект не принадлежит к классу 1» как 0.95 и вероятность принять гипотезу «объект принадлежит к классу 1» как 0,05 и находим критический диагностический балл:

$$d_{кр1} = 5 * \lg(0,95 / 0,55) = 5 * 19 = 6,4 \approx 6.$$

Если сумма четырех диагностических баллов для каждого показателя превышает этот порог, значит, с вероятностью  $p = 0,95$  объект относится к классу 1. Альтернативная гипотеза о принадлежности объекта к классу 2 дает диагностический балл, равный  $-6$ . Значения  $d_{кр}$  между  $-6$  и  $6$  не позволяют диагностировать состояние объекта, хотя и могут характеризовать степень близости объекта к тому или иному классу.

#### *Критерии классов трофности*

Выявленные предыдущими исследованиями участки озера с повышенной биогенной нагрузкой [Экосистема..., 1990; Онежское..., 1999; Крупнейшие..., 2015], а также обобщение собственных результатов позволили нам разработать для условий Онежского озера количественные критерии отнесения его вод к классу низкой трофности или классу высокой трофности (табл. 4).

*Табл. 4. Количественные критерии низкой и высокой трофности Онежского озера по изучаемым показателям*

*Table 4. Quantitative criteria of low and high trophic conditions of Lake Onego according to the studied indicators*

Показатель	Категория	
	Низкая трофность	Высокая трофность
Численность бактериопланктона, КОЕ/мл	от 0 до 800	от 300 до 24000
Хлорофилл «а», мкг/л	от 0 до 8	от 4,1 до 25
Прозрачность воды, м	от 2,5 до 6	от 1 до 3.5
Биомасса зоопланктона, мг/куб. м	от 0 до 1000	от 200 и выше

Поскольку границы этих классов пересекаются, распределения изучаемых показателей имеют некоторую зону трансгрессии (рис. 6). Тем не менее, в этих зонах вероятности принадлежности к первому или второму классу трофности различаются. Эти различия вероятностей, выраженные через диагностические баллы (табл. 5), даже в пределах зон трансгрессии также могут способствовать правильной классификации проб из конкретных частей акватории (рис. 6).

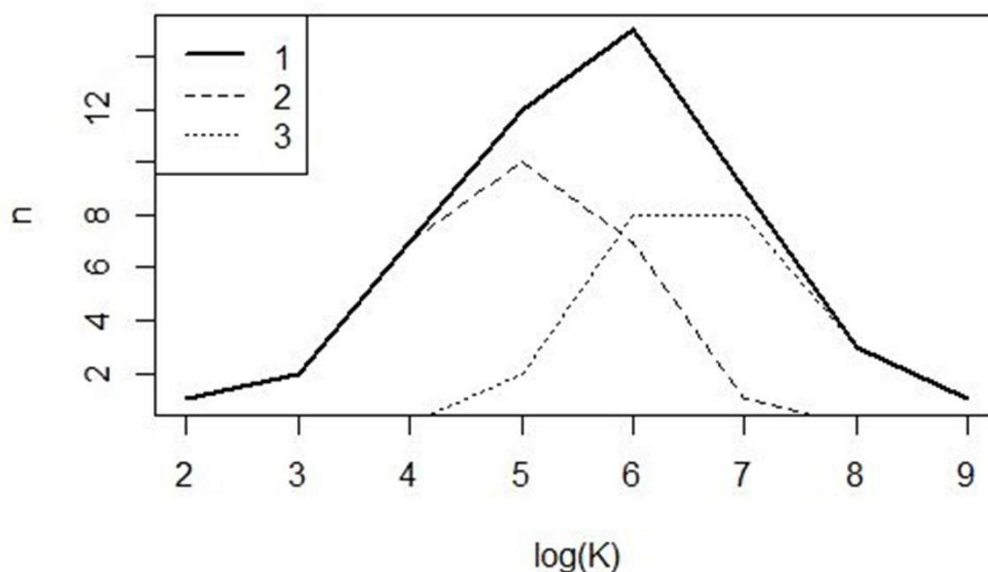


Рис. 6. Подразделение общего распределения численности бактериопланктона (1) на два класса, соответствующих низкой (2) и высокой (3) трофности Онежского озера; по оси абсцисс – логарифмированные значения численности бактериопланктона,  $\log(K)$ , по оси ординат – частота

Fig. 6. Division of the total distribution of bacterioplankton number (1) into two classes corresponding to low (2) and high (3) trophic conditions of Lake Onego; on the abscissa axis – logarithmic values of bacterioplankton number,  $\log(K)$ , on the ordinate axis – frequency

Табл. 5. Диагностические баллы для класса «низкая трофность», назначенные для разных значений четырех показателей (заданные логарифмами показатели)

Table 5. Diagnostic points for the "low trophic conditions" class, assigned for different values of the four indicators (logarithmic indicators)

Численность бактериопланктона	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
балл	10	10	6	9	3	-1	-5	-13	-13	-13
Хлорофилл «а»	-1,5	-1,0	-0,5	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
балл	14	14	14	14	14	3	-3	-4	-12	-12
Прозрачность	-1,5	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
балл	-13	-13	-13	-5	4	13	13	13	13	13
Биомасса зоопланктона	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
балл	13	13	13	13	4	-1	-4	-13	-13	-13

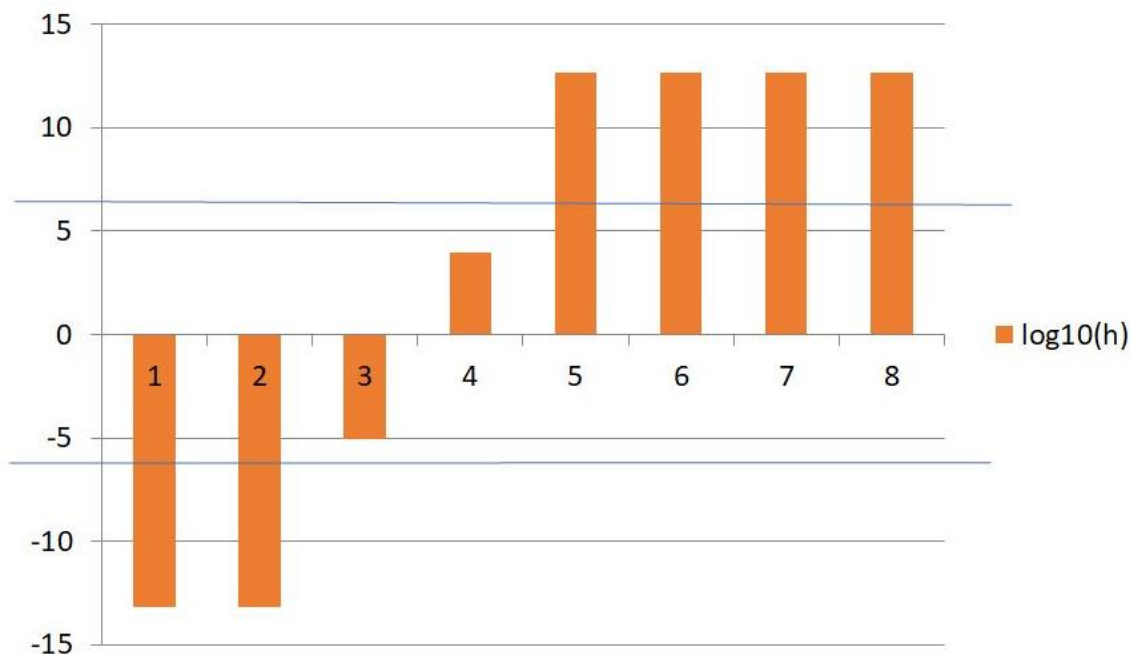


Рис. 7. Баллы класса «низкая трофность» для показателя прозрачности, даны логарифмы  $lg(h)$ ; горизонтальные линии – критические значения баллов 6 и  $-6$  ( $p = 0,05$ )

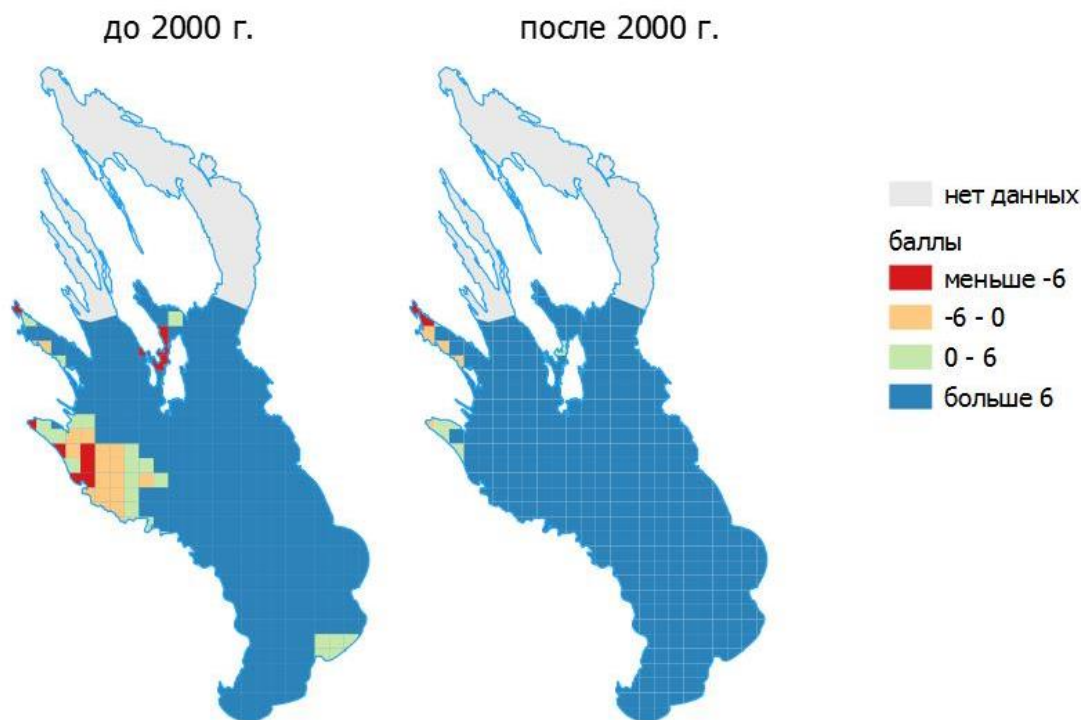
Fig. 7. Points of the "low trophic conditions" class for the transparency indicator, logarithms  $lg(h)$  are given; the horizontal lines are the critical values of points 6 and  $-6$  ( $p = 0,05$ )

#### Классификация ячеек акватории по трофности

Определение балла трофности для каждой ячейки по каждому показателю отдельно и в сумме привело к построению картограммы распределения зон трофности Онежского озера (рис. 8).

Полученная картина во многом аналогична той, что дает анализ главных компонент. Основная часть района Центральное Онего характеризуется низкой трофностью воды. В то же время хорошо видно, что в Кондопожской губе расширилась площадь с повышенной трофностью и увеличились переходные зоны между первым и вторым классом трофности вдоль западного берега Кондопожской губы. Воды Петрозаводской губы по-прежнему характеризуются более высокой трофностью, чем район Центральное Онего.

В отличие от анализа главных компонент, картограммы, построенные на основании метода диагностических баллов, непосредственно передают оценки состояния среды по критериям, заранее введенным в анализ. Эти картограммы проще, понятнее и отражают статистически обоснованное подразделение объектов. Тем не менее, результат такого построения непосредственно определяется принятыми пороговыми значениями, и любое изменение критических порогов неизбежно изменит результирующую картину. В нашем исследовании критерии разрабатывались и принимались один раз задолго до построения первичных картограмм, что и определило результат. Таким образом, анализ данных в рамках экспертной системы предъявляет особенно высокие требования к критическим границам, заостряет на них внимание исследователей. Безусловно, эти значения могут быть уточнены, и в будущем, вероятно, претерпят изменения (или дробление) и позволят построить более точные картограммы трофности онежских вод.



*Рис. 8. Картограммы распределения зон трофности в Онежском озере: высокая трофность (баллы меньше 6), низкая трофность (баллы больше 6), промежуточные (баллы от -6 до 6)*

*Fig. 8. Cartograms of the distribution of trophic conditions zones in Lake Onego: high trophic conditions (points less than 6), low trophic conditions (points more than 6), intermediate (points between -6 to 6)*

## ВЫВОДЫ

Для условий в целом низкого уровня трофии Онежского озера разработана более детальная классификация отдельных частей его акватории по уровню трофности. Применялись методы многомерного статистического анализа (анализ главных компонент) и методы классификации на основе формулы Байеса (диагностические баллы). Показано, что анализ главных компонент эффективно позволяет выполнять классификацию частей акватории, однако затруднено содержательное сравнение полученных картограмм. Примененный метод диагностических баллов позволил дать картину, доступную непосредственной интерпретации. По результатам классификации ячеек акватории Онежского озера были выделены зоны низкой трофности, высокой трофности, а также переходные зоны. Показано, что воды Петрозаводской и Кондопожской губ не могут быть отнесены к акватории с низкой трофностью, к которой отнесен практически весь район Центральное Онего. Сравнение двух двадцатилетних периодов – до и после 2000 г. – показывает, что трофность вод района Центральное Онего в целом стала ниже, а в Кондопожской губы – возросла.

Выполненное исследование вскрыло ряд вопросов, требующих своего решения и развития. В их числе – реорганизация баз данных, их унификация и расширение, тщательный выбор мест отбора проб с целью повышения репрезентативности собираемых данных, планирование специальных исследований по установлению критических границ для классификации вод (озерных биоценозов) по трофности, расширение спектра диагностических показателей.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was conducted in accordance with a state assignment given to the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (Northern Water Problems Institute, KRC, RAS).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алимов А.Ф.* Введение в продукционную гидробиологию. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 152 с.
2. *Алимов А.Ф., Богатов В.В., Голубков С.М.* Продукционная гидробиология. СПб.: Наука, 2013. 343 с.
3. *Андроникова И.Н.* Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разных трофических типов. СПб.: Наука, 1996. 189 с.
4. *Бульон В.В.* Зависимость рыбопродуктивности водоемов от первичной продукции. Методы изучения состояния кормовой базы рыбохозяйственных водоемов. Сборник научных трудов. Вып. 196. Л.: ГосНИОРХ, 1983. С. 3–11.
5. *Винберг Г.Г.* Первичная продукция водоемов. Минск: АН БССР, 1960. 329 с.
6. *Гублер Е.В., Генкин А.А.* Применение непараметрических критериев статистики в медико-биологических исследованиях. Л.: Медицина, 1973. 144 с.
7. *Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России.* Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 255 с.
8. *Калинкина Н.М., Коросов А.В., Белкина Н.А., Теканова Е.В., Сярки М.Т., Коросов А.А.* Географическая информационная система «Биоресурсы Онежского озера». ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. Т. 24. Ч. 2. С. 362–370. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-362-370.
9. *Китаев С.П.* Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.
10. *Коросов А.В.* Специальные методы биометрии. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. 364 с.
11. Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. 375 с.
12. *Мениуткин В.В., Филатов Н.Н., Потахин М.С.* Экспертная система «Озера Карелии». 1. Порядковые и номинальные характеристики озер. Водные ресурсы, 2009а. Т. 36. № 2. С. 160–171.
13. *Мениуткин В.В., Филатов Н.Н., Потахин М.С.* Экспертная система «Озера Карелии». 2. Классификация озер. Водные ресурсы, 2009б. Т. 36. № 3. С. 300–311.
14. *Оксиюк О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П., Линник П.Н., Кузьменко М.И., Кленус В.Г.* Комплексная экологическая классификация поверхностных вод суши. Гидробиологический журнал, 1993. Т. 29. №4. С. 62–76.
15. Онежское озеро. Атлас. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. 151 с.
16. Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1999. 293 с.

17. *Тимакова Т.М., Куликова Т.П., Литвинова И.А., Полякова Т.Н., Сярки М.Т., Теканова Е.В., Чекрыжева Т.А.* Изменение биоценозов Кондопожской губы Онежского озера под влиянием сточных вод целлюлозно-бумажного комбината. Водные ресурсы, 2014. Т. 41. № 1. С. 74–82. DOI: 10.7868/S032105961401012X.
18. Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Наука, 1990. 264 с.
19. *Carlson R.E.* A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 1977. V. 22. P. 361–369.
20. *Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A., Zobkov M., Ryzhakov A.* What is the extent of water brownification in Lake Onego, Russia? *Journal of Great Lakes Research*, 2020. V. 46. Iss. 4. P. 850–861. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.02.008>.
21. *Rukhovets L.A., Filatov N.N.* Ladoga and Onego – great European Lakes. Observations and Modeling. Chichester, UK: Springer-Verlag, 2010. 308 p. DOI: 10.1007/978-3-540-68145-8.

### REFERENCES

1. *Alimov A.F.* Introduction to Production Hydrobiology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. 152 p. (in Russian).
2. *Alimov A.F., Bogatov V.V., Golubkov S.M.* Production hydrobiology. St. Petersburg: Nauka, 2013. 343 p. (in Russian).
3. *Andronikova I.N.* Structural and functional organization of zooplankton in lake ecosystems of different trophic types. St. Petersburg: Nauka, 1996. 189 p. (in Russian).
4. *Boulion V.V.* Dependence of fish productivity of reservoirs on primary production. Methods for studying the state of the fodder base of fishery reservoirs. Collection of scientific papers. Issue 196. Leningrad: GosNIORKH, 1983. P. 3–11 (in Russian).
5. *Carlson R.E.* A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 1977. V. 22. P. 361–369.
6. Diagnosis and forecast of thermohydrodynamics and ecosystems great lakes of Russia. Petrozavodsk: KRC RAS, 2020. 255 p. (in Russian, abs English).
7. Ecosystem of Lake Onego and tendencies of its change. Leningrad: Nauka, 1990. 264 p. (in Russian).
8. *Gubler E.V., Genkin A.A.* Application of nonparametric criteria of statistics in biomedical research. Leningrad: Medicina, 1973. 144 p. (in Russian).
9. *Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A., Zobkov M., Ryzhakov A.* What is the extent of water brownification in Lake Onego, Russia? *Journal of Great Lakes Research*, 2020. V. 46. Iss. 4. P. 850–861. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.02.008>
10. *Kalinkina N.M., Korosov A.V., Belkina N.A., Tekanova E.V., Syarki M.T., Korosov A.A.* Geographic information system "Bioresources of Lake Onego". InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Petrozavodsk: KRC RAS, 2018. V. 24. Part 2. P. 362–370. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-362-370 (in Russian, abs English).
11. *Kitaev S.P.* Ecological bases of biological productivity of lakes in different natural zones. Moscow: Nauka, 1984. 207 p. (in Russian).
12. *Korosov A.V.* Special methods of biometrics. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2007. 364 p. (in Russian).
13. Lake Onego. Atlas. Petrozavodsk: KRC RAS, 2010. 151 p. (in Russian).
14. Lake Onego. Ecological problems. Petrozavodsk: KRC RAS, 1999. 293 p. (in Russian, abs English).



15. *Menshutkin V.V., Filatov N.N., Potakhin M.S.* Expert system "Lakes of Karelia". 1. Ordinal and nominal characteristics of lakes. *Water Resources*, 2009a. V. 36. No 2. P. 160–171 (in Russian).
  16. *Menshutkin V.V., Filatov N.N., Potakhin M.S.* Expert system "Lakes of Karelia". 2. Classification of lakes. *Water Resources*, 2009b. V. 36. No 3. P. 300–311 (in Russian).
  17. *Oksiyuk O.P., Zhukinskiy V.N., Braginskiy L.P., Linnik P.N., Kuzmenko M.I., Klenus V.G.* Integrated ecological classification of land surface waters. *Hydrobiological journal*, 1993. V. 29. No 4. P. 62–76 (in Russian).
  18. *Rukhovets L.A., Filatov N.N.* Ladoga and Onego – great European Lakes. Observations and Modeling. Chichester, UK: Springer-Verlag, 2010. 308 p. DOI: 10.1007/978-3-540-68145-8.
  19. The largest lakes-reservoirs of the north-west European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and anthropogenic impact. Petrozavodsk: KRC RAS, 2015. 375 p. (in Russian, abs English).
  20. *Timakova T.M., Kulikova T.P., Litvinova I.A., Polyakova T.N., Syarki M.T., Tekanova E.V., Chekryzheva T.A.* Changes in biocenoses of Kondopozhskaya Bay of Lake Onego under the influence of waste water from a pulp and paper mill. *Water Resources*, 2014. V. 41. No 1. P. 74–82. DOI: 10.7868/S032105961401012X (in Russian).
  21. *Vinberg G.G.* Primary production of reservoirs. Minsk: Academy of Sciences of the BSSR, 1960. 329 p. (in Russian).
-

Е.А. Васильева<sup>1</sup>, О.Н. Николаева<sup>2</sup>, Л.К. Трубина<sup>3</sup>

## ОПЫТ ПОДЕРЕВНОЙ ИНВЕНТАРИЗАЦИИ И КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ГОРОДСКИХ ЗЕЛЕННЫХ НАСАЖДЕНИЙ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

### АННОТАЦИЯ

В статье излагаются результаты исследований в области экологической оценки и картографирования состояния высокоствольной городской растительности. Городские зеленые насаждения подвергаются постоянному и интенсивному антропогенному воздействию, что обуславливает необходимость оперативного и тщательного мониторинга и контроля их состояния. Однако действующая методика инвентаризации городских зеленых насаждений давно устарела методологически и не учитывает современные возможности дистанционного зондирования Земли и ГИС-технологий в области получения сведений о природных объектах. В статье обосновывается новый подход, заключающийся в использовании свободно распространяемых материалов зондирования Земли для получения сведений о местоположении и основных экологических характеристиках деревьев, являющихся частью городского озеленения. Представлена принципиальная схема инвентаризации городских зеленых насаждений с применением материалов дистанционного зондирования Земли. Сформулированы требования к системе условных обозначений, используемых на цифровых картах городских зеленых насаждений. Приведены условные обозначения, разработанные с учетом существующей системы условных обозначений для крупномасштабных топографических карт. Отмечены достоинства и недостатки разработанной системы, и внесенные в нее коррективы. Представлены фрагменты созданных цифровых карт городских зеленых насаждений. Первоначально объектом картографирования являлось озеленение одной из магистралей города Новосибирска, затем озеленение улиц центральной части г. Якутска, и наконец, один из скверов г. Новосибирска. В ходе исследований для высокоствольных зеленых насаждений были определены их пространственное положение и основные виды нарушения их состояния (наличие многоствольности, сухостоев, поврежденных крон и пр.). Результаты показали состоятельность предложенного подхода для оперативной экологической оценки и картографирования линейных зеленых насаждений. При изучении и картографировании площадных городских насаждений целесообразно предусматривать дополнительное обследование в виде съемки территории с помощью беспилотных летательных аппаратов в местах загущенной высокоствольной растительности. Таким образом, предлагаемый подход сводит к минимуму полевые обследования территории, чем значительно экономит время и затраты на инвентаризацию городских зеленых насаждений.

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, ул. Плахотного, д. 10, 630108, Новосибирск, Россия; *e-mail*: [biomars217@gmail.com](mailto:biomars217@gmail.com)

<sup>2</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А. Н. Костякова, ул. Прянишникова, д. 19, 127550, Москва, Россия, Сибирский государственный университет геосистем и технологий, ул. Плахотного, д. 10, 630108, Новосибирск, Россия; *e-mail*: [onixx76@mail.ru](mailto:onixx76@mail.ru)

<sup>3</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, ул. Плахотного, д. 10, 630108, Новосибирск, Россия; *e-mail*: [trubinalk@rambler.ru](mailto:trubinalk@rambler.ru)

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** городские зеленые насаждения, городское озеленение, инвентаризация, экологическая оценка объектов озеленения, картографирование, цифровые карты, карты зеленых насаждений, условные обозначения, данные дистанционного зондирования, ГИС, геоинформационное картографирование.

Ekaterina A. Vasilieva<sup>1</sup>, Olga N. Nikolaeva<sup>2</sup>, Lyudmila K. Trubina<sup>3</sup>

## A CASE-STUDY OF TREE INVENTORY AND MAPPING OF PUBLIC GREEN SPACES

### ABSTRACT

The article presents the results of research in the field of mapping the ecological state of city trees. Public green spaces are subject to constant and intense anthropogenic impact, which necessitates prompt and thorough monitoring and control of their state. However, the current methodology for the inventory of public green spaces is methodologically outdated long ago and does not take into account the modern techniques of remote sensing and GIS technologies in the field of obtaining information about natural objects. The article substantiates a new approach, which consists in using freely distributed remote sensing data to obtain information about the location and main ecological characteristics of trees that are part of urban public greening. A schematic diagram of the inventory of public green spaces using Earth remote sensing materials is presented. Requirements for map symbols used on digital maps of public green spaces are formulated. The symbols developed taking into account the existing system of symbols for large-scale topographic maps are given. The advantages and disadvantages of the developed system, and the corrections made to it, are noted. Fragments of created digital maps of public green spaces are presented. The landscaping of streets and highways in Novosibirsk and Yakutsk and a park in Novosibirsk were assessed and mapped. The spatial position of city trees and the main types of disturbance in their condition (the presence of multi-stems, dead stems and branches, damaged crowns, etc.) were determined. The results showed the consistency of the proposed approach for operational environmental assessment and mapping of linear green spaces. When studying and mapping areal urban plantings, it is advisable to provide for an additional survey with the help of unmanned aerial vehicles to control thickened tall vegetation. Thus, the proposed approach minimizes field surveys of the territory, which significantly saves time and costs for an inventory of public green spaces.

**KEYWORDS:** public green spaces, greening, inventory, assessment of tree condition, mapping, digital maps, green spaces maps, map symbols, remote sensing data, GIS, geospatial mapping.

---

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Department of Ecology and Natural Resources Management, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, *e-mail*: [biomars217@gmail.com](mailto:biomars217@gmail.com)

<sup>2</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Institute of Amelioration, water management and construction named after A.N. Kostyakov, Department of Environmental Safety and Natural Resources Management, 19, Pryanishnikova St., Moscow, 127550, Russia;

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Department of Ecology and Natural Resources Management, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, *e-mail*: [onixx76@mail.ru](mailto:onixx76@mail.ru)

<sup>3</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Department of Ecology and Natural Resources Management, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, *e-mail* [trubinalk@rambler.ru](mailto:trubinalk@rambler.ru)

## ВВЕДЕНИЕ

Городские зеленые насаждения (ГЗН) являются неотъемлемой частью урбоценоза и выполняют обширный ряд экологических функций, от снижения уровня загрязнения атмосферы и до повышения эстетичности городской среды. При этом они подвергаются значительному антропогенному прессингу, обусловленному хозяйственной и рекреационной активностью городского населения [Николаева, 2019]. Для компенсации экологического ущерба, причиняемого ГЗН, необходимо регулярное планирование и проведения мероприятий по уходу и восстановлению, что требует обеспечения соответствующих органов управления городским хозяйством оперативной, регулярно собираемой и обновляемой информацией о современном состоянии ГЗН с детальностью вплоть до отдельного дерева. Однако действующая методика инвентаризации ГЗН характеризуется крайней методологической и технической отсталостью и предусматривает обследование ГЗН 1 раз в 5 лет; подеревная же инвентаризация предусмотрена только для городских парков и скверов<sup>1</sup>. Всё это, в сочетании с неблагоприятными экономическими факторами (недостаточное финансирование, недоукомплектованность кадрами) приводит к тому, что основные усилия по поддержанию городского озеленения в оптимальном состоянии концентрируются на ГЗН, официально выделенных в генплане как городские сады, парки, скверы и бульвары, а также на уличном озеленении (с акцентом на магистральные улицы). Но в условиях постоянно уплотняющейся городской застройки важное экологическое значение приобретает любой участок местности, занятый высокоствольной растительностью, включая внутриквартальное озеленение, состоянию которого уделяется особенно малое внимание, и уходо-восстановительные мероприятия для них проводятся в основном по заявкам местных жителей или жилищно-эксплуатационных организаций.

Таким образом, складывается ситуация, в которой городские органы зеленого хозяйства не владеют целостным представлением о состоянии ГЗН всех категорий. Недобеспеченность информацией делает невозможным системное решение проблем городского озеленения и ограничивает управляющую деятельность в этой сфере проведением точечных мероприятий, направленных на ликвидацию конкретных (зачастую – произвольно выбранных) локальных проблем.

Между тем, современные технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и геоинформационного картографирования предлагают обширные возможности по получению и визуализации детальных характеристик любого объекта на земной поверхности, в том числе и высокоствольной растительности. Далее в статье будет описан опыт подеревной инвентаризации, экологической оценки и картографирования состояния ГЗН.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основной проблемой при проведении подеревной инвентаризации ГЗН традиционным способом полевых обследований, который предлагается в действующей Методике<sup>7</sup>, являются высокие затраты труда и времени. Поэтому было решено использовать в качестве исходного источника свободно распространяемые материалы дистанционного зондирования Земли. Проведенные исследования показали [Муллаярова, 2018; Николаева, 2019], что их пространственное разрешение и периодичность обновления достаточны, чтобы получить сведения о ряде характеристик каждого дерева (положение на местности, высота, вид растительности – хвойная или лиственная). Для

<sup>1</sup> Методика инвентаризации городских зеленых насаждений. МинСтрой РФ. М., 1997 г. Электронный ресурс: <http://www.opengost.ru/iso/3087-metodika-inventarizacii-gorodskih-zelenyh-nasazhdeniy.html> (дата обращения 10.03.2019)

уточнения сведений о состоянии дерева (кривизна ствола, сухостойность) использовались материалы панорамной уличной фотосъемки. При обследовании ряда внутриквартальных территорий с плотно сомкнутой высокоствольной растительностью проводилось полевое обследование, однако его объемы и сроки были значительно сокращены по сравнению с традиционным подходом к подеревной инвентаризации ГЗН. При наличии технической и финансовой возможностей полевое обследование может быть заменено воздушным лазерным сканированием, выполненным с борта беспилотного летательного аппарата [Хлебникова, 2018]. Принципиальная схема подеревной инвентаризации ГЗН с применением материалов ДЗЗ представлена на рисунке 1 [Николаева, 2019].

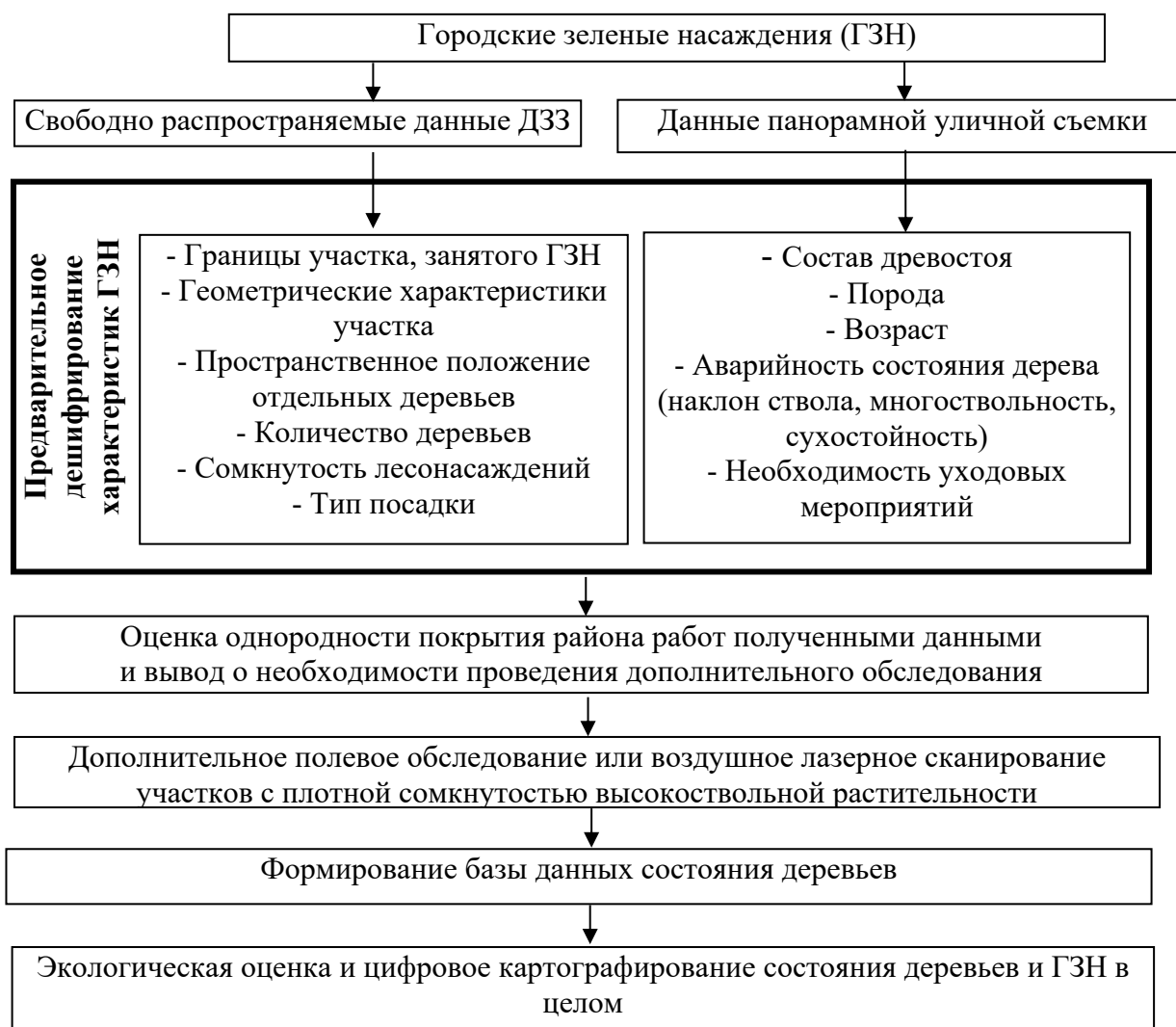


Рис. 1. Принципиальная схема инвентаризации городских зеленых насаждений с применением материалов дистанционного зондирования Земли

Fig. 1. Schematic diagram of the inventory of urban green spaces using remote sensing data

В инвентаризации и оценке состояния ГЗН важное место занимает картографическая визуализация. Цифровые карты используются как для отображения промежуточных результатов дешифрирования, так и для показа результатов оценки состояния ГЗН. В последнем случае карты выступают как рабочий документ для специалистов в области управления городским земельным хозяйством, что ставит вопрос

о наглядности оформления и удобстве их использования людьми, не имеющими специальной картографической подготовки. Была предпринята попытка разработать систему условных обозначений, которая опиралась бы на официально принятый перечень условных знаков, используемых для показа растительности на крупномасштабных топографических картах и планах. Это позволило бы обеспечить преемственность цифровых карт городского озеленения и других топографических материалов, создаваемых на территорию населенных пунктов.

К проектируемой системе условных обозначений предъявлялись следующие дополнительные требования:

- необходимость указать на карте конкретную породу древесной растительности. Для этого условные обозначения были сопровождаемы буквенными индексами, указывавшими сокращенное название породы в соответствии с действующими нормативными документами лесного хозяйства<sup>1</sup>;
- необходимость особо выделить на карте деревья, относящиеся к породам, не рекомендованным к использованию в городском озеленении из-за аллергенности или короткого срока жизни (тополь душистый, береза бородавчатая, клен американский [ясенелистный]). Для выполнения этого требования использовались цветовые различия условных знаков.

На рисунке 2 представлены условные обозначения, которые были разработаны для ряда древесных пород, наиболее часто встречающихся на улицах г. Новосибирска.

Береза бородавчатая		Б(б)
Береза повислая		Б(пов)
Вяз гладкий		В
Клен американский		К(а)
Рябина		Р
Тополь бальзамический		Т(душ)
Яблоня		Яб
Ясень		Я

Рис. 2. Условные обозначения пород древесной растительности на цифровых картах озеленения

Fig.2. Symbols of tree species on digital green spaces maps

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первоначальная апробация разработанных теоретических и методических положений выполнялась на примере ГЗН, расположенных вдоль ул. Титова, которая является одной из основных транспортных магистралей г. Новосибирска и имеет протяженность в

<sup>1</sup> Инструкция о порядке создания и размножения лесных карт. Электронный ресурс: [http://www.libussr.ru/doc\\_ussr/usr\\_13663.htm](http://www.libussr.ru/doc_ussr/usr_13663.htm) (дата обращения 10.03.2021)

4,5 км. Исследуемые ГЗН в соответствии с действующим ГОСТ относятся к категории озелененных территорий специального назначения, и представляют собой линейную обсадку городской улицы высокоствольной растительностью, которая постоянно подвергается отрицательному антропогенному воздействию, обусловленному влиянием автомобильного транспорта и местного населения.

Предварительно выполненное дешифрирование свободно распространяемых аэрокосмических материалов позволило определить точную локацию каждого отдельного дерева в пределах уличной обсадки и сформировать цифровую карту данной ГЗН. Ее фрагмент представлен на рис. 3.

Далее с использованием материалов панорамной уличной съемки, которые также являются свободно распространяемыми, были оценены основные показатели состояния деревьев (наличие многоствольности, сухих ветвей, деформированных крон и пр.) и по разработанной авторами формуле рассчитан индекс экологического состояния каждого дерева. Достоверность камерально определенных сведений была верифицирована посредством выборочных полевых обследований.



Рис. 3. Фрагмент цифровой карты зеленых насаждений специального назначения на участок улицы Титова

Fig. 3. Fragment of a digital green space map for a section of Titova Street

В ходе создания и оформления цифровой карты ГЗН было установлено, что использование ранее разработанных условных обозначений для отдельных деревьев требует внесения изменений в исходную конфигурацию используемой ГИС. Кроме того, специалистами Новосибирского Горзеленхоза были отмечены неудобства при зрительном восприятии условных знаков, обусловленные их сложной формой и различием в локализации (по центру условного знака либо у основания условного знака). Эти замечания были учтены при создании цифровой карты экологической оценки состояния объектов озеленения, где были применены условные знаки из стандартных библиотек и с точкой локализации в центре условного знака (см. рис. 4).



Рис. 4. Фрагмент цифровой карты состояния зеленых насаждений специального назначения (ул. Титова, Ленинский район г. Новосибирска)

Fig. 4. Fragment of a digital ecological map of urban green verges (Titova St., Leninsky district of Novosibirsk)

В целом по результатам первичной апробации был сделан вывод о пригодности используемого подхода для инвентаризации, экологической оценки и оперативного картографирования рядовых посадок ГЗН.

Для дальнейших экспериментов в качестве объекта исследования была выбрана центральная часть г. Якутска. Якутск находится в зоне резко континентального климата, характеризующегося крайне суровой зимой и коротким прохладным летом. Такие условия негативно сказываются на состоянии объектов городского озеленения. Обеспеченность населения Якутска зелеными насаждениями составляет лишь  $0,4 \text{ м}^2/\text{чел}$  при норме в  $12 \text{ м}^2/\text{чел}$  [Григорьева, 2019]. В таких условиях значительно повышается экологическая роль каждого участка ГЗН.

В ходе исследований был создан ряд цифровых слоев на центральную часть г. Якутска, ограниченную проспектом Ленина и улицами Орджоникидзе, Аммосова, Кирова и



Октябрьская. Далее были выполнены инвентаризация и экологическая оценка состояния деревьев уличной обсадки в соответствии с разработанной методикой. Используемая система условных обозначений и пояснительных подписей была доработана следующим образом:

- использованы простые, хорошо читаемые геометрические условные знаки с четкой локализацией;
- введена система буквенных индексов для указания породы дерева;
- учтена необходимость различия на карте саженцев и взрослых деревьев. Индекс саженца начинается со строчной буквы, индекс взрослого дерева – с заглавной.

Полученные результаты представлены на рисунке 5.

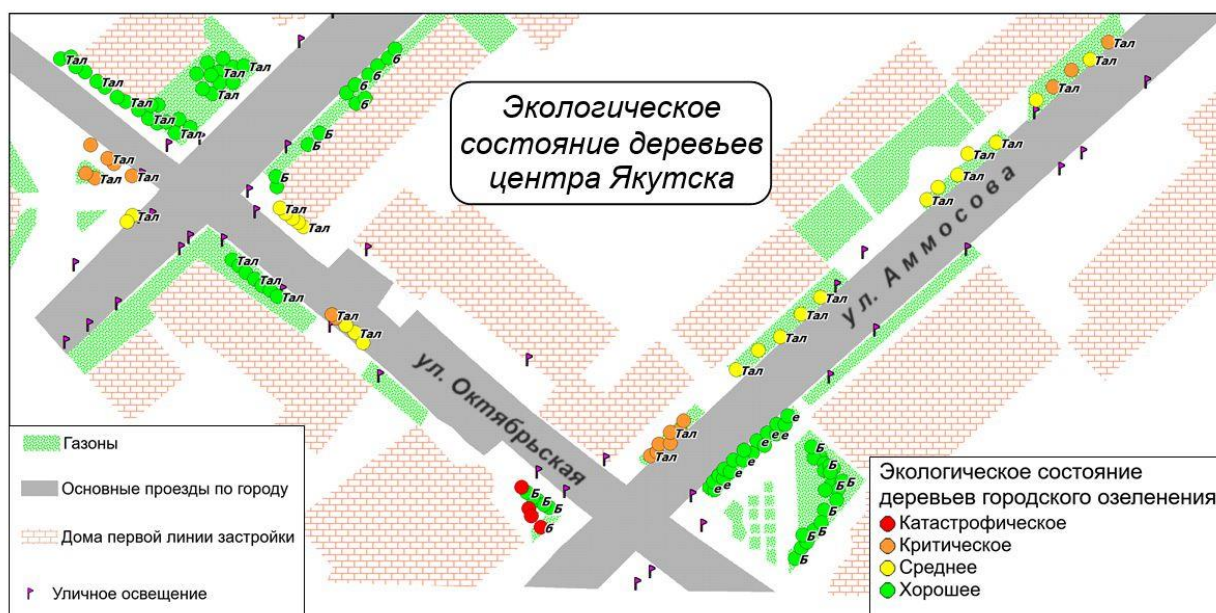


Рис. 5. Фрагмент цифровой карты состояния зеленых насаждений специального назначения (центральная часть г. Якутска)

Fig. 5. Fragment of a digital ecological map of urban green verges (center of Yakutsk)

Созданная карта позволила выявить участки городских улиц, деревья вдоль которых нуждаются в проведении уходовых мероприятий. Также карта выносит на передний план основные проблемы уличного озеленения Якутска: обилие ивы (тальника), используемой как объект озеленения, хотя она постоянно требует уходовых мероприятий из-за быстрого разрастания, а ее пыльца является источником аллергенов; большое количество погибших или погибающих саженцев; скудность породного состава городского озеленения (в основном это ива, береза и ель). Трудозатраты на создание карты составили порядка 60 часов, а затраты на проведение работ исключили такую важную статью расходов, как приобретение материалов дистанционного зондирования и проведение полномасштабных полевых работ. Использование же свободно распространяемого ГИС-обеспечения (например, QGIS), позволит избежать затрат на приобретение программного обеспечения. Таким образом, основные расходы сводятся к оплате труда квалифицированного персонала, владеющего навыками работы в ГИС и имеющего специальную профессиональную подготовку в области экологии.

Новейшая стадия экспериментальных работ состоит в доработке и апробации разработанной методики применительно к оценке ГЗН, имеющих не линейную, а площадную конфигурацию.

В качестве района работ выбран участок сквер вдоль аллеи Молодежная на ул. Вертовской, Новосибирск, для которого характерно сочетание рядовой и групповой форм посадки деревьев (см. рис. 6; границы сквера показаны красным цветом).

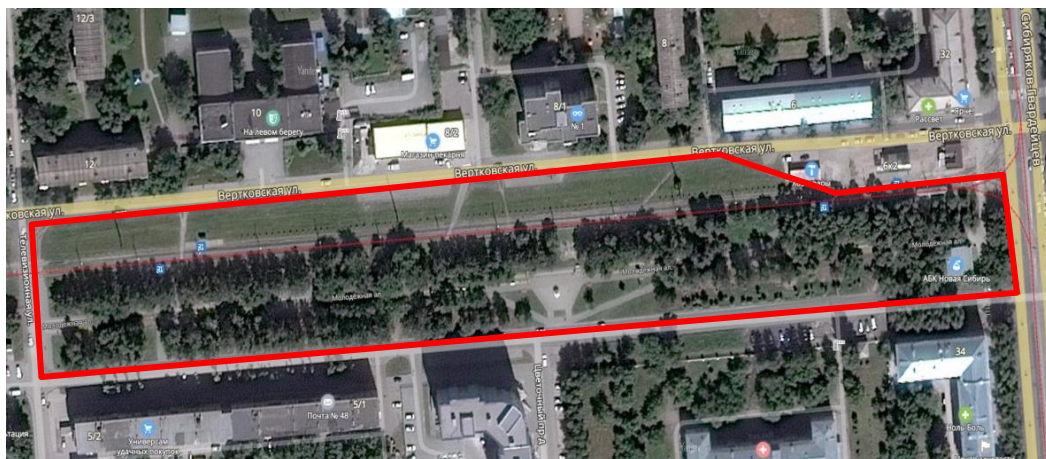


Рис. 6. Сквер вдоль аллеи Молодежная, ул. Вертовского, г. Новосибирск (свободно распространяемые материалы дистанционного зондирования Яндекс.Космоснимки)

Fig. 6. Square along the Molodezhnaya alley, st. Vertkovsky, Novosibirsk (freely distributed remote sensing data, Yandex.Kosmosnimki)

Использование разработанной методики позволило объективно и оперативно нанести на карту значительную часть (порядка 75 %) деревьев, произрастающих на территории сквера. Однако при дешифрировании плотно сомкнутых и удаленных от дорог групп растительности возникли закономерные затруднения, которые были устранены в ходе полевых обследований. Следует отметить, что объем этих обследований был сокращен практически в 4 раза относительно традиционной методики инвентаризации ГЗН, предусматривающей сплошное полевое обследование местности. Результаты выполненных исследований представлены на рисунке 7.

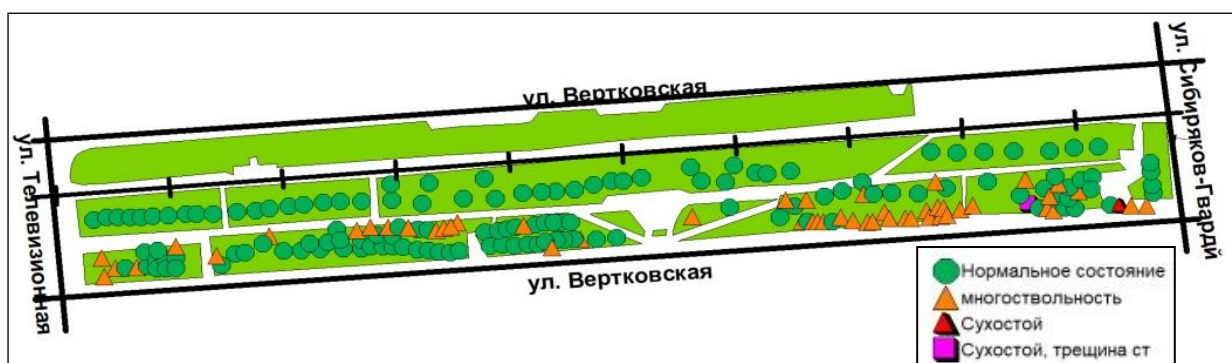


Рис. 7. Фрагмент цифровой карты состояния зеленых насаждений сквера Молодежной аллеи, г. Новосибирск

Fig. 7. Fragment of a digital ecological map of the Molodezhnaya Alley public garden, Novosibirsk

Система условных обозначений была вновь откорректирована с тем, чтобы особо выделить деревья, характеризующиеся нарушениями (многоствольностью, наличием сухостоя, растрескиванием ствола).

Выполненные исследования позволили наметить следующие направления перспективных исследований:

- повышение информативности исходных данных о ГЗН путем интеграции в рабочий процесс дополнительно получаемых материалов воздушного лазерного сканирования для участков с плотно сомкнутой высокоствольной растительностью;
- совершенствование системы условных обозначений с целью возможно более полного отображения на карте ботанических и экологических характеристик объектов озеленения;
- разработка процедур и инструментария для оперативного выявления типичных нарушений в области управления ГЗН (конфликта объектов озеленения и объектов городской застройки и инфраструктуры, автоматизированное определение объемов и затрат на проведение мероприятий по уходу за ГЗН, и т. п.).

## ВЫВОДЫ

Современные поставщики данных дистанционного зондирования предоставляют достаточно обширные объемы аэрокосмических снимков в свободное распространение на соответствующих сервисах в Интернете (из наиболее известных – Яндекс.Космоснимки и Google Maps). Данные материалы являются бесплатными при условии их некоммерческого использования, что позволяет рассматривать их как регулярно обновляемый источник данных о различных категориях объектов окружающей среды, в том числе – о городских зеленых насаждениях (ГЗН), пространственная конфигурация которых тяготеет к линейным. Оперативная обработка и анализ таких материалов в ГИС-среде в комплексе с использованием данных панорамной уличной съемки, которые также являются свободно распространяемыми, позволяет значительно снизить временные и ресурсные затраты на проведение подеревной инвентаризации ГЗН, упростить и ускорить процесс экологической оценки их состояния и, в конечном счете, повысить эффективность управления ГЗН. Для анализа и оценки состояния ГЗН, характеризующихся плотной сомкнутостью высокоствольной растительности на значительных площадях, целесообразно использовать при возможности материалы воздушного лазерного сканирования, а также специально получаемые на данную территорию аэрофотоснимки посредством беспилотных летательных аппаратов, являющихся наиболее экономичным и доступным видом аэрофотосъемки в городских условиях. Картографические материалы, получаемые в результате подеревной инвентаризации и экологической оценки состояния ГЗН, представляют интерес не только для специалистов в области управления городским озеленением, но и широкому кругу пользователей, неравнодушных к качеству их среды обитания, и могут быть обнародованы в Интернете для привлечения внимания и ресурсов общественности к решениям проблем городского озеленения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьева С.А., Глухая С.Е. Применение современных методов озеленения на примере Якутского городского парка. Наука, техника и образование, 2019. № 5 (58). С. 106–109.
2. Муллаярова П.И. О модернизации существующей методики инвентаризации зеленых насаждений с учетом современных достижений аэрокосмических исследований и ГИС-технологий. Вестник СГУГиТ, 2018. Т. 23. № 1. С. 132–142.

3. Николаева О.Н., Трубина Л.К., Васильева Е.А. Геоинформационное моделирование озелененных территорий специального назначения. Сборник материалов международного научного конгресса «Интерэкспо Гео-Сибирь». 2019. Т. 4. № 2. С. 47–55. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-4-2-47-55.
4. Хлебникова Т.А., Опритова О.А. Экспериментальные исследования точности построения плотной цифровой модели по материалам беспилотной авиационной системы. Вестник СГУГиТ, 2018. Т. 23. № 2. С. 119–129.

#### REFERENCES

1. Grigorieva S.A., Tlustaya S.E. Application of modern methods of gardening on the example of the Yakut city park. Science, technology and education, 2019. No 5 (58). P. 106–109 (in Russian).
  2. Mullayarova P.I. On the modernization of the existing methodology for the inventory of green spaces, taking into account the modern achievements of aerospace research and GIS technologies. Bulletin of SGUGiT, 2018. V. 23. No 1. P. 132–142 (in Russian).
  3. Nikolaeva O.N., Trubina L.K., Vasilyeva E.A. Geoinformation modeling of green areas for special purposes. Collection of materials of the international scientific congress «Interexpo Geo-Siberia», 2019. V. 4. No 2. P. 47–55. DOI: 10.33764 / 2618-981X-2019-4-2-47-55 (in Russian).
  4. Khlebnikova T.A., Opritova O.A. Experimental studies of the accuracy of constructing a dense digital model based on the materials of an unmanned aircraft system. Bulletin of SGUGiT, 2018. V. 23. No 2. P. 119–129 (in Russian).
-

УДК: 528.94

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-285-296

Е.Л. Воробьевская<sup>1</sup>, С.Н. Кириллов<sup>2</sup>, М.В. Слипенчук<sup>3</sup>, В.А. Журавлев<sup>4</sup>

## КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕННОСТИ ЭКОСИСТЕМ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «ТУНКИНСКИЙ» РЕСПУБЛИКИ БУРЯТИЯ

### АННОТАЦИЯ

Существующая на сегодняшний день недооценка экосистемных услуг объясняется сложностью стоимостного выражения ее разнообразных функций и взаимосвязей. Естественно, до конца определить экономическую ценность природы невозможно, поскольку стоимость незаменимых для жизни благ стремится к бесконечности. Вместе с тем, ценностный показатель этих благ в условиях рыночной экономики является определяющим условием финансового обеспечения сохранения и самовоспроизведения естественных экосистем. В условиях формирования глобальных рынков экосистемных услуг, перспективы эколого-экономической оценки особо охраняемых природных территорий велики. Такого рода оценки должны стать обязательными для регионов и учитываться в стратегиях их развития. Это касается и территории Тункинского национального парка, расположенного в Республике Бурятия, ставшего объектом картографирования. Базируясь на концепции общей экономической ценности, были рассчитаны покомпонентные и совокупные значения стоимости прямого использования ряда услуг национального парка. Основой для эколого-экономических расчетов послужила информация о природе и природопользовании исследуемой территории. На основе карты природно-территориальных комплексов Тункинского национального парка, анализ которой позволил получить представление о распределении основных природно-территориальных комплексов в пределах изучаемой территории, определялась площадь оцениваемых ресурсов. Оценка прямых экосистемных услуг проведена исходя из продуктивности биологических ресурсов по ряду видов промысловых животных, рыб, дикоросов, а также рекреационным и пастбищным ресурсам. Оценка косвенных услуг посчитана по депонированию углерода лесами и болотами, фильтрационной способности болот. Проведенная эколого-экономическая оценка и ее наглядное отображение на картах изучаемой территории может помочь в разработке программ рационального природопользования для бережного использования природных ресурсов, оптимизации его структуры для обеспечения устойчивости экологического каркаса территории, сохранения этнокультурного и ландшафтного разнообразия.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** картографирование, экосистемные услуги, национальный парк Тункинский.

---

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: [lvorob@mail.ru](mailto:lvorob@mail.ru)

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: [skaudi555@gmail.com](mailto:skaudi555@gmail.com)

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: [eco-msu@mail.ru](mailto:eco-msu@mail.ru)

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: [zuravlev.viktor32@mail.ru](mailto:zuravlev.viktor32@mail.ru)

**Elena L. Vorobyevskaya<sup>1</sup>, Sergey N. Kirillov<sup>2</sup>, Mikhail V. Slipenchuk<sup>3</sup>,  
Viktor A. Zhuravlev<sup>4</sup>**

## **ECOLOGICAL AND ECONOMIC VALUES MAPPING OF TUNKINSKY NATIONAL PARK ECOSYSTEMS OF THE REPUBLIC OF BURYATIA**

### **ABSTRACT**

The underestimation of ecosystem services that exists today is explained by the complexity of the value expression of its various functions and interrelationships. Naturally, it is impossible to fully determine the economic value of nature, since the value of goods irreplaceable for life tends to infinity. At the same time, the value indicator of these benefits in a market economy is a determining condition for financial support for the preservation and self-reproduction of natural ecosystems. In the context of the formation of global markets for ecosystem services, the prospects for the ecological and economic assessment of specially protected natural areas are great. Such assessments should become mandatory for the regions and be taken into account in their development strategies. This also applies to the territory of Tunkinsky National Park, located in the Republic of Buryatia, which has become an object of mapping. Based on the concept of total economic value, the component and aggregate values of the cost of direct use of a number of services of the national park were calculated. The information on the nature and use of natural resources in the study area served as the basis for ecological and economic calculations. A map of the natural-territorial complexes of Tunkinsky National Park was compiled, the analysis of which made it possible to get an idea of the distribution of the main natural-territorial complexes within the study area, as well as to determine their areas. The assessment of direct ecosystem services was carried out based on the productivity of biological resources for a number of species of animals, fish, wild plants, as well as recreational and pasture resources. The assessment of indirect services is calculated on the basis of carbon sequestration by forests and swamps, filtration capacity of swamps. The conducted ecological and economic assessment and its visual display on the maps of the studied territory can help in the development of ways to optimize nature management, which will contribute to the careful use of natural resources, diversification of its structure in order to preserve the ecological framework of the territory, ethnocultural and landscape diversity.

**KEYWORDS:** mapping, ecosystem services, Tunkinsky National Park.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время вопросы охраны природы и ведения природопользования приобретает всё большее значение. Развитие разрешенной хозяйственной деятельности на особо охраняемых природных территориях (ООПТ) – при условии грамотной организации и управления – могут внести существенный вклад в охрану природы, экологическое просвещение местного населения и развитие экологической культуры среди туристов, а также в социально-экономическое развитие региона [Kirillov *et al.*, 2016]. Экологический кризис во многом связан с тем, что значительные территории на нашей планете терпят

---

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: [lvorob@mail.ru](mailto:lvorob@mail.ru)

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: [skaudi555@gmail.com](mailto:skaudi555@gmail.com)

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: [eco-msu@mail.ru](mailto:eco-msu@mail.ru)

<sup>4</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: [zuravlev.viktor32@mail.ru](mailto:zuravlev.viktor32@mail.ru)

настоящее экологическое бедствие, настолько сильно они преобразованы человеком. Поэтому создание и сохранение ООПТ как естественных участков сохранившихся природных ландшафтов во всем их разнообразии видится важной задачей, а проведение их эколого-экономической оценки дает возможность показать не только высокую ресурсную роль экосистем, но и средообразующую, средозащитную роль в сохранении экосистемами территории природного баланса [Тишков, 2005]. Косвенные экологические услуги обладают потенциально большей стоимостью, чем прямые, но до сих пор недостаточно учитываются в экономике [Перелет, 2003].

Белорусские ученые считают, что «существующая на сегодняшний день явная «недооценка» природы объясняется сложностью стоимостного (денежного) выражения ее разнообразных функций и взаимосвязей. Естественно, до конца определить экономическую ценность природы невозможно, поскольку стоимость незаменимых для жизни благ стремится к бесконечности. Вместе с тем ценностный (стоимостной) «показатель» этих благ в условиях рыночной экономики является определяющим условием финансового обеспечения их сохранения и самовоспроизведения» [Неверов и др., 2001]. Это предопределяет актуальность исследования, посвященного поиску путей рационального природопользования для бережного использования природных ресурсов, оптимизации его структуры для обеспечения устойчивости экологического каркаса территории, сохранения этнокультурного и ландшафтного разнообразия. Проведенная эколого-экономическая оценка и ее наглядное отображение на картах изучаемой территории может помочь в разработке таких путей.

Пока создание ООПТ в нашей стране во многом экономически нерентабельно (хотя мировой опыт показывает, что может быть по-другому: успешное рентабельное для экономики стран развитие ООПТ в США, в странах Африки, в Финляндии, Австралии и пр.), что связано во многом с экономической политикой государства, а также с недооценкой экологических услуг, предоставляемых ООПТ. В условиях формирования глобальных рынков таких услуг, перспективы эколого-экономической оценки ООПТ велики. Такого рода оценки должны стать обязательными для регионов и учитываться в стратегии их развития. Объектом исследований является территория Тункинского национального парка, расположенного в Республике Бурятия.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Значительная часть материала собрана во время экспедиционных исследований, а также по литературным и фондовым источникам географического факультета МГУ, Бурятского института природопользования, Иркутского ИГ СО РАН, Министерства природных ресурсов Республики Бурятия, администрации пос. Аршан, краеведческих музеев и т.д. Используются топографические карты масштаба 1:200 000 и 1: 100 000, ведомости участков лесного фонда района; планы проектируемых лесохозяйственных мероприятий; таксационные описания участков лесного фонда; планы лесоустройства; схемы по лесничествам, районам, рекреации и целевому назначению; материалы о выдаче лицензий для охоты на ресурсно-промысловых животных, информация по квотам для охоты, квотам на вылов рыбы; правила связанные с заготовкой пищевых лесных ресурсов и сбором лекарственных растений, утвержденные приказом Рослесхоза для Республики Бурятии, правила заготовки и сбора недревесных лесных ресурсов, утвержденных приказом Рослесхоза; «хозяйственные календари» старожилов из числа коренных жителей, данные опроса охотников, местного населения, работников администрации, лесхоза и другие материалы. При составлении карт использовались космические снимки на район исследований, проведена работа со снимками с сайта Google, съемочных систем Aster, Spot, Landsat; обработка космических снимков в программе SASPlanet.

Использовались общегеографические методы исследований: картографический, математический, описательный и дистанционный (аэрокосмический). Эколого-географические методы исследований, использованные в данной работе, направлены на определение степени пригодности условий природной среды и природных ресурсов для тех или иных видов хозяйственной деятельности, в том числе туризма [Slipenchuk et al., 2015]. Основу данной группы представляли ландшафтные методы исследований. Для определения изменения состояния изучаемой территории во времени и для прогноза его будущего развития использовались историко-географические и топонимические методы. Также использовались социологические методы исследования.

Базируясь на концепции общей экономической ценности (стоимости) (ОЭЦ) [Dixon et al., 1994] были рассчитаны покомпонентное и совокупное значения стоимости прямого использования ряда услуг исследуемой территории. В данной работе использованы некоторые известные методики для определения компонентов ОЭЦ [Constanza et al., 1997; Pagiola et al., 2004; Бобылев и др., 2016], которые были адаптированы к особенностям имеющихся данных. Для проведения оценки использовались следующие методы: метод рыночных цен – использует рыночный спрос на услуги экосистем, которыми в данном случае являются природные ресурсы: древесина, промысловые виды животных, рыб, ресурсы дикоросов, депонирование углерода; метод транспортно-путевых затрат дает оценку готовности платить за экосистемные услуги, находящиеся на определенном расстоянии от потребителя и оценивают расходы денег и времени для посещения этого места [Михальчик, 2014]; аналоговый – биологическая очистка вод или водоочистные функции экосистем. Полученные значения при эколого-экономической оценке приводятся в рублях и переводятся в доллары США по курсу ЦБ на момент расчетов (2020 год).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основой для эколого-экономических расчетов послужила информация о природе и природопользовании исследуемой территории. Была составлена карта «Природно-территориальные комплексы Тункинского национального парка», анализ которой позволил получить представление о распределении основных природно-территориальных комплексов (ПТК) в пределах изучаемой территории, а также определить их площади. Анализ карты позволил дать первичную информацию по распределению различных видов природных угодий по территории исследования. Общая площадь территории – около 1176200 тыс. га (рис. 1). Основные виды угодий (га): лесные – 701200 га; тундровые 170685; болотные – 29300; долины рек и ручьев – 116523; лесостепные – 54673 и степные – 103819.

В проведенный расчет взяты лишь те функции ПТК Тункинского парка, которые на современном этапе поддаются эколого-экономическим оценкам вследствие наличия необходимых данных и доступных методик. Проведена оценка следующих услуг экосистем: а) прямых (продукционных) – биологических ресурсов (по ряду видов промысловых животных, рыб, дикоросов); рекреационных ресурсов; пастбищных ресурсов; б) косвенных (средообразующих) – депонирование углерода лесами и болотами, фильтрационная способность болот.

Главными объектами охоты в районе исследований являются дикие копытные, пушные животные [Науумов, 2002]. Расчет проведен для таких видов, как лось, соболь, горностаи, косуля сибирская, белка, кабарга. У лося продается рога, шкура и мясо – общая стоимость около 35 500 руб./шт. Учитывались: цена 1 кг. мяса лося в среднем 100 руб.; средний вес одной особи около 250 кг, соответственно мясная стоимость лося равна приблизительно 25 000 руб./шт., стоимость рогов около 5500 руб.; шкуры 5000 руб. Популяция насчитывает около 122 особей на территории парка, разрешен отстрел 20



особей (20 % от общей численности). Общую стоимость добычи лося можно оценить в 864 тыс. руб.

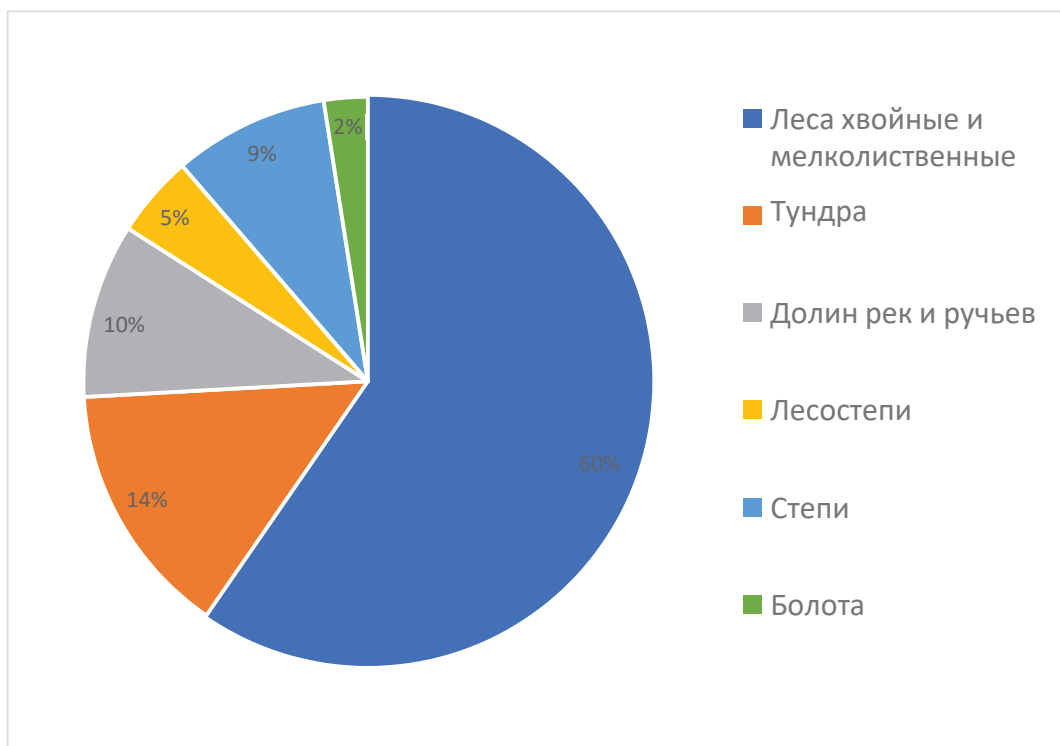


Рис. 1. Распределение площадей основных ПТК в Тункинском нацпарке

Fig. 1. Distribution of the areas of the main natural-territorial complexes in Tunkinsky National Park

Согласно данным парка, численность соболя на его территории находится на стабильном уровне и составляет 1050 особей. Норматив изъятия составляет 25 %. Учитывая, что одна шкурка соболя стоит в среднем 10 000 рублей, то общую стоимость добытых шкурок можно оценить в 2,6 млн руб. По данным парка численность белки находится на стабильном уровне, составляет 5418 особей. Учитывая, что можно добывать 20 % от общего числа популяции, общая стоимость добычи шкурок белки будет равна около 324 тыс. руб. Численность горностая в парке составляет 684 особи. Норматив изъятия – 20 %. Шкурка горностая стоит в среднем 700 рублей. Таким образом, общая стоимость добытых шкурок будет составлять 95 тысяч рублей.

Согласно учету в парке, численность косули – 513 особей. У косули реализуется мясо, рога, шкура – общая стоимость получается около 25 000 руб./шт. Учитывались: цена 1 кг мяса косули в среднем 400 руб.; средний вес одной особи около 50 кг, соответственно мясная стоимость равна приблизительно 20 000 руб./шт., стоимость рогов около 2000 руб.; шкуры 3000 руб. Общую стоимость добычи косули сибирской можно оценить в 250 тыс. руб.

Кабарга является одним из основных видов охотничьих ресурсов, численность в парке составляет 772 особи. Норматив изъятия составляет 3 % от численности, что составляет 15 особей. Стоимость одной особи около 87 тыс. руб. Учитывались: цена 1 кг мяса в среднем 350 руб.; средний вес одной особи около 15 кг, мясная часть стоит примерно 5 тыс. руб., мускусная железа в одной, средней железе обычно содержится  $\pm 20$  г., из железы делают спиртовую настойку из расчета 25 г на 0,5 л., таким образом при средней цене 10 мл. настойки в 2 тыс. руб., стоимость мускульной железы одной кабарги

составляет около 80 тыс. руб.; панты стоят около 2000 руб. Расчет показывает, что общую стоимость добычи можно оценить в 1,3 млн руб. в год.

Таким образом, общий доход от охоты на территории национального парка можно оценить в 5,4 млн руб.

На изучаемой территории ведется заготовка и сбор пищевых лесных ресурсов и лекарственных растений. В расчет взяты данные лесохозяйственного регламента 2016 года, в котором дана оценка возможному использованию ресурсов дикоросов (эксплуатационный запас), а также информация по биологической урожайности кедровых лесов по различным районам Бурятии [Традиционное..., 2007] (табл. 1). Возможный общий эксплуатационный доход от сбора и продажи дикоросов может составлять 345,5 млн рублей в год.

Табл. 1. Параметры использования лесов при заготовке дикоросов

Table 1. Parameters of the use of forests when harvesting wild plants

Вид дикоросов	Биологический запас, т	Ежегодный допустимый объем заготовки (эксплуатационный запас, т)
Кедровые орехи	1200	519
Брусника	321	112
Голубика	159	87
Черника	56	41
Клюква	71	43
Малина	48	25
Жимолость	68	36
Смородина	28	19
Облепиха	49	38
Другие ягоды	201	149
Грибы	620	462
Лекарственные растения	28	11,3

В водоёмах национального парка обитают следующие виды рыб ленок, хариус, щука, елец, сиг, язь, линь, плотва, карась, налим, голянь, окунь, голец, щиповка. Рыбопродуктивность водоемов и водотоков средняя и составляет от 0,7 до 4 кг/га. В зависимости от условий среды обитания размеры рыб значительно варьируют. Наиболее ценные промысловые виды рыбы: хариус, щука, язь, таймень и сиг. Имея средние цены на рыбу и объем обитаемой рыбы можно рассчитать эксплуатационный доход от рыболовства будет составлять 1,284 млн руб. за сезон.

Тункинский район чрезвычайно привлекателен для посещения рекреантами, особенно для жителей Бурятии и Иркутской области, основной объект притяжения – минеральные источники. По официальным данным администрации МО «Тункинский район» в 2019 году Тункинский район посетило 267 515 тысяч человек. Согласно статистике, в среднем туристу в Республике Бурятия оказывается услуг на 2643 руб. Таким образом, только по первичной оценке возможный общий доход от туризма может составлять 707,1 млн руб.

Количество сельскохозяйственных животных, выпасаемых в настоящее время на 158000 га пастбищ, составляет 32118 голов (коровы, лошади, овцы). Поголовье КРС (в

расчет взяты коровы симментальской породы, разводимых в районе) составляет 25 260 особей – это средняя цифра за последние 10 лет. В среднем с учетом убойной массы КРС около 180 кг. Средняя цена говядины на оптовом рынке около 200 руб. Таким образом, рыночная стоимость одной особи около 36 тыс. руб. При среднем оптимальном изъятии особей около 15 %, стоимость пастбищных ресурсов в пересчете на возможный доход от выпаса коров может составлять 136,404 млн. руб. в год.

Ресурсы дикоросов оценивались для кедровых шишек, голубики, черники, брусники. Для рыбопромысловых ресурсов – для хариуса, щуки, язя, тайменя и сига. Пастбищные ресурсы рассчитывались для разных видов пастбищ для коров, лошадей, яков, хайнаков, овец, северных оленей. Стоимость прямых экологических услуг для различных ПТК территории парка показана ниже (табл. 2).

Табл. 2. Стоимость прямых экологических услуг экосистем  
Тункинского национального парка

Table 2. Cost of direct ecological services of Tunkinsky National Park ecosystems

ПТК		Прямые услуги, долл.	Удельная стоимость
Леса	Лиственничный лес	1048770	11,8
	Кедровый лес	7768914	16,9
	Пихтово-кедровый лес	311479	15,7
	Сосновый травяной рододендровый лес	981508	12,4
	Лиственничный лес с кедровым стланником	71942	12,9
	Сосновый лес	96593	13,2
	Темнохвойные леса (пихта, ель)	208943	13,7
	Кедрово-сосново-пихтовый лес	104154	14,7
Болота		362954	12,4
Тундры		2144153	13,3
Лесостепи		986088	22,0
Степи		2886341	31,8
Долины рек и ручьев		2066333	16,6

Анализ полученной информации показал, что на территории парка удельная стоимость прямых услуг максимальна в лесостепях и степях (высокая оценка пастбищных ресурсов), а также в кедровых лесах: места произрастания ценного сырья – кедровых шишек орехи, места обитания ценных промысловых видов животных (соболь, горностаи, белка и др.). Высокую удельную стоимость имеют долины рек и ручьев (рыболовные, охотничьи, рекреационные ресурсы). Минимальная удельная стоимость наблюдается в тундровых и болотных ландшафтах, а также в сосновых и лиственничных лесах, хотя тундровые ландшафты располагают потенциальным ресурсом для выпаса северных оленей (тундровые и лесотундровые ПТК с ягельниками).

Были подсчитаны некоторые показатели косвенных услуг экосистем для того, чтобы показать высокую средообразующую и средозащитную роль в сохранении экосистемами территории природного баланса. Рассчитана водоочистная функция болот, депонирование углерода лесами и болотами [Пулы..., 2007]. Наибольшая стоимость косвенных услуг характерна для территорий, на которых присутствуют лесные массивы и

болота, которые участвуют в депонировании углерода (табл. 3). Наиболее ценными являются болота и с точки зрения их водоочистных функций, и с точки зрения депонирования углерода. Из лесных ПТК по данному показателю лидируют темнохвойные леса – пихтарники, ельники.

Для расчета стоимости водоочистных функций территории использовался аналоговый метод. Для оценки стоимости косвенного использования болот, их сравнивали со стоимостью фильтров промышленной очистной установки (ПОУ). Для расчета использованы данные:

- 1) Общая площадь болот: в тыс. га (29,3);
- 2) Фильтрующая способность болот: верховых и низинных (548 м<sup>3</sup>/га/сут и 137 м<sup>3</sup>/га/сут.), соответственно);
- 3) Продолжительность функционирования болот (безморозный период) – 112 дней;
- 4) Способность фильтрующей промышленной очистной установки (ПОУ) воды – 1500 м<sup>3</sup>/сутки;
- 5) Стоимость ПОУ – 50 тыс. долл. Срок работы ПОУ – 50 лет. Учитывая стоимость работы ПОУ в год, площадь болот и фильтрующую способность болот, получаем, что оценка «болотного потенциала» по очистке вод за безморозный период составляет 421,8 млн. руб. за год.

Площадь лесов (га): хвойные – 650357, мелколиственные – 83075; средний прирост запаса стволовой древесины в среднем за 5 лет (м<sup>3</sup>/га): хвойные – 1,6 мелколиственные – 2,4 (данные предоставленные парком). Объемный запас стволовой древесины, пророщенный в среднем за 5 лет (м<sup>3</sup>): хвойные – 1040571, мелколиственные – 199380. При расчетах применяются конверсионные коэффициенты, различающиеся для различных пород насаждений и возрастным группам. Запас углерода в фитомассе древостоев по группам преобладающих пород с учетом возраста древостоев рассчитан с учетом объемного запаса стволовой древесины и конверсионных коэффициентов (отдельно по группам преобладающих пород). Общий запас депонированного углерода складывается из суммы запасов углерода, рассчитанных для отдельных групп древостоев. Применялись следующие конверсионные коэффициенты (т/м<sup>3</sup>) для расчета запаса углерода в фитомассе древостоя по объемному запасу приращённой за год древесины лесного насаждения:

- для хвойных пород – 0,391,
- мелколиственных – 0,375.

В результате пересчета масса углерода в древесине (т.): хвойные: 406863; мелколиственные: 74767. Для получения объемов депонирования углекислого газа, необходимо полученные значения умножить на 3,66 – коэффициент пересчета объемов депонирования углерода в СО<sub>2</sub>. За стоимость депонирования углерода взят показатель средней стоимости эмиссии СО<sub>2</sub> на биржах посчитанный специалистами – 8,56 долл. Таким образом, стоимость депонирования углерода лесами парка составляет 15,089 млн долл.

Болота депонируют органические вещества на тысячелетия в отличие от лесов, которые связывают углерод на несколько десятков лет. Площадь болот: 29 300 га. Средняя величина депонирования углерода различными типами болот с учетом эмиссии составляет 43,7 г/м<sup>2</sup> в год или 0,437 т/га в год. Общий объем депонирования углерода 12 804 т. Для получения объемов депонирования углекислого газа, необходимо полученные значения умножить на 3,66 – коэффициент пересчета объемов депонирования углерода в СО<sub>2</sub>. Стоимость депонирования – 8,56 долл. Таким образом, стоимость депонирования углерода болотами исследуемой территории, по первичной оценке, равна 401 тыс. долл.

Табл. 3. Стоимость косвенных экологических услуг экосистем  
Тункинского национального парка

Table 3. Cost of indirect ecological services of Tunkinsky National Park ecosystems

ПТК		Косвенные услуги, долл.	Удельная стоимость
Леса	Лиственный лес	1490170	15,6
	Кедровый лес	8246723,9	15,4
	Пихтово-кедровый лес	330636	16,2
	Сосновый травяной рододендровый лес	1394598	17,3
	Лиственный лес с кедровым стланником	102221	15,9
	Сосновый лес	137247	17,2
	Темнохвойные леса (пихта, ель)	342149	18,2
	Кедрово-сосново-пихтовый лес	110560	17,1
Болота		6920463	236
Тундры		0	0
Лесостепи		197301	3,6
Степи		0	0
Долины рек и ручьев		2028470	12,7

Общая стоимость экологических услуг в экосистемах Тункинского национального парка представлена в таблице 4. Картографический метод позволяет наглядно демонстрировать ценность экосистемных услуг [Naidoo et al., 2008]. На основании анализа полученной информации и проведенных расчетов была составлена карта «Удельная стоимость экологических услуг Тункинского национального парка», позволяющая представить удельную стоимость прямых и косвенных экологических услуг, предоставляемых экосистемами парка (рис. 2).

Анализ полученной информации показал, что на территории парка наибольшая удельная стоимость наблюдается в болотных ландшафтах, которые важны для водоочистки и депонирования углерода. Из лесных ПТК, наибольшей стоимостью обладают кедровые леса. Высокая удельная стоимость также у лесостепных и степных ПТК, располагающих пастбищными ресурсами для рогатого скота, ограниченно обеспеченных охотопромысловыми ресурсами.

Удельная стоимость экологических услуг на территории Тункинского национального парка только по подсчитанным услугам (прямым и косвенным) составляет 2,25 тыс. руб. на 1 га/год или 35 долларов США на 1 га/год. Основную стоимость составляют косвенные услуги (54 %), тогда как прямые услуги составляют около 46 % от общей стоимости.

В случае, если принять в расчет косвенных услуг общий биологический запас промысловых видов биоты, по которым проводился расчет, то оценка общей стоимости косвенных услуг может быть в два раза выше, чем прямых, причем очевидно, что эта цифра показывает минимальное значение, которое удалось рассчитать на сегодняшний день.

Табл. 4. Общая стоимость экологических услуг в экосистемах Тункинского национального парка

Table 4. The total cost of ecological services of Tunkinsky National Park ecosystems

ПТК		Общие услуги, долл.	Удельная стоимость
Леса	Лиственный лес	2538940	27,4
	Кедровый лес	16015638	32,4
	Пихтово-кедровый лес	642115	31,9
	С сосновыми травяными рододендровыми горными лесами	2376106	29,7
	Лиственный лес с кедровым стланником	174164	28,8
	Сосновый лес	233840	30,4
	Темнохвойные леса (пихта, ель)	551092	31,9
	Кедрово-сосново-пихтовый лес	214714	31,8
Болота		7283417	248,4
Тундры		2144153	13,3
Лесостепи		1183389	25,6
Степи		2886341	31,8
Долины рек и ручьев		4094803	29,3

Удельная стоимость экологических услуг Тункинского национального парка

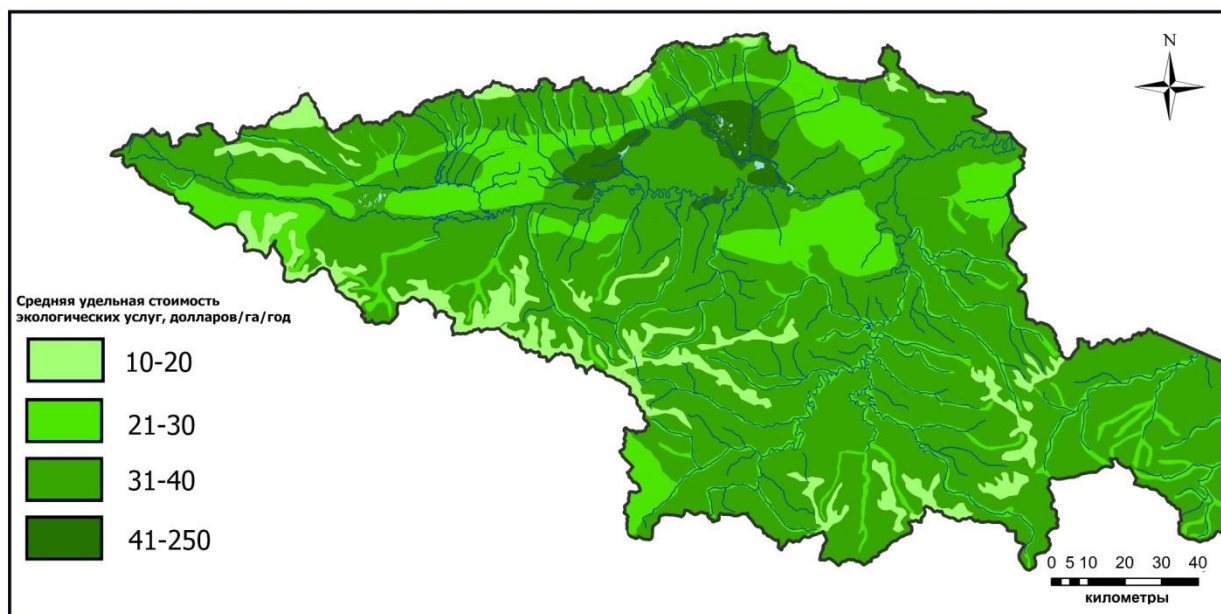


Рис. 2. Удельная стоимость экологических услуг Тункинского национального парка

Fig. 2. Specific cost of ecological services of Tunkinsky National Park

## ВЫВОДЫ

Территория исследования мало затронута хозяйственной деятельностью, поэтому сохранность экосистем здесь велика. Поэтому и велика их ценность – по проведенным подсчетам далеко по неполному перечню возможных показателей она составляет 41 млн долл. в год. Проведенная оценка экосистемных функций парка позволила выявить наиболее ценные участки, к которым отнесены болота, кедровые леса, степи и лесостепи: картографирование оценочных показателей это наглядно демонстрирует. Анализ показал, что по самым минимальным первичным расчетам, косвенные услуги в общей структуре стоимости экологических услуг территории составляют более половины. Одни из наибольших показателей средней удельной стоимости приурочены к уникальным природным комплексам района. Таким образом, вопрос выплат «экологическим донорам» становится ключевым для экономики таких территорий, а вовлечение местных жителей в экологически сбалансированное природопользование на территории парка может быть частью таких выплат.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды» и в рамках государственного задания «Устойчивое развитие территориальных систем природопользования» (проект № 121051100162-6).

## ACKNOWLEDGEMENTS

This research was performed according to the Development program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Lomonosov Moscow State University «Future Planet and Global Environmental Change» and within the framework of the state assignment "Sustainable development of territorial nature management systems" (project No 121051100162-6).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бобылев С.Н., Букварева Е.Н., Грабовский В.И., Данилкин А.А. и др.* Экосистемные услуги России: Прототип национального доклада. Т. 1. Услуги наземных экосистем. М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2016. 148 с.
2. *Михальчик К.И.* Применение метода транспортно-путевых затрат для определения экономической стоимости национальных парков и рекреационных зон: теоретический аспект. Молодой ученый, 2014. № 2. С. 500–502.
3. *Наумов П.П.* Эколого-экономическая оценка ресурсного потенциала и ущерба животному миру. Настольная книга по экономике сохранения биоразнообразия Байкальского региона. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2002. С. 33–38.
4. *Неверов А., Редковская О., Неверов Д.* Экономическая оценка биоразнообразия особо охраняемых природных территорий Беларуси. Природные ресурсы. 2001. №3. С. 89–96.
5. *Перелет Р.А.* Глобальные экологические (экосистемные) услуги – международные обмены и торговля. Инновации в рациональное природопользование и охрану окружающей среды. Ярославль: НПП «Кадастр», 2003. С. 78–85.
6. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 324 с.
7. *Тишков А.А.* Биосферные функции природных экосистем России. М., 309 с.
8. Традиционное природопользование: культурно-бытовые и хозяйственные аспекты. М.: Академия естествознания, 2007. 202 с.
9. *Constanza R., d'Arge R., de Groot R. et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997. V. 387. P. 253–260.
10. *Dixon J.A., Scura L.F., Carpenter R.A., Sherman P.B.* Economic Analysis of Environmental Impacts. London, 1994. 228 p.

11. Kirillov S., Slipenchuk M., Zengina T. Management of the sustainable development of the Baikal natural territory in Russia. *International Journal of Innovation and Sustainable Development*, 2016. V. 10. No 1. P. 57–68. DOI: 10.1504/IJISD.2016.073418.
12. Balmford A., Costanza R. et al. Global mapping of ecosystem services and conservation priorities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008. V. 105. No 28. P. 9495–9500. DOI: 10.1073/pnas.0707823105.
13. Pagiola S., von Ritter K., Bishop J.T. *Assessing the Economic Value of Ecosystem Conservation*. World Bank Environment Department, 2004. 66 p.
14. Slipenchuk M., Kirillov S., Vorobyova T., Zengina T. Mapping the recreational zones of the Republic of Buryatia, Russia. 15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference and EXPO, SGEM 2015, 2015. V. 2. P. 979-986. DOI: 10.5593/SGEM 2015/B22/S11.122.

### REFERENCES

1. Bobylev S.N., Bukvareva E.N., Grabovsky V.I., Danilkin A.A. et al. *Ecosystem Services in Russia: Prototype of the National Report*. T. 1. Services of terrestrial ecosystems. Moscow: Publishing house of the Center for Wildlife Conservation, 2016. 148 p. (in Russian).
2. Constanza R., d'Arge R., de Groot R. et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997. V. 387. P. 253–260.
3. Dixon J.A., Scura L.F., Carpenter R.A., Sherman P.B. *Economic Analysis of Environmental Impacts*. London, 1994. 228 p.
4. Kirillov S., Slipenchuk M., Zengina T. Management of the sustainable development of the Baikal natural territory in Russia. *International Journal of Innovation and Sustainable Development*, 2016. V. 10. No 1. P. 57–68. DOI: 10.1504/IJISD.2016. 073418.
5. Mikhailchik K.I. Application of the method of transport and travel costs to determine the economic value of national parks and recreational areas: theoretical aspect. *Young Scientist*, 2014. No 2. P. 500–502 (in Russian).
6. Naidoo R., Balmford A., Costanza R. et al. Global mapping of ecosystem services and conservation priorities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008. V. 105. No 28. P. 9495-9500. DOI: 10.1073/pnas.0707823105.
7. Naumov P.P. Ecological and economic assessment of resource potential and damage to the animal world. *Handbook on the economics of biodiversity conservation in the Baikal region*. Irkutsk: Irkutsk University Publishing House, 2002. P. 33–38 (in Russian).
8. Neverov A.V., Redkovskaya O.V., Neverov D.A. Economic assessment of biodiversity of specially protected natural areas of Belarus. *Natural resources*. 2001. No 3. P. 89–96 (in Russian).
9. Pagiola S., von Ritter K., Bishop J.T. *Assessing the Economic Value of Ecosystem Conservation*. World Bank Environment Department, 2004. 66 p.
10. Perelet R.A. Global ecological (ecosystem) services – international exchanges and trade. *Innovations in environmental management and environmental protection*. Yaroslavl: Cadastr, 2003. P. 78–85 (in Russian).
11. Pools and fluxes of carbon in terrestrial ecosystems in Russia. Moscow: Nauka, 2007. 324 p. (in Russian).
12. Slipenchuk M., Kirillov S., Vorobyova T., Zengina T. Mapping the recreational zones of the Republic of Buryatia, Russia. 15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference and EXPO, SGEM 2015, 2015. V. 2. P. 979–986. DOI: 10.5593/SGEM2015/ B22/S11.122.
13. Tishkov A.A. *Biosphere functions of natural ecosystems in Russia*. Moscow: Nauka, 2005. 309 p. (in Russian).
14. *Traditional nature management: cultural, household and economic aspects*. Moscow: Academy of Natural Sciences, 2007. 202 p. (in Russian).



УДК 528.94: 502.2: 504.03

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-297-311

Д.А. Лопаткин<sup>1</sup>

## КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СБАЛАНСИРОВАННОСТИ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА ПО ОТДЕЛЬНЫМ КАТЕГОРИЯМ ЗЕМЕЛЬ

### АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются основные методы оценки экологической сбалансированности территорий Байкальского региона посредством системы количественных оценок и экспертных характеристик исследуемых процессов на основе статистических данных. Экологическое равновесие Байкальской природной территории как сбалансированное соотношение естественных и измененных геосистем находится в зависимости от целостности природного каркаса региона. Природный каркас состоит непосредственно из экосистемы оз. Байкал, гидрографической сети бассейна озера, природных горно-таежных и других экологически значимых геосистем, образующих природную инфраструктуру региона, неразрывно связанную с социально-экономической инфраструктурой (социально-экономическим каркасом), состоящей из сети населенных пунктов и элементов инфраструктуры. Природные (естественные) геосистемы, составляющие природный каркас, также являются особым ресурсом экологической стабильности (равновесия). В качестве базовых картографических материалов использовались слои электронных карт «Экологического атласа Байкальского региона». Проведена инвентаризация и составлена база пространственных и непространственных данных по основным показателям экологической стабильности территории (естественная защищенность, напряженность территории и антропогенная нагрузка). Атрибутивные данные представлены в виде набора таблиц MapInfo, с которыми легко производить операции переструктуризации (изменение структуры и состава таблиц) данных и SQL – запросы. Пространственные данные представлены в виде векторной топологической модели данных. Для исследования экологического состояния земель региона выполнен геоинформационный анализ данных земельного кадастра, отражающий современное состояние промышленного, лесо- и сельскохозяйственного и другого воздействия на природные и природно-антропогенные геосистемы. Проведена типизация земель Байкальского региона, характеризующихся различной степенью антропогенной нагрузки. Рассчитаны коэффициенты относительной и абсолютной напряженности территории. Определен коэффициент естественной защищенности земель и коэффициент антропогенной нагрузки. Административные районы ранжированы по степени напряженности экологического состояния земель Байкальского региона.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** геоинформационное картографирование, региональный экологический каркас, экологическая сбалансированность территории, земельные ресурсы.

---

<sup>1</sup> Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, д. 1, 664033, Иркутск, Россия;  
e-mail: lopatkind@yandex.ru

**Dmitriy A. Lopatkin<sup>1</sup>**

## **MAPPING A ECOLOGICAL BALANCE OF THE BAIKAL REGION BY INDIVIDUAL LAND CATEGORIES**

### **ABSTRACT**

The article discusses the main methods of assessing the ecological balance of the territories of the Baikal region through a system of quantitative estimates and expert characteristics of the studied processes on the basis of statistical data. The ecological balance of the Baikal Natural Territory as a balanced ratio of natural and modified geo-systems depends on the integrity of the natural frame of the region. The natural framework consists directly of the oz ecosystem. Baikal, the hydrographic network of the lake basin, the natural mountain-taiga and other ecologically significant geosystems that form the natural infrastructure of the region, inextricably linked to the socio-economic infrastructure (socio-economic framework) consisting of a network of human settlements and infrastructure. Natural geosystems, which form the natural framework, are also a special resource for ecological stability (balanced). The electronic map layers of the «Environmental Atlas of the Baikal Region» were used as basic cartographic materials. An inventory was carried out and a database of spatial and non-spatial data on the main indicators of the ecological stability of the territory (natural security, territorial tension and anthropogenic load) was compiled. Attribute data is represented in the form of a set of MapInfo tables with which it is easy to carry out re-structuring operations (changing the structure and composition of tables) data and SQL – queries. Spatial data are presented as a vector topological data model. For the study of the ecological condition of the land of the region, the analysis of land cadastre data reflecting the current state of industrial, forestry, agriculture and other impacts on natural and natural anthropogenic geosystems was carried out. The land of the Baikal region, which is subject to varying degrees of anthropogenic pressure, has been classified. The relative and absolute intensity ratios of the territory have been calculated. The natural land protection factor and the anthropogenic load factor have been determined. The administrative regions are ranked according to the intensity of the ecological state of the lands of the Baikal region.

**KEYWORDS:** geoinformation mapping, regional ecological framework, ecological balance of the territory, land inventories

### **ВВЕДЕНИЕ**

В условиях возрастающей трансформации природной среды, современные системы природопользования – это преобразованные природно-антропогенные и техногенные ландшафты. Среди них широко распространены промышленные, лесо- и агропромышленные и селитебные геосистемы. Замена природных (коренных) геосистем природно-антропогенными и техногенными геосистемами приводит к изменению структуры природных геосистем, природных связей между компонентами, снижению основных функций – обмена вещества и энергией и свойств – целостности и территориальности. Исследование стабильности территориальной структуры, конструктивное использование разных способов и методик является актуальной задачей для решения проблемы рационального природопользования. На протяжении многих лет (более 100) в практике ландшафтных исследований, землеустройства и проектирования прилагаются усилия для формирования оптимальной структуры природопользования. Под экологической оптимизацией территории следует понимать закономерную совокупность мероприятий, направленных на нахождение

---

<sup>1</sup> V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Ulan-Batorskaya str., 1, 664033, Irkutsk, Russia;  
*e-mail:* [lopatkind@yandex.ru](mailto:lopatkind@yandex.ru)

ние оптимального варианта природопользования на определенном территориальном уровне. Социально-экономическое значение ландшафтного разнообразия обусловлено современным состоянием, степенью и видом использования в экономике, общими экологическими функциями, а также устойчивостью перед природными изменениями и деятельностью человека [Михеев, 2001]. Данные процессы усугубляются растущей социальной напряженностью, ослаблением контроля со стороны властей, потребительским отношением к природе, отсутствием средств на охрану окружающей среды из-за экономического кризиса в странах. Все это требует совершенствования структуры природопользования, создания эффективной организации территории<sup>1</sup>.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Решению проблемы устойчивости природно-антропогенных систем посвящено множество научных работ в России и за рубежом. Исследованиям, проводимым с применением методики расчета экологической устойчивости и стабильности территории на основе системы количественных оценок и характеристик изучаемых процессов, уделяется внимание специалистами различных отраслей знаний географических и смежных наук – землеустройства, геоэкологии, защиты окружающей среды, природообустройства, территориального планирования и экономики землепользования. В 1980-е годы широкое распространение получила методика оценки экологической стабильности ландшафта словацких ученых из Технического университета (г. Братислава) И. Рыбарски и Э. Гайссе [1981], согласно которым экологическая стабильность территории зависит от соотношения состава и структуры земельных угодий, условий и режима их использования. Для геоэкологических исследований России Б.И. Кочуровым [2003] на основе анализа структуры землепользований, с учетом потенциальных и реальных возможностей природы, была разработана концепция эколого-хозяйственного баланса земель. В сфере землеустройства, экономики землепользования и земельного кадастра схожую методику применял С.Н. Волков [2001]. В работах А.А. Тишкова [2018] с позиции биогеографии, в качестве индикаторов диагностики экосистем применяются данные о биомассе живого вещества как потенциала самоорганизации биосферы. Коллектив авторов Воронежской школы антропогенного ландшафтоведения, в качестве индикаторов диагностики и оценки устойчивости геосистем применяет параметры почвенного органогенного горизонта [Попова, Михно, 2012]. Применяется также биотехнический способ измерения состояния территории по площади растительного покрова. Расчет значения активности растительного покрова ведется по данным земельного кадастра [Мазуркин, 2020].

**АИС и ГИС.** Экспертные и интегральные системы оценки для анализа устойчивости природно-антропогенных систем нашли свое применение в атласных информационных системах (АИС). Одной из первых атласных информационных систем России, где методология качественной и полуколичественной оценки устойчивости сложных систем реализована на системе аналитического картографирования DataGraf, является Web-Атлас «Окружающая среда и здоровье населения России»<sup>2</sup>. В атласе рассмотрены критерии качественной оценки баланса и дисбаланса между разнообразием и

<sup>1</sup> Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года [Электронный ресурс]. <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=102028490&backlink=1&&nd=102430636> (дата обращения: 12.04.2021).

<sup>2</sup> Окружающая среда и здоровье населения России: Web-Атлас. [Электронный ресурс]. — <http://www.sci.aha.ru/ATL/ra00.htm> (дата обращения 12.04.2021).

однообразием в системе «природа – общество». Суть полуколичественной оценки явления заключается в приближенном выражении на основе статистических данных и экспертных оценок. С позиций актуальной биогеографии авторским коллективом ряда Институтов РАН (Москва) проведен ГИС-анализ данных дистанционного зондирования для оценки состояния природного каркаса в пределах каждого биома по сочетанию потерь площади и фитомассы природных экосистем Великого Евразийского природного массива. В качестве единиц картографирования рассматриваются биомы или их целостные части, за исключением промышленных, селитебных территорий и других трансформированных ландшафтов [Соболев и др., 2020]. Из множества выполняемых работ для Сибирского макрорегиона, можно выделить ГИС-разработку коллектива Института географии СО РАН (Иркутск) на основе геосистемной концепции академика В.Б. Сочавы [Плюснин и др., 2015]. Категории экологической стабильности геосистем, отражающие способность восстанавливать свою нарушенную структуру после внешнего воздействия, были установлены на основе структурно-функционального анализа соотношения характеристик в системе «область – геом» для набора геомеров в каждой из ландшафтных областей Байкальского региона. Природные структуры региона сгруппированы в категории уязвимости геосистем. По показателям устойчивости ландшафта к антропогенным ситуациям Т.И. Кузнецовой с соавторами составлена серия геоэкологических карт, которые явились базовыми для Web-атласа «Экологический атлас Байкальского региона»<sup>1</sup>.

**Объект исследования и методика картографирования.** Байкальский регион (БР) как объект исследования обладает признаками природно-территориальной и социально-культурной целостности<sup>2</sup>. Рассматриваемая территория охватывает субъекты Российской Федерации – Иркутскую область, Республику Бурятия и Забайкальский край. Два последних до недавнего времени относились к Сибирскому федеральному округу, сейчас входят в состав Дальневосточного федерального округа. Природный фон региона составляют зональные и азональные ландшафты суши и аквальные геосистемы оз. Байкал. В планетарном аспекте все многообразие геосистем региона относится к двум субконтинентам: Северной и Центральной Азии, которые представлены тундровым, таежным и степным типом природной среды, характеризующейся высоким уровнем биологического разнообразия и повышенной чувствительностью к внешним воздействиям.

В качестве научно-методической основы картографирования экологической сбалансированности Байкальского региона использован общетеоретический подход и совокупность территориальной организации природных и антропогенных геосистем бассейна Байкала и систем административно-территориального деления на основе статистических данных. В рамках исследования на макро- мезо- микрорегиональном уровне используется административный подход к управлению природными, в частности земельными ресурсами, и административно-территориальные единицы различного уровня, рассматриваемые как объект изучения экологической сбалансированности региона, обеспечиваются формализованными статистическими данными, что позволяет использовать алгоритмы обработки атрибутивных данных при геоинформационном картографировании экологического баланса БР. Анализируются данные земельного кадастра о распределении земельного фонда Байкальского региона по отдельным категориям земель. Для оценки степени сбалансированности территориальной структуры (отдельных категорий земель) БР проведена:

- 1) Типизация и распределение земель по степени антропогенного воздействия;

<sup>1</sup> Экологический атлас Байкальского региона. Иркутск: Изд-во ин-та географии СО РАН, 2017 [Электронный ресурс]. <http://atlas.isc.irk.ru> (дата обращения 12.04.2021).

- 2) Оценка обеспеченности БР элементами экологического каркаса (ЭК) на макро- мезо- и микрорегиональном уровнях;
- 3) Показатели экологической сбалансированности по Кочурову [2003] – естественная защищенность (КЕЗ), напряженность территории (КА, КО) и антропогенная нагрузка (КАН), адаптированы к существующей системе земельного кадастра БР на уровне административных районов.

**Распределение земель БР по категориям и видам угодий.** Земельный фонд региона представлен практически всеми категориями земельных угодий и видами использования земель умеренного климатического пояса. Однако его расположение в разных частях БР неравномерно. В общей структуре угодий преобладают сельскохозяйственные и несельскохозяйственные лесные, водно-болотные, прочие земли, которые размещаются в соответствии с горно-котловинным строением территории. Несмотря на большую общую площадь сельскохозяйственных земель в Республике Бурятия и Забайкальском крае по сравнению с Иркутской областью, доля сельскохозяйственных угодий в общей площади земель сельскохозяйственного назначения в Иркутской области составляет 80–90 %, а в Республике Бурятия и Забайкалье – от 70 до 80 %. Общая доля неиспользуемых земель от общей площади земель сельскохозяйственного назначения по Сибирскому и Дальневосточному федеральному округу составляет 5–10 %. В целом, по России этот показатель находится в пределах 11,8 % (по данным Росреестра по состоянию на 1 января 2020)<sup>1</sup>. По целевому назначению земельный фонд БР подразделяется на следующие основные категории земельного кадастра, представленные в таблице 1. Земельный фонд также распределяется по формам собственности и видам права на землю<sup>2</sup>.

*Табл. 1. Структура земельного фонда Байкальского региона по категориям земель на 1 января 2020 (по данным Росреестра), тыс. га*

*Table 1. Structure of the land fund of the Baikal region by land category as of 1 January 2020 (according to Rosregister), thousand. Ha*

Субъекты РФ	Всего категории земель	Категории земельного фонда						
		ЗСХН <sup>1</sup>	ЗНП <sup>2</sup>	ЗПиИН <sup>3</sup>	ЗООТ <sup>4</sup>	ЗЛФ <sup>5</sup>	ЗВФ <sup>6</sup>	ЗЗ <sup>7</sup>
Иркутская область	77686,7	2875,6	412,7	579,6	1552,4	69328,8	2241,5	494
Республика Бурятия	35133,4	2761,1	157,6	497,4	2093,7	26906,9	2124,2	592,5
Забайкальский край	43189,2	7985,8	235,3	1328,1	401,4	31936,5	121,8	1180,8

*Примечание: 1 – земли сельскохозяйственного назначения; 2 – земли населенных пунктов; 3 – земли промышленности и иного назначения; 4 – земли особо охраняемых территорий; 5 – земли лесного фонда; 6 – земли водного фонда; 7 – земли запаса.*

**Обеспеченность БР элементами ЭК.** Учитывая, что на нормативно-правовой основе выделены только ядерные элементы (заповедники, национальные

<sup>1</sup> Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2019 году [Электронный ресурс]. <https://www.mcx.ac.ru/upload/iblock/287/2877460f9167db668b75d4a5df2d4a13.pdf> (дата обращения: 12.04.2021).

<sup>2</sup> Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2019 году [Электронный ресурс]. <https://rosreestr.gov.ru/upload/Doc/16-upr/Госдоклад за 2019 год.pdf> (дата обращения: 12.04.2021).

парки, заповедники и т.д.), обеспеченность БР рассчитывалась только этими элементами. На федеральном уровне доля ядерных элементов ЭК от общей площади территории Российской Федерации составляет 2,7 %, количество особо охраняемых природных территорий различных уровней и категорий составляет около 13 тыс.<sup>1</sup> На уровне субъектов Российской Федерации доля ядерных элементов (заповедники и национальные парки федерального значения) составляет 5–10 % в Республике Бурятия, в Иркутской области доля этих элементов изменяется до 1–3 %, наименее обеспечена экологическими ядрами территория Забайкальского края менее 1 % [Особо охраняемые..., 2007]. В границах водосборного бассейна оз. Байкал, выделены зоны по обеспеченности элементами ЭК. Первая зона обеспечена на 25,5 % ядерными элементами ЭК в границах Центральной экологической зоны Байкальской природной территории (БПТ). Более 70 % территории этой зоны отнесены к объекту Всемирного природного наследия, зона отличается качественным разнообразием структурных элементов, которые выделены на законодательной основе (заповедники, национальные парки, заказники, водоохранная зона оз. Байкал). Вторая зона менее – 7 % включает российскую часть бассейн оз. Байкал за исключением первой зоны. Для нее характерно относительно равномерное распределение ядерных и линейных элементов (экологических коридоров) ЭК за счет водоохраных зон вдоль рек. Третья зона более – 10 % включает ЭК в монгольской части бассейна Байкала. Характерные особенности зоны определяются наличием крупных ядерных элементов по периферии и их отсутствием в центральной части зоны [Лопаткин, 2019].

**Типизация земель.** Для целей оценки экологической стабильности БР условно, всю структуру земельного кадастра можно подразделить на типы территорий: неурбанизированные территории (природные и природно-антропогенные объекты), урбанизированные территории (совокупность природно-антропогенных и техногенных объектов) и неиспользуемые территории неопределенного статуса (земли запаса). Категории земельного кадастра и типы территорий располагаются в таблице по степени увеличения антропогенного воздействия на природную среду (табл. 2).

*Табл. 2. Система оценки степени антропогенной нагрузки отдельных категорий земель и типы территорий Байкальского региона*

*Table 2. System for estimating anthropogenic pressure of selected land categories and types of territories of the Baikal region*

Типы территорий	Категорий земель, соответствующие степени антропогенной нагрузки и баллу оценки, P <sub>i</sub>	Степень антропогенной нагрузки	Баллы оценки, B <sub>i</sub>
Неурбанизированные	Особо охраняемых территорий и объектов (P1)	Очень низкая	1
	Водного фонда (P2)	Низкая	2
	Лесного фонда (P3)	Средняя	3
	Сельскохозяйственного назначения (P4)	Значительная	4
Неиспользуемые территории	Земли запаса (P5)	Высокая	5
Урбанизированные	Земли промышленности, транспорта и иного назначения; Земли населенных пунктов (P6)	Очень высокая	6

<sup>1</sup> Стратегия Развития системы особо охраняемых природных территорий Российской Федерации на период до 2030 года) [Электронный ресурс]. <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=PNPA&n=65776#03353058383212144> (дата обращения: 12.04.2021).

Наибольшую антропогенную нагрузку – 6 баллов по данной методике испытывают **урбанизированные территории** – участки суши, занятые поселениями городского типа и связанные с ними производственными, транспортными и инженерными сооружениями по Н.Ф. Реймерсу [1990]. К этому типу отнесены категории земельного фонда – земли населенных пунктов; земли промышленности, энергетики, транспорта, связи, радиовещания, телевидения, информатики, земли для обеспечения космической деятельности, земли обороны, безопасности и земли иного специального назначения, испытывающие наибольшую антропогенную нагрузку.

**Неиспользуемые территории** (земли запаса) высокая степень нагрузки – 5 баллов характеризуются как особый тип территорий неопределенного статуса, которые из-за непригодности для сельскохозяйственной обработки, или строительства не используются промышленными лесо- и сельскохозяйственными предприятиями и частными собственниками. К землям запаса относятся неосвоенные территории утратившие полезные свойства, подверженные радиоактивному и химическому загрязнению, технологическим и природные катаклизмам и низким температурам. Использование земель запаса возможно после перевода их в другую категорию и особых случаев предусмотренных законодательством РФ<sup>1</sup>.

Под **неурбанизированными территориями** понимают все пространство вне промышленной и селитебной зоны, которым придаются особые экологические средообразующие и средорегулирующие функции. К этой группе земель относятся оставшиеся категории земельного кадастра: *Земли сельскохозяйственного назначения* оценка степени нагрузки – 4 балла. Согласно Стратегии устойчивого развития сельских территорий Российской Федерации на период до 2030 года<sup>2</sup> Республика Бурятия и Забайкальский край относятся к регионам с неблагоприятными социальными условиями развития сельской местности и обширными зонами социально-экономической депрессии. Иркутская область – к регионам со слабой очаговой освоенностью сельской местности и неблагоприятными природно-климатическими условиями ее развития с преобладанием добывающей и лесной промышленности. В связи с этим выполнение основных экологических функций – природоохранной (поддержание экологического равновесия, сохранение природных ландшафтов, обустройство и функционирование заповедников, национальных парков и др.) и рекреационной (обеспечение оздоровления и отдыха населения) неурбанизированными (сельскохозяйственными и лесохозяйственными) территориями проявляются не в полной мере и с большими затратами. *Земли лесного фонда*. Антропогенная нагрузка оцениваются в – 3 балла. Основным целевым назначением земель лесного фонда является ведение на них лесного хозяйства (лесоразведение, лесовосстановление, сохранение лесов, обеспечение рационального лесопользования, охраны и защиты лесов). Несмотря на значительные площади лесного фонда<sup>3</sup> в общей площади земель – 89 % в Иркутской области – 76 % и 73,9 % в республике

<sup>1</sup> Земельный кодекс Российской Федерации" от 25.10.2001 N 136-ФЗ (ред. от 30.12.2020) (с изм. и доп., вступ. в силу с 10.01.2021). [Электронный ресурс]. [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_33773/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/) (дата обращения 12.04.2021).

<sup>2</sup> Стратегия устойчивого развития сельских территорий Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс]: <http://static.government.ru/media/files/Fw1kbNXVJxQ.pdf> (дата обращения 12.04.2021).

<sup>3</sup> Региональный доклад о состоянии и использовании земель в Иркутской области за 2019 год [Электронный ресурс]. <https://rosreestr.gov.ru/site/open-service/statistika-i-analitika/zemleustroystvo-i-monitoring/regionalnyy-doklad-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-zemel-v-irkutskoy-oblasti-za-2015-god/> (дата обращения: 12.04.2021).

Бурятия и Забайкальском крае соответственно, ущерб землям лесного фонда от антропогенного воздействия также значителен (техногенные загрязнения и лесные пожары, не целевые рубки леса, рекреация и др.). *Земли водного фонда* антропогенная нагрузка оценивая в – 2 балла. Значительная часть водного фонда представлена оз. Байкал крупными водохранилищами – Иркутским, Братским, Усть-Илимским; реками – Нижняя-Тунгуска, Лена, Ангара, Селенга, Шилка и др. Водные объекты в зависимости от особенностей их режима, физико-географических, морфометрических и других особенностей подразделяются на поверхностные водные объекты и подземные водные объекты. Отличительной характеристикой земель водного фонда является постоянная гидравлическая связь. К водному фонду не относятся котлованы и отстойники заполненные водой. В Российской Федерации земли водного фонда являются особо охраняемыми, при этом допустимо их использование для ведения легальной хозяйственной деятельности, при соблюдении целевого назначения ЗК РФ<sup>7</sup>. *Земли ООПТ* испытывают наименьшую антропогенную нагрузку – 1 балл. В соответствии с действующим законодательством к особо охраняемым территориям относятся земли, имеющие особое природоохранное, научное, историко-культурное, эстетическое, оздоровительное, рекреационное и иное ценное значение. Целевое предназначение земель особо охраняемых территорий как самостоятельной категории земель определено Федеральным законом Российской Федерации «Об особо охраняемых природных территориях».<sup>1</sup>

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве базовых картографических материалов использовались слои электронных карт «Экологического атласа Байкальского региона»<sup>3</sup>. Проведена инвентаризация и составлена база пространственных и непространственных данных по основным показателям экологической стабильности территории (естественная защищенность, напряженность территории и антропогенная нагрузка). Атрибутивные данные представлены в виде набора таблиц MapInfo, с которыми легко производить операции реструктуризации (изменение структуры и состава таблиц) данных и SQL – запросы. Пространственные данные представлены в виде векторной топологической модели данных. Для картографического отображения результатов исследования, был выбран способ фоновой картограммы характерный для относительных явлений (рис. 1–4). Выделенные на картах экологические показатели ранжируются на категории по степени антропогенной нагрузки: низкая, средняя и высокая. Каждая категория экологического состояния на карте отображается цветовым фоном по принципу интенсивности цветового фона по мере увеличения или уменьшения значения показателя явления.

**Показатели экологической сбалансированности Байкальского региона. Показатель естественной защищенности** (рис. 1) рассчитывается по формуле:

$$K_{ez} = P_{сф}/P_0, (1)$$

где  $P_{сф}$  «экологический фонд» – площади земель со средо- и ресурсосберегающими функциями ( $P_1, P_2, P_3, P_4$ ),  $P_1$  – с минимальной экологической нагрузкой принимается за 1, а остальные земли ранжируются по степени уменьшения экологических функций интервал ранжирования равен 0,2. В расчет не принимаются земли с высокой степенью антропогенной нагрузки ( $P_5, P_6$ );

<sup>1</sup> Федеральный закон Российской Федерации «Об особо охраняемых природных территориях» [Электронный ресурс]: <https://base.garant.ru/10107990/> (дата обращения 12.04.2021).



$$P_{сф} = P1 + 0,8 * P2 + 0,6 * P3 + 0,4 * P4, (2)$$

$P_0$  – общая площадь исследуемой территории.

В пределах БР естественная защищенность изменяется от минимального значения  $K_{ез} = 0,22$  в Забайкальском районе Забайкальского края и максимального –  $K_{ез} = 0,99$  в Тункинском районе Республики Бурятия, где формирующий экологический фонд Тункинский национальный парк занимают почти целиком территорию административного района. В результате, выделено три группы районов: с низкой –  $K_{ез} < 0,5$ ; средней  $K_{ез} = 0,5 - 0,75$  и относительно высокой –  $K_{ез} > 0,75$  степенью естественной защищенности. Значение  $K_{ез} < 0,5$  свидетельствует о критическом уровне естественной защищенности региона. Наименьшую степень защищенности испытывают районы лесостепной и степной природной зоны. При этом их значительная часть сконцентрирована в южных, и юго-западных примагистральных районах региона. Это наиболее благоприятные по природно-климатическим условиям и наиболее освоенные в хозяйственном отношении районы с небольшой долей земель со средообразующими функциями.

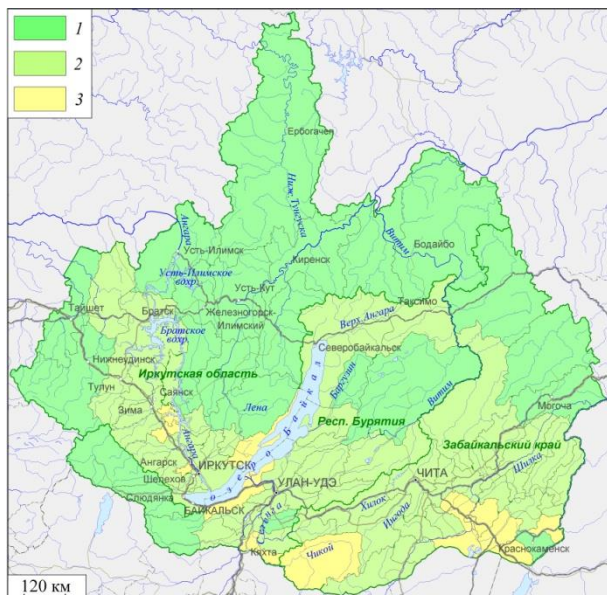


Рис. 1. Естественная защищенность Байкальского региона. Степень естественной защищенности территории: 1 – относительно высокая ( $K_{ез} > 0,75$ ); 2 – средняя ( $K_{ез} = 0,5 - 0,75$ ); 3 – низкая ( $K_{ез} < 0,5$ )

Fig. 1. Indicator of natural protection of the Baikal region. The degree of natural protection of the territory: 1 – relatively high ( $C_{np} > 0.75$ ); 2 – medium ( $C_{np} = 0.5-0.75$ ); 3 – low ( $C_{np} < 0.5$ )

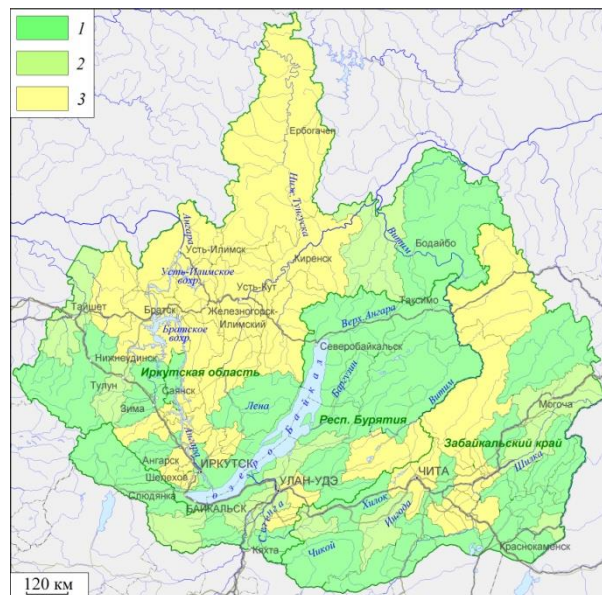


Рис. 2. Коэффициент абсолютной антропогенной напряженности. Абсолютная антропогенная напряженность территории: 1 – относительно низкая ( $K_a < 0,5$ ), 2 – напряженная ( $K_a = 0,5 - 1$ ), 3 – высокая ( $K_a \geq 1$ )

Fig. 2. Indicator of absolute anthropogenic tensions Absolute anthropogenic tensions of the territory: 1 – relatively low ( $C_a < 0.5$ ), 2 – stressful ( $C_a = 0.5 - 1$ ), 3 – high ( $C_a \geq 1$ )

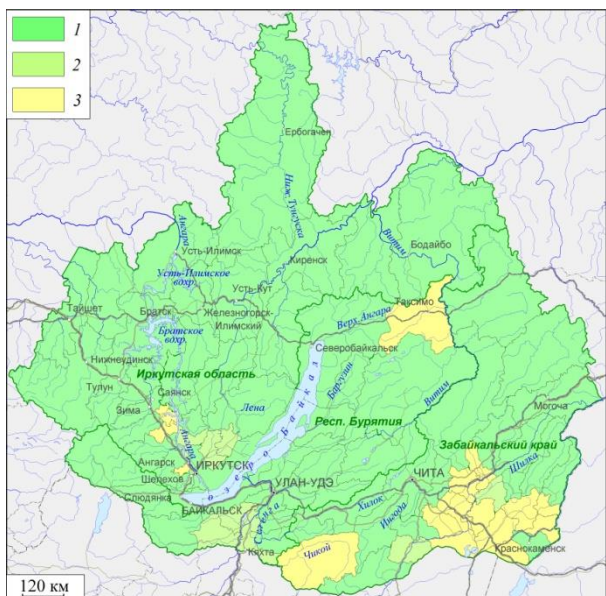


Рис. 3. Коэффициент относительной антропогенной напряженности. Относительная антропогенная напряженность территории: 1 – низкая ( $K_o < 0,5$ ), 2 – средняя ( $K_o = 0,5 - 1$ ), 3 – высокая ( $K_o \geq 1$ )

Fig. 3. Coefficient of relative anthropogenic stress. Relative anthropogenic stress of the territory: 1 – low ( $C_r < 0.5$ ), 2 – medium ( $C_r = 0.5 - 1$ ), 3 – high ( $C_r \geq 1$ )

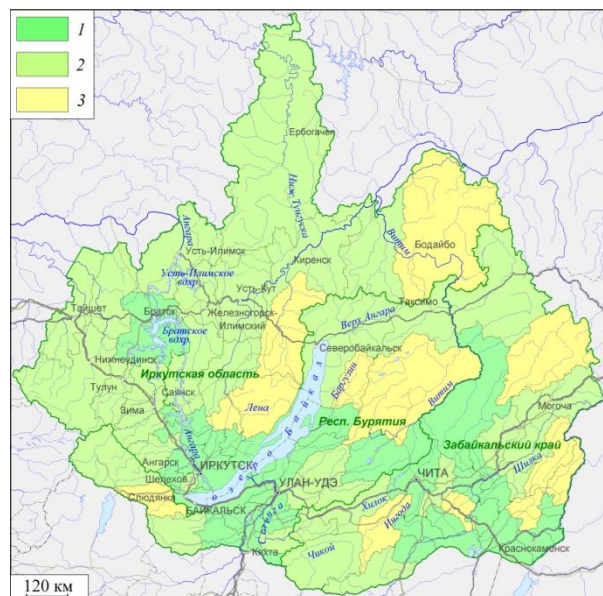


Рис. 4. Коэффициент антропогенной нагрузки Байкальского региона. Антропогенная нагрузка территории: 1 – высокая ( $K_{ан} \geq 2,5$ ); 2 – напряженная ( $K_{ан} = 2 - 2,5$ ), 3 – относительно низкая ( $K_{ан} < 2$ )

Fig. 4. Anthropogenic load factors of the Baikal region. Anthropogenic load of the territory: 1 – high ( $C_{al} > 2.5$ ); 2 – stressful ( $C_{al} = 2 - 2.5$ ); 3 – relatively low ( $C_{al} < 2$ )

Средним уровнем защищенности отличаются районы примыкающие к Транссибирской (Транссиб) и западному участку Байкало-Амурской (БАМ) (Тайшет-Братск) железнодорожной магистрали, Братскому водохранилищу Иркутской области; Районы участка БАМа (Северобайкальск-Таксимо), бассейна р. Селенга и нижнего течения р. Баргузин в границах республики Бурятия; Центральные, южные и юго-восточные районы Забайкальского края. Значительная часть северных и северо-восточных районов бассейнов рек Ниж. Тунгуски и Лены, а также, часть западных районов примыкающих к участку Транссиба (Тайшет-Нижнеудинск) в Иркутской области; центральные районы республики Бурятия и Северные районы Забайкальского края обладают определенным потенциалом устойчивости к антропогенному воздействию. Коэффициент абсолютной антропогенной напряженности (рис. 2) показывает отношение площади земель, сильно нарушенных застройкой и промышленностью, к площади слабонарушенных и неиспользуемых земель.

$$K_a = \frac{P_6}{P_1}, (3)$$

где  $P_6$  – Земли промышленности, транспорта, населенных пунктов, инфраструктуры;  
 $P_1$  – Земли особо охраняемых территорий и объектов.

Соотношение между территориями крайних экологических значений дает представление об антропогенном воздействии на потенциальную устойчивость геосистем и на поддержание охраняемых территорий на должном уровне. Чем ниже значение  $K_a < 0,5$  тем относительно благополучнее состояние природной среды региона. Значение  $K_a = 0,5 - 1$  указывает на очень низкую долю земель особо охраняемых территорий в структуре землепользований и характеризует состояние земель как напряженное. Значение  $K_a \geq 1$  указывает на отсутствие в административном районе земель особо охраняемых территорий и объектов. Для снижения антропогенной нагрузки необходимо довести развитие сети охраняемых природных территорий до требуемых соотношений. На высокие значения напряженности в этих районах оказывает особенность учета отдельных категорий земель, в частности ОПТ, которые создаются на землях лесного и водного фонда без их отчуждения и дальнейшего включения в земельный кадастр [Помазкова, Фалейчик, 2018].

Расчет коэффициента *относительной антропогенной напряженности*, зависит, от экологического баланса земель сильно преобразованных хозяйственной деятельностью и земель выполняющих средообразующие и средостабилизирующие функции (рис. 3). Коэффициент относительной антропогенной напряженности ( $K_0$ ) – отношение площади земель с высокой нагрузкой к площади земель с низкой антропогенной нагрузкой.

$$K_0 = \frac{P_4 + P_5 + P_6}{P_1 + P_2 + P_3}, (4)$$

где  $P_1$  – Земли особо охраняемых территорий и объектов;

$P_2$  – Земли водного фонда;

$P_3$  – Земли лесного фонда;

$P_4$  – Земли сельскохозяйственного назначения;

$P_5$  – Земли запаса;

$P_6$  – Земли промышленности, транспорта, населенных пунктов, инфраструктуры.

Относительная антропогенная напряженность напрямую связана со значением коэффициентов. Низкие значения коэффициента относительной антропогенной указывают на низкую антропогенную нагрузку, высокие значения – на высокую. В целом, при  $K_0 \leq 1$ , напряженность экологического состояния земель считается сбалансированной по степени антропогенной преобразованности и потенциалу устойчивости природы. Для БР значения  $K_0$  находятся в диапазоне от 0,002 до 12,9. Согласно методики выделены три группы районов с низкой –  $K_0 < 0,5$ ; средней  $K_0 = 0,5 - 1$  и высокой –  $K_0 > 1$  степенью антропогенной напряженности. Картографический анализ показателя выявил, что значительные территории (группы районов с низкой степенью антропогенной напряженности –  $K_0 < 0,5$ ) БР обладают некоторым потенциалом устойчивости природной среды к антропогенному воздействию. Такие значения показателя в какой-то мере объясняется относительно высокой и средней естественной защищенностью (см. рис. 1.). Уникальный природно-ресурсный потенциал региона позволил создать мощный лесопромышленный комплекс. Субъекты РФ, входящие в состав БР дифференцированы, по зонам инвестиционного освоения лесов. Различия территорий проявляются в степени и направлении развития лесного комплекса, задачам территориального планирования и природно-ландшафтной дифференциации лесного фонда как фактора, определяющего виды и интенсивность использования лесов, природоохранную инфраструктуру. Зоны наиболее активного освоения лесного комплекса приурочены к центральным, восточным и северо-западным районам Иркутской области. По природно-климатическим

особенностям северные районы области, где сосредоточены – «резервные леса» выведены из зоны активного освоения [Макаренко, 2019]. Более половины лесных ресурсов Республики Бурятия сосредоточено в бассейне озера Байкал, где леса имеют огромное экологическое и рекреационное значение. Особые регламентирующие требования к проведению лесозаготовительной, иной лесоэкономической деятельности в Центральной экологической зоне оказывает сдерживающее влияние на развитие лесной отрасли в регионе, в частности в Республике Бурятия<sup>1</sup>. Наименее развита лесная отрасль промышленности в Забайкальском края. К проблемам, сдерживающим эффективное лесопромышленное хозяйство края относятся: недостаточная точность оценки лесоресурсного потенциала, слабый контроль за использованием и воспроизводством лесов, низкий уровень внедрения современных информационных технологий в лесное хозяйство. Основным видом использования лесов в крае являются лесозаготовки, который не выдерживают конкуренции с соседними регионами из-за низкого качества древесины. Истощение лесосырьевых ресурсов, которые выработаны на экономически доступных территориях на расстоянии (до 100 км) вдоль Транссиба является одной из главных причин недостаточной экономической эффективности лесопромышленного комплекса Забайкальского края<sup>2</sup>. Сельскохозяйственное землепользование БР имеет, также ярко выраженные зональные природно-экономические особенности, которые выражаются в относительно слабом освоении и неравномерном размещении сельскохозяйственных земель. В условия горно-котловинного рельефа наибольшая концентрация нагрузки агропромышленного комплекса приходится на природные комплексы котловин и долины крупных рек. Эти территории обладают наиболее благоприятными природно-климатическими условиями и трудовыми ресурсами, что отражается на ведении сельского хозяйства. Кроме того, учитывая интенсивность развития промышленности, возрастание роли городских территорий, пригородных и примагистральных центров производства, нагрузка на эти территории будет возрастать [Чернигова, Тулунова, 2019].

**Интегральный коэффициент антропогенной нагрузки** (рис. 4) который показывает, насколько сильно деятельность человека влияет на состояние природной среды. Он выражается в прямой зависимости, чем ниже данный коэффициент, тем ниже влияние человека на природную среду.

$$K_{ан} = \frac{\sum P_i \cdot V_i}{P_0}, \quad (5)$$

где  $P_i$  – площадь земель с соответствующим уровнем антропогенной нагрузки,  $V_i$  – балл, соответствующий площади с определенным уровнем антропогенной нагрузки (табл. 2),  
 $P_0$  – общая площадь исследуемой территории.

При расчете коэффициента антропогенной нагрузки принято допущение, что значение коэффициента  $K_{ан} \leq 2,0$  соответствует относительно низкой антропогенной нагрузке на земли,  $K_{ан} = 2 - 2,5$  – напряженной и  $K_{ан} > 2,5$  – высокой. Проведенный картографический анализ выявил следующие закономерности. БР испытывает антропогенную нагрузку неравномерно. Наибольшую нагрузку испытывают примагистральные

<sup>1</sup> Об утверждении Лесного плана Республики Бурятия (с изменениями на 13 июля 2018 года) [Электронный ресурс]. — <https://docs.cntd.ru/document/424054599> (дата обращения 12.04.2021).

<sup>2</sup> Об утверждении государственной программы Забайкальского края "Развитие лесного хозяйства Забайкальского края" (с изменениями на 11 июня 2020 года) [Электронный ресурс]. — <https://docs.cntd.ru/document/412715933> (дата обращения 12.04.2021).

районы, прилегающие к Транссибу и БАМу в Иркутской области, центральные и южные районы Республики Бурятия, а также центральные и юго-восточные районы Забайкальского края, где располагаются энергетические центры главные промышленные и селитебные зоны, агропромышленный комплекс. Байкальский регион в целом остается регионом со сложной экологической и социально-экономической обстановкой. Экономическая (ресурсная) составляющая в развитии региона преобладает над экологической (природоохранной) составляющей и определяет проблемы развития сельских территорий, землепользования и загрязненность окружающей среды [Тулохонов и др., 2019]. Ведущая роль первичного сектора в экономике региона обусловлена экономико-географическим положением, выборочным неравномерным и исторически кратким характером освоения (около 300 лет), что предопределило развитие мощного горнодобывающего и лесопромышленного комплекса, сельскохозяйственного, селитебного природопользования и энергетики – главных факторов интенсивных нарушений природной среды [Минерально-сырьевой сектор..., 2015].

**РАБОТА ВЫПОЛНЕНА** в рамках государственного задания (№ гос.регистрации АААА-А21-121012190063-2).

## **ВЫВОДЫ**

Оценка обеспеченности элементами ЭК выявила, что существующая сеть ООПТ не выполняет в полной мере возложенные на эти территории природоохранные функции в силу неравномерности распределения ядерных элементов по территории и различного уровня охраны и статуса ОПТ. Резкая интенсификация хозяйственной деятельности и ее возрастающее влияние на природную среду: интенсивное развитие лесной промышленности, сельского хозяйства, зарегулирование стока рек и другие виды антропогенных воздействий все это негативно влияет на показатели экологической сбалансированности БР. С практической точки зрения оценка экологического баланса территории региона необходима как основа для разработки предложений по развитию всей территории для гармоничного экономического и экологически устойчивого развития. Методика оценки не лишена недостатков, которые выражаются в достоверности обоснования и отборе количества показателей, формирующих экологическую стабильность территории, сложности и неоднозначности объекта картографирования, его трудоемкости, доступности и, в то же время недостатка информации, неполного учета процессов, происходящих в системе «природа – население – экономика». На данном этапе развития научных знаний, становится очевидной необходимость комплексного использования различных методов и подходов к оценке экологической сбалансированности территории.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Волков С.Н. Землеустройство. Т. 2: Землеустроительное проектирование. Внутрихозяйственное землеустройство. Учеб. пособие. М.: Колос, 2001. 648 с.
2. Карта «Особо охраняемые природные территории международного и федерального значения», м-б 1:15 000 000. Национальный атлас России. В 4-х т. Т. 2. Природа. Экология. М.: Роскартография, 2007. С. 458–461.
3. Кочуров Б.И. Экодиагностика и сбалансированное развитие. М.: Смоленск, 2003. 384 с.
4. Лопаткин Д.А. Картографирование территориальной структуры экологического каркаса Байкальского региона. География и природные ресурсы. 2019. № 5. С. 83–89.

5. *Мазуркин П.М.* Экологическая консолидация угодий субъектов России по активности растительного покрова. *Науки о Земле.* 2020. № 2. С. 93–113.
6. *Макаренко Е.Л.* Картографирование лесопромышленного комплекса Сибири и древесно-сырьевого потенциала его развития. *Геодезия и картография.* 2019. № 11. С. 37–47. DOI:10.22389/0016-7126-2019-953-11-37-47.
7. Минерально-сырьевой сектор Азиатской России: как обеспечить социально-экономическую отдачу. Под ред. В.В. Кулешова. Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2015. 352 с.
8. *Михеев В.С.* Ландшафтный синтез географических знаний. Новосибирск: Наука, 2001. 216 с.
9. *Плюснин В.М., Кузнецова Т.И., Батуев А.Р., Лопаткин Д.А.* Геоинформационное ландшафтно-экологическое картографирование бассейна озера Байкал (в пределах России и Монголии). *Геодезия и картография.* 2015. № 8. С. 29–37. DOI: 10.22389/0016-7126-2015-902-8-29-37.
10. *Помазкова Н.В., Фалейчик Л.М.* Оценка эколого-хозяйственного баланса территории Забайкальского края. *Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология.* 2018. № 2. С. 5–15.
11. *Попова Н.В., Михно В.Б.* Анализ методик диагностики устойчивости экосистем в целях прогноза развития ландшафтов территории России. *Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология.* 2012. № 1. С. 29–34.
12. *Реймерс Н.Ф.* Природопользование. М.: Мысль, 1990. 637 с.
13. *Рыбарски И., Гайссе Э.* Влияние состава угодий на экологическую стабильность территории. *Землеустроительные работы в специфических условиях.* Сб. науч. трудов. Пер. со словац. Татранска-Ломница, 1981. С. 19–26.
14. *Соболев Н.А., Тишков А.А., Белоновская Е.А., Глазов П.М., Кобяков К.Н., Кольцов Д.Б., Кренке А.Н., Семенцова М.В., Титова С.В.* Применение ГИС для картографирования Великого Евразийского природного массива. *ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. Т. 26. Ч. 4. М.: Издательство Московского университета, 2020. С. 5–19. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-4-26-5-19.*
15. *Тишков А.А.* Актуальная биогеография Северной Евразии. *Актуальные вопросы биогеографии.* СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 2018. С. 406–409.
16. *Тулохонов А.К., Болданов Т.А., Дагбаева С.Д.-Н.* О критериях, условиях и рисках в оценке эффективности экономики и политики аграрного природопользования в России. *Вестн. Бурят. ун-та. Сер. Экономика и менеджмент.* 2019. № 3. С. 62–69. DOI: 10.18101/2304-4446-2019-3-62-69.
17. *Чернигова Д.Р., Тулунова Е.С.* Особенности развития сельскохозяйственного землепользования Иркутской области. *Московский экономический журнал.* 2019. № 2. С. 7–15. DOI: 10.24411/2413-046X-2019-12006.

#### REFERENCES

1. *Chernihiv D.R., Tulunova E.S.* Features of the development of agricultural land use in the Irkutsk region. *Moscow Economic Journal.* 2019. No 2. P. 7–15. DOI: 10.24411/2413-046X-2019-12006 (in Russian).
2. *Kochurov B.I.* Ecodiagnostics and balanced development. Moscow: Smolensk, 2003. 384 p. (in Russian).
3. *Lopatkin D.A.* Mapping the territorial structure of the ecological framework of the Baikal region. *Geography and Natural Resources.* 2019. No 5. С. 83–89. (in Russian).

4. *Makarenko E.L.* Mapping of the timber industry complex of Siberia and the wood-raw material potential of its development. *Geodesy and Cartography*. 2019. No 11. P. 37–47. (in Russian).
5. *Mazurkin P.M.* Environmental consolidation of the lands of Russian subjects on active vegetation cover. *Earth Sciences*. 2020. No 2. P. 93–113 (in Russian).
6. *Mikheev V.S.* Landscape synthesis of geographical knowledge. Novosibirsk: Nauka, 2001, 216 p. (in Russian).
7. Mineral and raw materials sector of Asian Russia: how to ensure socio-economic returns. Edited by V.V. Kuleshov. Novosibirsk: IEOPP SB RAS, 2015. 352 p. (in Russian).
8. *Plyusnin V.M., Kuznetsova T.I., Batuev A. R., Lopatkin D. A.* Geoinformation landscape-ecological mapping of the Lake Baikal basin (within Russia and Mongolia). *Geodesy and Cartography*. 2015. No 8. P. 29–37. DOI: 10.22389/0016-7126-2015-902-8-29-37 (in Russian).
9. *Pomazkova N.V., Faleychik L.M.* Assessment of the ecological and economic balance of the territory of the Trans-Baikal Territory. *Bulletin of the VSU. Series: Geography. Geoecology*. 2018. No 2. P. 5–15 (in Russian).
10. *Popova N.V., Mikhno V.B.* Analysis of methods for diagnosing ecosystem stability in order to forecast the development of landscapes in Russia. *Bulletin of the VSU. Series: Geografia. Geoecology*. 2012. No 1. P. 29–34 (in Russian).
11. *Reimers N.F.* Nature management. Moscow: Mysl, 1990. 637 p (in Russian).
12. *Rybarski I., Gaisse E.* Influence of the composition of land on the ecological stability of the territory. *Land management works in specific conditions. Sat. nauch. trudov. Trans. from Slovak. Tatranska Lomnica*, 1981. P. 19–26 (in Russian).
13. *Sobolev N.A., Tishkov A.A., Belonovskaya E.A., Glazov P.M., Kobayakov K.N., Koltsov D.B., Krenke A.N., Sementsova M.V., Titova S.V.* Using GIS for mapping the Great Eurasian Natural Backbone InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press. 2020. V. 26. Part 4. P. 5–19. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-4-26-5-19 (in Russian).
14. *Tishkov A. A.* Actual biogeography of Northern Eurasia. Topical issues of biogeography. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University Press, 2018. P. 406–409 (in Russian).
15. *Tulokhonov A. K., Boldanov T. A., Dagbaeva S. D.-N.* On criteria, conditions and risks in assessing the effectiveness of the economy and policy of agricultural nature management in Russia. *Vestn. Buryat. un-ta. Ser. Economics and Management*. 2019. No 3. P. 62–69. DOI: 10.18101/2304-4446-2019-3-62-69 (in Russian).
16. *Volkov S.N.* Land administration. V. 2: Land administration planning. Internal land administration. A textbook. Moscow: Kolos, 2001. 648 p. (in Russian).
17. Map «Specially Protected Natural Areas of International and Federal Importance», m-b 1:15 000 000. National Atlas of Russia in 4 volumes. T. 2. Nature. Ecology. Moscow: Roscartography, 2007. P. 458–461 (in Russian).

Д.А. Давыдов<sup>1,2</sup>, Е.А. Боровичев<sup>2</sup>, О.В. Петрова<sup>2</sup>

## КОНЦЕПЦИЯ ЗОНИРОВАНИЯ ООПТ ПОЛЯРНО-АЛЬПИЙСКИЙ БОТАНИЧЕСКИЙ САД-ИНСТИТУТ В ЦЕЛЯХ ОХРАНЫ РЕДКИХ ВИДОВ И РАЗВИТИЯ ТУРИЗМА

### АННОТАЦИЯ

Представлена концепция зонирования территории Полярно-альпийского ботанического сада-института (ПАБСИ) (Россия, Мурманская область), который является особо охраняемой природной территорией (ООПТ) федерального значения. Промышленные предприятия региона фактически не оказали значительного негативного воздействия на экосистемы в пределах его территории, позволив сохранить типичные для Хибин экосистемы. По видовому богатству фототрофных организмов территория превосходит большинство аналогичных по площади участков в регионе.

В исследовании представлен анализ текущих и возможных видов хозяйственной деятельности, влекущих за собой нарушение сохранности объектов охраны. Предложен дифференцированный режим охраны ООПТ для решения нескольких разнородных задач: сохранение природных экосистем, создание и функционирование коллекционных питомников, научная деятельность, экологическое просвещение и природно-познавательный туризм.

Предложенное зонирование позволяет осуществление хозяйствования для поддержания, реконструкции или строительства новых объектов на территории ПАБСИ в будущем. Анализ территории проводился на основе картирования местонахождений видов, внесенных в Красные книги региона и России на основе данных гербариев Полярно-альпийского ботанического сада-института (КРАБГ), Института проблем промышленной экологии Севера (ИНЕП) и информационной системы CRIS (<http://www.krabg.ru/cris>), с учетом статуса редкости, экскурсионных и туристических маршрутов, мест тренировок альпинистов. На территории выделены следующие зоны: административная, научно-экспозиционная, особо охраняемая и заповедная. Наиболее жесткий режим охраны определен для заповедной зоны, наиболее мягкий – для административной.

Предложенное зонирование должно способствовать как безусловному сохранению природных комплексов и охраняемых видов, так, и проведению научных исследований, а также и успешному функционированию ПАБСИ как научного учреждения и устойчивому рекреационному использованию территории.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** геоинформационные технологии, устойчивое развитие, особо охраняемые природные территории, редкие виды, Арктическая зона Российской Федерации.

<sup>1</sup> Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина Кольского НЦ РАН, ул. Ферсмана, д. 18А, 184209, Апатиты, Россия, *e-mail*: [d\\_disa@mail.ru](mailto:d_disa@mail.ru)

<sup>2</sup> Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН, ул. Ферсмана, д. 14А, 184209, Апатиты, Россия.



Denis A. Davydov<sup>1,2</sup>, Evgeny A. Borovichev<sup>2</sup>, Olga V. Petrova<sup>2</sup>

**A ZONING CONCEPT OF POLAR-ALPINE BOTANICAL GARDEN-INSTITUTE  
AS PROTECTED AREA FOR NATURE CONSERVATION  
AND TOURISME DEVELOPMENT**

**ABSTRACT**

A zoning concept of Polar-Alpine Botanical Garden-Institute (PABGI) (Russia, Murmansk Region) as a specially protected area is presented. The activities of industrial manufactures in the region did not actually cause a significant negative impact on the ecosystems within its territory, making it possible to preserve the ecosystems typical for the Khibiny. The species richness of phototrophic organisms at the PABGI area is higher than the equal per squares sites in the region. The study presents an analysis of current and types of economic activities that entail a violation of the safety of objects of protection. A differentiated protection regime has been proposed for solution of several heterogeneous problems: the preservation of natural ecosystems, the creation and operation of plant Nurseries, scientific studies, environmental education and natural tourism. The proposed zoning allows the implementation of management for the maintenance, reconstruction, or building of new objects on the territory of the PABSI in the future. The analysis of the territory was carried out on the basis of mapping the locations of species included in the Red Data Books of the region and Russia on the basis of data from the herbaria of the Polar-Alpine Botanical Garden-Institute (KPABG), the Institute of Industrial Ecology of the North (INEP) and the CRIS information system (<http://www.kpabg.ru/cris>), taking into account the conservation status, excursion and tourist routes, training sites for climbers. The following zones are allocated on the territory: administrative, scientific-exposition, specially protected and reserved. The most stringent protection regime is determined for the protected area, the softest – for the administrative one. The proposed zoning should contribute to both the unconditional preservation of natural complexes and protected species and the conduct of scientific research and the successful functioning of the PABGI as a scientific organization and sustainable recreational use of the territory.

**KEY WORDS:** geo-information technologies, sustainable development, protected areas, rare species, the Arctic zone of the Russian Federation.

**ВВЕДЕНИЕ**

Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина Кольского научного центра Российской академии наук (ПАБСИ) – один из крупнейших в Арктике. Согласно ФЗ РФ № 33 от 14.03.1995 «Об особо охраняемых природных территориях» ботанические сады и дендропарки составляют особую категорию ООПТ федерального значения. С момента создания в 1931 году, Ботанический сад выступает заповедником естественной растительности. Площадь заповедной зоны была значительно увеличена в 1989 г., вместо 356 га, которые отводились под нее прежде под заповедную территорию отведено еще около 894 га [*Мохообразные...*, 2001]. Активное промышленное освоение Мурманской области и, в частности, Кировского района началось одновременно с созданием Ботанического сада и фактически не нанесло значительного негативного воздействия на экосистемы в пределах его территории.

<sup>1</sup> Polar Alpine Botanical Garden Institute Kola SC RAS, 184209, Fersman's st 18A, Apatity, Russia,  
*e-mail: d\_disa@mail.ru*

<sup>2</sup> Institute of the Industrial Ecology Problems of the North of the Kola Science Center of RAS, 184209,  
Fersman's st 14A, Apatity, Russia.

Границы и особенности режима особой охраны ПАБСИ учитываются при разработке планов и перспектив экономического и социального развития муниципальных образований Мурманской области – города Кировска с подведомственной территорией, города Апатиты с подведомственной территорией, Кандалакшского района, а также при подготовке документов территориального планирования и инвентаризации земель.

По видовому богатству фототрофных организмов территория ПАБСИ превосходит большинство аналогичных по площади участков в регионе. Здесь отмечено 1063 вида (31.5% от общего числа, зарегистрированных в Мурманской области) растений, лишайников и цианопрокариот [Константинова и др., 2011]. Среди объективных причин, сказывающихся на высоком уровне альфа разнообразия следует отметить: расположение в самом высоком горном массиве Мурманской области и значительную вариабельность местообитаний, присущую дифференцированным ландшафтам, смену поясов растительности, повышенное количество осадков, по сравнению с более равнинными территориями. Существенную роль играет и высокая степень изученности, обусловленная большим вниманием к этой территории значительного числа исследователей, [Константинова, Лихачев, 1987; Костина, 1988; Антонова, Дудорева, 1997; Лукницкая, 2001; Мохообразные..., 2001; Давыдов, 2008; CRIS, 2021<sup>1</sup>]. На питомниках ПАБСИ культивируются 341 вид аборигенных растений Мурманской области, в том числе 43 вида включенные в Красную книгу Мурманской области [2014] и пять видов в Красную книгу РФ [2008]. В заповедной и особо охраняемой зоне ПАБСИ охраняются малонарушенные растительные сообщества и места произрастания редких видов растений – 7 видов лишайников, 13 видов мохообразных и 15 видов сосудистых растений, включенных в Красную книгу Мурманской области [2014]; четыре вида сосудистых растений внесены также в Красную книгу РФ [2008]. Решение разнородных задач, таких как создание и функционирование коллекционных питомников, в которых проводятся интродукционные эксперименты, наблюдения за видами растений Мурманской области, представителями других районов, просветительская работа в рамках экскурсий по оранжерее тропических и субтропических растений, по экологической тропе и коллекционным фондам, сохранение природных экосистем и местообитаний редких видов, произрастающих в естественных условиях требует введения дифференцированного режима охраны для различных участков территории ПАБСИ. В связи с этим возникла необходимость разработки концепции зонирования территории ПАБСИ.

Для достижения цели был проведен анализ текущих и возможных видов хозяйственной деятельности, влекущих за собой нарушение сохранности объектов охраны. При этом зонирование не должно противоречить нормам действующего законодательства и разрешать осуществление хозяйствования для поддержания, реконструкции или строительства новых объектов на территории ПАБСИ в будущем. В то же время, в концепцию были внесены пункты, ограничивающие возможное вмешательство в местообитания редких и нуждающихся в охране видов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для привязки объектов на местности использовался GPS навигатор Garmin Etrex 30x (Garmin Ltd., США). Анализ территории и соответствующих выделяемым зонам участков проводился с использованием программ QGIS (лицензия GNU GPL 2). Тематические карты созданы с использованием векторной топоосновы масштаба 1:200000 ГлавНИВЦ, МПР, 1998 г. Финальную визуализацию информации и подготовку карт-схем

<sup>1</sup> CRIS. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kpabg.ru/cris> (дата обращения: 28.03.2021).

проводили в ArcGIS 10.7.1. Данные по местонахождениям видов, внесенных в Красную книгу Мурманской области [2014] и/или России [2008] нанесены по гербарным образцам, хранящимся в гербариях Полярно-альпийского-ботанического сада-института им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН (КРАВГ) и Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН (ИПЕР), внесенных в информационную систему по биоразнообразию CRIS [Мелехин и др., 2013; Melekhin et al., 2019]. При зонировании территории учтены экскурсионные и туристические маршруты на территории ПАБСИ [Аврорин, 1932; Андреев и др., 1982; Белкина и др., 2005; и др.], а также сложившиеся места тренировок альпинистов и скалолазов [Хибины..., 1994<sup>1</sup>; Эколого-экономическое..., 2000<sup>2</sup>].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе были определены виды хозяйственной деятельности, влекущие за собой нарушение сохранности флористических объектов, растительных сообществ, природных ландшафтов, коллекций и экспозиций, а также инфраструктуры ПАБСИ. К ним отнесены следующие виды:

- проведение геологоразведочных работ, поиск и добыча полезных ископаемых;
- выделение и предоставление земельных участков из состава земель ПАБСИ;
- предоставление земельных участков для ведения садоводства, огородничества, индивидуального гаражного или индивидуального жилищного строительства;
- изменение гидрологического режима;
- засорение и загрязнение водных объектов;
- купание в водоемах; сбор любых растений, их частей и семян, кроме проводимого в научных и производственных целях в соответствии с научными задачами;
- разведение костров, пускание палов, выжигание растительности;
- нахождение с огнестрельным, пневматическим и метательным оружием, в том числе с охотничьим огнестрельным оружием, капканами и другими орудиями охоты, а также с продукцией добывания объектов животного мира и орудиями добычи (вылова) водных биоресурсов;
- уничтожение и повреждение аншлагов, шлагбаумов, стендов, граничных столбов, других информационных знаков и указателей оборудованных экологических троп и мест отдыха, объектов садово-парковой архитектуры, строений, сооружений и иного имущества ПАБСИ.

После этого на схему границ ПАБСИ были нанесены все известные местонахождения видов, внесенных в Красную книгу Мурманской области или РФ по категориям статуса редкости, определяющим строгость их охраны и основные экскурсионные и туристические маршруты, а также сложившиеся места тренировок альпинистов. С учетом этого, помимо общих запретных мер предусмотрено выделение зон, на которых разрешена определенная хозяйственная деятельность (рис. 1). Выделение зон проведено с учетом природных, историко-культурных, рекреационно-туристических особенностей территории и с учетом типов осуществляемой деятельности. В результате установлен дифференцированный режим охраны с выделением четырех зон: административной (зона Г), научно-экспозиционной (зона В), особо охраняемой (зона Б) и заповедной (зона А) (табл. 1).

<sup>1</sup> Хибины: каталог альпинистских маршрутов. Мурманск. Север. 1994. 58 с.

<sup>2</sup> Эколого-экономическое обоснование национального парка «Хибины». Научный отчет. Апатиты: ИППЭС КНЦ РАН, 2000. Т. 1. 210 с. Т. 2. 172 с. <http://www.biodiversity.ru/kola/>.

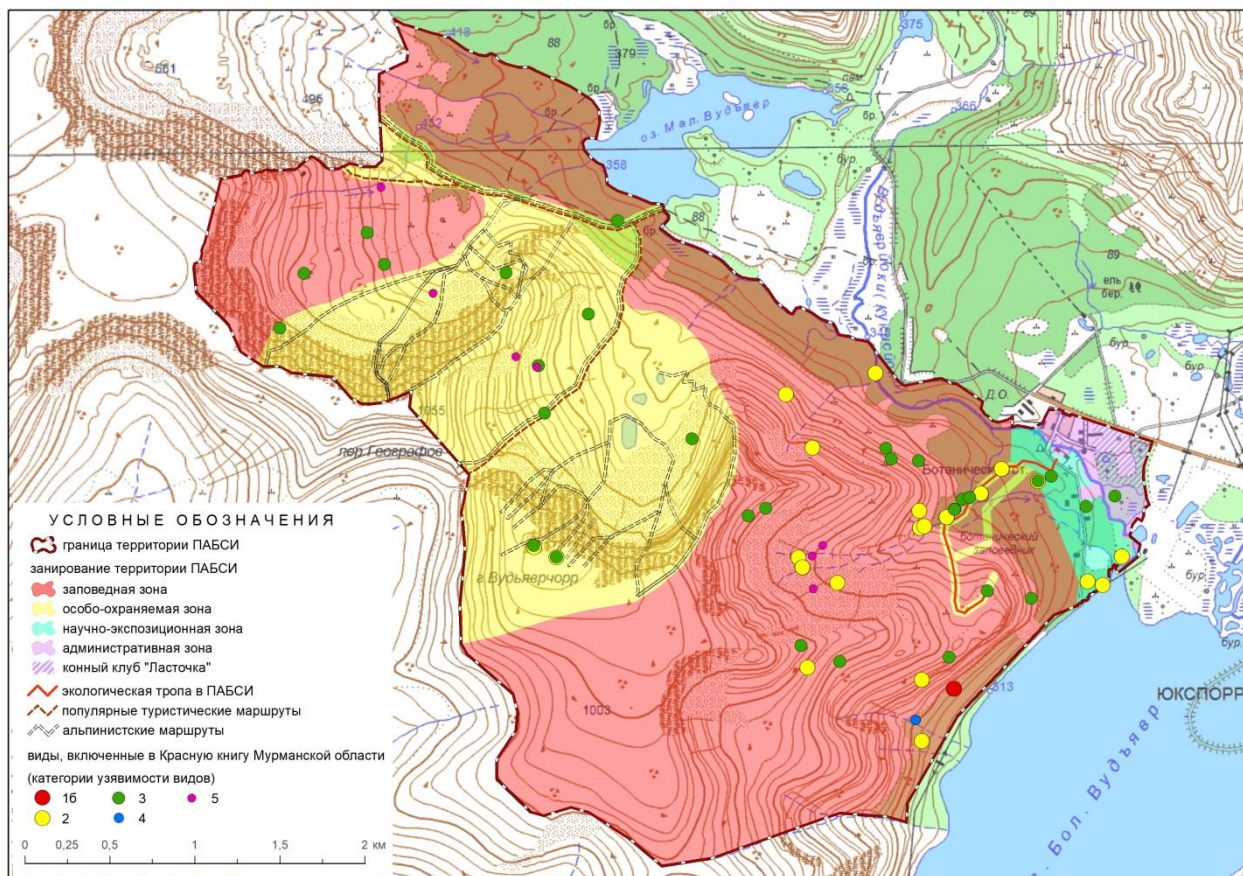


Рис. 1. Схема функционального зонирования Полярно-альпийского ботанического сада-института

Fig. 1. Functional zoning scheme of the Polar-Alpine Botanical Garden-Institute

**Административная зона** Ботанического сада располагается на левом берегу реки Вудъяврйок. Здесь сосредоточены лабораторные здания, тепличный комплекс, хозяйственные постройки, музей. Она предназначена для осуществления мероприятий, направленных на обеспечение уставной деятельности Ботанического сада и жизнедеятельности граждан, проживающих и работающих на этой территории. В административной зоне предусмотрен минимальный набор запретов (табл. 1). Также в этой зоне допускается самый широкий спектр возможных видов деятельности (табл. 1).

Правый берег реки Вудъяврйок в её нижнем течении занимает **научно-экспозиционная зона**, включающая питомники открытого грунта и экспозиции. Она предназначена для обеспечения и осуществления научной, рекреационной деятельности, природно-познавательного туризма. В научно-экспозиционной зоне допускается научно-исследовательская деятельность, ведение экологического мониторинга, проведение природоохранных, биотехнических и противопожарных мероприятий, землеустроительных работ, эколого-просветительская деятельность, организация и обустройство экскурсионных экологических троп и маршрутов, смотровых площадок, создание новых экспозиций коллекционных растений и производственных питомников для выращивания растений (табл. 1). Работы по комплексному благоустройству территории в пределах этой зоны должны проводиться с учетом минимизации ущерба лесным насаждениям и окружающей среде: допускается возведение временных построек (беседок, пунктов хранения инвентаря), информационных стендов, аншлагов, скамеек, навесов от дождя.

**Особо охраняемая зона** выделена в границах существующих дорог, троп и традиционных туристических маршрутов. Она предназначена для сохранения природной среды в естественном состоянии. Уменьшение площади особо охраняемой зоны не допускается. В данной зоне возможно проведение экскурсий и транзитное посещение в целях природно-познавательного туризма.

Большая часть территории включена в **заповедную зону**, она охватывает северный, северо-восточный и, частично, южный и юго-восточные склоны горы Вудъяврчорр, цирк Ганешина, а также Первый и Второй Молибденитовые цирки горы Тахтарвумчорр. Нахождение здесь регламентировано и требует дополнительных согласований с администрацией ПАБСИ. Заповедная зона предназначена для сохранения природной среды в естественном состоянии. Уменьшение площади заповедной зоны не допускается. В пределах заповедной зоны запрещены любая хозяйственная деятельность и рекреационное использование территории (табл. 1). В заповедной зоне допускается научно-исследовательская деятельность, ведение экологического мониторинга, проведение природоохранных, биотехнических, противопожарных мероприятий и землеустроительных работ.

*Табл. 1. Виды запрещенной и разрешенной деятельности на территории Полярно-альпийского ботанического сада-института*

*Table 1. Types of prohibited and permitted activities on the territory of the Polar-Alpine Botanical Garden-Institute*

Деятельность	Зоны ПАБСИ			
	А	Б	В	Г
<b>Запрещенная деятельность</b>				
1. Проведение геологоразведочных работ, поиск и добыча полезных ископаемых.	+	+	+	+
2. Выделение и предоставление земельных участков из состава земель ПАБСИ.	+	+	+	+
3. Предоставление земельных участков для ведения садоводства, огородничества, индивидуального гаражного или индивидуального жилищного строительства.	+	+	+	+
4. Изменение гидрологического режима, за исключением работ, связанных с функционированием ПАБСИ.	+	+	+	+
5. Засорение и загрязнение водных объектов (в том числе мойка механических транспортных средств).	+	+	+	+
6. Сбор любых растений, их частей и семян, кроме проводимого в научных и производственных целях в соответствии с научными задачами ПАБСИ.	+	+	+	+
7. Разведение костров, пускание палов, выжигание растительности.	+	+	+	+
8. Нахождение с огнестрельным, пневматическим и метательным оружием, в том числе с охотничьим огнестрельным оружием в собранном и разобранном виде, капканами и другими орудиями охоты, а также с продукцией добывания объектов животного мира и орудиями добычи (вылова) водных биоресурсов, кроме случаев, связанных с проведением мероприятий по государственному надзору в области охраны и использования территории ПАБСИ уполномоченными должностными лицами.	+	+	+	+

9. Купание в водоемах.	+	+	+	+
10. Уничтожение и повреждение аншлагов, шлагбаумов, стендов, граничных столбов, других информационных знаков и указателей оборудованных экологических троп и мест отдыха, объектов садово-парковой архитектуры, строений, сооружений и иного имущества ПАБСИ.	+	+	+	+
11. Строительство автомобильных дорог, трубопроводов, линий электропередачи и других линейных объектов, кроме случаев связанных с функционированием ПАБСИ.	+	+	+	-
12. Нанесение ущерба природным ландшафтам, растительным сообществам и коллекциям живых растений, а именно:	+	+	+	+
12.1. Распашка земель и любые работы, связанные с уничтожением либо перемещением почвенного покрова	+	+	+*	+*
12.2. Рубка леса, кроме рубок ухода и санитарных рубок.	+	+	+	+
12.3. Повреждение деревьев и кустарников.	+	+	+	+
12.4. Заготовка древесины для собственных нужд.	+	+	+	+
12.5. Засорение и загрязнение территории.	+	+	+	+
12.6. Размещение (хранение, захоронение) любых видов отходов.	+	+	+	+ <sup>1</sup>
12.7. Засорение и загрязнение водных объектов (в том числе мойка механических транспортных средств).	+	+	+	+
12.8. Промысловая, спортивная и любительская охота.	+	+	+	+
12.9. Интродукция растений.	+	+	-	-
12.10. Другие виды деятельности, влекущие за собой нарушение сохранности растительного, почвенного покрова, ландшафтов, коллекций и экспозиций, кроме случаев связанных с функционированием ПАБСИ.	+	+	+	+
7. Сбор любых растений, их частей и семян, кроме проводимого в научных и производственных целях в соответствии с научными задачами ПАБСИ.	+	+	+	+
8. Деятельность, влекущая за собой нарушение условий обитания и вызывающая беспокойство объектов животного мира.	+	+	-	-
9. Пребывание граждан.	+	-	-	-
10. Пребывание граждан вне специально выделенных маршрутов.	-	+	+	-
11. Нахождение на территории ПАБСИ с собаками и другими домашними животными, за исключением случаев использования собак, связанных с обеспечением охраны территории ПАБСИ и его функционированием.	+	+	+	-
12. Строительство промышленных, хозяйственных объектов.	+	+	-	-
13. Строительство жилых зданий и сооружений, а также предназначенных для размещения посетителей ПАБСИ.	+	+	+	-
14. Строительство, реконструкция, капитальный ремонт промышленных, хозяйственных и жилых объектов, за исключением объектов рекреационной инфраструктуры, и иных объектов, связанных с функционированием ПАБСИ.	+	+	+	-
15. Устройство и оборудование стоянок для ночлега.	+	+	+	-
16. Распашка земель, за исключением мероприятий по созданию новых коллекций и питомников растений, а также мер противопожарного и иного обустройства территории ПАБСИ.	+	+	-	-

17. Разведение костров, пускание палов, выжигание растительности.	+	+	+	+
18. Нахождение с огнестрельным, пневматическим и метательным оружием, в том числе с охотничьим огнестрельным оружием в собранном и разобранном виде, капканами и другими орудиями охоты, а также с продукцией добывания объектов животного мира и орудиями добычи (вылова) водных биоресурсов, кроме случаев, связанных с проведением мероприятий по государственному надзору в области охраны и использования территории ПАБСИ уполномоченными должностными лицами.	+	+	+	+
19. Нахождение с дистанционно управляемыми летательными аппаратами (дронами), кроме связанного с выполнением научных исследований в ПАБСИ.	+	-	-	-
20. Движение и стоянка транспортных средств, кроме случаев, связанных с функционированием ПАБСИ.	+	+	+	-
21. Уничтожение и повреждение аншлагов, шлагбаумов, стендов, граничных столбов, других информационных знаков и указателей оборудованных экологических троп и мест отдыха, объектов садово-парковой архитектуры, строений, сооружений и иного имущества ПАБСИ.	+	+	+	+
<b>Разрешенная деятельность</b>				
1. Научно-исследовательская деятельность.	+	+	+	+
2. Ведение экологического мониторинга.	+	+	+	+
3. Проведение природоохранных мероприятий.	+	+	+	+
4. Проведение биотехнических мероприятий.	+	+	+	+
5. Проведение противопожарных мероприятий.	+	+	+	+
6. Проведение землеустроительных работ.	+	+	+	+
7. Эколого-просветительская деятельность.	-	+	+	+
8. Организация и обустройство экскурсионных экологических троп и маршрутов, смотровых площадок.	-	+	+	+
9. Организация и обустройство мест отдыха и стоянок.	-	-	+	+
10. Работы по комплексному благоустройству территории.	-	-	+	+
11. Размещение музеев и информационных центров, в том числе с экспозицией под открытым небом.	-	-	-	+
12. Строительство, реконструкция и эксплуатация объектов рекреационной инфраструктуры.	-	-	+	+
13. Развитие народных и художественных промыслов и связанных с ними видов пользования природными ресурсами, не противоречащих режиму особой охраны.	-	-	-	+
14. Строительство, реконструкция, ремонт и эксплуатация хозяйственных и жилых объектов, в том числе дорог, линий электропередачи и других линейных объектов, связанных с функционированием ПАБСИ КНЦ РАН, в том числе в рамках деятельности по развитию инфраструктуры ПАБСИ КНЦ РАН, предусмотренной договорами между ПАБСИ КНЦ РАН и сторонними юридическими лицами по развитию экологического туризма.	-	-	-	+
15. Посещение гражданами в порядке, определенном специальным положением ПАБСИ КНЦ РАН.	-	+	+	+

Примечание: А – заповедная зона, Б – особо охраняемая зона, В – научно-экспозиционная зона, Г – административная зона; \* – кроме случаев, связанных с функционированием ПАБСИ КНЦ РАН; <sup>1</sup> – по решению администрации ПАБСИ КНЦ РАН разрешено временное складирование бытовых отходов (на срок не более шести месяцев) в местах (на площадках), специально определенных ПАБСИ КНЦ РАН и обустроенных в соответствии с требованиями законодательства Российской Федерации в области охраны окружающей среды, в целях их дальнейшего использования, обезвреживания, размещения, транспортирования.

Сохранению местообитаний краснокнижных на территории должно способствовать информирование населения посредством установки информационных стендов и аншлагов в местах входа троп на территорию ООПТ. Реализация этой идеи позволит посетителям получить информацию об охраняемых ботанических объектах, рациональнее относиться к выбору маршрутов передвижения и сформировать правильный паттерн поведения на территории ООПТ ПАБСИ.

## ВЫВОДЫ

1. Обоснована концепция функционального зонирования территории ООПТ федерального значения – Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН. Выделение зон проведено с учетом природных, историко-культурных, рекреационно-туристических особенностей территории и с учетом типов осуществляемой деятельности.
2. На территории ООПТ установлен дифференцированный режим охраны с выделением четырех зон: административной (зона Г), научно-экспозиционной (зона В), особо охраняемой (зона Б) и заповедной (зона А).
3. Предложенное зонирование должно способствовать как безусловному сохранению природных комплексов и охраняемых видов, так, и проведению научных исследований и успешному функционированию ПАБСИ как научного учреждения, а также устойчивому рекреационному использованию территории.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственных заданий ПАБСИ КНЦ РАН АААА-А18-118050490088-0, ИППЭС КНЦ РАН АААА-А18-118021490070-5, при частичной поддержке РФФИ 18-05-60142 и за счет средств гранта Российского научного фонда № 21-14-00029, <https://rscf.ru/project/21-14-00029/>.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This study was carried out as part of government contracts with PABGI KSC RAS (АААА-А18-118050490088-0) and INEP KSC RAS (АААА-А18-118021490070-5), as well as with the support of the Russian Foundation for Fundamental Research (project no. 18-05-60142) and Russian Science Foundation (project no. 21-14-00029, <https://rscf.ru/en/project/21-14-00029/>).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аврорин Н.А.* Полярно-альпийский ботанический сад Академии наук. Путеводитель по Хибинским тундрам. Издание второе, испр. и доп. Л.: Изд-во Академии наук СССР. 1932. С. 107–112.
2. *Андреев Г.Н., Казаков Л.А., Кислых Е.Е., Козупеева Т.А., Филиппова Л.Н., Шляков Р.Н.* Полярно-альпийский ботанический сад: Путеводитель. Мурманск: Книжное издательство. 1982. 72 с.



3. Антонова И.М., Дудорева Т.А. Каталог лишайников заповедной территории Полярно-альпийского ботанического сада. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1997. 34 с.
4. Белкина О.А., Константинова Н.А., Королева Н.Е., Костина В.А., Урбанавичене И.Н. Ботанические экскурсии по Хибинским и Ловозерским горам. Апатиты: Минералы Лапландии. 2005. 128 с.
5. Давыдов Д.А. Наземные цианопрокариоты на территории Полярно-альпийского ботанического сада-института (Хибины, Кольский полуостров). Бюлл. Моск. о-ва испытателей природы. Отдел биологический. 2008. Т. 113. Вып. 1. С. 72–75.
6. Красная книга Мурманской области. Кемерово: Азия-Принт, 2014. 578 с.
7. Красная книга Российской Федерации (растения). М.: Т-во науч. изд. КМК, 2008. 855 с.
8. Константинова Н.А., Белкина О.А., Боровичев Е.А., Давыдов Д.А., Костина В.А., Лихачев А.Ю., Мелехин А.В., Шалыгин С.С. Обзор разнообразия растений, лишайников и цианопрокариот на особо охраняемых природных территориях Мурманской области. Вестник Кольского научного центра РАН, 2011. № 2(5). С. 63–73.
9. Константинова Н.А., Лихачев А.Ю. Мохообразные территории Полярно-альпийского ботанического сада. Апатиты, 1987. 25 с.
10. Костина В.А. Каталог сосудистых растений территории Полярно-альпийского ботанического сада. Апатиты, 1988. 38 с.
11. Лукницкая А.Ф. Конъюгаты (Chlorophyta: Zygnematomphyceae) окрестностей г. Кировска (Хибины, Кольский полуостров). Новости систематики низших растений. СПб., 2001. Т. 35. С. 12–16.
12. Мелехин А.В., Давыдов Д.А., Шалыгин С.С., Боровичев Е.А. Общедоступная информационная система по биоразнообразию цианопрокариот и лишайников CRIS (Cryptogamic Russian Information System). Бюлл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. биол., 2013. Т. 118. Вып. 6. С. 51–56.
13. Мохообразные и сосудистые растения территории Полярно-альпийского ботанического сада (Хибинские горы, Кольский полуостров). Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2001. 91 с.
14. Путеводитель по Хибинским тундрам. Под ред. А.Е. Ферсмана. Л. Изд-во АН СССР. 1932. 200 с.
15. Melekhin A.V., Davydov D.A., Borovichev E.A., Shalygin S.S., Konstantinova N.A. CRIS – service for input, storage and analysis of the biodiversity data of the cryptogams. Folia Cryptogamica Estonica, 2019. V. 56. P. 99–108. DOI: 10.12697/ fce.2019.56.10.

## REFERENCES

1. Andreev G.N., Kazakov L.A., Kislykh E.E., Kozupeeva T.A., Filippova L.N., Shlyakov R.N. Polar-Alpine Botanical Garden: Guide. Murmansk: Book publishing house. 1982. 72 p. (in Russian).
2. Antonova I.M., Dudoreva T.A. Catalog of lichens in the protected area of the Polar-Alpine Botanical Garden. Apatity: Kola SC RAS publ., 1997. 34 p. (in Russian).
3. Avrorin N.A. Polar-Alpine Botanical Garden of the Academy of Sciences. Guide to the Khibiny tundra. Second edition Leningrad: USSR Academy of Sciences. 1932. P. 107–112 (in Russian).
4. Belkina O.A., Konstantinova N.A., Koroleva N.E., Kostina V.A., Urbanavichene I.N. Botanical excursions in the Khibiny and Lovozero mountains. Apatity: Minerals of Lapland. 2005. 128 p. (in Russian).

5. Bryophytes and vascular plants of the territory of the Polar-Alpine Botanical Garden (Khibiny Mountains, Kola Peninsula). Apatity: KSC RAS, 2001. 91 p. (in Russian).
  6. *Davydov D.A.* Terrestrial cyanoprokaryotes on the territory of the Polar-Alpine Botanical Garden-Institute (Khibiny, Kola Peninsula). Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Biological department. 2008. V. 113. No 1. P. 72–75 (in Russian).
  7. *Guide to the Khibiny tundra.* Ed. A.E. Fersman. Leningrad: USSR Academy of Sciences. 1932. 200 p. (in Russian).
  8. *Konstantinova N.A., Belkina O.A., Borovichev E.A., Davydov D.A., Kostina V.A., Likhachev A.Yu., Melekhin A.V., Shalygin S.S.* Review Diversity of Plants, Lichens and Cyanoprokaryotes in Specially Protected Natural Areas of the Murmansk Region. Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2011. No 2 (5). P. 63–73 (in Russian).
  9. *Konstantinova N.A., Likhachev A.Yu.* Bryophytes of the Polar-Alpine Botanical Garden. Apatity, 1987. 25 p. (in Russian).
  10. *Kostina V.A.* Catalog of vascular plants of the Polar-Alpine Botanical Garden territory. Apatity, 1988. 38 p. (in Russian).
  11. *Luknitskaya A.F.* Conjugates (Chlorophyta: Zygnematophyceae) in the vicinity of Kirovsk (Khibiny, Kola Peninsula). News of systematics of lower plants. Saint Petersburg., 2001. V. 35. P. 12–16 (in Russian).
  12. *Melekhin A.V., Davydov D.A., Borovichev E.A., Shalygin S.S., Konstantinova N.A.* CRIS – service for input, storage and analysis of the biodiversity data of the cryptogams. Folia Cryptogamica Estonica, 2019. V. 56. P. 99–108. DOI: 10.12697/ fce.2019.56.10.
  13. *Melekhin A.V., Davydov D.A., Shalygin S.S., Borovichev E.A.* CRIS (Cryptogamic Russian Information System) public information system on biodiversity of cyanoprokaryotes and lichens. Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Biological department. 2013. V. 118. No 6. P. 51–56 (in Russian).
  14. Red Data Book of the Murmansk Region. Kemerovo: Asia-Print, 2014. 578 p. (in Russian).
  15. Red Data Book of the Russian Federation (plants). Moscow: Tovarishchestvo nauch. izd. KMK, 2008. 855 p. (in Russian).
-

УДК: 911.9

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-323-334

В.А. Крюков<sup>1</sup>, Е.И. Голубева<sup>2</sup>

## ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ПРИРОДООХРАННЫХ РЕЖИМОВ ГОРОДСКОЙ ООПТ В ГИС-СРЕДЕ

### АННОТАЦИЯ

Масштаб трансформаций функциональных зон, соответствующих природоохранных режимов, степени уязвимости природных комплексов к антропогенной нагрузке, трансформаций границ, изменений экосистемного потенциала (рассчитанных двумя путями: на основе величины экосистемных услуг биогеоценозов и законодательно установленного функционального зонирования и природоохранных ограничений) оценен на примере природного заказника «Долина реки Сетуни» (Москва, Россия) с использованием открытого программного обеспечения QGIS и InVEST и открытых пространственных данных. Увеличившиеся в некоторых случаях более чем в 2 раза значения показателей ландшафтной метрики (в особенности коэффициента оптимальной формы), исключение участков и их компенсация удаленными от основного массива ООПТ долинными участками, значение средневзвешенной разности экосистемных потенциалов, рассчитанных двумя способами, равное -4,8 (по шкале от -20 до +20), снижение площади зон со строгими природоохранными ограничениями с 35% до 11% – все это указывает на значительные негативные трансформации и преобладание участков негативного зонирования с чрезмерно мягкими природоохранными режимами.

Наряду с увеличением рекреационного потенциала ООПТ, одной из главных причин происходящих изменений является возведение крупных объектов транспортной инфраструктуры, в меньшей степени – инженерных, социальных и административных объектов. Сопутствующее увеличение плотности дорожной и тропиной сети приводит к фрагментаризации ядер ООПТ и снижению их способности исполнять основную цель заказника – сохранение природных и культурных комплексов, а также биоразнообразия. Результаты анализа изменений указывают на перекоп в триаде устойчивого развития «природа-общество-экономика» относительно рассматриваемого заказника в сторону последних двух компонентов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ООПТ, ГИС, городская экология, функциональное зонирование, трансформации ООПТ.

---

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: [vitkryukov@gmail.com](mailto:vitkryukov@gmail.com)

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия. *e-mail*: [egolubeva@gmail.com](mailto:egolubeva@gmail.com)

Vitaly A. Kryukov<sup>1</sup>, Elena I. Golubeva<sup>2</sup>

## ASSESSMENT OF URBAN PROTECTED AREAS REGULATIONS CHANGES USING GIS SOFTWARE

### ABSTRACT

The scale of functional zones transformations, related nature conservation regulations, vulnerability of ecosystems to human impact, PAs borders transformations, changes of ecosystem potentials (estimated in two ways: on the basis of ecosystem services value and functional zoning and PAs restrictions established by law) is assessed in case study PA – Setun valley nature reserve (Moscow, Russia). Free open-source softwares QGIS and InVEST, open-access spatial data were used. Crucial negative transformations and predominance of negative zoning areas with too mild nature protection regimes have been revealed: landscape metrics indices rise (some of them more than doubled, especially coefficient of ideal form), exclusion of some PA part and its compensations with valley parts that are lie further away from main PA part, average-weighted ecosystem potentials difference estimated in two ways is -4.8 (possible values range from -20 to +20), reduction of zones with strict nature protection restrictions from 35% to 11%. Growth of recreational potential and construction of large transport objects are the crucial causes of current negative changes in case-study reserve at the same time, construction of engineering, social and administrative facilities are the secondary causes. Associated rise of road and pedestrian network is leading to PAs cores fragmentation and decrease of its ability to complete the main reserve goal – a conservation of natural and cultural complexes and biodiversity. The results of case-study reserve transformations analysis demonstrate an imbalance in sustainable development triad “nature-society-economy” in favour of last two components.

**KEYWORDS:** protected areas, GIS, urban ecology, functional zoning, PADDD.

### ВВЕДЕНИЕ

Современная городская среда из-за острой нехватки свободного места является местом сосредоточения различных конфликтов природопользования, среди которых отдельное место занимают особо охраняемые природные территории (ООПТ). Рост городов и распространение городского образа жизни неминуемо приводят к снижению экосистемного потенциала особо ценных участков экологического каркаса города, увеличивают потенциально возможную техногенную нагрузку на природные рефугиумы, которые существуют даже в городах в виде ООПТ. Также, в городах происходят качественные изменения в планировочных структурах, связанные с острой нехваткой места, джентрификацией, требованиям к комфортности проживания и растущим спросом на улучшение экологической ситуации [Махрова и др., 2013].

Городские ООПТ обычно богаты как и условно природными, так и преобразованными и продолжающимися формироваться культурными ландшафтами [Исаченко, 2020]. Для устойчивого развития между этими составляющими необходим компромисс, т.е. ООПТ должна обладать эффектом функциональной поляризации и иметь

---

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: [vitkryukov@gmail.com](mailto:vitkryukov@gmail.com)

<sup>2</sup> Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia. e-mail: [egolubeva@gmail.com](mailto:egolubeva@gmail.com)

зонирование. Тем не менее, многие городские ООПТ в России и зарубежом не включены в систему функционального зонирования, и на них действует единый свод ограничений и разрешений, как, например, в Санкт-Петербурге<sup>1</sup>. В Москве практика зонирования крупных ООПТ в составе проектов планировки распространилась с 2002 г., а в 2020 г. для всех ООПТ, за исключением ботанических садов, появились новые, более детальные, версии функционального зонирования в составе Положений об ООПТ.

В настоящее время площадь 139 ООПТ Москвы составляет более 19000 га (в границах до присоединения Новой Москвы – почти 18% от площади города). Это самый высокий показатель из российских городов с населением больше миллиона человек. Тем не менее, если рассматривать и Новую Москву, в которой ООПТ полностью отсутствуют, а есть категория земель с более низким охранным статусом (особо охраняемые зелёные территории – ООЗТ), то этот показатель составит 7,5%.

Характерная особенность ООПТ Москвы – присутствие функционального зонирования практически на всех территориях, что является важным инструментом для распределения потоков посетителей. Тем не менее, по состоянию на апрель 2021 года, зоны со сравнительно строгими природоохранными ограничениями в целом занимают всего лишь 7,8%, а прогулочные зоны составляют более 60% от общей площади ООПТ. Природоохранные ограничения внутри зон с одними и теми же названиями могут довольно значительно различаться (на отдельных участках может быть разрешено возведение инженерных коммуникаций, в то время как на других этот вид деятельности оказывается под запретом).

В качестве ключевой территории исследования рассматривается природный заказник «Долина реки Сетуни» на западе г. Москвы площадью около 700 га, охватывающий преимущественно нижнее и среднее течение р. Сетуни (правый приток р. Москвы) и её некоторые мелкие притоки. Несмотря на относительно большую для городской ООПТ площадь, ширина долины с охранным статусом в 100-150 м – частая для заказника ситуация.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения трансформаций границ во времени использовались пространственные данные из законодательных актов правительства Москвы об изменениях границ природных территорий на основе онлайн-портала «ООПТ России»<sup>2</sup> и Вестника Мэра и правительства Москвы с графическими приложениями. При привязке изображений с исключаемыми/включаемыми участками использовались растры, а не поворотные точки границ участков по причине того, что их координаты приведены в местной системе МГТТ, параметры перехода из которой в общеизвестные отсутствуют в открытом доступе. Этим обусловлены погрешности при определении включаемых или исключаемых участков, частично компенсированные пространственными данными Росреестра<sup>3</sup> о границах земельных участков. Тем не менее, основные закономерности изменений границ видны и с использованием описанного способа. Кроме того, для момента вывода/ввода участков из/в использование и на настоящий момент определялся характер использования и растительности участка (при её наличии) с использованием разновременных снимков высокого разрешения Google Earth Pro, находящихся в открытом доступе.

<sup>1</sup> Сайт ГКУ «Дирекция особо охраняемых природных территорий Санкт-Петербурга». Электронный ресурс: <http://oopt.spb.ru/> (дата обращения 24.03.2021).

<sup>2</sup> Портал «ООПТ России». Электронный ресурс: <http://oopt.aari.ru/> (дата обращения 24.03.2021).

<sup>3</sup> Публичная кадастровая карта России. Электронный ресурс: <https://pkk.rosreestr.ru/> (дата обращения 24.03.2021).

Для определения метрических показателей ООПТ использовались границы ООПТ и двух видов функциональных зон<sup>1</sup>: заповедные участки (фактически отсутствуют в долине Сетуни) и зоны охраняемого ландшафта. Такие показатели ландшафтной метрики, как коэффициенты оптимальной формы  $O$ , расчлененности  $P$ , фрагментарности  $\Phi$ , соседства  $C$ , помогают определить степень фрагментированности природных комплексов, близость их формы к идеальной (кругу), удаленность отдельных патчей (участков ООПТ) друг от друга, наличие буферных зеленых зон поблизости [Shumaker, 1996; Jaeger, 2000; Hawbaker, etc., 2006; Bhardwaja, Kumarb, 2019] (бóльшие значения показателей указывают на бóльшую фрагментированность, расчлененность, меньшую близость к оптимальной форме и т.д.). В совокупности с распределением потоков посетителей и характером близлежащей застройки по этим показателям возможно оценить уязвимость природных комплексов к антропогенной нагрузке. В нашем случае в качестве расчетных единиц использовались не ландшафтные объекты, а ООПТ в целом, их отдельные патчи и природоохранные ядра – зоны с самыми строгими ограничениями деятельности. Показатели ландшафтной метрики были рассчитаны через свободный модуль FragScare среды QGIS.

Кроме того, были сравнены два варианта границ и ядер ООПТ по состоянию на 2006 год, когда была утверждена территориальная схема сохранения и развития долины Сетуни и появилась первая версия функционального зонирования. Общие изменения можно оценить после геопространственной привязки растрового изображения черно-белых схем территориальной схемы.

Для оценки экосистемного потенциала  $E$  ООПТ использовались две методики:

1.  $E_1$ , рассчитанный по планировочным ограничениям в градостроительной системе Москвы в последней версии 2020 г. (размещение функциональных зон, соответствующие режимы охраны и размещение капитальных строений). Оценка проводилась с помощью взвешенной балльной шкалы от 0 до 20, при которой каждому расчетному участку (пересечение функциональных зон и капитальных объектов) присваивалось собственное значение  $E_1$  (так, у зон охраняемого ландшафта – 17, у прогулочных зон с размещенными инженерными сетями – 5, у застроенных участков третьих лиц – 0) с использованием среды QGIS.

2.  $E_2$ , рассчитанный по величине экосистемных услуг, предоставляемых природно-территориальными единицами. Для определения в общих чертах биогеоценотической структуры территории использовался снимок Landsat 8, подвергнутый классификации с обучением (табл. 1). Кроме этого выделялись участки антропогенных ландшафтов (строения и прилегающее культурное озеленение; участки, практически полностью утратившие почвенно-растительный покров). Для определения относительной величины экосистемных услуг и ранжирования отдельных участков по экосистемному потенциалу  $E_2$  использовалось открытое программное обеспечение InVEST<sup>2</sup>, позволяющее рассчитывать 18 видов экосистемных услуг. Среди них были отобраны 6 моделей: Carbon Storage and Sequestration (депонирование и секвестрация углерода), Crop Pollination (опыление), Habitat Quality (качество среды обитания), Water Purification (Nutrient Delivery Ratio) (накопление биогенных веществ и очистка водных ресурсов, Urban Cooling (снижение эффекта городского острова тепла). Так, среди входных параметров для

<sup>1</sup> Интегрированная автоматизированная информационная система обеспечения градостроительной деятельности города Москвы. Электронный ресурс: <https://isogd.mos.ru/isogd-portal/gis/none/none> (дата обращения 24.03.2021).

<sup>2</sup> InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs). Электронный ресурс: <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest> (дата обращения 24.03.2021).

модели Carbon Storage and Sequestration, помимо пространственного распределения биогеоценозов, использовалось среднее содержание углерода в наземной и подземной биомассе, а также отпаде, стоимость тонны выбросов CO<sub>2</sub> [Nelson, etc., 2009], а в модели Habitat Quality – набор возможных угроз биоразнообразию (вырубка, рекреационная активность, прокладка дорог, инженерных коммуникаций и т.д.), максимальное расстояние, через которое угрозы будут в заметной степени влиять на местообитания, вес каждой угрозы в уязвимости местообитаний, характер снижения степени угрозы с расстоянием (линейный или экспоненциальный), степень уязвимости биогеоценозов к угрозам по балльной шкале [Тишков, 2005; Prugh, etc., 2008].

Табл. 1. Биогеоценозы и антропогенные ландшафты, выделенные при управляемой классификации  
Table 1. Ecosystems and anthropogenic landscapes designed on the basis of supervised classification

№	Тип	Вид		
		Преимущественно открытые	Полуоткрытые/полузакрытые	Преимущественно закрытые
1	Субквальные подтопленные или заболоченные комплексы долин рек и малых водотоков	Преимущественно открытые	Полуоткрытые/полузакрытые	Преимущественно закрытые
2	Преимущественно хвойные леса	–	Полуоткрытые/полузакрытые	Преимущественно закрытые
3	Смешанные леса	–	Полуоткрытые/полузакрытые	Преимущественно закрытые
4	Преимущественно мелколиственные леса	–	Полуоткрытые/полузакрытые	Преимущественно закрытые
5	Заболоченные участки/низинные и переходные болота у водоразделов	–	Полуоткрытые/полузакрытые	Преимущественно закрытые
6	Окультуренные редколесья и насаждения кустарников паркового типа	Преимущественно открытые	Полуоткрытые/полузакрытые	–
7	Сухие и переходные луга	Открытые	–	–
8	Участки с преимущественно снятым почвенно-растительным покровом		–	
9	Застроенные участки и культурные насаждения вблизи		–	

Как видно, принципиальное различие между двумя указанными методиками заключается в источниках информации и юридическом признании зонирования. Экосистемный потенциал, рассчитанный с помощью этих подходов, должен различаться из-за интенсивной антропогенной нагрузки в городе на условно естественные природные комплексы. Для определения несоответствия формального функционального зонирования и реальной ценности экосистемных услуг в среде QGIS проводилась операция взвешенного оверлея векторных полигональных слоев  $E_1$  и  $E_2$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Геоинформационное обеспечение оценки потенциала городской ООПТ имеет ряд отличительных особенностей:

– Относительно широкий набор данных, потенциально имеющих высокую значимость для исследований в области экологии города. Тем не менее, в основном, они касаются объектов социальной инфраструктуры, интенсивности использования территории, негативных источников воздействия на природную среду. Компоненты природной среды, хотя и широко изучаемые специалистами-географами, экологами, биологами, почвоведом и т.д. в большей степени требуют проведения собственных специальных исследований;

– Обилие открытых данных государственных структур, имеющих высокую точность, однако, не очень высокую актуальность, и открытых данных онлайн-пользователей, благодаря которым повышается охват территорий с относительно высокой детальностью данных. Последний вид данных отличается большей легкостью доступа по сравнению с пространственной информацией законодательных актов, касающихся ООПТ;

– Относительная простота получения новых пространственных данных о состоянии компонентов ландшафта в ходе геоэкологических исследований в связи с удобством доступа на большинство ООПТ и их близостью. Однако, важными препятствиями являются закрытые территории, на которых расположены различные сторонние пользователи (объекты здравоохранения, культуры и образования, рекреационной, транспортной и инженерной инфраструктуры, административные объекты);

– Высокий уровень заинтересованности горожан в создании комфортной среды для рекреации на ООПТ, информированность о происходящих конфликтах природопользования и относительно широкий охват в СМИ и социальных сетях сущности и локализации конфликтов природопользования, нарушений компонентов природной среды.

В долине реки Сетуни техногенные процессы трансформации условно естественных ландшафтов находят весьма яркие проявления. В настоящее время она представляет собой сильно расчленённую и фрагментированную долину с преобладанием мягких природоохранных ограничений. Существующее функциональное зонирование имеет яркий диссонанс между природоохранной деятельностью и общественной и экономической: условно природные зоны со строгими природоохранными ограничениями занимают около 11%, а административно-хозяйственные участки и зоны третьих лиц в сумме 32% (почти в 3 раза выше), в то время как территориальной схемой ООПТ 2006 года была предусмотрена площадь заповедных участков на уровне около 35%, суммы административно-хозяйственных участков и третьих лиц – около 25%. Между существующим подходом к природоохранным режимам долины Сетуни и, к примеру, подходом к национальным паркам Германии (поставлена цель достигнуть площади заповедной зоны не менее 75% от площади каждого национального парка)<sup>1</sup> существует слишком огромная разница.

Снижение площади зон со строгими ограничениями (ядер) примерно в 3 раза повлекло и снижение их устойчивости к потенциальному антропогенному воздействию, что проявилось в изменениях показателей ландшафтной метрики (табл. 2). Показатели оптимальной формы, расчлененности, фрагментарности границ ООПТ возросли более чем в 2 раза, что указывает на значительное снижение устойчивости ООПТ к потенциальным

---

<sup>1</sup> Nationale Naturlandschaften. Evaluation of German National Parks. Электронный ресурс: <http://www.europarc-deutschland.de/wp-content/uploads/2012/10/Evaluation-of-German-National-Parks.pdf> (дата обращения 24.03. 2021).



антропогенным воздействиям. Оптимальность формы природоохранных ядер в настоящее время также сильно уменьшилась, в то время как расчлененность и фрагментарность изменились мало. Единственную позитивную для охраны природного наследия динамику показал коэффициент соседства для ядер ООПТ, значения которого снизились, так как при сокращении заповедных участков их стали окружать другие зоны, играющие роль буфера.

Табл. 2. Показатели ландшафтной метрики заказника «Долина реки Сетуни»

Table 2. Landscape metrics indices of Setun valley reserve

Показатели ландшафтной метрики	Границы ООПТ		Ядра ООПТ	
	2006	2021	2006	2021
<i>O</i> (коэффициент оптимальной формы)	1,59	3,13	7,29	15,02
<i>P</i> (коэффициент расчлененности)	4,18	8,28	9,33	10,89
<i>Φ</i> (коэффициент фрагментарности)	1	2,57	10,74	12,4
<i>C</i> (коэффициент соседства)	7,21	7,57	26,31	6,4

Среди видов антропогенной деятельности наиболее масштабным является рекреационная активность, однако, широко распространены и другие (возведение объектов транспортной, инженерной, общественной, административно-хозяйственной инфраструктуры). Именно создание крупных линейных транспортных объектов приводило к наиболее масштабным переключкам границ ООПТ, фрагментации охраняемых участков, увеличению количества патчей. Сокращение площади ООПТ невозможно без компенсации, поэтому заказник постепенно расширялся в сторону верховий (рис. 1, фрагмент 1), в то время как в других частях исключались пространства, предназначенные для строительства (рис. 1, фрагмент 2). Наибольшие по площади трансформации произошли ещё в 2016 г., а площадь исключенных/включенных за все годы участков достигает примерно 16% от максимально возможной площади ООПТ, причём около 38% площади от когда-либо исключенных участков было исключено в 2006 г. для строительства проспекта генерала Дорохова и жилых комплексов в нижнем течении р. Раменка (рис. 1, фрагмент 2).

Преимущественно ранее исключенные участки теперь заняты жилыми строениями, уже построенными или в стадии возведения, в меньшей степени – транспортными объектами и нежилыми строениями (рис. 2). До отмены природоохранного статуса эти территории в основном были заняты мелколиственными и смешанными лесами, однако застроенные участки и пространства с деградировавшим растительным покровом тоже занимали значительную площадь (около 25%) (рис. 2). Таким образом, частично исключенные участки уже были застроены и значительно трансформированы, несмотря на наличие охранного статуса. Что касается включенных участков, в настоящее время здесь преимущественно распространены субквальные залесенные пространства и мелколиственные леса, однако, в малых количествах присутствуют и сильно трансформированные территории. Стоит отметить, что около 35% от площади включенных участков ранее были зарезервированы под создание других малых ООПТ – заказников «Долина реки Наверашки» и «Долина реки Сетунь в Солнцево».

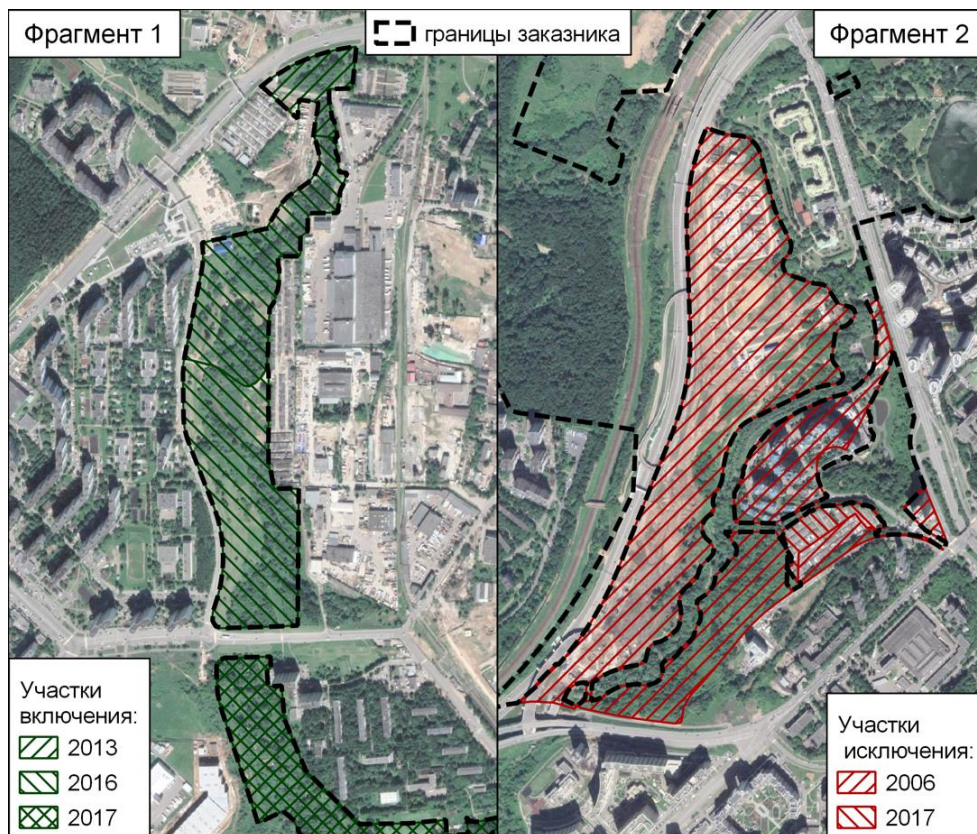


Рис. 1. Характерные изменения границ заказника «Долины реки Сетунь»

Fig. 1. Specific changes of Setun valley reserve borders

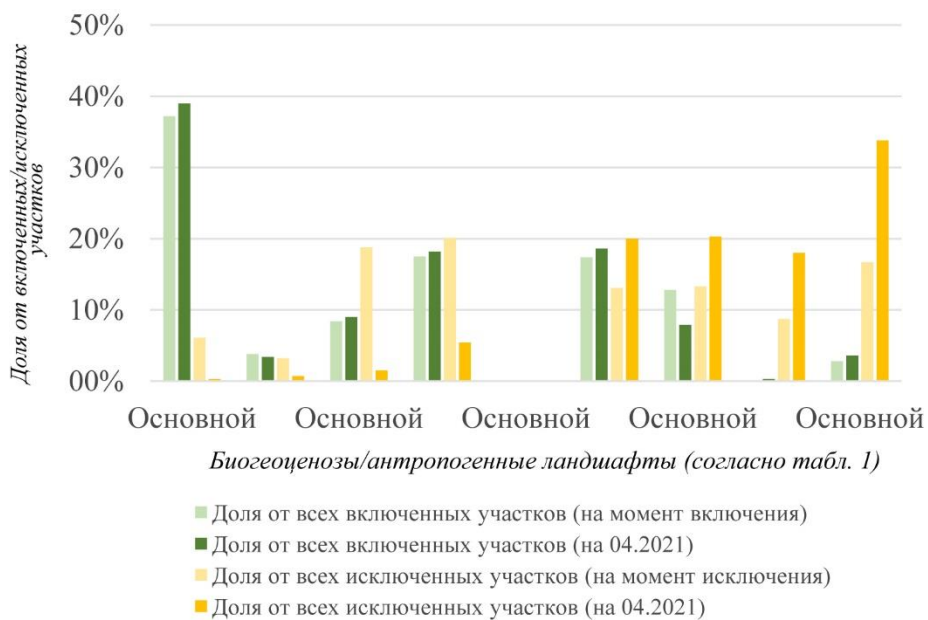


Рис. 2. Распределение исключенных и включенных участков ООПТ по биогеоценозам/характеру использования антропогенных ландшафтов (описание № 1–9 приведено в табл. 1)

Fig. 2. Excluded and included PAs parts according to ecosystems/land use of anthropogenic landscapes (№ 1–9 description is given in table 1)

Полученные значения экосистемного потенциала и  $E_1$ , и  $E_2$  значительно различаются в пространстве (рис. 3):  $E_1$  наиболее высок у пойменных участков в границах водоохранных зон преимущественно в среднем течении Сетуни, наиболее низок в центральной части заказника, где расположены многочисленные объекты здравоохранения, закрытые территории специального назначения и железнодорожное полотно; область распространения максимальных значений  $E_2$  шире и охватывает в том числе многие мелколиственные леса и даже пойменные участки (в том числе старицы), находящиеся в использовании третьими лицами и предназначенные для прокладки транспортных объектов, а минимальные значения  $E_2$  характерны для пространств паркового типа с масштабным мощением, редкими культурными насаждениями, которые распространены в Сетуни довольно слабо относительно многих других ООПТ Москвы.

Средневзвешенный показатель  $E_1$  для всей территории заказника составил 6,5, а  $E_2$  – 11,3 (по шкале от 0 до 20). Таким образом, разность  $E_1$  и  $E_2$  составляет около -4,8 (по шкале от -20 до +20), что указывает на преобладание участков негативного зонирования (участки со слишком мягкими природоохранными режимами, не способствующими сохранению условно природных биогеоценозов) над участками позитивного зонирования (участки со слишком строгими природоохранными режимами). Из этого значения в масштабе всей ООПТ можно сделать вывод о преобладании социального потенциала ООПТ над экосистемным. Из апробации авторской методики оценки экосистемного потенциала на некоторых других ООПТ Москвы известно, что у крупных природно-исторических парков показатель  $E_1-E_2$  выше, чем у рассматриваемого заказника.

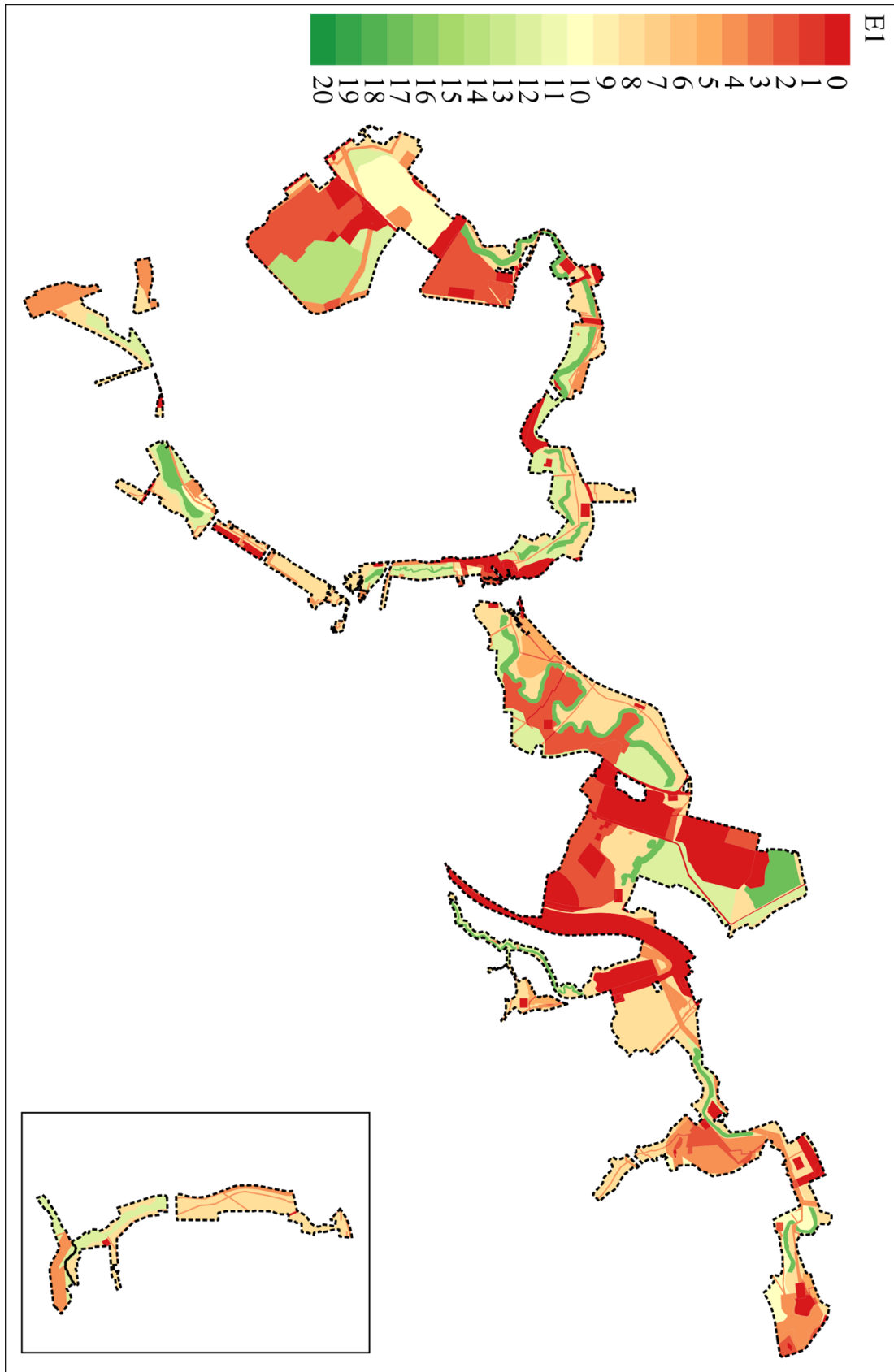
Таким образом, в настоящее время (с 2020 г.) существуют все основания для масштабного благоустройства в долине Сетуни, которое, конечно же, приведет к повышению рекреационной ценности территории, значимости зелёных зон в глазах местных жителей, возможному интересу к происходящим на ООПТ негативных событиях, связанных с нарушением природных комплексов, но, одновременно, к закономерному повышению доли культурных ландшафтов, уменьшению условно природных комплексов и потенциальному снижению биоразнообразия.

## ВЫВОДЫ

Результаты настоящего исследования указывают на возрастающие проблемы в выполнении заказником своей основной цели – «охрана природных и историко-культурных комплексов, естественных ландшафтов, сохранение или восстановление природных комплексов, биологического разнообразия»<sup>1</sup>. Существующие тенденции изменения природоохранных режимов и границ ООПТ указывают, скорее, на расширение рекреационного потенциала, а не на его поддержание, как гласит закон г. Москвы от № 48 «Об особо охраняемых природных территориях в городе Москве». Причины кроются в развитии урбанизационных процессов, повышении плотности дорожной сети, разрезающей и фрагментирующей малонарушенные (относительно остальной территории города) природные участки, несовершенствах системы градостроительного планирования. Подобная ситуация ожидаема в связи с тем, что городская ООПТ как объект интереса жителей, государственных (как и связанных с охраной природы, так и не имеющих к ней никакого отношения) и коммерческих структур является местом сосредоточения конфликтов природопользования [Сокольская и др., 2018].

Тем не менее, не стоит полагать, что подобная ситуация будет характерна для любой городской ООПТ. В данном случае, рассматриваемый заказник изначально имел очень невыгодное положение:

<sup>1</sup> Закон г. Москвы от 26.09.2001 № 48 «Об особо охраняемых природных территориях в городе Москве».



*Рис. 3. Экосистемный потенциал  $E_1$  заказника «Долина реки Сетуни», рассчитанный на основе функционального зонирования*

*Fig. 3. Ecosystem potential  $E_1$  of Setun valley reserve, estimated based on functional zoning*

Сетунь прорезает весь Западный округ и впадает в Москву, вокруг располагалось множество индустриальных объектов, которые в рамках реновации промышленных зон постепенно прекращают своё существование, а на их месте и в окрестностях появляется многоэтажная жилая застройка, значительно усиливающая рекреационную нагрузку на ООПТ. Некоторые другие менее вытянутые и фрагментированные крупные ООПТ, которые не так сильно увязаны с потоковыми системами речных долин, имеют большой потенциал для сохранения городского биоразнообразия (например, природно-исторические парки «Измайлово» и «Битцевский лес»).

В ходе данной работы успешно применена методика взвешенного оверлея в среде QGIS с использованием балльных оценок для экосистемного потенциала охраняемой территории. Разработанная методика позволяет выявить участки позитивного зонирования, где установлены строгие режимы охраны, и негативного зонирования, где установлены недостаточно строгие режимы охраны. Полученные схемы (рис. 3) наглядно показывают направления природоохранной деятельности для потребителей (городские жители, представители дирекций городских парков, работники государственных организаций, связанных с охраной природы). Такие схемы просты для воспроизведения в QGIS и прочих ГИС-программах, могут создаваться полуавтоматически по стандарту при оценках состояния окружающей среды.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках научной темы госзадания кафедры рационального природопользования географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова «Устойчивое развитие территориальных систем природопользования» и в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was implemented in the scientific program of Environmental Management Department of The Faculty of Geography at Lomonosov Moscow State University «Sustainable development of spatial land-use systems» and was performed according to the Development program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of M.V. Lomonosov Moscow State University «Future Planet and Global Environmental Change».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Исаченко Г.А., Исаченко Т.Е.* Роль особо охраняемых природных территорий в формировании культурных ландшафтов Санкт-Петербурга. Наследие и современность, 2020. №4. С. 34–51.
2. *Махрова А.Г., Нефедова Т.Г., Трейвиш А.И.* Новая Москва в контексте развития Московской агломерации. Геоэкологические проблемы Новой Москвы (под ред. А. В. Кошкарева, Э. А. Лихачева, А. А. Тишкова). М.: Медиа-ПРЕСС, 2013. С. 18–26.
3. *Сокольская Е.В., Кочуров Б.И., Долгов Ю.А., Лобковский В.А.* Многофакторная модель как основа для управления качеством окружающей среды урбанизированных территорий. Теоретическая и прикладная экология, 2018. № 2. С. 26–34. DOI: 10.25750/1995-4301-2018-2-026-034.
4. *Тишков А.А.* Биосферные функции природных экосистем России. 2005. М.: Наука. 309 с.

5. *Bhardwaj G., Kumar A.* The comparison of shape indices and perimeter interface of selected protected areas especially with reference to Sariska Tiger Reserve, India. *Global Ecology and Conservation*, 2018. V. 17. e00504. DOI: 10.1016/j.gecco.2018.e00504.
6. *Hawbaker T.J., Radeloff V.C., Clayton M.K., Hammer R.B., Gonzales-Abraham C.E.* Road Development, Housing Growth, And Landscape Fragmentation in Northern Wisconsin: 1937–1999. *Ecological Applications*, 2006. V. 16. I. 3. P. 1222–1237. DOI: 10.1890/1051-0761(2006)016[1222:RDHGAL]2.0.CO;2.
7. *Jaeger J. A. G.* Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecology*, 2000. 15. P. 115–130.
8. *Schumaker N.H.* Using landscape indices to predict habitat connectivity. *Ecology*, 1996. V. 77. No 4. P. 1210–1225.
9. *Prugh L.R., Hodges K.E., Sinclair A.R., Brashares J.S.* Effect of habitat area and isolation on fragmented animal populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008. V. 105. N. 52. P. 20770-20775. DOI: 10.1073/pnas.0806080105.

#### REFERENCES

1. *Bhardwaj G., Kumar A.* The comparison of shape indices and perimeter interface of selected protected areas especially with reference to Sariska Tiger Reserve, India. *Global Ecology and Conservation*, 2018. V. 17. e00504. DOI: 10.1016/j.gecco.2018.e00504.
  2. *Hawbaker T.J., Radeloff V.C., Clayton M.K., Hammer R.B., Gonzales-Abraham C.E.* Road Development, Housing Growth, And Landscape Fragmentation in Northern Wisconsin: 1937–1999. *Ecological Applications*, 2006. V. 16. I. 3. P. 1222–1237. DOI: 10.1890/1051-0761(2006) 016[1222:RDHGAL]2.0.CO;2.
  3. *Jaeger J.A.G.* Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecology*, 2000. 15. P. 115–130.
  4. *Isachenko G., Isachenko T.* The role of specially protected natural areas in the formation of Saint Petersburg cultural landscapes. *Heritage and Modern Times*, 2020. № 4. P. 55–72. (in Russian).
  5. *Makhrova A.G., Nefedova T.G., Treivish A.I.* New Moscow in the context of Moscow agglomeration. *Geoecologic problems of New Moscow* (edited by Koshkarev A.V., Likhacheva E.A., Tishkov A.A.), 2013. Moscow, Media-PRESS. P. 18–26. (in Russian).
  6. *Prugh L.R., Hodges K.E., Sinclair A.R., Brashares J.S.* Effect of habitat area and isolation on fragmented animal populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008. V. 105. No 52. P. 20770-20775. DOI: 10.1073/pnas.0806080105.
  7. *Schumaker N.H.* Using landscape indices to predict habitat connectivity. *Ecology*, 1996. V. 77. No 4. P. 1210–1225.
  8. *Sokolskaya E.V., Kochurov B.I., Dolgov Y.A, Lobkovsky V.A.* A multi-factor model as the basis for the environmental quality management of urban areas. *Theoretical and applied ecology*, 2018. № 2. P. 26-34. DOI: 10.25750/1995-4301-2018-2-026-034. (in Russian).
  9. *Tishkov A.A.* Biosphere functions of Russia natural ecosystems. Moscow: Nauka, 2005. 309 p. (in Russian).
-

А.Н. Огурцов<sup>1</sup>, В.В. Дмитриев<sup>2</sup>, А.А. Егоров<sup>3</sup>, П.М. Бакунович<sup>4</sup>

**ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ФАКТОРОВ  
ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ БИОРАЗНООБРАЗИЮ БИОГЕОЦЕНОЗОВ  
ВОДОСБОРНОГО БАСЕЙНА ОЗЁР БЕЛОЕ И ЛИППОВСКОЕ  
(КУРГАЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ, РОССИЯ)**

**АННОТАЦИЯ**

Решение задач совершенствования и создания новых методов интегральной оценки факторов, формирующих биоразнообразие территории в условиях постоянной угрозы его снижения в окружающей человека природной среде является актуальным направлением геоэкологических исследований. Целью нашего исследования является выявление опасности утраты биоразнообразия на ключевых участках территории на основе метода анализа и синтеза показателей при информационном дефиците и его современной версии – АСПИД-метода на ГИС-основе.

В качестве примера рассмотрены результаты исследований влияния факторов потенциальной опасности утраты биоразнообразия на водосборе двух смежных озер на Кургальском полуострове. Объектами исследования и оценки являются биогеоценозы полуострова и их таксоны. Предметом исследования является опасность утраты биоразнообразия и факторы ее определяющие. В соответствии с процедурой интегральной оценки опасности утраты биоразнообразия по АСПИД-методу для каждого биогеоценотического таксона рассчитывался композитный показатель, характеризующий уровень совокупной опасности утраты биоразнообразия. Он формировался на основе системы отдельных (нормированных) показателей с учетом их весомости в интегральной оценке. Система отдельных показателей отражает влияние антропогенных и природно-антропогенных факторов на исследуемое системное свойство.

Результаты расчетов композитных показателей легли в основу составления тематических карт интегральной оценки опасностей. Тематические карты составлены с использованием географических информационных систем (ГИС). Оценочные карты позволяют выявить участки территории с различной степенью сохранения и угрозы опасности утраты биоразнообразия.

В процессе анализа карт были выявлены особенности и различия пространственного распределения оценок, что позволило определить участки водосбора озер с низкой и высокой степенью опасности утраты биоразнообразия. При оценке антропогенной составляющей на фоне естественных изменений отмечено, что основная угроза исходит от антропогенных факторов, поскольку «сильная» и «наиболее сильная» степень опасности была выявлена у 42% биогеоценозов, а в случае природно-антропогенных факторов лишь у 21%. Угроза природно-антропогенных факторов биоразнообразию биогеоценозов наиболее сильно проявляется на западной границе

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, ВО 10-линия, д. 33-35, 199178 Санкт-Петербург, Россия, e-mail: [aogurcov@yandex.ru](mailto:aogurcov@yandex.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, ВО 10-линия, д. 33-35, 199178 Санкт-Петербург, Россия, e-mail: [v.dmitriev@spbu.ru](mailto:v.dmitriev@spbu.ru)

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, ВО 10-линия, д. 33-35, 199178 Санкт-Петербург, Россия, e-mail: [a.a.egorov@spbu.ru](mailto:a.a.egorov@spbu.ru)

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, ВО 10-линия, д. 33-35, 199178 Санкт-Петербург, Россия, e-mail: [polina-backunovich@yandex.ru](mailto:polina-backunovich@yandex.ru)

водосбора. В восточной части полуострова влияние природно-антропогенных факторов менее выражено.

Полученный опыт и результаты интегральной оценки сохранения биоразнообразия предполагается использовать при оценке интегративных свойств наземных и водных геосистем, экологического статуса и экологического благополучия водных объектов и их водосборных территорий.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** изменение биоразнообразия, водосбор озера, интегральная оценка, АСПИД, ГИС.

**Alexander N. Ogurtsov<sup>1</sup>, Vasiliy V. Dmitriev<sup>2</sup>, Alexander A. Egorov<sup>3</sup>,  
Polina M. Bakunovich<sup>4</sup>**

**SPATIAL ANALYSIS AND INTEGRAL ASSESSMENT OF FACTORS  
OF THE POTENTIAL DANGERS TO THE BIODIVERSITY OF BIOGEOCENOSES  
IN THE CATCHMENT AREA OF BELOYE AND LIPPOVSKOYE LAKES  
(KURGALSKY PENINSULA, RUSSIA)**

**ABSTRACT**

In the context of maintaining a constant threat of biodiversity loss, it is urgent to solve the problem of improving and creating new methods for assessing the factors of biodiversity change. Due to the complexity and multidimensionality of the task, the authors are invited to use the method of analyzing and synthesizing indicators with information deficit (ASPID method).

As an example of using the method, this article presents the results of studies of potential risk factors for biodiversity loss in the catchment area of two adjacent lakes on the Kurgalsky Peninsula.

As objects of the assessment chosen taxa biogeocenoses of the peninsula. In accordance with the procedure for estimating the ASPID-method for each taxon, a composite indicator was calculated. The composite indicator characterizes the level of the total risk of biodiversity loss. It is formed on the basis of a system of individual indicators and taking into account their weight. The system of individual indicators reflects the effect of anthropogenic and natural anthropogenic factors.

Calculations of composite indicators have formed the basis for the compilation of thematic maps of the integral assessment of hazards. Thematic maps are compiled using geographic information systems (GIS). Assessment maps allow you to identify areas of the territory with a high and low degree of danger.

The analysis of the maps revealed differences in the spatial distribution of estimates, which allows to identify areas of the lake catchment with a low and high degree of risk of biodiversity loss. In particular, it is noted that the main threat comes from anthropogenic factors, since the "strong" and "most severe" degree of danger is detected in 42% of biogeocenoses, and in the case of anthropogenic-natural factors only in 21%. The threat of anthropogenic-natural

---

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, VO 10-line 33-35, 199178, St. Petersburg, Russia, *e-mail*: [aogurcov@yandex.ru](mailto:aogurcov@yandex.ru)

<sup>2</sup> Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, VO 10-line 33-35, 199178, St. Petersburg, Russia, *e-mail*: [v.dmitriev@spbu.ru](mailto:v.dmitriev@spbu.ru)

<sup>3</sup> Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, VO 10-line 33-35, 199178, St. Petersburg, Russia, *e-mail*: [a.a.egorov@spbu.ru](mailto:a.a.egorov@spbu.ru)

<sup>4</sup> Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, VO 10-line 33-35, 199178, St. Petersburg, Russia, *e-mail*: [polina-backunovich@yandex.ru](mailto:polina-backunovich@yandex.ru)



factors to the biodiversity of biogeocenoses is most pronounced on the western border of the catchment area. In the eastern part of the catchment area, the influence of anthropogenic-natural factors is less noticeable.

Since the solution of the problem of biodiversity conservation affects the ecology of territories and in particular catchment areas, it can be useful in determining the ecological status and ecological well-being of water bodies and their catchment areas.

**KEYWORDS:** biodiversity change, lake catchment, integral assessment ASPID, GIS.

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях сохранения постоянной угрозы утраты биоразнообразия является актуальным решение задачи совершенствования и создания новых методов интегральной оценки сохранения, угрозы или утраты биоразнообразия на различных территориях. Большинство этих исследований посвящено вопросам формирования структуры биоразнообразия и её сохранению, главным образом, в масштабе одной-двух видовых групп. Реже затрагиваются вопросы биоразнообразия в масштабе биогеоценоза и экосистемы в целом. При этом в качестве главного критерия и едва ли не единственного показателя природоохранной ценности территории используется видовое богатство [Tropik et al., 2013]. Однако успешное решение задачи сохранения биоразнообразия во многом зависит от учёта сложности и многоаспектности этого понятия, и не может быть достигнуто с использованием какого-либо единственного индикатора или показателя [Spangenberg, 2007]. Поэтому в настоящее время предпринимаются усилия по определению необходимого и достаточного перечня оценочных параметров биоразнообразия для формирования системы оценки, основанной не только на прямых измерениях, составляющих биоразнообразия, но и их интеграции с «факторами давления» (воздействия), что необходимо и важно учитывать при оценке «факторов изменения биоразнообразия» [De Bello et al., 2010].

Несмотря на масштабность работ, результаты этих исследований недостаточно полно освещают вопросы использования факторов давления, несущих потенциальную опасность утраты биоразнообразия. В работе De Bello с соавт. [2010], в частности, отмечается, что существующие в Европейском Союзе системы сохранения биоразнообразия зачастую грешат чрезмерным использованием «не стандартизированной индикаторной информации» и биотических показателей, в ущерб факторам-угрозам ответственным за утрату биоразнообразия.

Анализ информационной базы рецензируемой литературы «ScienceDirect» показал, что число публикаций, посвященных исследованиям биоразнообразия, с 2010 года возросло почти в четыре раза (рис. 1). Среди них, по оценке авторов, менее 10 процентов публикаций затрагивают вопросы о роли факторов, ответственных за утрату биоразнообразия в будущем.

Поскольку факторы, представляющие опасность утраты биоразнообразия довольно многочисленны и носят как естественный, так и антропогенный характер, необходима их структуризация и разработка интегрированного подхода, в рамках которого различные показатели можно объединять в единую многокритериальную и многоуровневую систему оценки. Реализация такого подхода с использованием метода анализа и синтеза показателей при информационном дефиците [Dmitriev et al., 2020, Амаро Медина, Дмитриев, 2019] положена авторами в основу проведенных исследований. Результаты других исследований с разной степенью подробности в описании подхода изложены в большом количестве наших публикаций, посвященных оценке интегративных свойств природных и общественных систем.

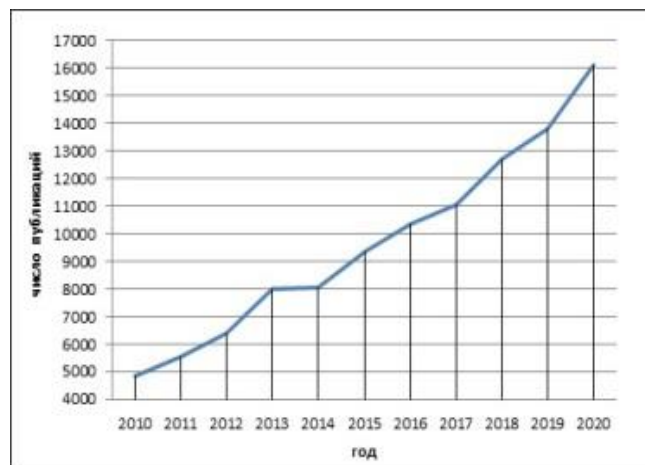


Рис. 1. Число публикаций по биоразнообразию (по данным ScienceDirect)

Fig. 1. Number of publications on biodiversity (according to ScienceDirect)

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основной целью нашего исследования являлось проведение интегральной оценки факторов потенциальной опасности биоразнообразию биогеоценозов водосборного бассейна. В качестве модельной территории были выбраны водосборные бассейны двух озер (оз. Белое и оз. Липповское), расположенных в Кингисеппском районе Ленинградской области (Россия) на территории Кургальского полуострова. Общая площадь водосбора озер составляет 64,73 км<sup>2</sup>.

В природном отношении район исследования расположен в условиях южной тайги, а гидрологическая сеть полуострова представлена небольшими реками, болотами и озерами, наибольшими из которых являются оз. Белое и оз. Липповское. Несмотря на природоохранный статус Кургальского полуострова, этот район является излюбленным местом для отдыха местных жителей, рекреантов и туристов из ближайших окрестностей и г. Санкт-Петербурга. Это обуславливает потенциальную опасность утраты биоразнообразия биогеоценозов на водосборах озер.

В связи с поставленной целью объектами для оценки являлись биогеоценозы водосборных бассейнов этих двух озер, а предметами оценки – факторы опасности как природного, так и антропогенного характера, которые в работе были разделены на две группы: антропогенные и природно-антропогенные.

Материалами для исследования явились данные полевых исследований, проведенные в полевой сезон 2020 г., снимки высокого разрешения и материалы предыдущих исследований по биоразнообразию территории [Смагин, Галанина, 2003; Экологический атлас..., 2007; Крижук, Теплякова, Калибернова, 2011; Сергиенко, 2013; Глазкова и др., 2018; Глазкова и др., 2019; Глазкова и др., 2020]. При выделении биогеоценозов использовались также методические подходы, разработанные при выделении типов леса для северо-запада России [Федорчук и др., 2005].

Все опасности в изучаемом регионе, исходя из опыта и знаний об их проявлении, были ранжированы по максимальному проявлению (Maximum exposure to danger). Всего было выделено 3 ранга: 1 – фактор слабо или редко проявляющийся; 2 – фактор, значительно проявляющийся; 3 – очень сильно проявляющийся фактор.

Для каждого биогеоценоза на основе экспертной оценки была определена степень проявления опасности в зависимости от преобладающей жизненной формы, возраста

древостоя, режима увлажнения и богатства почв, наличия растительных ресурсов (грибов и ягод), степени его нарушенности, близости к берегу водоема, возможности проезда и некоторых других особенностей. Всего экспертами, на данном этапе работы использовалось 4 степени проявления опасности: 1 – 0,00 – угроза не характерна для биогеоценоза; 2 – 0,33 – фактор, слабо или редко влияющий на биогеоценоз; 3 – 0,67 – фактор, значительно влияющий на биогеоценоз; 4 – 1,00 – очень сильно влияющий фактор.

В итоге, на основании типологии лесов северо-запада России были выделены достаточно крупные по объему типы биогеоценозов (всего 33, табл. 1), для которых экспертами была определена степень проявления потенциальной опасности биоразнообразию биогеоценозов водосбора озер Липповское и Белое по выбранным факторам. Рассмотрим примеры экспертного учета степени проявления опасности.

Для выявления степени проявления опасности (Degree of danger = Ddg), связанной с рекреацией на берегу водоема (A1), учитывалось расположение биогеоценоза по его удалению от берега водоема: Ddg = 1 в пределах первых 50 м, Ddg = 0,67 на удалении 51–100 м, Ddg = 0,33 на удалении 101–200 м, Ddg = 0 на удалении свыше 201 м.

При оценке Ddg по незаконной рубке леса (A2) Ddg = 0,67 для взрослых ельников и сосняков зеленомошным; Ddg = 0,33 для взрослых сосняков и ельников сырых, молодых ельников и сосняков зеленомошных и неморальных, березняков зеленомошных; Ddg = 0,00 для остальных.

Поскольку опасность утраты биоразнообразия исходит от воздействия многочисленных угроз, будем считать необходимым и обоснованным использование композитных показателей для интегральной оценки их совокупного влияния [Godínez-Gómez *et al.*, 2020].

Для оценки совокупного действия факторов в процессе получения композитных показателей опасности, исходные характеристики (табл. 1) предварительно подвергались процедуре нормирования с целью возможности их сравнения путем перевода в единую шкалу от 0,0 до 1,0. Поскольку увеличение значений исходных характеристик (степени проявления опасности) означает ухудшение ситуации для биогеоценоза, чреватой утратой биоразнообразия, то при нормировании мы воспользовались линейной монотонно убывающей функцией согласно [Амаро Медина, Дмитриев, 2019]. В последующем проводилась процедура интеграции нормированных значений исходных параметров и расчёт композитных показателей. В нашем случае для интеграции как антропогенных, так и природно-антропогенных критериев использовалась линейная аддитивная модель свёртки [Хованов, 1996] вида:

$$Q^{(j)} = q_1^{(j)} \times w_1 + q_2^{(j)} \times w_2 + \dots + q_i^{(j)} \times w_i$$

где:  $Q^{(j)}$  – композитный показатель опасности утраты биоразнообразия  $j$ -го биогеоценоза;  $q_i^{(j)}$  – отдельный (нормированный) показатель, характеризующий опасность утраты биоразнообразия  $j$ -го биогеоценоза с точки зрения величины  $i$ -го критерия;  $w_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го критерия.

В нашем случае весовой коэффициент ассоциируется с максимальным проявлением опасности фактора и рассчитывается по алгоритму рандомизации [Хованов, 1996], допускающему использование ординальной (порядковой) информации для получения весовых коэффициентов.

При расчёте весовых коэффициентов учитывалась имеющаяся нечисловая информация о максимальном проявлении опасности факторов в виде: «фактор, значительно

проявляющийся» > «очень сильно проявляющийся фактор» > «слабо или редко проявляющийся фактор».

Процедура составления интегральных карт потенциальной опасности биоразнообразию и их пространственный анализ проводилась средствами ГИС Mapinfo.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве инструмента интегральной оценки и проведения расчета композитных показателей опасности мы воспользовались авторской системой Geoexpert. Расчёт проводился по каждой из двух групп факторов (табл. 1) с учетом максимального проявления опасности.

*Табл. 1. Типы биогеоценозов и экспертные оценки критериев потенциальной опасности биоразнообразию биогеоценозов водосбора озёр Липновское и Белое*

*Table 1. Types of biogeocenoses and expert assessments of the criteria for potential danger to biodiversity of biogeocenoses in the catchment area of Lippovskoe and Beloe Lakes*

№ п/п	Биогеоценоз	Антропогенные критерии <sup>1</sup>					Природно-антропогенные критерии				
		A1	A2	A3	A4	A5	N1	N2	N3	N4	N5
1	Ельники зеленомошные	0,32	0,67	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,00	0,00	0,33
2	Ельники зеленомошные	0,11	0,33	1,00	1,00	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
3	Ельники зеленомошные	0,61	0,33	1,00	1,00	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
4	Ельники сырые	0,15	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	0,67	0,67	0,00	0,67
5	Ельники сырые	0,35	0,33	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00
6	Ельники сырые	0,36	0,33	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00
7	Сосняки неморальные	0,28	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,33
8	Сосняки зеленомошные	0,44	0,67	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,00	0,00	0,33
9	Сосняки зеленомошные	0,28	0,33	1,00	1,00	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
10	Сосняки сырые	0,18	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	0,33	0,67	0,00	0,33
11	Сосняки сырые	0,00	0,33	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00
12	Березняки зеленомошные	0,24	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00
13	Березняки зеленомошные	0,17	0,33	1,00	1,00	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
14	Березняки зеленомошные	0,21	0,33	1,00	1,00	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
15	Березняки заболоченные	0,13	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00
16	Березняки заболоченные	0,02	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	Осинники неморальные	0,27	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	Черноольшанники заболоченные	0,11	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	Луга	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00

<sup>1</sup> Примечание:

Группа антропогенных факторов: A1 – рекреация по берегам озер; A2 – незаконная рубка леса; посещаемость биогеоценозов при сборе полезных растительных ресурсов A3 – грибов и A4 – ягод; A5 – проезды по территории на квадрациклах и другом транспорте.

Группа природно-антропогенных факторов опасности: N1 – пожары; N2 – ветровалы; N3 – изменение гидрологического режима; N4 – инвазивные виды; N5 – болезни и вредители леса.

20	Редколесья сосновые заболоченные	0,05	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33
21	Верховые и переходные болота	0,10	0,00	0,00	0,33	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	Прибрежноводные заросли	0,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	Березняки зеленомошные	0,93	0,33	0,33	1,00	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
24	Ручей	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	Ельники неморальные	0,35	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26	Редины	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,00
27	Сельскохозяйственные угодья	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,00
28	Сероольшанники неморальные	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
29	Пустоши	0,02	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
30	Пустоши	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
31	Луга	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
32	Ельники неморальные	0,33	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00
33	Ельники неморальные	0,67	0,33	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Для группы антропогенных факторов опасности при расчете композитных показателей реализовано следующее условие:

$$A1 > A5 > A2 = A3 = A4.$$

Для группы природно-антропогенных факторов реализовано условие:

$$N1 = N4 > N3 = N5 > N2.$$

Результаты расчёта легли в основу составления тематических карт интегральной оценки и пространственного анализа факторов опасности биоразнообразию биогеоценозов водосборного бассейна озёр Липповское и Белое (рис. 2).

Оценочная шкала ранжирована на пять категорий опасности. Ранжирование осуществлялось методом естественных границ (Jenks Natural Breaks).

Анализ и сравнение пространственного распределения результатов двух вариантов расчета композитного показателя, построенного на основе сочетания антропогенных и природно-антропогенных территориальных детерминант, позволил выполнить ранжирование биогеоценозов водосбора озер по отношению к условиям изменения биоразнообразия. В случае воздействия только антропогенных факторов оценочные категории довольно равномерно распределяются по водосбору, при природно-антропогенном характере воздействий преобладают биогеоценозы в которых складывается ситуация с «наиболее слабой» – «слабой» и «относительно сильной» опасностью потери разнообразия. «Сильный» и «наиболее сильный» характер опасности проявляется лишь в 21% биогеоценозов, а в случае антропогенной опасности уже в 42% случаев. Как следует из рассмотренного примера, вклад в угрозу снижения биоразнообразия вносят как природно-антропогенные, так и антропогенные факторы, причем последние имеют тенденцию к увеличению и преобладанию над первыми. Этот факт находит подтверждение в работе [Yang et al., 2020].

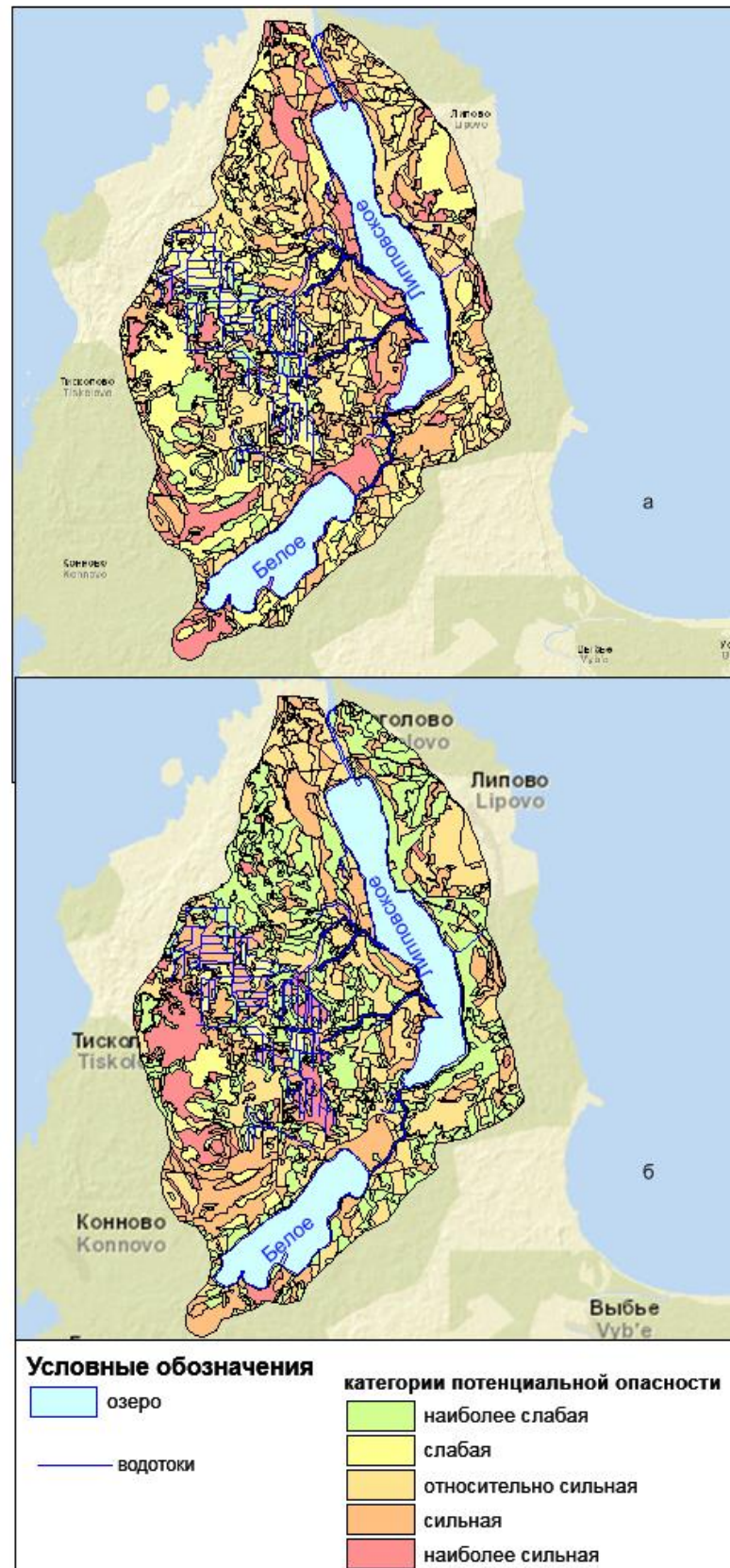


Рис. 2. Ранжирование водосборов озер по потенциальной опасности антропогенных (а) и природно-антропогенных (б) факторов утраты биоразнообразия биogeоценозами  
Fig. 2. Ranking of the lake catchment area by the potential danger of anthropogenic (a) and natural-anthropogenic (b) factors of loss of biodiversity of biogeocenoses

К западу от озера Липповское (рис. 2а) на участке развития мелиоративной системы доминирование антропогенного фактора менее показательно. Здесь степень его опасности для снижения биоразнообразия «слабая» и «очень слабая». Лишь на границах этой области, на отдельных участках, проявляется очень высокая степень опасности утраты биоразнообразия. По всей видимости, мелиоративная система и заболоченность этой местности служат естественными барьерами для влияния антропогенных факторов.

Участки водосбора (рис. 2б) с наиболее сильной степенью опасности влияния природно-антропогенных факторов имеют менее широкое распространение. Главным образом угроза биоразнообразию биоценозов наиболее сильно проявляется на западной границе водосбора. В восточной части влияние природно-антропогенных факторов проявляется менее заметно.

Повсеместно встречаются участки, где антропогенные и природно-антропогенные факторы близки по степени опасности утраты биоразнообразия биогеоценозов.

## ВЫВОДЫ

Исследование и интегральная оценка факторов потенциальной опасности биогеоценозам является важной составной частью решения проблемы сохранения биоразнообразия. Такие работы должны носить системный характер и проводиться с учетом сложности и многоаспектности объектов и предметов исследования, сочетания природно-антропогенных и антропогенных факторов и выявления интегративных свойств сложных систем в целом. Более того, для понимания возможных последствий необходимо учитывать важность и соотносить весомость угроз для биоразнообразия. Согласно полученным результатам и в отличие от ранее проводимых работ [Godínez-Gómez *et al.*, 2020], в рассмотренных примерах учитывается влияние инвазивных видов; с учетом анализа *ниж*-информации (неполной, неточной, нечисловой) вводятся весовые коэффициенты. На примере оценки потенциальной опасности биоразнообразию водосборных бассейнов показано, как влияние различных факторов сказывается на пространственной неоднородности угроз биоразнообразию. Полученные результаты могут служить отправной точкой для работ по сохранению биоразнообразия биогеоценозов Кургальского заказника в целом.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность Российскому Фонду Фундаментальных Исследований за поддержку исследований в рамках выполнения гранта РФФИ № 19-05-00683 А, а также Институту наук о Земле СПбГУ за помощь в организации работ.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to the Russian Foundation of Basic Research for supporting the studies on sustainability assessment within the framework of the RFBR grant No. 19-05-00683 A as well as to the Institute of Earth Sciences of St. Petersburg State University for assistance in organizing the works.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амаро Медина Д.Р., Дмитриев В.В. Интегральная оценка экологического благополучия речных систем. Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле, 2019. № 64 (2). С. 162–184. DOI: 10.21638/spbu07.2019.201.
2. Глазкова Е.А., Гимельбрант Д.Е., Степанчикова И.С., Доронина А.Ю., Гинзбург Э.Г., Потемкин А.Д., Дорошина Г.Я., Андреев М.П. Ценные ботанические

- объекты заказника «Кургальский» (Ленинградская область). 1. Редкие и охраняемые виды. Труды КарНЦ РАН, 2018. № 8. С. 37–60.
3. Глазкова Е.А., Ликсакова Н.С., Гимельбрант Д.Е., Доронина А.Ю., Степанчикова И.С., Гинзбург Э.Г., Потемкин А.Д. Ценные ботанические объекты заказника «Кургальский» (Ленинградская область). 2. Леса, болота, луга. Труды КарНЦ РАН, 2019. № 8. С. 44–61.
  4. Глазкова Е.А., Ликсакова Н.С., Доронина А.Ю., Гимельбрант Д.Е., Степанчикова И.С., Гинзбург Э.Г., Потемкин А.Д. Ценные ботанические объекты заказника «Кургальский» (Ленинградская область). 3. Приморские, водные и прибрежно-водные биотопы. Заказник как ключевая ботаническая территория. Труды КарНЦ РАН, 2020. № 1. С. 5–16.
  5. Крижук С.Г., Теплякова Т.Е., Калибернова Н.М. Опыт анализа биоразнообразия бореальных экосистем на основе ГИС с использованием спутниковых данных (на примере Кургальского заказника). Региональная экология, 2011. № 1–2 (31). С. 30–42.
  6. Сергиенко В.Г. Разнообразие растительных сообществ и флоры заказника «Кургальский». Труды СпбНИИЛХ, 2013. № 3. С. 49–55.
  7. Смагин В.А., Галанина О.В. Болота Кургальского полуострова. Ботанический журнал. 2003. Т. 88. № 5. С. 71–92.
  8. Федорчук В.Н., Нешатаев В.Ю., Кузнецова М.Л. Лесные экосистемы северо-западных районов России: Типология, динамика, хозяйственные особенности. СПб.: СпбНИИЛХ, 2005. 382 с.
  9. Хованов Н.В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1996. 196 с.
  10. Шукин А.К. Экологический атлас заказника «Кургальский». СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. 90 с.
  11. De Bello Fr., Lavorel S., Gerhold P., Reier Ü., Pärtel M. A biodiversity monitoring framework for practical conservation of grasslands and shublands. Biological Conservation, 2010. V. 143. Iss. 1. P. 9–17.
  12. Dmitriev V.V., Terleev V.V., Nikonorov A.O., Ogurtsov A.N., Osipov A.G., Sergeyev Yu.N., Kulesh V.P., Fedorova I.V. Global Evaluation of the Status and Sustainability of Terrestrial Landscapes and Water Bodies. Landscape Modelling and Decision Support, Innovations in Landscape Research. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2020. P. 231–253. DOI: 10.1007/978-3-030-37421-1\_12.
  13. Godínez-Gómez O., Schank C., Mas J-F., Mendoza E. An integrative analysis of threats affecting protected areas in a biodiversity stronghold in Southeast Mexico, Global Ecology and Conservation, 2020. V. 24. e01297. DOI: 10.1016/j.gecco. 2020.e01297.
  14. Spangenberg J.H. Biodiversity pressure and the driving forces behind. Ecological Economics, 2007. V. 61. Iss. 1. P. 146–158.
  15. Tropek R., Hejda M., Kadlec T., Spitzer L. Local and landscape factors affecting communities of plants and diurnal Lepidoptera in black coal spoil heaps: Implications for restoration management. Ecological Engineering, 2013. V. 57. P. 252–260.
  16. Yang S., Li C., Lou H., Wang P., Wu X., Zhang Y., Zhang J., Li X. Role of the countryside landscapes for sustaining biodiversity in karst areas at a semi centennial scale. Ecological Indicators, 2021. V. 123. 107315. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.107315.

## REFERENCES

1. Amaro Medina D.R., Dmitriev V.V. Approaches to assessment and GIS-mapping of sustainability and environmental well-being of geosystems. Integral assessment of ecological



- status of fluvial systems. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2019. V. 64. No 2. P. 162–184. DOI: 10.21638/spbu07.2019.201 (in Russian).
2. *De Bello Fr., Lavorel S., Gerhold P., Reier Ü., Pärtel M.* A biodiversity monitoring framework for practical conservation of grasslands and shublands. *Biological Conservation*, 2010. V. 143. Iss. 1. P. 9–17.
  3. *Dmitriev V.V., Terleev V.V., Nikonorov A.O., Ogurtsov A.N., Osipov A.G., Sergeev Yu.N., Kulesh V.P., Fedorova I.V.* Global Evaluation of the Status and Sustainability of Terrestrial Landscapes and Water Bodies. *Landscape Modelling and Decision Support, Innovations in Landscape Research*. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2020. P. 231–253. DOI: 10.1007/978-3-030-37421-1\_12.
  4. *Fedorchuk V.N., Neshataev V.Yu., Kuznetsova M.L.* Forest ecosystems of the north-western regions of Russia: Typology, dynamics, forest management features. St-Petersburg, 2005. 382 p. (in Russian).
  5. *Glazkova E.A., Gimel'brant D.E., Stepanchikova I.S., Doronina A.Yu., Ginzburg E.G., Potemkin A.D., Doroshina G.Ya., Andreev M.P.* Valuable botanical objects of the Kurgalsky Nature Reserve (Leningrad Region). 1. Rare and protected species. *Trans. KarRC RAS*, 2018. No 8. P. 37–60 (in Russian).
  6. *Glazkova E.A., Liksakova N.S., Doronina A.Yu., Himelbrant D.E., Stepanchikova I.S., Ginzburg E.G., Potemkin A.D.* Valuable botanical objects of the Kurgalsky nature reserve (Leningrad region). 3. Coastal, aquatic and semiaquatic biotopes of high conservation value. The Kurgalsky reserve as an important plant area. *Trans. KarRC RAS*, 2020. No 1. P. 5–16 (in Russian).
  7. *Glazkova E.A., Liksakova N.S., Gimel'brant D.E., Doronina A.Yu., Stepanchikova I.S., Ginzburg E.G., Potemkin A.D.* Valuable botanical objects of the Kurgalsky Nature Reserve (Leningrad Region). 2. Forests, mires, grasslands of high conservation value. *Trans. KarRC RAS*, 2019. No 8. P. 44–61 (in Russian).
  8. *Godínez-Gómez O., Schank C., Mas J-F., Mendoza E.* An integrative analysis of threats affecting protected areas in a biodiversity stronghold in Southeast Mexico. *Global Ecology and Conservation*, 2020. V. 24. e01297. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01297>.
  9. *Hovanov N. V.* Analysis and synthesis of indicators at information deficiency. St. Petersburg: St. Petersburg State University Press, 1996. 196 p. (in Russian).
  10. *Kritsuk S.G., Teplyakova T.E., Kalibernova N.M.* Experience in analyzing the biodiversity of boreal ecosystems based on GIS using satellite data (on the example of the Kurgalsky Nature Reserve). *Regional Ecology*, 2011. No 1–2 (31). P. 30–42 (in Russian).
  11. *Schukin A.K.* Ecological atlas of the Kurgalsky Nature Reserve. St. Petersburg: St. Petersburg State University Press, 2007. 90 p. (in Russian).
  12. *Sergienko V.G.* Diversity of plant communities and flora in reserve "Kurgalskyi". *Proceeding of the Saint Petersburg Forestry research institute*, 2013. No 3. P. 49–55 (in Russian).
  13. *Smagin V.A., Galanina O.V.* Mires of Kurgalsky peninsula. *Bot. zhurn.*, 2003. V. 88. No 5. P. 71–92 (in Russian).
  14. *Spangenberg J.H.* Biodiversity pressure and the driving forces behind. *Ecological Economics*, 2007. V. 61. Iss. 1. P. 146–158.
  15. *Tropek R., Hejda M., Kadlec T., Spitzer L.* Local and landscape factors affecting communities of plants and diurnal Lepidoptera in black coal spoil heaps: Implications for restoration management. *Ecological Engineering*, 2013. V. 57. P. 252–260.
  16. *Yang S., Li C., Lou H., Wang P., Wu X., Zhang Y., Zhang J., Li X.* Role of the countryside landscapes for sustaining biodiversity in karst areas at a semi centennial scale. *Ecological Indicators*, 2021. V. 123. 107315. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.107315.

Б.В. Полушковский<sup>1</sup>, А.В. Белова<sup>2</sup>

**ОЦЕНКА КАЧЕСТВЕННЫХ И КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
СОСТОЯНИЯ ЛЕСОПОЛОС  
НОВОАЛЕКСАНДРОВСКОГО ГОРОДСКОГО ОКРУГА  
СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**АННОТАЦИЯ**

В статье анализируется возможность оценки современного состояния лесозащитных насаждений в Ставропольском крае на основе данных дистанционного зондирования. При помощи фотограмметрического и картометрического методов проанализированы космические снимки для модельной территории Ставропольского края (Новоалександровского городского округа). Применение геоинформационных технологий позволило с помощью картографического метода оценить текущее состояние лесополос и определить их качественные и количественные характеристики. В процессе оцифровки и дешифрирования снимков лесополосы были разделены на категории по степени разрушения. Всего в ходе проведения работ было выделено 2524 лесополосы общей площадью 10,95 тыс. га. В результате появилась возможность оценить качественное состояние лесополос Новоалександровского городского округа и выявить, что целых и незначительно разрушенных защитных лесополос больше как в количественном отношении, так и по занимаемой ими площади. Далее в процессе исследования были установлены количественные характеристики лесополос – определена площадь, а также измерена и внесена в атрибутивную таблицу длина и ширина всех защитных лесных насаждений Новоалександровского городского округа. Установлено, что ширина большей части защитных лесополос (1281 шт.) в районе исследования составляет от 20 до 30 метров, а 1001 лесополоса имеют ширину более 30 м. Наиболее часто встречающаяся длина лесополос – менее 500 м. (1034 шт.) и 500–1000 метров (680 шт.). Площадные характеристики защитных лесных насаждений куда более неоднородны – так, полностью целых лесополос было выявлено 247 шт., общей площадью 1058 гектаров. Незначительно разрушенных лесополос 1623 шт., а их площадь 7395 гектаров. Значительно разрушенных лесополос 41 шт., площадью 1734 гектара и полностью разрушенных – 44 шт., площадью 213,8 гектаров.

Предложенную методику исследования и оценки защитных лесных насаждений можно использовать для других территорий Ставропольского края для более полного исследования состояния лесополос региона.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** данные дистанционного зондирования, дешифрирование, лесополосы, картографирование лесополос, геоинформационные системы.

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО Северо-Кавказский федеральный университет, Институт наук о Земле, 355000, г. Ставрополь, проспект Кулакова, 16/1 (корпус № 16) e-mail: [boris\\_pol@rambler.ru](mailto:boris_pol@rambler.ru)

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО Северо-Кавказский федеральный университет, Институт наук о Земле, 355000, г. Ставрополь, проспект Кулакова, 16/1 (корпус № 16) e-mail: [gis\\_anna@mail.ru](mailto:gis_anna@mail.ru)

**Boris V. Polushkovsky<sup>1</sup>, Anna V. Belova<sup>2</sup>**

**ASSESSMENT OF QUALITATIVE AND QUANTITATIVE  
CHARACTERISTICS OF THE STATE OF FOREST LANDS OF THE  
NOVOALEKSANDROVSK CITY DISTRICT OF STAVROPOL REGION WITH  
THE USE OF GEOINFORMATION TECHNOLOGIES**

**ABSTRACT**

The article analyzes the possibility of evaluating the current state of forest protection plant in the Stavropol Territory based on remote sensing data. With the help of photogrammetric and kartometric methods, space snapshots are analyzed for the model territory of the Stavropol Territory (Novoaleksandrovsky City District). The use of geo-information technologies allowed us using a cartographic method to estimate the current state of forest belt and determine their qualitative and quantitative characteristics. In the process of digitizing and decrypting, forest belts were divided into categories by destruction. In total, 2524 forest belts with a total area of 10.95 thousand hectares were allocated during the work. As a result, it was possible to assess the qualitative state of the forest belt of the Novoaleksandrovsky urban district and reveal that entire and slightly destroyed protective forest belts are greater than in quantitative terms and in the area they occupy. Further, in the process of the study, the quantitative characteristics of the forest belt were established – the area was determined, and the length and width of all protective forest plantations of the Novoaleksandrovsky urban district was determined and entered into an attribute table. It has been established that the width of most of the protective forest belt (1281 pcs) in the area of the study is from 20 to 30 meters, and 1001 forest belts have a width of more than 30 m. The most common length of forest belt is less than 500 m. (1034 pcs.) and 500–1000 meters (680 pcs.). Square characteristics of protective forest plantations are much more inhomogeneous – so, completely scaffolding was revealed 247 pcs., With a total area of 1058 hectares. Slightly destroyed forest belt 1623 pcs. and their area are 7395 hectares. Significantly destroyed forest belt 41 pcs., with an area of 1734 hectares and fully destroyed – 44 pcs., with an area of 213.8 hectares.

The proposed research methodology and evaluation of protective forest plantations can be used for other territories of the Stavropol Territory for a more complete study of the state of the region of the region.

**KEYWORDS:** remote sensing data, decryption, forest belts, mapping of forest belts, geographic information systems.

**ВВЕДЕНИЕ**

Для всей территории России характерна значительная разбалансированность сельскохозяйственных земель. В ряде субъектов земли сельскохозяйственного назначения занимают значительную часть всех земель региона. Так, в Ставропольском крае, доля земель сельскохозяйственного назначения составляет 92 %<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> North Caucasus Federal University, Institute of Earth Sciences, 355000, Stavropol, Kulakova Av., 16/1 (building number 16) *e-mail: boris\_pol@rambler.ru*

<sup>2</sup> North Caucasus Federal University, Institute of Earth Sciences, 355000, Stavropol, Kulakova Av., 16/1 (building number 16) *e-mail: gis\_anna@mail.ru*

<sup>3</sup> Региональный доклад о состоянии и использовании земель Ставропольского края. Электронный ресурс: <http://www.stavreg.ru/index.php/12-napolnenie/750-regionalnyu-doklad-o-sostoyanii-i-ispolzovani- zemel-stavropolskogo-kraja> (дата обращения 30.03.2021).

Общая площадь эродированных земель в крае составляет 1671 тыс. га, или 31,7 % от площади сельскохозяйственных угодий.

Активное проявление эрозионных процессов проявляется на 25,7 % территории пашни (1009 тыс. га), то есть каждый четвёртый гектар пашни разрушен от действия воды и ветра. При этом 40,3 % площади пашни подвержено выдуванию, 13,2 % – действию водной эрозии, 2,2 % – совместному воздействию воды и ветра<sup>1</sup>.

Кроме того, территория Ставрополя (и особенно восточные районы) относятся к регионам с рискованным земледелием<sup>2</sup>, поэтому для ряда районов региона значение лесозащитных насаждений трудно переоценить. Лесные полосы – это защитные лесные насаждения в виде лент, создаваемые на пахотных землях, пастбищах, в садах, вдоль каналов и дорог, по бровкам оврагов, на склонах и т. п. с целью их защиты от различных неблагоприятных факторов [Лесная энциклопедия, 1985].

Лесные полосы играют значительную природоохранную, средообразующую и рекреационную роль. Они существенно меняют ветровой режим, влажность воздуха, испаряемость, положительно влияют на накопление запасов влаги в почве, улучшают гидрологический режим территории и микроклимат, предотвращают развитие водной и ветровой эрозии. интенсивность поверхностного стока, и тем самым защищают почвы от смыва и размыва. В борьбе с водной эрозией под влиянием лесополос смыв почвы существенно сокращается [Кочкарь, 2002].

Кроме того, защитные лесные насаждения, особенно в регионах с высокой долей сельскохозяйственных земель, являются важными аккумуляторами углерода, как в многолетней наземной биомассе, так и в почве под ними путем формирования органического вещества. Типичный видовой состав лесополос в Ставропольском крае включает такие виды растений как абрикос обыкновенный, алыча, бузина, дуб летний, клен остролистный, орех грецкий, тополь, шелковица, ясень обыкновенный. К сожалению, с использованием данных дистанционного зондирования видовой состав определить практически невозможно, на это указывает и ряд зарубежных исследователей [Noorian et al., 2016].

Лесополосы в Ставропольском крае выполняют в основном ветрозащитную функцию, улучшают водный режим почвы путем задержания снега и препятствуют эрозии<sup>3</sup>.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На территории Ставропольского края лесополосы высаживались в отдельные периоды 60–80 гг. XX века. В постсоветский период вопросы агролесомелиоративного обустройства территорий перестали быть актуальными. Попытки возрождения агролесомелиорации со стороны научно-исследовательских учреждений в России в целом пока безуспешны ввиду отсутствия государственного финансирования [Ерусалимский, Рыжков, 2017]. Таким образом, и в Ставропольском крае с 90-х гг. системные мероприятия по поддержанию и развитию сети лесополос не проводились. Поэтому на сегодняшний день лесополосы края имеют различное качественное и количественное

<sup>1</sup> О состоянии окружающей среды и природопользовании в Ставропольском крае. Электронный ресурс: <http://www.mpr26.ru/deyatelnost/otchety-doklady/o-sostoyanii-okruzhayushchey-sredy-i-prirodopolzovanii-v-stavropolskom-krae> (дата обращения 30.03.2021).

<sup>2</sup> Атлас земель Ставропольского края. Электронный ресурс: <http://mshsk.ru/dzz/atlasSK.pdf> (дата обращения 30.03.2021).

<sup>3</sup> О состоянии окружающей среды и природопользовании в Ставропольском крае. Электронный ресурс: <http://www.mpr26.ru/deyatelnost/otchety-doklady/o-sostoyanii-okruzhayushchey-sredy-i-prirodopolzovanii-v-stavropolskom-krae> (дата обращения 30.03.2021).

состояние, которое мы попытались систематизировать и описать в виде нескольких категорий: целая лесополоса; незначительно разрушенная; значительно разрушенная; полностью разрушенная; категория не определима (рис. 1). Оценка состояния лесополос проводилась визуально, с использованием данных дистанционного зондирования – снимков, доступных в сервисе Google Maps. Проведение любого исследования, касающегося оценки лесной растительности, связано с нехваткой информации. Использование данных дистанционного зондирования позволяет не только получить актуальные данные, но и применить наиболее экономичную и оптимальную методику исследования [Adjognon et al., 2019]. Использование космических снимков позволяет проанализировать не только состояние и эффективность защитных лесонасаждений, но дать экологическую оценку эрозионных ландшафтов [Сабиров и др., 2007; Ермолаев и др., 2017].

Так как сервис Google Maps функционирует на базе снимков Landsat 8, а также спутников сверхвысокого разрешения WorldView и QuickBird, то в теории разрешение снимков может достигать 0,5–0,6 м/пиксель. Однако это высокое разрешение характерно, в основном, для территории крупных городов. Эмпирически нами было установлено, что снимки земель сельскохозяйственного назначения имеют пространственное разрешение около 2,5 м/пиксель, что достаточно для нашего исследования. Такое разрешение позволяет при помощи фотограмметрического метода достаточно точно выделять лесополосы, ширина которых в Ставропольском крае обычно составляет 12–25 м. За разные годы в сервисе Google Maps доступны снимки с различным разрешением и сделанные в разные времена года. Также еще одним достоинством таких снимков является отображение данных в цветах, привычных и естественных для человеческого глаза. Для проведения анализа были отобраны наиболее свежие из имеющихся материалов (как правило, за 2018–2020 гг.), сделанные в теплое время года (т.к. на снимках, сделанных зимой, снежный покров не позволяет надежно идентифицировать лесополосы) [Гурьев и др., 2013].

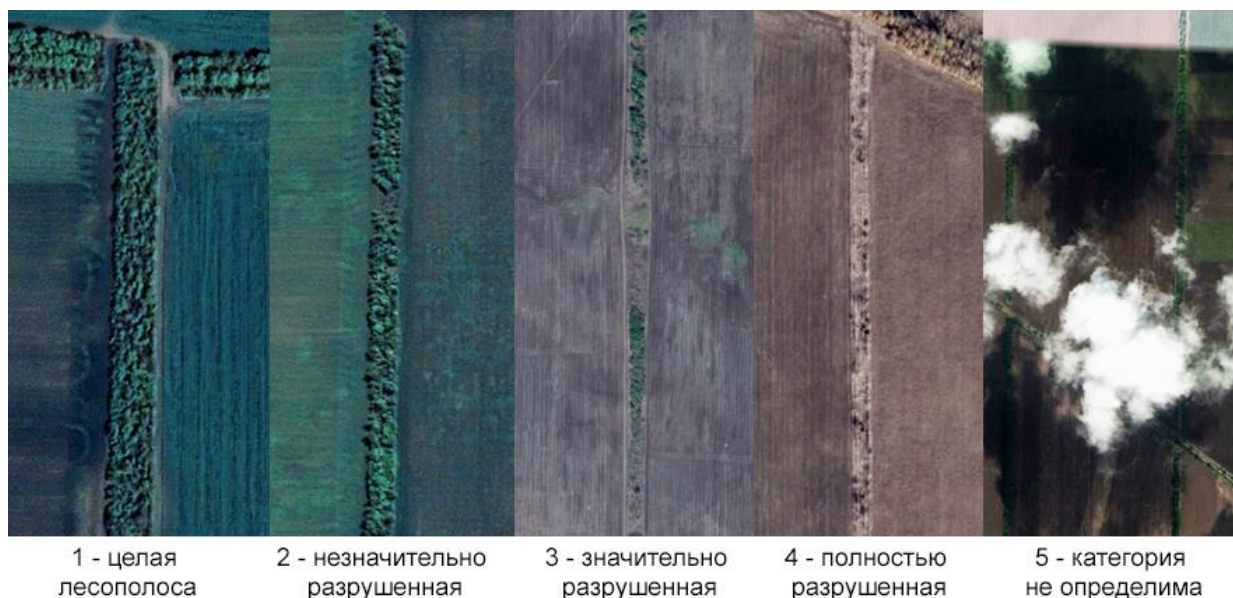


Рис. 1. Категории визуального выделения лесополос

Fig. 1. Categories of visual identification of forest belts

Для объективной оценки степени поврежденности насаждений осуществлена камеральная инвентаризация защитных лесных полос на основании данных дистанционного зондирования. Для отработки методики исследования качественного и количественного состояния лесополос был выбран Новоалександровский городской округ (ранее – Новоалександровский район), расположенный в северо-западной части Ставропольского края. В «Докладе о состоянии окружающей среды и природопользовании в Ставропольском крае», ежегодно публикуемом Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Ставропольского края, Новоалександровский городской округ выделяется как один из немногих районов с относительной однородностью почвенного покрова<sup>1</sup>.

Новоалександровский городской округ расположен в западной части края и имеет площадь 201,5 тыс. га. Район имеет сельскохозяйственную специализацию, общая площадь сельскохозяйственных угодий района составляет 188,9 тыс. га, из которых 168,7 тыс. га занимает пашня<sup>2</sup>. Таким образом, степень распаханности района – 83 %, что характерно для районов с сельскохозяйственной специализацией. Также Новоалександровский городской округ является одним из районов края с равнинным рельефом и минимальными перепадами высот, что выгодно отличает его от центральных и южных районов края [Полушковский и др., 2020].

На начальном этапе исследования по материалам дистанционного зондирования была проведена оцифровка и создание полигонального векторного слоя лесных полос. По результатам выполнения данной работы векторизовано более 2,5 тысяч объектов на снимках.

В процессе оцифровки лесополосы были организованы в классы по приведенным выше критериям, что позволило дать качественную оценку их состояния. Оцифровка лесополос и дальнейшая обработка проводилась с использованием Google Earth Pro, ГИС MapInfo Professional 15.0, а также QGIS 3.12.1. В процессе оцифровки из района исследования были исключены территории населенных пунктов, а также оцифровке не подвергались те области, где защитные лесополосы между полями отсутствуют (рис. 2).

Начальная векторизация лесополос велась в Google Earth Pro, в результате чего был получен векторный слой данных в формате \*.kml/kmz. Далее полученный слой был экспортирован в ГИС MapInfo для проведения дальнейшего анализа.

В процессе векторизации и классификации лесополос, проводимой в ГИС MapInfo, было выявлено, что распределение лесополос различных категорий на территории округа не следует каким-либо пространственным закономерностям (рис. 3). Лесополосы разной степени сохранности располагаются бессистемно.

По структуре и размещению лесополос видно, что большая их часть ориентирована в направлении север-юг, для выполнения ими ветрозащитной функции. По данным Ставропольского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды господствующими ветрами в Новоалександровском городском округе являются восточные (38,4 %) и западные (25 %) (рис. 4.). По данным дистанционного зондирования практически невозможно оценить влияние вредоносных ветров на степень разрушения лесополос.

---

<sup>1</sup> О состоянии окружающей среды и природопользовании в Ставропольском крае. Электронный ресурс: <http://www.mpr26.ru/deyatelnost/otchet-y-doklady/o-sostoyanii-okruzhayushchey-sredy-i-prirodopolzovanii-v-stavropolskom-krae> (дата обращения 30.03.2021).

<sup>2</sup> Новоалександровский городской округ Ставропольского края. Электронный ресурс: <http://newalexandrovsk.ru> (дата обращения: 30.03.2021).



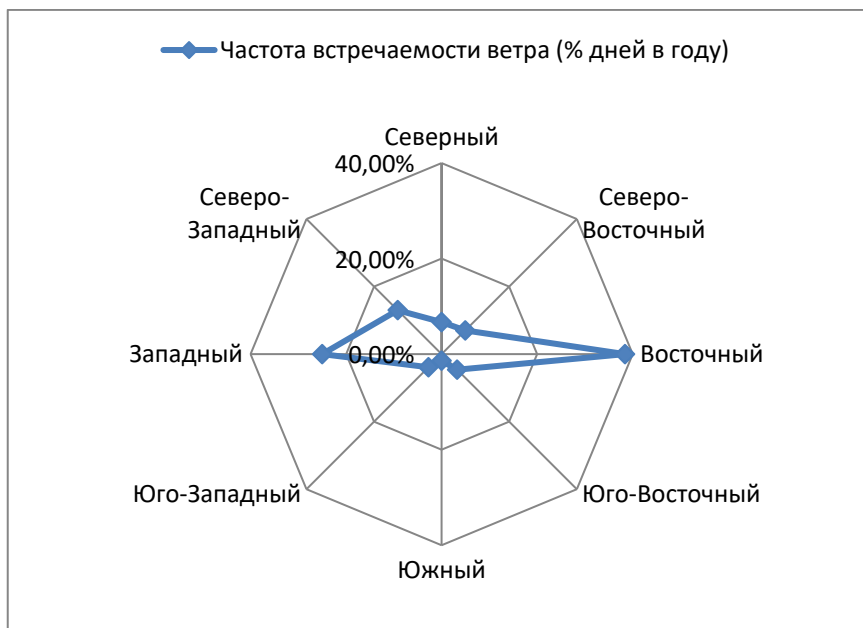


Рис. 4. Роза ветров Новоалександровского городского округа

Fig. 4. Wind rose of Novoaleksandrovsky urban district

В процессе оцифровки лесополосы были выполнены в виде полигональных объектов, которые по умолчанию имеют свойство площади. Поэтому одновременно с изучением качественных характеристик защитных лесополос было выполнено внесение площадей в атрибутивную таблицу. Для этого в ГИС MapInfo дополнительно в слое с лесополосами было создано поле Area, для дальнейшего расчета площадей (рис. 5).

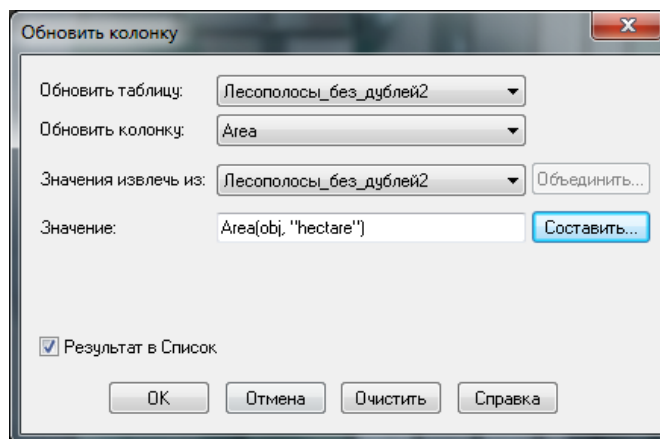


Рис. 5. Составление выражения для вычисления площади

Fig. 5. Drawing up an expression for calculating the area

Далее, используя статистику таблицы, можно провести расчет площадей лесополос различных категорий сохранности. Для удобства расчетов мы разделили все лесополосы района на 5 тематических слоев, и определили площади каждой категории лесозащитных насаждений.

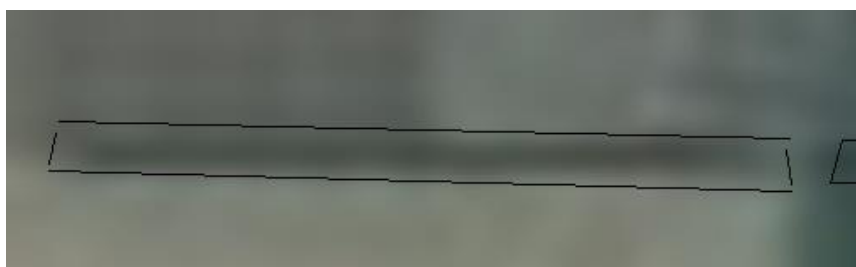
Следующей важной характеристикой защитных лесополос является их длина и ширина. Чем больше ширина – тем эффективнее лесополоса выполняет свои защитные функции. То же самое касается и длины лесополос – длинная лесополоса без разрывов



будет обеспечивать лучшую защиту сельскохозяйственных земель, чем ряд коротких лесополос или лесополоса с разрывами. Однако свойство длины и ширины у полигональных объектов отсутствует. В связи с этим, нам пришлось использовать несколько промежуточных этапов для определения линейных характеристик лесополос.

Начальным этапом стало преобразование полигонов в полилинии, что было выполнено в ГИС MapInfo. Несмотря на то, что было осуществлено преобразование защитных лесополос в полилинии, они являлись целыми объектами, для которых измерить длину и ширину в автоматическом режиме невозможно. Для разбиения полилинии на отдельные сегменты использовалась QGIS и ее функция векторного анализа «Взорвать линии».

Таким образом, мы получаем множество сегментов всех защитных лесополос (рис. 6). В идеальном варианте лесополоса разделяется на 4 составляющих полилинии: две длинные и две короткие, которые можно измерить средствами ГИС.



*Рис. 6. Пример разбиения лесополосы на отдельные сегменты*

*Fig. 6. An example of dividing a forest belt into separate segments*

Линейные характеристики длины и ширины были внесены в атрибутивную таблицу.

Теперь, имея данные о длине защитных лесополос, необходимо оценить их ширину и избавиться от дублирования данных в атрибутивной таблице. Согласно рекомендациям по агролесомелиоративному проектированию защитные лесополосы, в зависимости от пород деревьев, должны иметь ширину в интервале 10–30 м. [Защитное..., 1986] Однако в процессе оцифровки и разработки методики нередко попадались лесополосы, имеющие ширину 31–35 м. Пользуясь этими данными, с помощью инструмента запроса выберем и удалим объекты, имеющие значение длины менее 40 м (рис. 7).



*Рис. 7. Результат удаления линий менее 40 м*

*Fig. 7. Result of removing lines less than 40 m.*

Расчёт ширины защитных лесополос и запись ширины в поле width был проведён также при помощи инструмента работы с таблицами MapInfo по формуле:  $width = area / length$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Всего на территории Новоалександровского городского округа по данным ДЗЗ было выделено 2524 лесополосы общей площадью 10,95 тыс. га, что составляет 5,8 % от общей площади земель сельскохозяйственного назначения в районе. Показатель защитной лесистости, которая рассчитывается как отношение площади защитных лесополос к площади пашни, для Новоалександровского городского округа составила 6,5 %. Величина лесистости по отдельным районам Ставропольского края различна, зависит от физико-географических, климатических и почвенных условий и колеблется от 0,1 % до 6,9 %<sup>1</sup>, так что территорию Новоалександровского городского округа можно считать по этому показателю благополучной.

Полученные в ходе векторизации территории района количественные данные представлены на рис. 8.

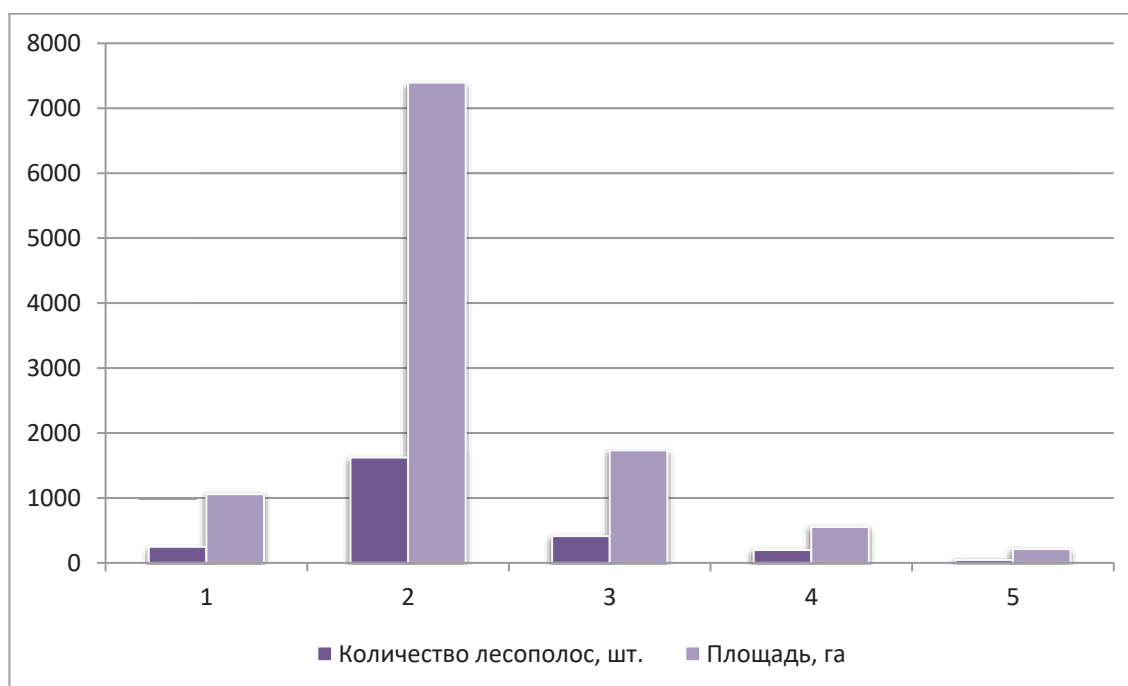


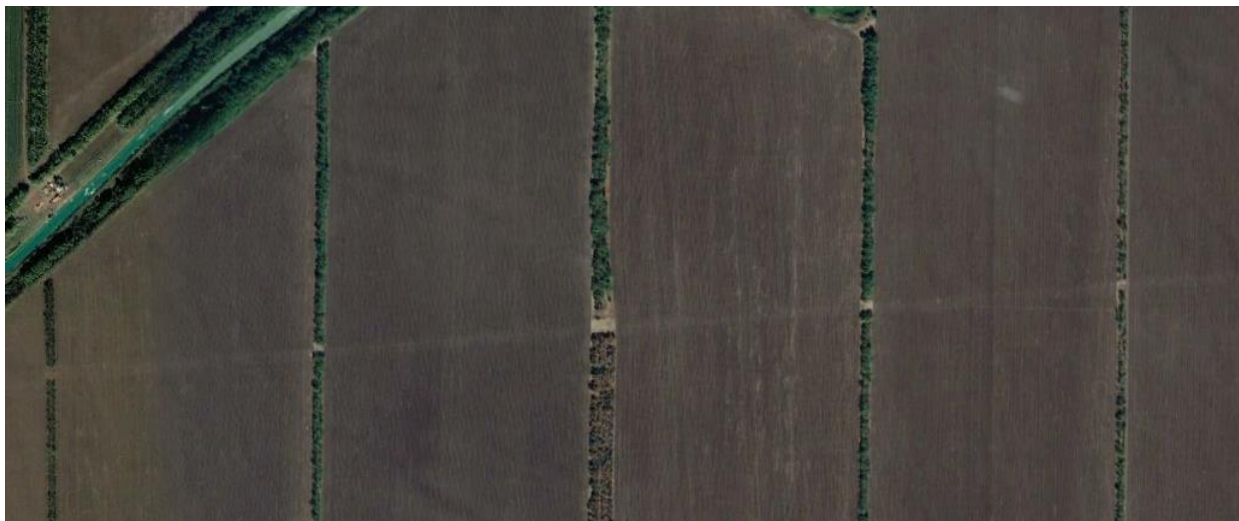
Рис. 8. Гистограмма с количественными характеристиками каждой категории лесополос

Fig. 8. Histogram with quantitative characteristics of each category of forest belts

Проанализировав распределение лесополос по качественным категориям, можно сделать выводы о том, что в выбранном районе исследования значительную часть лесополос составляют целые и незначительно разрушенные лесополосы (1 и 2 категория). Таких лесополос 74 % от общего числа лесополос в районе, и они занимают 77,2 % общей площади лесополос. Вместе с тем, как видно из рис. 4, большинство лесополос имеют

<sup>1</sup> Общие сведения о лесных ресурсах края. Электронный ресурс: <http://www.mpr26.ru/forest/o-lesnykh-resursakh-kraja/> (дата обращения 30.03.2021)

незначительные разрушения, а полностью целых защитных насаждений очень мало. Нарушения лесозащитных полос на территории Новоалександровского округа часто связаны с разрушениями, полученными за счёт хозяйственной деятельности (например, прокладкой разнообразных подземных коммуникаций). Места пересечения трасс линейных сооружений с лесополосами хорошо просматриваются на снимках и ведет к нарушению их защитных функций (рис. 9).



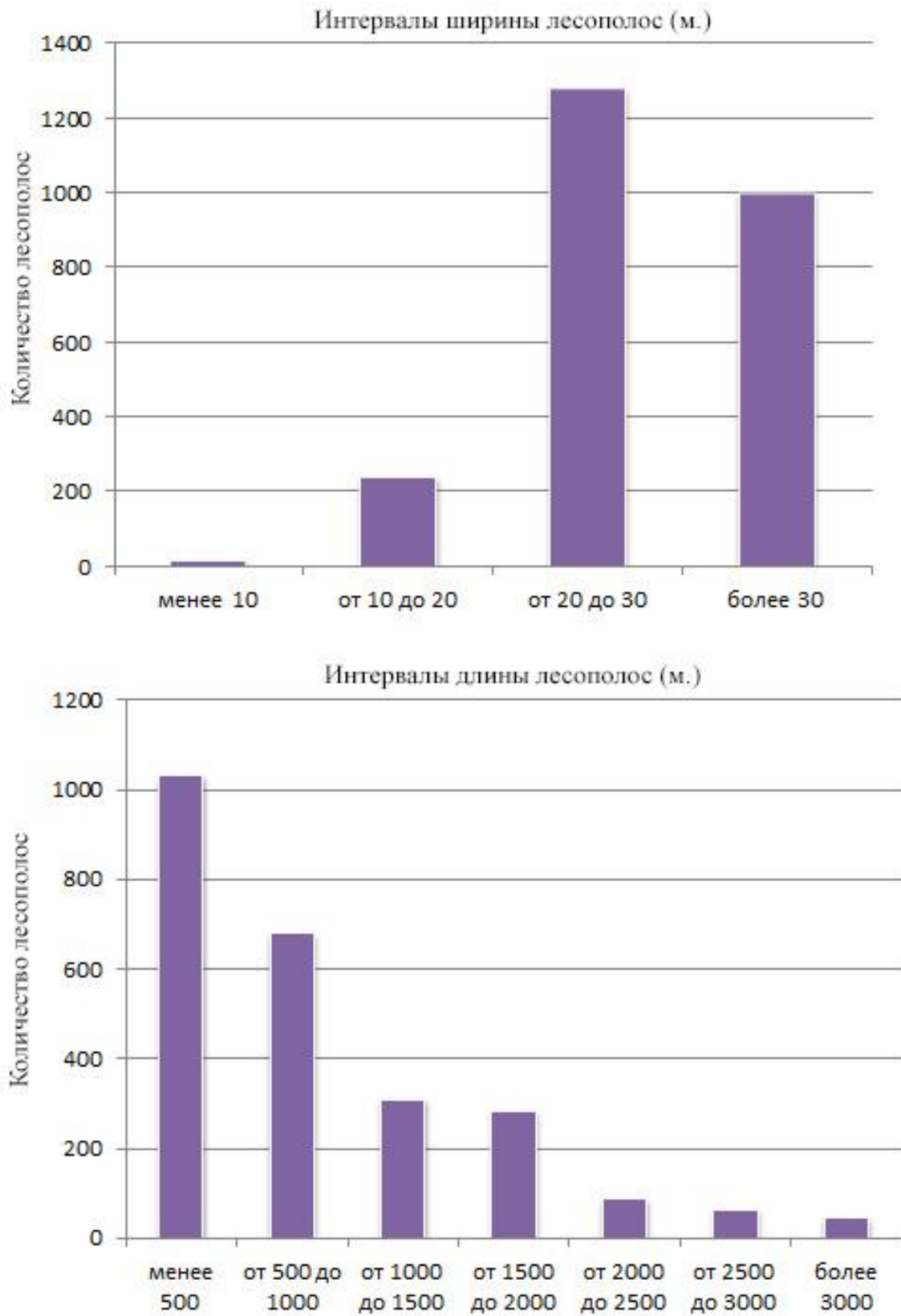
*Рис. 9. Пример пересечения лесополос подземными коммуникациями*  
*Fig. 9. An example of crossing forest belts by underground utilities*

Вместе с тем значительно разрушенных лесополос на территории района не так много – 16,4 % от общего количества всех лесополос района. Количество полностью разрушенных защитных лесополос данных категорий составляет всего 7,8 %. Таким образом, в Новоалександровском городском округе достаточно хорошая степень сохранности лесозащитных насаждений.

В процессе оцифровки не удалось классифицировать лесополосы, находящиеся на стыках склеенных снимков, в областях с высокой облачностью и т.д. Такие объекты были отнесены к 5 категории. В целом их количество не велико (1,7 % от общего количества лесополос в районе, площадь – 1,95 % от общей площади лесополос). Для их дальнейшей идентификации необходимо либо применять дополнительные съемки (например, данные крупномасштабных аэрофотосъемок), либо запланировать полевые выезды на местности для визуальной оценки состояния.

Следующий этап исследования заключался в определении количественных метрических характеристик лесозащитных насаждений.

Проведенный количественный анализ позволил определить диапазоны, в которых варьируются размеры лесополос. Всего 8 лесополос имеют ширину менее рекомендованной в 10 метров, большая часть лесополос (2282 шт.) имеет ширину от 20 до 40 метров. Длина лесополос куда более неоднородна – так, в процессе анализа удалось выявить, что в районе 1034 защитных лесополосы имеют длину менее 500 м. Это в первую очередь объясняется конфигурацией и размерами полей Новоалександровского городского округа, но в то же время снижает эффективное действие таких лесополос по борьбе с дефляцией. При этом на рисунке можно отметить обратную зависимость длины лесополос и их количества: чем длиннее лесополосы, тем их меньше в районе исследования (рис. 10).



*Рис. 10. Характеристика длины и ширины лесополос Новоалександровского городского округа*

*Fig. 10. Characteristics of the length and width of the forest belts of the Novoaleksandrovsk urban district*

## ВЫВОДЫ

Результаты проведенного исследования показывают, что состояние лесополос Новоалександровского городского округа Ставропольского края можно оценить в общем как достаточно хорошее по степени сохранности защитных лесополос. В то же время, достаточно небольшое количество лесополос можно охарактеризовать как «целые», во многих случаях отмечаются локальные разрушения защитных лесонасаждений, которые с течением времени могут привести к их дальнейшей деградации.

Продолжающееся активное освоение территории края, развитие сельскохозяйственного производства, а также строительство инфраструктурных объектов негативно воздействуют на лесные полосы. Для предотвращения дальнейшей деградации и разрушения лесополос необходимо наладить работу по восстановлению существующих лесополос и обустройству новых защитных лесных насаждений. Этот процесс должен проводиться целенаправленно органами государственной власти на территории всего региона, так как большая часть сельскохозяйственных угодий перешла в частную собственность. В связи с тем, что в процессе межевания земель площадь лесополос зачастую вычиталась из площади образуемых участков пашни (по просьбе заказчика работ), определить фактического собственника лесополос становится затруднительным. Часть работ по их восстановлению может быть возложена на выявленных собственников, но в целом это достаточно затратные мероприятия и требуют внимания и вложений государства. Решение проблемы оценки состояния защитных лесонасаждений в настоящее время позволит сохранить плодородие почв в будущем.

Применение спутниковой съемки в совокупности с методами ГИС позволило провести комплексное исследование структурной неоднородности лесных полос. Данный метод хотя и не позволяет получить детальную оценку, дает общее понимание того, насколько критична ситуация с состоянием полос данного района в целом. Представленный методический подход может быть использован для корректировки существующих, а также проектирования новых защитных лесных насаждений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гурьев А.Т., Алешко Р.А., Торхов С.В., Трубин Д.В.* Тематическая обработка спутниковых снимков лесных территорий на основе структурных моделей. Архангельск: ИПЦ САФУ, 2013. 164 с.
2. Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2017. Т. 159, кн. 4. С. 668–680.
3. *Ерусалимский В.И., Рожков В.А.* Многофункциональная роль защитных лесных насаждений. Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. М.: Почвенный институт, 2017. Вып. 88. С. 121–138.
4. Защитное лесоразведение в СССР. Под ред. Е.С. Павловского, Б.А. Абакумов, Д.К. Бабенко, И.М. Бартенев и др. М.: Агропромиздат, 1986. 263 с.
5. *Кочкар М.М.* Роль лесополос, регулирующих сток, во взаимодействии природных и антропогенных факторов эрозионно-гидрологического процесса в Нижнем Поволжье [Текст]: автореф. канд. с.-х. наук. Всероссийский научно-исследовательский институт агролесомелиорации (Волгоград). Волгоград, 2002. 22 с.
6. Лесная энциклопедия: в 2-х т. Гл. ред. Г.И. Воробьев; ред. кол. Н.А. Анучин, В.Г. Атрохин, В. Н. Виноградов и др. Т. 1. М., 1985. 563 с.
7. *Полушковский Б.В., Турун П.П., Сутормина Э.Н., Белова А.В.* Оценка состояния лесополос Ставропольского края с использованием данных дистанционного зондирования Земли и геоинформационных технологий. Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2020. Т. 14. № 3. С. 105–110. DOI: 10.31161/1995-0675-2020-14-3-105-110.

8. *Сабиров А.Т., Галилулин И.Р., Кокутин С.Н., Колесникова Е.Р.* Экологическая оценка эрозионных ландшафтов с использованием космических снимков. Вестник Казанской государственной сельскохозяйственной академии. 2007. Т. 2. № 1. С. 74–79.
9. *Adjognon G.S., Rivera-Ballesteros A., Van Soest D.* Satellite-based tree cover mapping for forest conservation in the drylands of Sub Saharan Africa (SSA): Application to Burkina Faso gazetted forests. *Development Engineering*. V. 4. 2019. 100039. ISSN 2352-7285. DOI: 10.1016/j.deveng.2018.100039.
10. *Noorian N., Shataee-Jouibary S.H., Mohammadi J.* Assessment of Different Remote Sensing Data for Forest Structural Attributes Estimation in the Hyrcanian Forests. *Forest Systems*, 2016. V 25. Issue 3, e074. DOI: 10.5424/fs/2016253-08682.

#### REFERENCES

1. *Adjognon G.S., Rivera-Ballesteros A., Van Soest D.* Satellite-based tree cover mapping for forest conservation in the drylands of Sub Saharan Africa (SSA): Application to Burkina Faso gazetted forests. *Development Engineering*, V. 4. 2019, 100039. ISSN 2352-7285. DOI: 10.1016/j.deveng.2018.100039.
2. *Ermolaev O.P., Medvedeva R.A., Platoncheva E.V.* Methodological approaches to monitoring erosion processes on agricultural lands of the European part of Russia using space survey materials. *Uchen. app. Kazan. un-that. Ser. Natural science*. 2017. V. 159 (4). P. 668–680 (in Russian).
3. *Erusalimsky V.I., Rozhkov V.A.* The multifunctional role of protective forest plantations. *Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Institute*. Moscow: Soil Institute, 2017. 88. P. 121–138 (in Russian).
4. *Forest encyclopedia: in 2 volumes*. Ch. ed. G.I. Vorobyov; ed. count N.A. Anuchin, V.G. Atrokhin, V.N. Vinogradov et al. T. 1. M., 1985. 563 p. (in Russian).
5. *Guryev A.T., Aleshko R.A., Torkhov S.V., Trubin D.V.* Thematic processing of satellite images of forest areas based on structural models. Arkhangelsk: IPC NARFU, 2013. 164 p. (in Russian).
6. *Kochkar M.M.* The role of runoff-regulating forest belts in the interaction of natural and anthropogenic factors of the erosion-hydrological process in the Lower Volga region [Text]: abstract of PhD dissertation. Sciences: 06.03.04; All-Russian Research Institute of Agroforestry (Volgograd). Volgograd, 2002. 22 p. (in Russian).
7. *Noorian N., Shataee-Jouibary S.H., Mohammadi J.* Assessment of Different Remote Sensing Data for Forest Structural Attributes Estimation in the Hyrcanian Forests. *Forest Systems*, 2016. Volume 25, Issue 3, e074. DOI: 10.5424/fs/2016253-08682.
8. *Polushkovsky B.V., Turun P.P., Sutormina E.N., Belova A.V.* Assessment of the state of forest belts of the Stavropol Territory using data from remote sensing of the Earth and geoinformation technologies. *Bulletin of the Dagestan State Pedagogical University. Natural and exact sciences*. 2020. V. 14. No 3. P. 105–110. DOI: 10.31161 / 1995-0675-2020-14-3-105-110 (in Russian).
9. *Protective afforestation in the USSR*. Ed. Pavlovsky E.S. Abakumov B.A., Babenko D.K., Bartenev I.M. et al. M.: Agropromizdat, 1986. 263 p. (in Russian).
10. *Sabirov A.T., Galilulin I.R., Kokutin S.N., Kolesnikova E.R.* Environmental assessment of erosional landscapes using space images. *Bulletin of the Kazan State Agricultural Academy*. 2007. V. 2. No 1. P. 74–79 (in Russian).

УДК: 502.75

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-359-374

В.В. Тимофеева<sup>1</sup>, С.А. Кутенков<sup>2</sup>, В.Н. Тарасова<sup>3</sup>, В.И. Андросова<sup>4</sup>, А.В. Руоколайнен<sup>5</sup>

## ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИС ПРИ ОЦЕНКЕ ПРИРОДООХРАННОЙ ЦЕННОСТИ ГОРОДСКИХ ЛЕСОВ (НА ПРИМЕРЕ ПАРКА «САВИН НАВОЛОК», Г. ПЕТРОЗАВОДСК, РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ)

### АННОТАЦИЯ

Приводится информация о состоянии и природоохранной ценности рекреационных лесов парка Савин Наволок. Составлены карты растительности и локализации редких и охраняемых видов сосудистых растений, мхов, лишайников и грибов. На территории парка выявлены 9 типов леса. Преобладают березняки травяные (31,8 %), ельники (25,2 %) и сосняки (16,3 %). Около четверти всей территории (25,6 %) занимают смешанные хвойно-лиственные леса, осинники, ивняки. Для парка характерно повышенное флористическое разнообразие: выявлены 258 видов сосудистых растений, 40 видов мхов и 45 видов лишайников. Отличительной чертой флоры Савин Наволока от смежных территорий является присутствие большого числа видов южнотаежной подзоны (19,7 %), в т.ч. неморальных, находящихся здесь на северной границе ареала (*Corydalis solida*, *Pulmonaria obscura*, *Tilia cordata* и др.). В парке Савин Наволок зарегистрированы 8 охраняемых в Республике Карелия видов: *Galium odoratum*, *Humulus lupulus*, *Lentaria afflata*, *Neckera pennata*, *Punctularia strigosozonata*, *Thalictrum kemense* из них два вида – *Calypso bulbosa* и *Cypripedium calceolus* – подлежат охране на территории всей Российской Федерации. *Chaenotheca brachypoda* и *Ulmus glabra* включены в “Перечень объектов растительного и животного мира, нуждающихся в особом внимании к их природной среде и рекомендованных для бионадзора”. Согласно Федеральному закону «Об особо охраняемых природных территориях», природные комплексы парка Савин Наволок соответствуют критериям необходимым для придания им статуса особо охраняемой природной территории в ранге памятника природы или государственного ботанического заказника регионального значения «Савин Наволок».

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** геоинформационные технологии, снимки Sentinel-2, программа QGIS 2.10.1., картограмма, охраняемые виды, растительность, рекреационные леса.

<sup>1</sup> Институт леса — обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Карельский научный центр Российской академии наук", ул. Пушкинская, д. 11, 185910, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, e-mail: [timofeevavera2010@yandex.ru](mailto:timofeevavera2010@yandex.ru)

<sup>2</sup> Институт биологии — обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук», ул. Пушкинская, д. 11, 185910, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, e-mail: [effort@krc.karelia.ru](mailto:effort@krc.karelia.ru)

<sup>3</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, д. 33, 185910, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, e-mail: [tarasova1873@gmail.com](mailto:tarasova1873@gmail.com)

<sup>4</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, д. 33, 185910, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, e-mail: [vera.androsova28@gmail.com](mailto:vera.androsova28@gmail.com)

<sup>5</sup> Институт леса — обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Карельский научный центр Российской академии наук", ул. Пушкинская, д. 11, 185910, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, e-mail: [aruokolainen@mail.ru](mailto:aruokolainen@mail.ru)

Vera V. Timofeeva<sup>1</sup>, Stanislav A. Kutenkov<sup>2</sup>, Victoria N. Tarasova<sup>3</sup>, Vera I. Androsova<sup>4</sup>, Anna V. Ruokolainen<sup>5</sup>

## EXPERIENCE OF USING GIS IN ASSESSMENT OF CONSERVATION VALUE OF URBAN FORESTS (BY EXAMPLE OF «SAVIN NAVOLOK» PARK, PETROZAVODSK CITY, REPUBLIC OF KARELIA)

### ABSTRACT

The information about the state and nature conservation value of the recreational forests of the Savin Navolok Park is presented. Maps of vegetation and localization of rare and protected species of vascular plants, mosses, lichens and fungi have been compiled. Nine types of forest have been identified in the Park where birch herb-rich forests (31.8%), spruce forests (25.2%), and pine forests (16.3%) prevail. About a quarter of the studied territory (25.6%) is covered by mixed coniferous-deciduous forests, aspen and willow forests. The flora of the Park is characterized by high species diversity: 258 species of vascular plants, 40 species of mosses and 45 species of lichens have been identified. In comparison with adjacent territories, distinctive feature of the studied flora is the presence of a large number of species of the southern taiga subzone (19.7%), including nemoral species on the northern border of their distribution range (*Corydalis solida*, *Pulmonaria obscura*, *Tilia cordata*, etc.). In the Savin Navolok Park, 8 species protected in the Republic of Karelia are registered: *Galium odoratum*, *Humulus lupulus*, *Lentaria afflata*, *Neckera pennata*, *Punctularia strigosozonata*, *Thalictrum kemens*, among which species *Calypso bulbosa* and *Cypripedium calceolus* are listed in the Red Data Book of Russian Federation. Species *Chaenotheca brachypoda* and *Ulmus glabra* are included in the list of taxa of the Republic of Karelia that need special attention to their state in the natural environment and are recommended for biological surveillance. According to the Federal Law “On Specially Protected Natural Areas”, the natural complexes of the Savin Navolok Park satisfies the criteria for give this territory the status of a specially protected natural area in the rank of a natural monument or a state botanical reserve of regional significance “Savin Navolok”.

**KEYWORDS:** GIS technology, Sentinel-2 satellite images, QGIS 2.10.1. program, cartogram, protected species, vegetation, recreational forests.

### ВВЕДЕНИЕ

Современные ГИС-технологии являются необходимым инструментом для решения многих задач, связанных с охраной природы. Особенно актуально применение высокоточных геоинформационных данных для выделения ценных в природоохранном и рекреационном отношении участков лесных массивов на границе городов и примыкающих к ним зеленых зон.

Город Петрозаводск окружен обширными массивами естественных лесных сообществ среднетаежного типа. Общая площадь лесных внутригородских территорий и мас-

---

<sup>1</sup> Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya St., 11, 185910, Petrozavodsk, Karelia, Russia, e-mail: [timofeevavera2010@yandex.ru](mailto:timofeevavera2010@yandex.ru)

<sup>2</sup> Institute of Biology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya St., 11, 185910, Petrozavodsk, Karelia, Russia, e-mail: [effort@krc.karelia.ru](mailto:effort@krc.karelia.ru)

<sup>3</sup> Petrozavodsk State University, Lenin av., 33, 185910, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia, e-mail: [tarasova1873@gmail.com](mailto:tarasova1873@gmail.com)

<sup>4</sup> Petrozavodsk State University, Lenin av., 33, 185910, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia, e-mail: [vera.androsova28@gmail.com](mailto:vera.androsova28@gmail.com)

<sup>5</sup> Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya St., 11, 185910, Petrozavodsk, Karelia, Russia, e-mail: [aruokolainen@mail.ru](mailto:aruokolainen@mail.ru)



сивов, непосредственно примыкающих к застройке и включенных в черту города, составляет около 6 тыс. га<sup>1</sup>. Эти лесные территории в значительной степени обеспечивают устойчивость городских экосистем, нивелируют негативное воздействие города на окружающую среду близлежащих территорий и выполняют большую рекреационную функцию [Генеральный..., 2007; Подгорная и др., 2013].

На протяжении полуторавековой истории изучения флоры г. Петрозаводска леса Сайнаволока, всегда привлекали внимание ботаников. Здесь, на южной окраине города, до настоящего времени сохранился большой фрагмент лесного массива, флора которого характерна для подзоны южной тайги. Очевидно, что уже первые исследователи флоры города, такие, как А. Бордзынский, обследовавший Петрозаводскую губу Онежского озера [Бордзынский, 1867], А.К. Гюнтер изучавший флору в окрестностях Петрозаводска [Гюнтер, 1867, 1980], J.P. Norrlin [Norrlin, 1871] и др., неоднократно посещали территорию Сайнаволока с ботаническими экскурсиями.

Много позднее, в 1942 г., богатые неморальными видами леса района Сайнаволока были исследованы известным финским ботаником L. Fagerström [Fagerström, 1945]. Значительный гербарный материал по флоре города, собранный в то время, хранится сегодня в коллекции Ботанического музея университета г. Хельсинки (Н). В послевоенное время (с 1949 г. и позднее) Сайнаволока неоднократно посещался известным ботаником М.Л. Раменской с коллегами [Раменская, 1957, 1958; Гербарные...].

С 1980-х гг. и по настоящее время лесной массив Сайнаволока и смежных территорий, как и флора г. Петрозаводска в целом, регулярно обследовались ботаниками Петрозаводского государственного университета, а также Институтов леса и биологии Карельского научного центра РАН и др. [Андреев, 1992; Буцких и др., 2000, Дьячкова, Антипина, 2000; Антипина и др., 2001, Антипина, 2002; Лантратова и др., 2003; Кравченко, 2007; Рудковская, 2007 и др.].

Леса зеленых зон играют важную роль в улучшении экологии поселений. Лесные сообщества выполняют водоохранные и почвозащитные функции, создают более благоприятные мезоклиматические условия, поглощают пыль и избыток углекислого газа, насыщают воздух кислородом, служат оздоровлению, являются местами отдыха [Рысин, 2008]. Бесконтрольное сведение городских лесов и передача их участков под строительство, приводит к ухудшению санитарного состояния города в целом, повышению загрязнения воздуха (в том числе выхлопными газами) и уменьшению эстетической привлекательности Петрозаводска. В то же время местные жители активно используют городские леса в рекреационных целях, что должно стимулировать деятельность администрации города по их сохранению [Зорина, Руоколайнен, 2015]. Очевидно, что с точки зрения сохранения биоразнообразия аборигенной флоры и оптимизации городской среды, наиболее ценные участки таких лесов целесообразно выделять и исключать из планов застройки или проведения коммуникаций и придавать им тот или иной природоохранный статус (например, в ранге памятника природы) [Буцких и др., 2000].

За последние десятилетия классические бумажные топографические карты крайне устарели, как по объективности предоставления современной ситуации об объектах, так и в технологическом их использовании для моделирования и/или мониторинга состояния природных экосистем. Географические информационные системы, как информационные технологии исследования пространственных отношений, способствуют многостороннему решению частных экологических задач [Коросов, Зорина, 2016], помогают выполнить

---

<sup>1</sup> Правила землепользования и застройки города Петрозаводска в границах территории Петрозаводского городского округа от 11 марта 2010 года № 26/38-771. Электронный ресурс: <http://docs.cntd.ru/document/919330320> (дата обращения: 24.10.2020).

анализ и синтез разнообразной информации о территориальном расположении и структуре фитоценозов, а также смоделировать их дальнейшее развитие под воздействием факторов внешней среды. Использование ГИС-технологий, в частности, позволяет с высокой степенью точности зонировать участки городских и пригородных лесов по различным категориям ценности, сохранять уязвимые к антропогенным нагрузкам элементы экосистем и в соответствии с этим грамотно планировать развитие инфраструктуры города.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом изучения являлись фитоценозы парка Савин Наволок – одного из самых крупных сохранившихся естественных массивов леса в г. Петрозаводске.

Парк Савин Наволок ( $61^{\circ}45'9''$  с.ш.,  $34^{\circ}27'6''$  в.д.), располагается в юго-восточной части Петрозаводского городского округа, в городском районе Сайнаволок и ограничен с разных сторон побережьем Онежского озера, Румянцевским парком, улицами Волонская, Ковдинская, Судостроительная и ручьем Каменным (рис. 1). Общая площадь парка – 53,96 га.

Согласно археологическим и историческим сведениям здесь были обнаружены поселения древнего человека эпох неолита и энеолита [Панкрушев, Журавлев, 1966], а в XV–XVI вв. – располагалась деревня Савин Наволок. Леса парка имеют высокий рекреационный потенциал и активно используются горожанами, как одно из доступных мест отдыха. В настоящее время здесь планируется массовая и частично уже ведется точечная активная жилищная застройка.

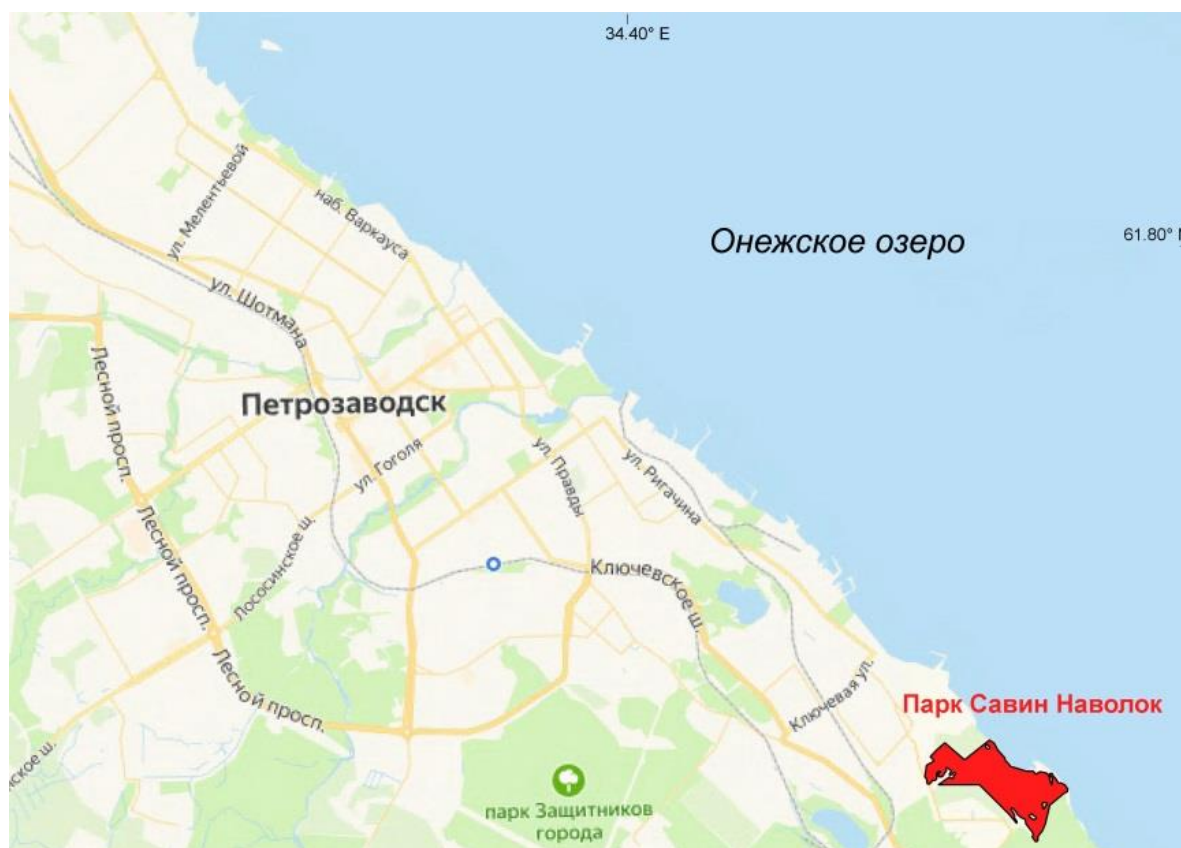


Рис. 1. Карта-схема парка Савин Наволок и смежных территорий

Fig. 1. Schematic map of Savin Navolok park and adjacent territories

Согласно Постановлению Законодательного Собрания Республики Карелия<sup>1</sup>, в соответствии с пунктом 6 статьи 62<sup>2</sup> Федерального закона от 10 января 2002 года № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды», парк Савин Наволок входит в перечень территорий, включенных в лесопарковый зеленый пояс (ЛЗП) вокруг г. Петрозаводска под пунктом № 17 – Рекреационные зоны (парки, бульвары, сады, аллеи, скверы, зеленые зоны общего пользования) (рис. 2). Таким образом, уже в настоящее время рассматриваемая территория является зоной с ограниченным режимом природопользования и иной хозяйственной деятельности и создана в целях реализации права каждого гражданина на благоприятную окружающую среду.

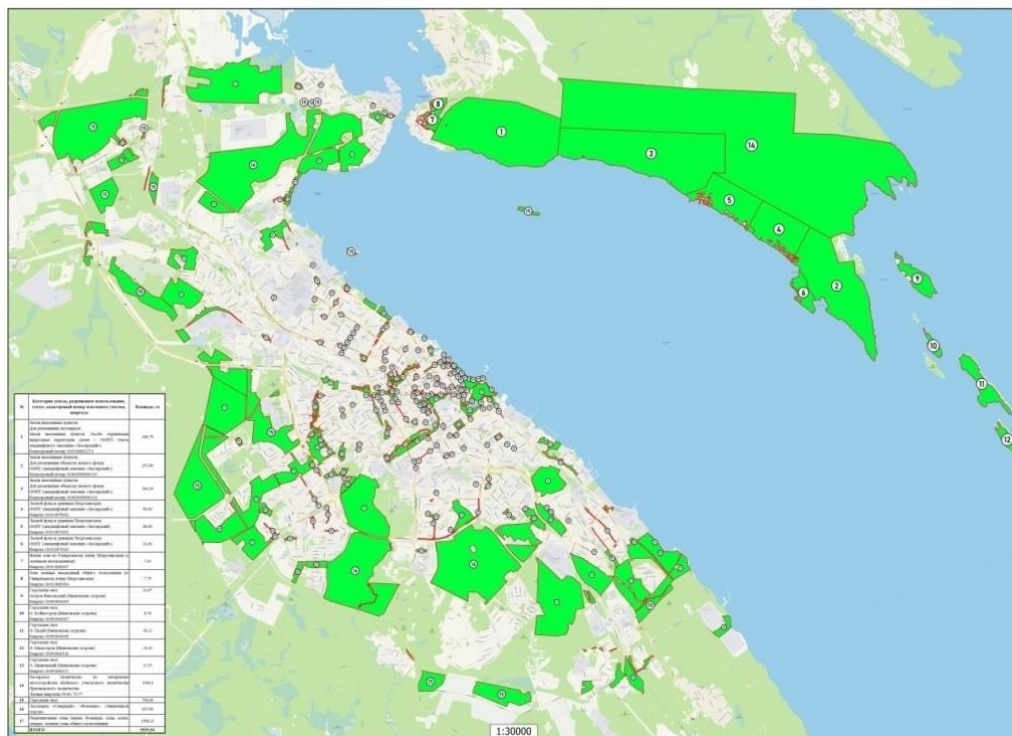


Рис. 2. Карта-схема лесопаркового зеленого пояса вокруг города Петрозаводска

Fig. 2. Schematic map of the forest-park green belt around the city of Petrozavodsk  
(<http://ecology.gov.karelia.ru/upload/iblock/07f/Kart-skhema-LZP.jpeg>)

Целью исследования являлось комплексное изучение растительного покрова парка Савин Наволок; выявление и оценка при помощи ГИС-технологий значимых в природоохранном отношении объектов и предложение рекомендаций по их охране.

Геоботаническое и флористическое обследование лесных участков проводилось маршрутным методом. Маршруты разрабатывались на основе топографической карты таким образом, чтобы охватить всё разнообразие местообитаний и растительных сообществ парка. Общая протяженность маршрутов – 9 км. В пределах фитоценозов, внутри контуров, при помощи рулетки во всех типах растительных сообществ были заложены пробные площади (ПП) размером 25 × 25 м. Всего было заложено 11 пробных площадей. Для каждой ПП регистрировалось местоположение, выполнялись геоботанические и таксацион-

<sup>1</sup> Постановление Законодательного Собрания Республики Карелия от 19 апреля 2018 года № 643-VI ЗС О создании лесопаркового зеленого пояса вокруг города Петрозаводска и о его площади. Электронный ресурс: <http://ecology.gov.karelia.ru/about/6871/> (дата обращения: 24.102020).

ные описания, включающие в себя определение общих характеристик живого напочвенного покрова и древостоя [Методы..., 2002]. Относительная сумма площадей поперечных сечений стволов деревьев определялась при помощи полнотомера Биттерлиха в 5 точках на ПП (в углах и в центре ПП) с учётом породного состава и состояния (живое, сухостойное, валёж). Возраст деревьев, формирующих первый ярус, измеряли при помощи возрастного бурава, высоту (эклиметром), диаметр у основания ствола и на высоте 130 см (портняжным метром). Оценивали подрост (вид растения, плотность [шт./га]), состав и густоту подлеска. При описании живого напочвенного покрова (на учетных площадках 1 × 1 м) регистрировали видовое разнообразие травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов, общее проективное покрытие, покрытие и встречаемость отдельных видов. На основе полученных значений рассчитывалась формула древостоя.

Для создания карты растительности проведено визуальное дешифрирование космических снимков высокого разрешения [Токарева, 2010], находящихся в открытом доступе Яндекс.Карты<sup>1</sup>, BingMaps<sup>2</sup>, разносезонных снимков Sentinel-2, совмещенное с наземным маршрутным методом исследований. Создание картографического материала проведено с использованием ГИС программы QGIS 2.10.1. Работа включала несколько этапов [Коросов, Зорина, 2016]: подготовка исходных карт и таблиц с данными; создание сети контуров однородных по фактуре растительного покрова; совмещение космоснимков разных сезонов года для уточнения границ контуров; использование полученной натурной биологической информации (геоботаническое описание растительности с 30 точек) о лесных и прочих сообществах на предмет совместимости с выделенными контурами на космоснимках; создание карты (картограммы) растительности объекта. Названия синтаксонов растительности даны согласно традиции школы В.Н. Сукачева [Сукачев, 1931].

При выявлении флоры парка (лишайники, грибы, мхи, сосудистые растения), кроме маршрутных натурных исследований были обработаны гербарные коллекции Петрозаводского государственного университета (PZV), Карельского научного центра РАН (PTZ), Ботанического института им. В.Л. Комарова (LE); изучены доступные литературные публикации о флоре г. Петрозаводска. Номенклатура видов лишайников дана согласно сводке A. Nordin et al. [2011]; грибов по Index Fungorum<sup>3</sup>; мхов по М.С. Игнатову, Е.А. Игнатовой [2003, 2004]. Названия видов сосудистых растений приведены в соответствии с "Checklist of the vascular plants of Finland" [Kurtto et al., 2016]. Координаты местонахождения редких видов фиксировались при помощи GPS/ГЛОНАСС навигатора. Для охраняемых видов также регистрировали характеристики субстрата, размеры и жизненное состояние.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Растительный покров парка очень мозаичный – здесь, на сравнительно небольшой площади выявлены 9 типов леса (рис. 3). В сложении древостоев парка равную долю имеют лиственные и хвойные породы (табл. 1). Возраст ели варьирует от 73 до 150 лет, сосны – до 130 лет. Большая часть территории покрыта лесом из смеси древесных пород: ель (*Picea abies*, *P. abies* subsp. × *fennica*), береза (*Betula pendula*, *B. pubescens*), сосна (*Pinus sylvestris*) и осина (*Populus tremula*), в различном соотношении, чистые древостои практически не представлены. Наибольшую площадь (31,8 %) занимают березняки травя-

<sup>1</sup> Яндекс.Карты. Электронный ресурс: [https://yandex.ru/maps/18/petrozavodsk/?from=tabbar&ll=34.472440%2C61.744198&mode=whatshere&source=serp\\_navig&whatshere%5Bpoint%5D=34.466139%2C61.752140&whatshere%5Bzoom%5D=14.21&z=14.21](https://yandex.ru/maps/18/petrozavodsk/?from=tabbar&ll=34.472440%2C61.744198&mode=whatshere&source=serp_navig&whatshere%5Bpoint%5D=34.466139%2C61.752140&whatshere%5Bzoom%5D=14.21&z=14.21) (дата обращения 20.07.2020).

<sup>2</sup> BingMaps. Электронный ресурс: <https://bestmaps.ru/map/bing/satellite/14/61.7488/34.4731> (дата обращения 20.07.2020).

<sup>3</sup> Index Fungorum. A nomenclatural database. 2021. Электронный ресурс: <http://www.indexfungorum.org> (дата обращения 26.04.2021).

ные, в их древостоях обычны ель и осина. Второй по занимаемой площади формацией являются ельники (24,6 %), часто в их составе присутствуют осина и береза, реже сосна. Среди ельников преобладают травяно-черничные и черничные зеленомошные сообщества. Существенную площадь (16,9 %) занимают и сосняки, как правило, с примесью ели. Среди сосняков преобладает черничный тип, реже травяно-черничный. На меньшей площади (6,8 %) доминирует осина, часто с примесью ели. Еще 8,4 % территории занимают смешанные леса с примерно равным сочетанием 2–4 пород. Кроме лесов на территории отмечаются заросли кустарника и молодняка из смеси ольхи серой (*Alnus incana*), ивы (*Salix cinerea*, *S. myrsinifolia*, *S. pentandra*), березы, осины, черемухи (*Padus avium*) (10,4 %), небольшая часть площади (1,1 %) лишена древесного яруса (расчистка под ЛЭП, пустыри на берегу озера). В подлеске лесов чаще других встречаются *Ribes spicatum*, *Lonicera xylosteum*, *Salix aurita*, *S. caprea*, *Sorbus aucuparia*.

Среди типов условий местопроизрастания преобладает травяной (57,9 %), отмечаемый в лиственных насаждениях, травяно-черничный зеленомошный, характерный для хвойных насаждений, более редок (23,4 %). Черничный зеленомошный тип занимает меньшую площадь (15,5 %) и приурочен к песчаным почвам вблизи берега озера. Сфагновый тип практически не представлен (2,1 %).

Табл. 1. Типы растительных сообществ и их площади в пределах территории парка

Table 1. Types of plant communities and their areas within the Savin Navolok Park

Типы растительных сообществ	Формула древостоя	Площадь, га	Доля от общей площади, %
Березняки травяные	54Б18Е15Ос12С1Ив	17,14	31,8
Ельники травяно-черничные зеленомошные	74Е 11Б 11Ос 4Б	10,18	18,9
Сосняки черничные зеленомошные	74Е 11Б 11Ос 4Б	5,88	10,9
Смешанные леса (ель, сосна, осина, береза) травяные	–	4,55	8,4
Осинники травяные	68Ос 16Ив 8Е 4Б 4Ол	3,28	6
Лиственные молодняки и кустарники (ольха серая, ива, береза, осина, черемуха) травяные	–	2,69	5
Ивняки травяные	–	2,61	4,8
Ельники черничные зеленомошные	74Е 11Б 11Ос 4Б	2,42	4,5
Сосняки травяно-черничные зеленомошные	31С 31Ос 28Е 10Б	2,08	3,9
Ельники кисличные	49Б 43Е 5Ос 3Ив	0,98	1,8
Сосняки сфагновые	–	0,83	1,5
Расчистка под ЛЭП, пустыри	–	0,6	1,1
Осинник черничный	85Ос 7Е 5Ол 3С	0,41	0,8
Ивняк сфагновый	–	0,31	0,6
Общая площадь лесов		53,96	100,0

Примечание. Породы деревьев: С – сосна, Е – ель, Б – береза, Ос – осина, Ол – ольха, Ив – ива.

В целом, растительные условия можно характеризовать как достаточно богатые по минеральному питанию, по большей части оптимальные по режиму увлажнения, что сказывается на богатстве флористического состава территории. Леса характеризуются развитым травяно-кустарничковым ярусом, представленным, наряду с обычными лесными видами (*Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea*, *Oxalis acetosella* и др.), широким набором травянистых растений. Моховой ярус, напротив, развит слабо, массовыми являются только несколько типичных таежных видов (*Dicranum scoparium*, *Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi* и др.).

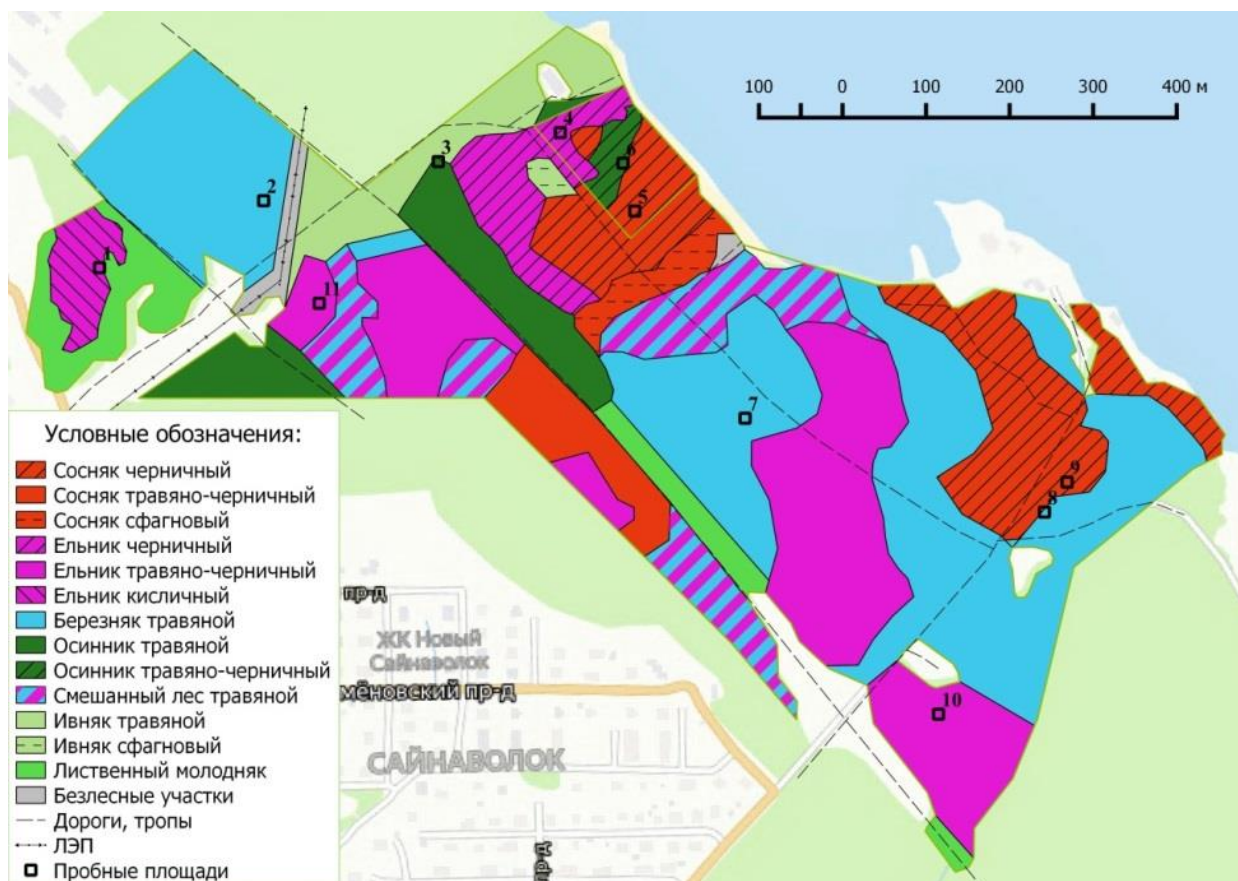


Рис. 3. Карта растительности изученного участка (М 1:10 000)

Fig. 3. Vegetation map of the studied area (M 1:10 000)

На территории парка было обнаружено 45 видов лишайников. Исследования показали, что лишенофлора Савин Наволока типична для среднетаёжных лесов северо-западной части России. Видовое разнообразие лишайников в лесных сообществах зависит от многих факторов, но прежде всего – от наличия подходящего субстрата, микроусловий (режима влажности и освещённости) и давности нарушения [Тарасова и др., 2012]. Сочетание негативных факторов, таких, как атмосферное загрязнение, рекреационная нагрузка, небольшая давность нарушения (свежие локальные низовые пожары, вырубка леса), обусловленных особенностями городской среды, оказывают отрицательное влияние на общее разнообразие лишайников. Как известно, лишайники являются крайне чувствительными к атмосферному загрязнению [Тарасова и др., 2012], поэтому на участках, расположенных на севере и северо-западе парка, граничащих со сплошной застройкой, их видовое разно-

образии невелико. В эпифитном покрове встречаются преимущественно толерантные к атмосферному загрязнению виды, а на талломах чувствительных видов образуются обширные некротические (темно-коричневые) и хлоротические (беловатые) пятна. Но на участках, удаленных от застройки, произрастают виды, высоко чувствительные к атмосферному загрязнению: *Bryoria fuscescens*, *Evernia mesomorpha*, *Leptogium saturninum*, *Loxospora elatina*, *Mycoblastus sanguinarius*, *Platismatia glauca* и др.

Один вид – *Chaenotheca brachypoda* внесен в Перечень объектов растительного и животного мира, нуждающихся в особом внимании к их природной среде и рекомендованных для бионадзора [Красная..., 2020]. Данный вид был обнаружен на коре старой рябины в смешанном осиново-еловом травяном лесу (61°45.230 с.ш., 34°27.529 в.д.). Таллом накипной, площадь – около 1 дм<sup>2</sup>, фертильный, с многочисленными плодовыми телами.

Среди лишайников парка 4 являются видами, предложенными в качестве индикаторов малонарушенных естественных лесных сообществ на Северо-Западе России [Выявление..., 2009]: уже упомянутая *Chaenotheca brachypoda*, а также *Gyalecta truncigena* (61°45.141 с.ш., 34°27.401 в. д.), *Leptogium saturninum* (61°45.245 с.ш., 34°28.219 в. д.; 61°44.999 с.ш., 34°28.087 в.д.), *Scytinium teretiusculum* (61°45.245 с. ш., 34°28.219 в.д.).

Таким образом, несмотря на влияние городской среды, на относительно небольшой площади парка произрастает 12% всей лишайной флоры ПетрГО [Tarasova et al., 2013, 2015; Tarasova и др., 2016]. Местонахождение вида, занесенного в перечень видов рекомендованных для бионадзора в Республике Карелия и обнаружение в сообществах парка видов – индикаторов малонарушенных лесов указывает на ценность исследованного участка в отношении сохранения и поддержания общего биоразнообразия.

На территории Петрозаводского городского округа отмечено 10 из 71 вида грибов, включенных в Красную книгу Республики Карелия [2020]. Из них в парке Савин Наволок выявлено 2 охраняемых вида: *Lentaria afflata* (61°44.950' с.ш., 34°28.667' в.д.) – на вершине валежного ствола диаметром около 15 см у руч. Каменного на площади ствола 20 × 20 см заросшем мхами, около 20 плодовых тел гриба. *Punctularia strigosozonata* (61°45.263' с.ш., 34°28.035' в.д.) – на усыхающем стволе осины диаметром около 30 см, на площади ствола 30 × 30 см с отстающей корой, около 20 шляпок гриба. Относится к специализированным видам, приуроченным к лесам со старыми осинами [Выявление..., 2009]. Ранее этот вид отмечался только в Кондопожском, Лахденпохском и Суоярвском районах Карелии.

В парке Савин Наволок обнаружено 40 видов мхов. Бриофлора парка остается недоисследованной, но даже имеющиеся данные позволяют судить о её высоком, для лесных местообитаний, богатстве. Напочвенный моховой покров на большей части парка разрежен, что связано с высокой ролью лиственных деревьев в древостоях и развитой травянистой растительностью. Лиственный опад создает неблагоприятные условия для развития сплошного мохового покрова, однако способствует появлению более требовательных к питанию видов, в целом увеличивая разнообразие бриофлоры. В приозерных лесах моховой покров существенно деградирует в связи с нарастающей рекреационной нагрузкой. В парке повсеместно встречаются обычные таежные виды, такие, как *Dicranum polysetum*, *D. scoparium*, *Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi*, *Rhytidiadelphus triquetrus*, *Sciuro-hypnum reflexum*. В смешанных и лиственных лесах обычны *Amblystegium serpens*, *Brachythecium rivulare*, *B. salebrosum*, *Cirriphyllum piliferum*, *Climacium dendroides*, *Plagiomnium cuspidatum*, *Sciuro-hypnum oedipodium* и др. В заболоченных лесах напочвенный покров составлен сфагновыми мхами. На стволах осины отмечены эпифиты: *Campylopusium sommerfeltii*, *Orthotrichum speciosum*, *Sanionia uncinata* и др. Один из видов – *Neckera pennata* (61°45.014' с.ш., 34°28.102' в.д.) охраняется в Республике Карелия [2020]. На

территории парка вид обнаружен как минимум на стволах 7 деревьев осины в ельнике травяно-черничном по южной границе парка. Деревья с некерой расположены группой, таким образом, все найденные экземпляры вида составляют одну небольшую локальную ценопопуляцию. Частью она попадает в пределы парка, частью выходит за его границы. На отдельных деревьях встречается от 1 до 3 пятен (куртин) мха, площадью от 0,5 до 3 дм<sup>2</sup>; общая площадь выявленных куртин мха составляет 17 дм<sup>2</sup>. Поврежденные и отмирающие растения отсутствуют.

Флора сосудистых растений представлена 257 видами из 68 семейств. Преобладают аборигенные виды – 215 (83,3 %).

Анализ таксономической структуры флоры парка Савин Наволок показал, что по числу видов преобладают семейства, типичные для лесов среднетаежной подзоны Карелии: *Asteraceae* – 29 видов, *Poaceae* – 23, *Rosaceae* – 16, *Ranunculaceae* – 14, *Scrophulariaceae* – 13, *Cyperaceae* – 9, *Fabaceae* – 8, *Orchidaceae* – 5 видов.

Среди широтных географических элементов в составе флоры преобладают бореальные виды – 125 (59,8 % от аборигенной фракции. Важной и отличительной особенностью флоры парка, повышающей её природоохранную ценность, является наличие в ее составе элементов южной тайги (виды с «южными» связями) – 41 вид (19,7 %), среди которых неморальных – 19 (9,1 %). Для сравнения, доля «южных» видов в лесах Карелии к югу от Петрозаводска (граница с Ленинградской областью), не превышает 13,3 %, из них неморальных видов – 5,8 % [Кравченко и др., 2005]. Среди травянистых неморальных видов в лесах парка можно встретить *Corydalis solida*, *Epipactis helleborine*, *Melampyrum nemorosum*, *Pulmonaria obscura*, *Stellaria holostea* и др. Из древесных видов неморальной флоры вдоль ручья Каменного произрастают такие, как *Tilia cordata*, *Ulmus glabra*, а также *Humulus lupulus*. Суммарные доли элементов широкого диапазона распространения (плюризональные, почти космополиты) – 14,8 % и видов «северной» фракции (арктические, арктоальпийские, гипоарктические и др.) – 4,4 %.

Преобладающие долготные фракции – евразийская – 79 видов (37,8 %), циркумполярная – 61 (29,2 %), европейско-сибирская – 39 (18,7 %) и европейская – 20 видов (9,6 %). В целом аборигенные виды лесных сообществ распределяются по 32 типам ареала; преобладают виды с бореальным евразийским (23,9 %), бореальным циркумполярным (18,2 %) и бореальным европейско-сибирским (12,4 %) распространением.

Анализ эколого-ценотической структуры аборигенной фракции флоры лесов показал, что основу растительных сообществ составляют массовые лесные (48,8 %) виды, среди которых много представителей крупнотравья (*Aconitum septentrionale*, *Athyrium filix-femina*, *Dryopteris carthusiana*, *D. filix-mas*, *Matteuccia struthiopteris* и др.). Высоко участие луговых (16,3 %) и прибрежных (10,0 %) видов сосудистых растений.

В составе адвентивной фракции отмечены 43 вида или 16,7 %. В основном это широко распространенные в городе виды разнообразных нарушенных местообитаний (*Chenopodium album*, *Cirsium setosum*, *Galium album* и др.). Между тем, в пределах парка отмечены единичные экземпляры распространенных в республике инвазивных видов, таких как *Aquilegia vulgaris*, *Impatiens glandulifera*, *I. parviflora*, *Rosa rugosa*.

В районе парка Савин Наволок выявлены пять охраняемых в Карелии видов сосудистых растений (рис. 4): *Galium odoratum*, *Humulus lupulus*, *Thalictrum kemense*, из них – *Calypso bulbosa* и *Cypripedium calceolus* включены также в Красную книгу Российской Федерации [2008]. Один вид – *Ulmus glabra* – внесен в Перечень объектов растительного и животного мира, нуждающихся в особом внимании к их природной среде и рекомендованных для бионадзора [Красная..., 2020].



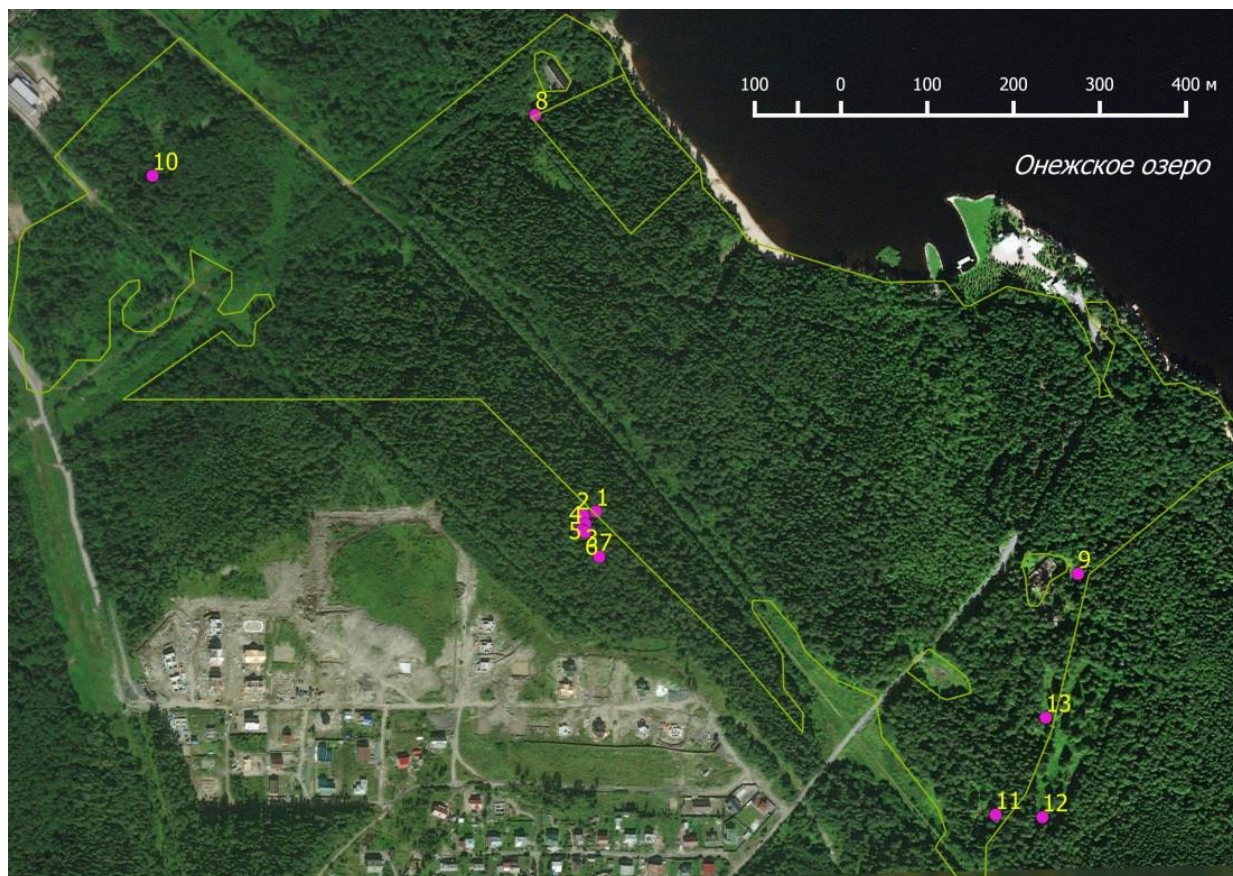


Рис. 4. Карта местонахождений охраняемых видов в парке Савин Наволок и на смежной территории (М 1:10 000)

Fig. 4. Map of protected species locations in Savin Navolok Park and in the adjacent territory

Условные обозначения. Цифрами обозначены местонахождения видов: 1 – *Cypripedium calceolus*, 2 – *Galium odoratum*, 3 – *Humulus lupulus*, 4–10 – *Neckera pennata*, 11 – *Chaenotheca brachypoda*, 12 – *Lentaria afflata*, 13 – *Punctularia strigosozonata*

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, флора лесов района парка Савин Наволок является ценным объектом разнообразия аборигенной флоры не только в границах Петрозаводского городского округа, но и пределах всего Олонецкого флористического района в целом. Здесь, на сравнительно небольшой по площади территории произрастает более  $\frac{1}{4}$  всех видов сосудистых растений известных для г. Петрозаводска, а также 40 видов мхов и 45 видов лишайников.

2. Отличительной особенностью флоры парка от смежных территорий является наличие большого количества неморальных видов, характерных для южной тайги Массива сохранившихся до настоящего времени спелых еловых лесов в пределах парка, и в целом в районе Сайнаволоок, служат резерватом популяций редких и охраняемых на региональном и федеральном уровнях видов сосудистых растений, мхов, лишайников и грибов.

3. При помощи геоинформационных технологий составлена карта растительности парка и закартировано местонахождение редких и охраняемых видов сосудистых растений, мхов, лишайников и грибов, что позволит наблюдать за состоянием их популяций в

условиях города. Всего в пределах парка Савин Наволок выявлены 8 охраняемых в Республике Карелия видов, из которых 2 – *Calypso bulbosa* и *Cypripedium calceolus* – подлежат охране на территории всей Российской Федерации.

4. По уровню биологического разнообразия, наличия редких и охраняемых видов растений и грибов, а также рекреационной значимости, лесные сообщества парка Савин Наволок можно отнести к лесам высокой природоохранной ценности (ЛВПЦ). Местонахождения редких видов в условиях города Петрозаводска и, конкретно, района Сайнаволок, нуждаются в специальной охране, что неоднократно подчеркивалось специалистами Петрозаводского государственного университета и Карельского научного центра РАН [Андреев, 1992; Буцких и др., 2000; Дьячкова, Антипина, 2000; Антипина, 2002 и др.].

5. В соответствии с вышеперечисленными результатами и наличием объективной научной информации о биологической ценности лесов парка целесообразно рассмотрение вопроса о придании территории Савин Наволок (с последующим уточнением границ) статуса особо охраняемой природной территории (ООПТ) – памятника природы или государственного ботанического заказника регионального значения «Савин Наволок».

Согласно Федеральному закону «Об особо охраняемых природных территориях» (статья 2. Категории особо охраняемых природных территорий, особенности их создания и развития)<sup>1</sup>, природные комплексы парка Савин Наволок соответствуют необходимым критериям, установленным при принятии решений о создании особо охраняемых природных территорий.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Карельского научного центра РАН (Институт биологии КарНЦ РАН, Институт леса КарНЦ РАН). Благодарим О.Н. Ежова (ФИЦКИА УрО РАН, г. Архангельск) за помощь при определении видов грибов.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the state assignment of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Biology Research Institute, KarRC RAS, Forest Research Institute, KarRC RAS). We are grateful to O.N. Ezhov (FECIAR UrB RAS, Arkhangelsk) for help in identifying of fungi species.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев К.А. Охраняемые деревья-памятники Петрозаводска и Сортавалы. Охраняемые природные территории и памятники природы Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1992. С. 100–104.
2. Антипина Г.С., Венжик Ю.В., Тойвонен И.М. Конспект флоры сосудистых растений города Петрозаводска: Учебное пособие. Петрозаводск: ПетрГУ, 2001. 110 с.
3. Антипина Г.С. Урбанофлора Карелии. Петрозаводск, 2002. 198 с.
4. Бордзынский А. Естественно-исторические заметки из путешествия по Олонецкой губернии. Журн. Министерства народного просвещения, 1867. Т. 135. № 7–9. С. 606–670.
5. Буцких О.А. (Рудковская), Кравченко А.В., Тимофеева В.В. Флора Петрозаводска: изученность, состояние, проблемы охраны. Формирование растительного покрова

<sup>1</sup> Федеральный закон «Об особо охраняемых природных территориях» (с изменениями на 31 июля 2020 года). Электронный ресурс: <http://docs.cntd.ru/document/9010833> (дата обращения: 24.10.2020).

- на урбанизированных территориях: Матер. Междунар. науч. конф. (Великий Новгород, 9–10 июня 2000 г.). Великий Новгород, 2000. С. 59–64.
6. Выявление и обследование биологически ценных лесов на Северо-Западе Европейской части России. Т. 2. Пособие по определению видов, используемых при обследовании на уровне выделов. Отв. ред. Л. Андерссон, Н.М. Алексеева, Е.С. Кузнецова. СПб., 2009. 258 с.
  7. Генеральный план г. Петрозаводска. 2007. Электронный ресурс: <http://base.garant.ru/23187900/> (дата обращения: 24.10.2020).
  8. *Гюнтер А.К.* Материалы для познания флоры Олонецкой губернии. Олонецкие губернские ведомости, 1867. № 3. С. 3–44; № 4. С. 65–67.
  9. *Гюнтер А.К.* Материалы к флоре Обонежского края. Тр. СПб об-ва естествоиспытателей, 1880. Т. 11. Вып. 2. С. 17–60.
  10. *Дьячкова Т.Ю., Антипина Г.С.* Редкие растения флоры г. Петрозаводска. Формирование растительного покрова на урбанизированных территориях: Матер. Междунар. науч. конф. (Великий Новгород, 9–10 июня 2000 г.). Великий Новгород, 2000. С. 90.
  11. *Зорина А.А., Руоколайнен А.В.* Экологическое состояние городских лесов Петрозаводского городского округа. «Живые и биокосные системы», 2015. № 14; Электронный ресурс: <http://www.jbks.ru/archive/issue-14/article-3>.
  12. *Игнатов М.С., Игнатова Е.А.* Флора мхов средней части Европейской России. М.: КМК, 2003. Т. 1. 608 с.
  13. *Игнатов М.С., Игнатова Е.А.* Флора мхов средней части Европейской России. М.: КМК, 2004. Т. 2. С. 609–944.
  14. *Коросов А.В., Зорина А.А.* Экологические приложения Quantum GIS: учебное пособие для студентов биологических специальностей. Петрозаводск: Издательство ПетрГУ, 2016. 211 с.
  15. *Кравченко А.В.* Конспект флоры Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 403 с.
  16. *Кравченко А.В., Тимофеева В.В., Рудковская О.А.* 3.1. Сосудистые растения. Природные комплексы Вепсской волости: особенности, современное состояние, охрана и использование. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 89–119.
  17. Красная книга Республики Карелия. Белгород: КОНСТАНТА, 2020. 448 с.
  18. Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). М.: КМК, 2008. 855 с.
  19. *Лантратова А.С., Ицксон Е.Е., Марковская Е.Ф., Куснак Н.В.* Сады и парки в истории Петрозаводска. Петрозаводск: Петропресс, 2003. 158 с.
  20. Методы изучения лесных сообществ. СПб: НИИХимии СПбГУ. 2002. 240 с.
  21. *Панкрушев Г.А., Журавлев А.П.* Стоянка Вигаи наволоок I. Новые памятники истории древней Карелии. М.; Л., 1966. С. 152–172.
  22. *Подгорная М.Н., Тарасова В.Н., Марковская Н.В., Марковская Е.Ф.* Ценные лесные территории Петрозаводского городского округа. Принципы экологии, 2013. № 1. С. 51–60.
  23. *Раменская М.Л.* Полевой дневник (6.5.1957–19.8.1957). Архив Петрозаводского ин-та языка, литературы и истории. Фонд 5, опись № 2, ед. хран. № 193. 1957. 90 л.
  24. *Раменская М.Л.* Полевой дневник (26.5.1958–29.9.1958, 3.5.1959–13.8.1959). Архив Петрозаводского ин-та языка, литературы и истории. Фонд 5, опись № 2, ед. хран. № 194. 1958. 88 л.
  25. *Рудковская О.А.* Особенности формирования флоры на урбанизированной территории в условиях средней тайги (на примере г. Петрозаводска, Карелия). Дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2007. 360 с.

26. Рысин Л.П. Лесные экосистемы на урбанизированных территориях. Лесные системы и урбанизация. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. С. 6–23.
27. Сукачев В.Н. Руководство к исследованию типов леса. 3-е изд. М., 1931. 328 с.
28. Тарасова В.Н., Сони́на А.В., Андросова В.И. Лишайники: физиология, экология, лишеноиндикация. Ч. 2. Учебное пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2012. 296 с.
29. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. 148 с.
30. Fagerström L. Ett bidrag kännedom om lavfloran i Terijoki socken på Karelska näset. Meddeland. Soc. Fauna Fl. Fenn, 1945. V. 20. P. 155–170.
31. Kurto A., Lampinen R., Piirainen M., Uotila P. Checklist of the vascular plants of Finland. Suomen putkilokasvien luettelo. Norrlinia, 2019. V. 34. P. 206.
32. Norrlin J.P. Flora Kareliae onegensis. Pt. I. Not. Sällsk. F. et Fl. Fenn. Förh. 1871. B. 12. Ny ser. X. 183 p.
33. Nordin A., Moberg R., Tønsberg T., Vitikainen O., Dalsätt Å., Myrdal M., Snitting D., Ekman S. Santesson's Checklist of Fennoscandian Lichen-forming and Lichenicolous Fungi. Ver. April 29, 2011. Электронный ресурс: <http://130.238.83.220/santesson/home.php> (дата обращения: 29.04.2021).
34. Tarasova V.N., Sonina A.V., Androsova V.I., Ahti T. The present lichen flora of the city of Petrozavodsk. Folia Cryptogamica Estonica, 2013. V. 50. P. 57–66.
35. Tarasova V.N., Sonina A.V., Androsova V.I., Ahti T. The lichens from the City of Petrozavodsk in the Herbarium of the Botanical Museum, University of Helsinki (H). Folia Cryptogamica Estonica, 2015. V. 52. P. 41–50.

#### REFERENCES

1. Andreev K.A. Protected trees-monuments of Petrozavodsk and Sortavala. Protected natural territories and natural monuments of Karelia. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 1992. P. 100–104 (in Russian).
2. Antipina G.S., Venzhik Yu.V., Tojvonen I.M. Konspekt flory sosudistyxh rasteniy goroda Petrozavodsk: Uchebnoe posobie. Petrozavodsk: PetrGU, 2001. 110 p. (in Russian).
3. Antipina G.S. Urbanoflora of Karelia. Petrozavodsk, 2002. 198 p. (in Russian).
4. Bordzynsky A. Natural-historical notes from a trip to the Olonets province. Journal. Ministry of Public Education, 1867. T. 135. No 7–9. P. 606–670 (in Russian).
5. Butskikh O.A. (Rudkovskaya), Kravchenko A.V., Timofeeva V.V. Flora of Petrozavodsk: study, state, problems of protection. Formation of vegetation cover in urbanized areas: Mater. international scientific. conf. (Veliky Novgorod, June 9–10, 2000). Veliky Novgorod, 2000. P. 59–64 (in Russian).
6. D'yachkova T.Yu., Antipina G.S. Rare plants of the flora of Petrozavodsk. Formation of vegetation cover in urbanized areas: Mater. international scientific. conf. (Veliky Novgorod, June 9–10, 2000). Veliky Novgorod, 2000. P. 90 (in Russian).
7. Fagerström L. Ett bidrag kännedom om lavfloran I Terijoki socken på Karelska näset. Meddeland. Soc. Fauna Fl. Fenn, 1945. V. 20. P. 155–170.
8. General plan of Petrozavodsk. 2007. Web resource: <http://base.garant.ru/23187900/>. (date of access: 24.10.2020) (in Russian).
9. Gunther A.K. Materials for cognition of the flora of the Olonets province. Olonets Provincial Gazette, 1867. No 3. P. 3–44; No 4. P. 65–67 (in Russian).
10. Gunther A.K. Materials for the flora of the Obonezh Region. Tr. St. Petersburg Society of Naturalists, 1880. V. 11. Iss. 2. P. 17–60 (in Russian).
11. Identification and survey of biologically valuable forests in the North-West of the European part of Russia. V. 2. A guide to identifying the species used in the survey at the level

- of the stand / Resp. Ed. L. Andersson, N.M. Alekseeva, E.S. Kuznetsova. Saint Petersburg, 2009. 258 p. (in Russian).
12. *Ignatov M.S., Ignatova E.A.* The moss flora of the middle part of European Russia. Moscow: KMK, 2003. T. 1. 608 p. (in Russian).
  13. *Ignatov M.S., Ignatova E.A.* The moss flora of the middle part of European Russia. Moscow: KMK, 2004. T. 2. P. 609–944 (in Russian).
  14. *Korosov A.V., Zorina A.A.* Ekologicheskie prilozheniya Quantum GIS: uchebnoe posobie dlya studentov biologicheskikh special'nostey. Petrozavodsk: Izdatel'stvo PetrGU, 2016. 211 p. (in Russian).
  15. *Kravchenko A.V.* Abstract of the flora of Karelia. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2007. 403 p. (in Russian).
  16. *Kravchenko A.V., Timofeeva V.V., Rudkovskaya O.A.* 3.1. Vascular plants. Natural complexes of the Vepsian volost: features, current state, protection and use. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2005. P. 89–119 (in Russian).
  17. *Kurtto A., Lampinen R., Piirainen M., Uotila P.* Checklist of the vascular plants of Finland. Suomen putkilokasvien luettelo. Norrlinia, 2019. V. 34. P. 206.
  18. *Lantratova A.S., Itsikson E.E., Markovskaya E.F., Kuspak N.V.* Gardens and parks in the history of Petrozavodsk. Petrozavodsk: Petropress, 2003. 158 p. (in Russian).
  19. Methods for studying forest communities. Saint Petersburg: Research Institute of Chemistry of St. Petersburg State University, 2002. 240 p. (in Russian).
  20. *Nordin A., Moberg R., Tønsberg T., Vitikainen O., Dalsätt Å., Myrdal M., Snitting D., Ekman S.* Santesson's Checklist of Fennoscandian Lichen-forming and Lichenicolous Fungi. Ver. April 29, 2011. Web resource: <http://130.238.83.220/santesson/home.php> (accessed 29.04.2021).
  21. *Norrlin J.P.* Flora Kareliae onegensis. Pt. I. Not. Sällsk. F. et Fl. Fenn. Förh., 1871. No 12. Ny ser. X. 183 p.
  22. *Pankrushev G.A., Zhuravlev A.P.* Parking lot Vigay pillow I. New monuments of the history of ancient Karelia. Moscow; Leningrad., 1966. P. 152–172. (in Russian).
  23. *Podgornaya M.N., Tarasova V.N., Markovskaya N.V., Markovskaya E.F.* Valuable forest areas of the Petrozavodsk urban district. Principles of ecology, 2013. No 1. P. 51–60.
  24. *Ramenskaya M.L.* Field diary (26.5.1958–29.9.1958, 3.5.1959–13.8.1959). Archive of the Petrozavodsk Institute of Language, Literature and History. Fund 5, inventory number 2, ed. storage No 194. 1958. 88 p. (in Russian).
  25. *Ramenskaya M.L.* Field diary (6.5.1957–19.8.1957). Archive of the Petrozavodsk Institute of Language, Literature and History. Fund 5, inventory number 2, ed. storage No 193. 1957. 90 p. (in Russian).
  26. Red Book of the Republic of Karelia. Belgorod: CONSTANT, 2020. 448 p. (in Russian).
  27. Red Book of the Russian Federation (plants and mushrooms). Moscow: KMK, 2008. 855 p. (in Russian).
  28. *Rudkovskaya O.A.* Features of the formation of flora in an urbanized area in the middle taiga (on the example of Petrozavodsk, Karelia). PhD dissertation. Petrozavodsk, 2007. 360 p. (in Russian).
  29. *Rysin L. P.* Forest ecosystems in urbanized areas. Forest systems and urbanization. Moscow: KMK Scientific Publishing Association, 2008. P. 6–23. (in Russian).
  30. *Sukachev V.N.* A guide to researching forest types. 3rd ed. Moscow, 1931. 328 p. (in Russian).
  31. *Tarasova V.N., Sonina A.V., Androsova V.I., Ahti T.* The lichens from the City of Petrozavodsk in the Herbarium of the Botanical Museum, University of Helsinki (H). Folia Cryptogamica Estonica, 2015. V. 52. P. 41–50.

32. *Tarasova V.N., Sonina A.V., Androsova V.I.* Lichens: physiology, ecology, lichen indication. Part 2. Study guide. Petrozavodsk: PetrGU, 2012. 296 p. (in Russian).
  33. *Tarasova V.N., Sonina A.V., Androsova V.I., Ahti T.* The present lichen flora of the city of Petrozavodsk. *Folia Cryptogamica Estonica*, 2013. V. 50. P. 57–66.
  34. *Tokareva O.S.* Processing and interpretation of Earth remote sensing data: a tutorial. Tomsk: TPU Publishing House, 2010. 148 p. (in Russian).
  35. *Zorina A.A., Ruokolainen A.V.* The ecological state of the urban forests of the Petrozavodsk urban district. "Living and Bioinert Systems", 2015. No 14. Web resource: <http://www.jbks.ru/archive/issue-14/article-3> (in Russian).
-

УДК: 528.946:912.43:911.5

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-375-386

С.А. Седых<sup>1</sup>, И.Н. Биличенко<sup>2</sup>

## КЛАССИФИКАЦИЯ ГОРНЫХ ГЕОСИСТЕМ ПРИМОРСКОГО ХРЕБТА (ПРИОЛЬХОНЬЕ) И ИХ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ

### АННОТАЦИЯ

По Приморскому хребту проходит западная граница Центральной экологической зоны Байкала. В физико-географическом отношении этот хребет определяет и западную границу Прибайкальской гольцово-горнотаежной и котловинной провинции Байкало-Джугджурской физико-географической области, а также ареала распространения кедрового стланика. На юго-восточном макросклоне Приморского хребта и Приольхонском плато сильно выражены эффекты «дождевой тени» и аридно-котловинного, контрасты высокогорного и подгорного эффектов. В 2015–2016 годах в этой части региона был пик пирогенного воздействия по количеству пожаров и площади их распространения. Только в центральной части хребта отмечено более 20 пожаров. На Приольхонском плато к низовым гарям добавляется усиливающееся с каждым годом антропогенное влияние.

Классификации геосистем Приморского хребта и их картографирование на базе регионально-типологического подхода – основная цель данного исследования. Основными задачами стали: анализ регионального фона, выявление основных факторов дифференциации, классификация фаций и их групп в районе исследования, картографирование геосистем на топологическом уровне (масштабы 1:50000 и 1:100 000). Для выполнения задач проводятся полевые комплексные исследования с 2012 года, сформирована база данных, включающая исходные базовые картографические данные, ДДЗ, данные пунктов описаний и наблюдений. Результатами исследования являются: определение критериев и источника данных для контуров на разных уровнях картографического представления, уточнены размеры площадных выделов. Также составлены: базовая ландшафтно-типологические карты и производные оценочные. геосистем локального уровня, в том числе карту серийности. Представлен вариант оценочного крупномасштабного картографирования на полигоне площадью 50 км<sup>2</sup> где выделено 95 площадных контуров, относящихся к 54 типам фаций, при средней площади 3,7 га. Сформирована развернутая оценочная легенда) с различными характеристиками локальных топогеосистем, включая серийность, геохимический тип и подтип фации, варианты отклонения от фоновой нормы (факторально-динамические ряды). Проанализирована сложность и многообразие локальных ситуаций, установлена принадлежность локальных геосистем с структурам региональной размерности.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Прибайкалье, горно-таежные геосистемы, картографирование, ГИС, классификация, фация.

<sup>1</sup> ФГБУН «Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН», Улан-Баторская, д. 1, 664033, Иркутск, Россия, *e-mail*: [sedykh@li.ru](mailto:sedykh@li.ru)

<sup>2</sup> ФГБУН «Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН», Улан-Баторская, д. 1, 664033, Иркутск, Россия, *e-mail*: [irinabilnik@mail.ru](mailto:irinabilnik@mail.ru)

Sergey A. Sedykh<sup>1</sup>, Irina N. Bilichenko<sup>2</sup>

## CLASSIFICATION OF MOUNTAIN GEOSYSTEMS OF THE PRIMORSKII RANGE (PRIOLKHONIE) AND THEIR MAPPING

### ABSTRACT

The western border of the Central Ecological Zone of Baikal runs along the watershed of the Primorskii range in physical and geographical terms, this ridge borders the west of the Baikal mountain-mountain taiga and basin province of the Baikal-Dzhugdzhur physical-geographical region. On the southeastern macroslope of the Primorskii ridge and the Priolkhon plateau, the effects of "rain shadow" and arid-hollow, contrasts of high-mountain and foothill effects are strongly pronounced. Since 2015 to 2016, the influence of the pyrogenic factor has significantly increased. More than 20 fires were recorded in the central part of the ridge alone. On the Priolkhon plateau, this is supplemented by an increasing anthropogenic influence every year.

The classification of the geosystems of the Primorskii range and their mapping based on the regional typological approach is the main goal of this study. The main tasks were: analysis of the regional background, identification of the main factors of differentiation, classification of facies and their groups of the study area, mapping of geosystems at the topological level (scales 1: 50,000 and 1: 100,000). To accomplish the tasks, integrated field research has been carried out since 2012, a database has been formed, including the initial basic cartographic data, remote sensing data, bases of descriptions and observations. The results of the research are: determination of criteria and data source for contours at different levels of cartographic representation, the sizes of areal sections are specified. Also compiled: basic landscape-typological maps and derived estimates. geosystems of the local level. A detailed assessment legend was formed (based on the georelational table of field descriptions and spatial data) with various characteristics of local topogeosystems, including seriality, geochemical type and subtype of facies, deviation from the background norm (factor-dynamic series). A variant of the estimated large-scale mapping is presented on a polygon with an area of 50 km<sup>2</sup>, where 95 areal contours related to 54 types of facies are identified, with an average area of 3.7 hectares. The complexity and diversity of local situations is analyzed, the affiliation of local geosystems with structures of regional dimension is established.

**KEYWORDS:** Gisbaikalia, mountain taiga geosystems, mapping, GIS, classification, facies.

### ВЕДЕНИЕ

Создание ландшафтных карт на территорию Прибайкалья ориентировано как на фундаментальную, так и природоохранную или рекреационную прикладные задачи, так как основная часть территории, прилегающей к озеру Байкал имеет природоохранный статус. В основном это горные хребты, расположенные вокруг озера, а также межгорные котловины. Горные геосистемы Прибайкалья функционируют в условиях высокой тектонической активности, значительном высотном и экспозиционном разнообразии климатических ситуаций, вертикальной и горизонтальной расчлененности рельефа при господстве крутых склонов с высокой интенсивностью современных экзогенных процессов. Среди последних преобладают мерзлотные, криогенно-склоновые (курумы и россыпи, солифлюкция) и гравитационно-склоновые (лавинные конусы, сели, обвальные и осыпные) [Атлас..., 2004].

Ландшафтная структура Прибайкалья является сложной и контрастной. Согласно физико-географическому районированию [Ланшафты..., 1977] данный регион расположен

<sup>1</sup> V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, 664033, Irkutsk, Ulan-Batorskaya st., 1, Russia, e-mail: [sedykh@li.ru](mailto:sedykh@li.ru)

<sup>2</sup> V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, 664033, Irkutsk, Ulan-Batorskaya st., 1, Russia, e-mail: [irinabilnik@mail.ru](mailto:irinabilnik@mail.ru)



в пределах Байкало-Джугджурской горнотаежной области. В основном на этой территории господствуют светлохвойные горно-таежные геосистемы, к которым добавляются гольцовые, подгольцовые, горно-лесостепные (подтаежные) и горностепные ландшафты.

Изучение геосистем ненарушенных участков, оценка их характеристик, построение прогнозов и выбор природоохранных решений требуют совершенствования методов исследования, особенно пространственного анализа и картографического представления.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ландшафтные карты отражают современное состояние ландшафтов, но при их картографировании постоянно возникают вопросы, связанные с классификацией геосистем и критериями их типизации [Загорская, 2007].

Работа была выполнена согласно геосистемному подходу сибирской географической школы [Сочава, 1978]. Картографирование геосистем направлено на создание типологических карт структуры, динамики и функционирования геосистем. Также данный подход предназначен для обработки и упорядочивания большого объема пространственной информации. Он широко используется при региональных географических исследованиях, ландшафтном и других видах тематического картографирования [Михеев, 2001].

В исследовании учитываются региональные и локальные черты геосистем горных территорий. При этом использовался регионально-типологический подход [Михеев, 1987], когда локальные геосистемы детализируются на региональном фоне.

Ключевой участок расположен на Приморском хребте, в его центральной части (от перевала Зундук на севере до Ангинско-Таловской депрессии на юге), охватывает вершины водораздела и юго-восточный макросклон, обращенный к Байкалу. Восточная часть включает Приольхонское плато до Хужир-Нугайского залива Байкала и приустьевую конуса выноса реки Сарма. По-другому эту территорию еще называют – Приольхонье. Условия формирования ландшафтов здесь значительно отличаются от окружающей территории Прибайкалья. Это один из самых сухих, с наименьшим количеством осадков, коротким вегетационным периоде, малоснежной зимой, с среднеянварскими температурами воздуха ниже – 17 °С, июля – выше 14 °С [Атлас, 2004]. Годовое количество осадков изменяется от 200-250 мм в прибрежной полосе и возрастает до 300–400 в высокогорной части.

Одна из неотектонических особенностей, которая осложняет структуру ландшафтов – наличие протяженного уступа по юго-восточному макросклону Приморского хребта (обусловленного Обручевский сбросом по западному борту Байкальской котловины) с перепадом высот до 1000 м. Сложен уступ щебнистыми делювиальными отложениями, склоны покрыты мелкодерновинно-злаковой и низкотравной остепненной растительностью [Загорская, 2007]. Ниже уступа к Байкалу простирается наклонное полого-волнистое Приольхонское плато, сложенное гнейсами, амфиболитами, кварцитами чернорудской свиты архея, покровом из средне- и верхнечетвертичных элювиальных песков, делювиальных суглинков. Основными экзогенными процессами на хребте являются физическое выветривание, нивация, криогенные процессы в гольцовом поясе гор, десерпция и линейная эрозия на горно-таежных склонах. Флювиальные процессы распространены по днищам котловин, а плоскостной смыв и эоловые процессы на Приольхонском плато [Вуркин, 1991].

Геосистемы хребта в пределах Прибайкальской гольцово-горнотаежной и котловинной провинции Байкало-Джугджурской горной области развиваются преимущественно в ограниченных и редуцированных условиях развития. Здесь преобладают светлохвойные горно-таежные геосистемы, занимающие почти 50% площади хребта.

Также для хребта характерно наличие сухих подтаежных сосновых (*Pinus sylvestris*) лесов, горных кедровых (*Pinus sibirica*), горных степей с редколесьями и редианами лиственницы (*Larix sibirica*). По своему основному ареалу распространения последние относятся к семиаридным горам Южной Сибири и засушливым плато Центральной Азии. Горно-тундровые ландшафты распространены не так широко из-за небольших высот и представлены каменистыми и мохово-лишайниковыми, реже представлены субальпийно-типные луговины. Хорошо выражен подгольцовый кустарниковый пояс с кедрово-стланиковыми (*Pinus pumila*) и ерниковыми (*Betula nana*) комплексами. Также он образует кустарниковый ярус в подгольцовых кедровых и лиственничных редколесьях. В горах к западу от Приморского хребта кедровый стланик практически не встречается.

Сочетание уникальных природных компонентов и факторов, позволяющим функционировать столь разным ландшафтам в горном окружении Байкала и делает столь ценным Приморский хребет.

Хребет имеет северо-восточное простирание, юго-восточный макросклон находится в зоне "дождевой тени". К тому же здесь имеют место аридно-котловинный, высокогорный и подгорный эффекты. Таким образом, актуальность картографического отображения объектов и явлений на хребте связана с выраженной местной спецификой. Антропогенное воздействие ограничено с 1990-х Приольхонским плато, где проводят прокладку и реконструкцию дорог, ЛЭП для региональных нужд, жилое строительство по берегам Байкала. Разработки минеральных ресурсов в горно-таежном поясе хребта прекратились до границы Центральной экологической зоны, но на западном макросклоне хребта ведется разведка россыпного золота. Было свернуто вскрытие залежей микрокварцитов и фосфатного сырья на Курминском участке в конце 1980-х годов. Добыча золота в долинах рек, впадающих в озеро Байкал закончилась в 1950-х. Пожары в 2015–16 годах отмечены во всех высотных поясах хребта. Рекреация в основном развита на прибрежных ландшафтах, которые испытывают в связи с этим значительную антропогенную нагрузку.

При тематическом картографировании геосистем хребта выделяются фации и их группы в крупном масштабе, которые далее обобщаются на более мелких масштабных уровнях до классов.

В основе базы дистанционных данных – коллекция снимков Landsat 4 MMS, 5 TM, 7 ETM, 8 OLI за 1985–2020 гг. (рис. 1). Она включает сопоставимые сцены на июль месяц с очередностью годов, комбинациями синтеза каналов снимка и границ сцен. Набор ДДЗ дополняют летние снимки многозональной съемки спутников серии Канопус-Б1-Б6, Ресурс П (со сканерным прибором Сангур-У с максимальным разрешением 2–0,7 м). 12-канальные снимки Европейского аэрокосмического агентства систем Sentinel (с разрешением 10, 20, 60 м), также регулярно обновляются на Байкальскую природную территорию в последние годы. Для детализации картографируемых ситуаций на уровне фаций и их групп использованы космоснимки сверхвысокого разрешения (КСР) с открытых ресурсов СКАНЭКС – Яндекс, Google: сцены на основе снимков QuickBird-2, GeoEye, Ikonos, RapidEye за 2012-2020 гг.

Для цифровой модели рельефа по абсолютным высотам (от 456 м до 1778 м – г. Трехголовый), моделей крутизны и поляризации склонов используются данные спутника ALOS (прибор DAICHI) и SRTM v.4.1. Данные с разрешением 30 м хорошо рекомендовали в ГИС-картографировании гор внутриконтинентальной части субконтинента Северной Азии, так как дают малое количество пробелов и ошибок в одноградусных секторах съемки при обработке в программной среде. Для построения растровых изображений и векторных карт используется ГИС-среда MapInfo Professional 15 и модуль Vertical Mapper, обладающие расширенными возможностями пространственного анализа (2-х и трехмерного). Дополнительные средства включают синтаксис картознаков и

операций с семантикой в геореляционных таблицах и легендах карт, работы с удаленными WMS-серверами и др.

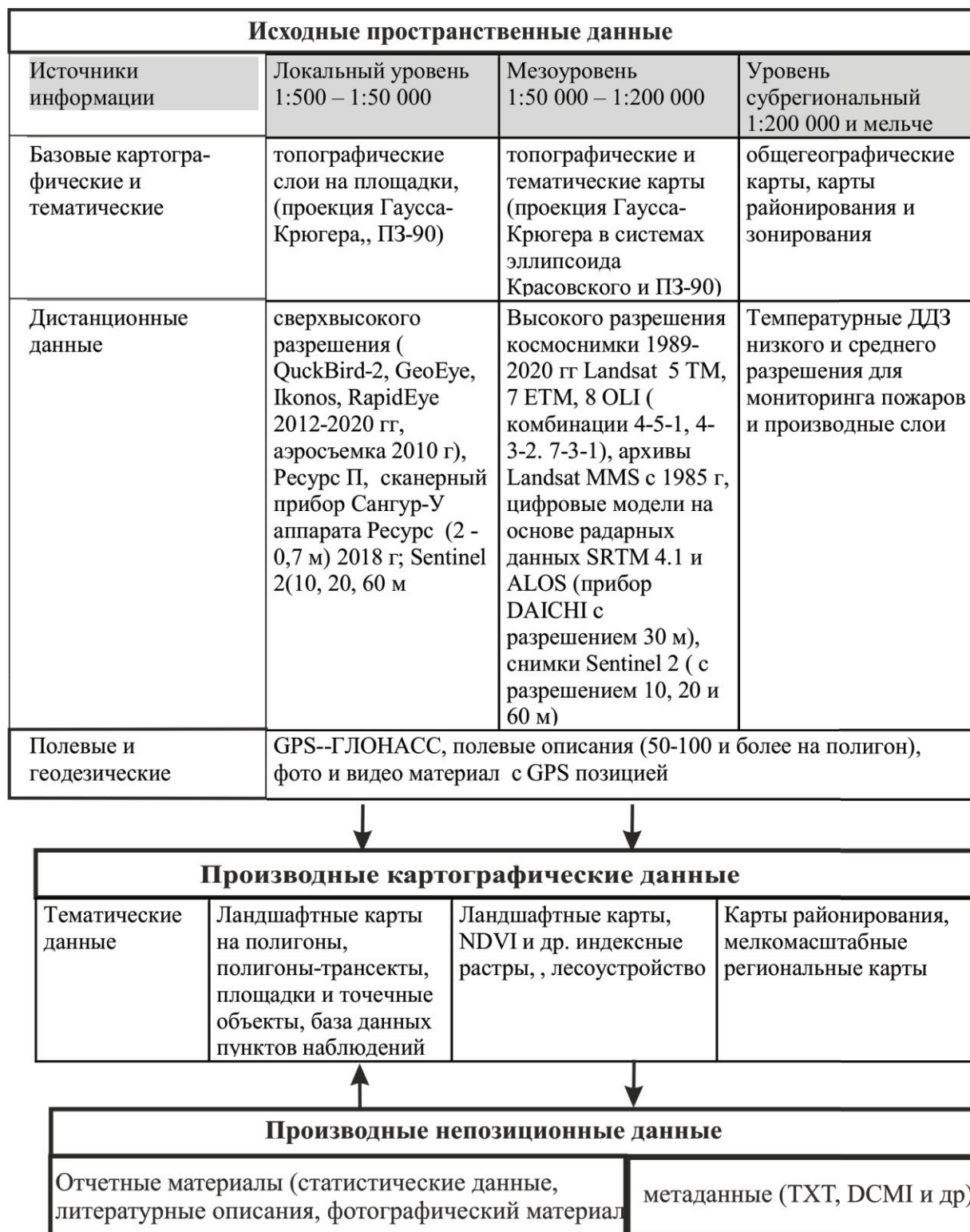


Рис. 1. Блоки базы данных на основе картографических, дистанционных и полевых источников

Fig. 1. Database blocks based on cartographic, remote and field sources

Первоначальное определение очагов возгорания (в 2015–2017 гг.) в теплое время проводилось в поле и по данным Министерства природных ресурсов и СКАНЭКС (очаги возгорания на портале <https://fires.ru/><sup>1</sup>).

Данные на каждый год уточнялись по космоснимкам, дополнялись векторными полигонами гарей на Байкальский регион в среднем масштабе, на Приморский хребет в крупном. Выделение контуров ненарушенных земель (с древесной растительностью, без нее – высокогорий, горных и луговых степей плато и котловин) и нарушенных (лесные пожары, пастбища) проводилось при помощи автоматической (ISODATA) и классификации с обучением. Использовались комбинации каналов для Landsat 5, 8 и в программе MultiSpec 3.2, с размером дифференцируемых кластеров 30 м на пиксель. По КСР проводилось уточнение и дальнейшее экспертное деление кластеров 30 м на пиксель. до 15-5 метров на пиксель, внесение дополнительных контуров в итоговом масштабе 1: 50 000. Результаты классификаций сравнивались с геоизображениями базы данных университета Мэриленда Landsat Forest-Cover Change (LFCC 2000-2019, версия 1.7) с разрешением 30 м [Sexton et al., 2015], и High-Resolution Global Maps of 21st Century Forest Cover Change [Hansen et al., 2013], глобальной карты типов растительного покрова ESA Glob Cover 2009<sup>2</sup>). Это позволяет уменьшить субъективные ошибки выделения изменений в лесном покрове (время возникновения и площадь контура) путем сопоставлении векторного слоя с растровыми изображениями LFCC для контуров до 50 м и ячеек раstra с разрешения 30 метров.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для отображения структуры и динамики геосистем гор Сибири предложена усовершенствованная методика создания тематического качественного слоя в ГИС-среде, а именно площадных контуров для отображения в крупном масштабе. В таблице 1 приведены критерии выделения контуров локальных геосистем Приморского хребта (групп фаций, фаций) в крупном масштабе. Геомеры уровня ранга класса фаций и геомов отражаются в легенде карты в виде некартируемых классификационных заголовков. Их пространственное отображение соответствует уровню проработки в среднем и мелком масштабах (площади приведены на основе оценки региональных атласов и публикаций [Сочава, 1973]). Указаны площадь отдельного выдела при картографировании, источник данных для выделения полигона. Приведена последовательность на примере от уровня геома гольцового горно-тундрового водораздельных высокогорий до локального уровня.

*Табл. 1. Критерии и позиционные источники выделения площадных контуров горных геосистем разного ранга*

*Table 1. Criteria and positional sources for identifying areal contours of mountain geosystems of different ranks*

<b>Уровень геосистем (геомер)</b>	<b>Ранг геомера</b>	<b>Площадь выдела</b>	<b>Источник данных для контуров</b>
Гольцовый горно-тундровый водоразделов (1100-2000 м)	Геом Крупнее	10 и более км <sup>2</sup>	Региональный анализ мелкомасштабных геосистем. карт и ДДЗ
Водораздельный горно-тундровые	Класс фаций	2-10 км <sup>2</sup>	Выделение водоразделов по алгоритму с проверкой (по

<sup>1</sup> <https://fires.ru/> Электронный ресурс «СКАНЭКС – мониторинг пожаров» (дата обращения 09.09. 2020).

<sup>2</sup> ESA Glob Cover Version 2.3 2009 300m resolution Land Cover Map. Электронный ресурс: [http://due.esrin.esa.int/page\\_globcover.php](http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php) (дата обращения 24.11.2019).

			векторным топокартам матрице высот) на основе ЦМР, дифференциация по ДДЗ
Уплощенных вершин кустарничково-мохово-лишайниковые с мелко-глыбовыми россыпями с группировками ерника	Группа фаций	Более 10 га, до 100-200 га	выделение контуров по классификациям и синтезу каналов Landsat 8 Landsat 8 (OLI, комбинации каналов, <u>30 м</u> ), Sentinel 2
Кустарничково-мохово-лишайниковая на петроземах и с мелко-глыбовыми россыпями	Фация	1-10 га	ЦМР, КСВ*, выделение контуров
Субгоризонтальное плакорное местоположение мохово-лишайниковое	Элементарный гомогенный выдел	Менее 1 га /	КСВ, экспертное выделение по ареалам местоположений и полевым пунктам описаний

\*КСВ – космоснимки сверхвысокого разрешения

Картографирование структуры и динамики геосистем в масштабе 1:50 000 включает: сбор данных, анализ динамики с 1980-х годов, создание базовой ландшафтно-типологической карты, производных оценочных и прогнозных карт. Подход к крупномасштабному картографированию включил актуальные позиционные данные и критерии выделения, различные характеристики локальных топогеосистем, включая серийность, геохимический подтип фации [Загорская, 2007] и отклонение от региональной нормы (серийность и факторальные ряды). Ландшафтные карты были составлены на различные участки Приморского хребта [Plyusnin at all, 2018].

На рисунке 2. представлена оценочная карта «Серийность геосистем» с легендой (рис. 3), как комбинированный вариант картографического представления. На основе ландшафтно-типологической карты проведена оценка свойств фаций и их групп. Оценка сделана по базе полевых описаний в MS Excel с пространственной привязкой, по 50 точкам комплексных описаний с 30 почвенными разрезами на участок.

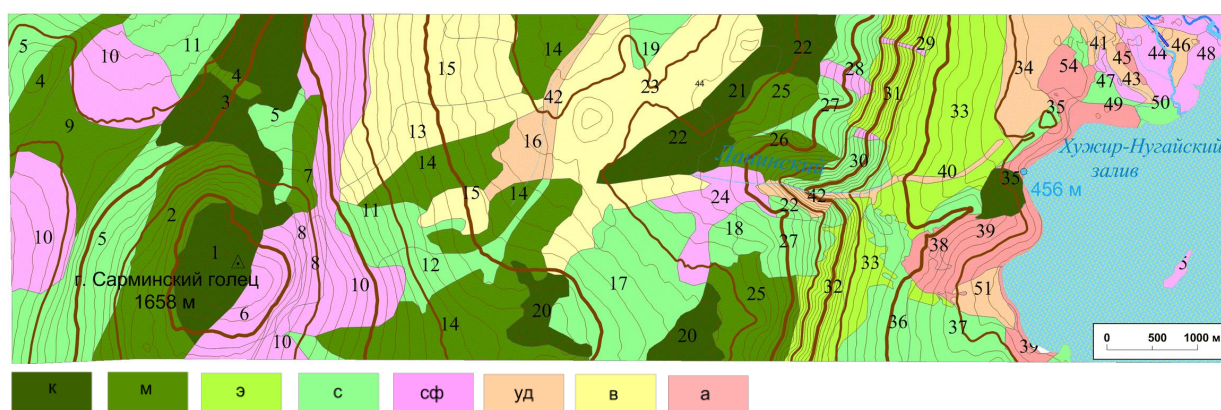


Рис. 3 Оценочная карта «Серийность геосистем» с указанием номеров локальных фаций. Серийность групп фаций: \*к – коренные, м – мнимокоренные, с – серийные, э – экстраобластные серийные и серийно-факторальные, сф – серийные факторальные, уд – устойчиво-длительно-производные, в – восстановительные серии (пирогенные), а – антропогенные нарушенные. Номер фаций: 1-54 (см в легенде рис. 3)

Fig. 3. Evaluation map "Seriality of geosystems" of a representative transect in the central part of the Primorsky Range"

Группа фаций	Тип фаций	Подтип фаций	Фация
<b>Гольцовый горно-тундровый геом (1500-1658 м). Водораздельный класс фаций</b>			
Вершинная уплощенных гор элювиальная горно-тундровая лишайниковая (Кр, Лт*)	Автономно-элювиальный	Ортоэлювиальный	1. Вершинная горно-тундровые щебнистые лишайниковые на коренных породах (к**) 2. Привершинная лишайниковая с редкими группами стланика и единичными молодяками кедра (м)
Пологохолмистых вершин горно-тундровая лишайниковая с на мелкоглыбовых россыпях и редким кедровым стлаником (Кр, Лт)	Автономно-элювиальный	Ортоэлювиальный	3. Пологово-холмистых вершин горно-тундровая лишайниковая с на мелкоглыбовых россыпях и редким кедровым стлаником (к) 4. Привершинная пологих склонов горно-тундровая лишайниковая (м)
<b>Подгольцовый кустарниковый геом (1200-1500 м). Водораздельный и склоновый классы фаций</b>			
Покатых склонов горно-тундровая и кедрово-сланиковая (Кр)	Трансэлювиальный	Покатых склонов	5 Кедрово-стланиковая с пятнами горных тундр на курумах (с)
Нивального уступа и склонов лишайниковые, чернично-шикшиевые с группировками кедрового стланика и можжевельником (Кр)	Трансэлювиальный	Уступы и крутые и склоны	6. Кедрово-стланиковая чернично-шикшиевые с можжевельником, угнетенным подростом кедра на щебнистых грубоскелетных почвах (сф)
Средней крутизны и покатых юго-восточных склонов кустарничково-лишайниковая (Лт)	Трансэлювиальный	Средней крутизны и покатые склоны	7. Кедрово-стланиковая с карликовой березой, можжевельником, рябиной чернично-голубичная на грубоскелетных горных подзолах и коллювии (м)
Покатых склонов субальпийская луговая (Гд)	Трансаккумулятивный	Покатые склоны	8. Луговая травяная пустотная с нивальными нишами и мочажинами (сф)
Покатых склонов подгольцовая кедрово-стланиковая и ерниково-березовая (Мз)	Трансэлювиальный	Покатые склоны	9. Кедрово-стланиковая голубично-брусничная с угнетенным подростом кедра на грубоскелетных горных подзолах и коридорами выветривания (м) 10. Кедрово-стланиковая с ерниковой - березкой мохово-лишайниковые на россыпях коллювия (сф)
<b>Горнотаежный лиственничный геом редуцированного развития, склоны гор ниже 1500 м. Склоновый класс фаций</b>			
Пологих склонов редколесная кедровая кустарничково-мелкотравная-лишайниковая (Лт)	Трансэлювиальный	Пологих склоны	11. Кедровая редколесная кустарничково- лишайниковая с кедром в подросте с группировками кедрового стланика на грубоскелетных горных почвах (с)
<b>Горнотаежный темнохвойный геом условий редуцированного развития, межгорных понижений класс фаций 1400-1300 м</b>			
Межгорных понижений кедрово-еловая мелкотравно-осочково-сфаговая (Гд)	Супераквальный	Полугидроморфный	12. Кедрово-еловая мелкотравно-осочково-сфаговая на торфянисто-перегнойных почвах (сф)
<b>Лиственничный геом ограниченного развития. Водораздельный и склоновый лиственнично-кедровые классы фаций (1200-600 м).</b>			
Пологих южных и восточных склонов лиственничная с кедром багульниковые (Мз)	Трансэлювиальный	Пологие склоны	13. Лиственнично-березовые с кедром багульниковые с подлеском из ольхи и рябины, с жимолостью на бурых лесных грубогумусных почвах (в)
<...>			<...>
Лугово-степные прибрежных наклонных равнин	Антропогенно преобразованный	Субгоризонтальные	54. Селитебные территории с рудеральной растительностью

\* Эколого-динамические характеристики (отклонения от региональной нормы). Фоновые основные: Мз – мезоморф-ные, Лт – литоморфные, Кр – криоморфные, Гд – гидроморфные.

\*\* Серийность групп фаций, см. подпись к рис. 2.

*Рис. 3. Легенда карты (фрагмент) «Серийность геосистем»  
Fig. 3. Map legend (fragment) to the map "Seriality of geosystems"*

Цветом и тоном качественных площадных картознаков показана серийность геосистем (ранга фаций). Изменчивость ландшафтов объясняется одним из основных положений учения о геосистемах [Сочава, 1978], когда геосистемы представлены коренными структурами и переменными состояниями. Последние рассматриваются как различные модификации коренной структуры □серийные геосистемы, восстановительные стадии. Наиболее наглядная модель анализа изменчивости □ факторально-динамические ряды фаций, показывающие характер и степень трансформации коренной плакорной геосистемы [Крауклис, 1969].

Коренной определялась фация, которая может рассматриваться как «фоновая норма» [Крауклис, 1979]. В модели факторально-динамических рядов инварианты располагаются на факторной оси соответствующего ряда (литоморфного, гидроморфного и др.), занимая позицию в зависимости от степени видоизменяющего влияния (позиция коренной, мнимокоренной и серийной фации) [Черкашин и др., 2005].

Факторальный ряд в легенде указан применительно к группе фаций, как возможный вариант отклонения, в том числе и при наличии в группе коренной фации, то есть условной «плакороподобной поверхности» как точки отсчета. Видоизменяющее влияние в таком случае затрагивает фации мнимокоренную или серийную. В таблице 1 гольцовые горно-тундровые фации водоразделов отнесены к коренным на основе карт «Ландшафты юга Восточной Сибири» [1977] и «Геосистемы» [Атлас..., 2004].

Номерами указан тип фаций соответствующий типологической классификации.

Дополнительно, фации по принципу гомогенности объединялись в подтипы и типы по критерию ландшафтно-геохимических условий формирования геосистем [Семенов, 1991]. Морфологический подход устанавливает сходство геосистемы по физиономическим признакам, а основным критерием выступает однородность признаков [Загорская, 2007]. Универсальным критерием в морфологии ландшафта считается местоположение как элемент орографического профиля, которое в ряду сопряженных местоположений определяет многие различия между фациями [Полинов, 1956; Глазковская, 1964; Исаченко, 1991], в том числе высотный уровень, ярусность рельефа, склоновую микроразнообразие.

Для определения типов местоположений использована карта крутизны склонов на основе ЦМР. Создана шкала ранжирования склонов: обрывистые (более 45°), крутые (30–45°), средней крутизны (20–30°), покатые (10–20°), пологие склоны (3–10°), уплощенные поверхности (0–3°). На практике установлено, что границы показателей крутизны склонов часто совпадают с границами групп фаций. Выделены типы местоположений: автономные (элювиальные) плоские, автономные (элювиальные) пологие, автономные (элювиальные) средней крутизны, неэлювиальные (элювиально-трансэлювиальные) пологие, трансэлювиальные плоские, трансэлювиальные пологие, трансэлювиальные средней крутизны, трансэлювиальные крутые, трансэлювиальные очень крутые, обрывистые уступы, трансэлювиально-аккумулятивные плоские, трансэлювиально-аккумулятивные супераквальные плоские, супераквальные пологие. Преобладающая экспозиция склонов – юго-восточная (для более чем половины местоположений).

Следующий этап исследования с прогнозным картографированием позволит определить варианты изменения ландшафтно-экологической ситуации на среднесрочный и долгосрочный периоды. Тематические позиционные данные о локальных геосистемах в виде векторных слоев и таблиц с семантическими значениями необходимы для проведения создания прогнозных карт с вариантами восстановления геосистем и природоохранного зонирования с сопоставлением ситуации на разные периоды, начиная с 1980-х годов. Методика и полученный опыт могут быть использованы для других участков гор субконтинента Северной Азии.

## ВЫВОДЫ

Геосистемный анализ с ГИС-картографированием геосистем центральной части Приморского хребта проведен в крупном масштабе на полигоне-трансекте площадью 50 км<sup>2</sup>. Перепад высот от триангуляционного пункта гольца Сарминский до уреза Байкала составляет 1202 метров, расстояние по прямой составляет тринадцать километров. Выделено 95 площадных контуров, относящихся к 54 фациям, при площади в интервале 1–10 га, средней – 3,7 га. Уточнены критерии выделения и размеры площадных контуров геосистем локального уровня, актуальные источники данных для построения тематических слоев. Реализовано картографирование по положению в рельефе типов местоположений и по однородности компонентов, в первую очередь – геоморфологических характеристик, растительности, почв, с учетом ландшафтно-геохимических условий. Представлены сложность и многообразие топологических ландшафтных ситуаций, что отражено в поле и легенде карты таблице, с атрибутивными данными, зависящих как от локальных вариантов изменчивости, так и от региональной специфики.

Современная ландшафтно-экологическая ситуация весьма динамична по причине пирогенного влияния. Горно-таежные и подтаежные геосистемы были частично затронуты низовыми пожарами в 2000-х годах. В таежных поясах хребта преобладают коренные и мнимокоренные склоновые лиственничные фации, ближе к подножию – склоновые подтаежные сосновые. Обе группы хорошо восстанавливаются после пожаров. Геосистемы подгольцового и горно-таежного поясов байкало-джугджурской типа имеют высокую экологическую ценность (средоформирующую и средозащитную) для бассейна Байкала и его водоразделов. Натурные исследования и картографирование показали, что площади высокогорных кедровников с лиственницей сокращаются по причинам усыхания и повреждения вредителями на полигоне (от десятков га до нескольких га), в других частях хребта – по причине частых пожаров. Подгольцовые кедрово-стланиковые фации сохраняют свою площадь при отсутствии пожаров. В противном случае – на других участках они практически не восстанавливаются. Антропогенное воздействие (застройка, пастбища, дорожные работы) распространяется по площади и интенсивности по склонам Приольхонского плато с горные луговыми степями и редколесьями, затрагивает прибрежно-береговые геосистемы.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет средств государственного задания (№ госрегистрации АААА–А19–119080700040–8, АААА–А21–121012190063–2) и при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН Китая в рамках научного проекта № 20-55-53030 ГФЕН\_а.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out at the expense of the state assignment (state registration number АААА – А19–119080700040–8, АААА–А21–121012190063–2) and with the financial support of the RFBR and GFEN of China within the framework of the scientific project No. 20-55-53030 GFEN\_a.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Иркутской области: Экологические условия развития. Ред. В.В. Воробьев, А.Н. Антипов, В.Ф. Хабаров. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН; М.: Роскартография, 2004. 90 с.
2. *Выркин В.Б.* Геоморфологические аспекты эрозии сельскохозяйственных земель котловин Прибайкалья. География и природные ресурсы. 1991. №1. С. 38–44.



3. *Глазковская М.А.* Геохимические основы типологии и методологии исследований природных ландшафтов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1964. 288 с.
4. *Загорская В.М.* Ландшафтная структура Центрального Приольхонья. География и природные ресурсы. 2004. №4. С. 58–68.
5. *Исаченко А.Г.* Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высшая школа, 1991. 366 с.
6. *Крауклис А.А.* Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск: Наука, 1979. 232 с.
7. *Крауклис А.А.* Факторально-динамические ряды таежных геосистем и принципы их построения. Докл. Ин-та географии Сибири и Дальнего Востока. 1969. Вып. 22. С. 15–25.
8. Ландшафты юга Восточной Сибири. Карта. Масштаб 1:1 500 000. В.С. Михеев, В.А. Ряшин. М.: ГУГК, 1977. 4 л.
9. *Михеев В.С.* Ландшафтно-географическое обеспечение комплексных проблем Сибири. Новосибирск: Наука, 1987. 207 с.
10. *Михеев В.С.* Ландшафтный синтез географических знаний. Новосибирск: Наука, 2001. 216 с.
11. *Полынов Б.Б.* Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 751 с.
12. *Семенов Ю.М.* Ландшафтно-геохимический синтез и организация геосистем. Новосибирск: Наука, 1991.
13. *Сочава В.Б.* Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 317 с.
14. *Черкашин А.К., Коновалова Т.И., Бессолицына Е.П. и др.* Ландшафтно-интерпретационное картографирование. Новосибирск: Наука, 2005. 424 с.
15. *Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R. et al.* High-Resolution global maps of 21st Century forest cover change. *Science*, 2013. V. 342. P. 850–853.
16. *Plyusnin V.M., Bilichenko I. N. and Sedykh S. A.* Spatio-temporal Organization of Mountain Taiga Geosystems of the Baikal Natural Territory *Geography and Natural Resources*, 2018, V. 39. No 2. P. 130–139
17. *Sexton J.O., Noojipady P., Song X.-P., Anand A., McMahon S., Huang C., Feng M., Channan S., Townshend J.R.* A model for the propagation of uncertainty from continuous estimates of tree cover to categorical forest cover and change. *Remote Sensing of Environment*, 2015. V. 156. P. 418–425.

## REFERENCES

1. Atlas of the Irkutsk region: Environmental conditions for development. Ed. V.V. Vorobiev, A.N. Antipov, V.F. Khabarov. Irkutsk: Publishing house of the Institute of Geography SB RAS; Moscow: Roskartografiya, 2004. 90 p. (in Russian).
2. *Vyrkin V.B.* Geomorphological aspects of erosion of agricultural lands in the depressions of the Baikal region. *Geography and natural resources*, 1991. No 1. P. 38–44 (in Russian).
3. Glazkovskaya M.A. Geochemical foundations of typology and methodology for the study of natural landscapes. Moscow: Izd-vo Moscow University, 1964. 288 p.
4. *Zagorskaya V.M.* Landscape structure of the Central Olkhon region. *Geography and natural resources*, 2004. No 4. P. 58–68 (in Russian).
5. Isachenko A.G. Landscape studies and physical-geographical zoning. Moscow: Higher School, 1991. 366 p. (in Russian).
6. *Krauklis A.A.* Problems of Experimental Landscape Science. Novosibirsk: Science, 1979. 232 p. (in Russian).
7. *Krauklis A.A.* Factor-dynamic series of taiga geosystems and principles of their

- construction. Dokl. Institute of Geography of Siberia and the Far East. 1969. Issue. 22. P. 15–25 (in Russian).
8. Landscapes of the south of Eastern Siberia. Map. Scale 1: 1 500 000. Mikheev V.S., Ryashin V.A. Moscow: GUGK, 1977 (in Russian).
  9. *Mikheev V.S.* Landscape-geographical support of complex problems of Siberia. Novosibirsk: Nauka, 1987. 207 p. (in Russian).
  10. *Mikheev V.S.* Landscape synthesis of geographical knowledge. Novosibirsk: Nauka, 2001. 216 p. (in Russian).
  11. *Polynov B.B.* Selected Works. Moscow: Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1956. 751 p. (in Russian).
  12. *Semenov Yu.M.* Landscape-geochemical synthesis and organization of geosystems. Novosibirsk: Science, 1991. (in Russian).
  13. *Sochava V.B.* Introduction to the theory of geosystems. Novosibirsk: Nauka, 1978. 317 p. (in Russian).
  14. *Cherkashin AK, Konovalova TI, Bessolitsyna EP et al.* Landscape interpretation mapping. Novosibirsk: Nauka, 2005. 424 p.
  15. *Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R. et al.* High-Resolution global maps of 21st Century forest cover change. *Science*, 2013. V. 342. P. 850–853 (in Russian).
  16. *Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R. et al.* High-Resolution global maps of 21<sup>st</sup> Century forest cover change. *Science*, 2013. V. 342. P. 850–853.
  17. *Plyusnin V. M., Bilichenko I. N. and Sedykh S. A.* Spatio-temporal Organization of Mountain Taiga Geosystems of the Baikal Natural Territory *Geography and Natural Resources*, 2018, Vol. 39, No. 2, P. 130–139.
  18. *Sexton J.O., Noojipady P., Song X.-P., Anand A., McMahon S., Huang C., Feng M., Channan S., Townshend J.R.* A model for the propagation of uncertainty from continuous estimates of tree cover to categorical forest cover and change. *Remote Sensing of Environment*, 2015. V. 156. P. 418–425.
-

УДК: 912, 911.53, 908

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-387-408

**О.И. Маркова<sup>1</sup>**

## **ПРИНЦИПЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ДАННЫХ ОБ ЭКОЛОГИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ ПРИРОДНО-ИСТОРИЧЕСКИХ ПАРКОВ МЕГАПОЛИСОВ В АТЛАСНУЮ ИНФОРМАЦИОННУЮ СИСТЕМУ (НА ПРИМЕРЕ ПАРКА «МОСКВОРЕЦКИЙ»)**

### **АННОТАЦИЯ**

В рамках настоящих исследований осуществлена задача разработки принципов создания атласной информационной системы (АИС) для оценки экологического состояния особо охраняемых природных территорий Московского мегаполиса. Исследования проведены на примере парка «Москворецкий», самого большого и сложного по структуре природно-исторического парка Москвы, расположенного в Северо-Западном и Западном административных округах столицы. Такие парки имеют природоохранное, историко-культурное, просветительское и рекреационное значение как особо ценные для города природные комплексы и памятники отечественной истории и культуры.

Разработана общая схема организации данных в атласной информационной системе об ООПТ Москвы и конкретно о Москворецком природно-историческом парке. Все разнообразные данные иерархически связаны между собой. Для получения концентрированной информации использованы и взаимосвязаны данные разнообразных источников.

Рассмотрена ландшафтно-экологическая структура Москворецкого парка. Выявлены историко-географические процессы, сформировавшие облик культурных ландшафтов природно-исторического парка – урбанизация, гидротехнические преобразования, строительство спортивных сооружений, благоустройство.

Составлена карта Москворецкого парка со всеми ООПТ, входящими в его структуру, другими примечательными объектами, инфраструктурой, озеленёнными территориями. Предполагается роль этой карты как основы для дальнейшего создания атласной информационной системы и наполнения её разнообразными данными.

Составлена таблица по отдельным ООПТ, входящим в структуру Москворецкого парка, приведены их типы и основные характеристики, особенности природного и культурного наследия, культурного ландшафта, экологические проблемы, конфликты природопользования. Основной экологической проблемой парка является расширение городского строительства, отчуждающее территории из области природоохранного природопользования.

Перспективы создания АИС связаны с мониторингом и решением экологических и культурологических проблем части мегаполиса, входящей в состав природно-исторического парка.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** атласная информационная система, данные, экология, мегаполис, природно-исторический парк.

---

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Научно-исследовательская лаборатория комплексного картографирования, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: [solntsevaolga1401@gmail.com](mailto:solntsevaolga1401@gmail.com)

**Olga I. Markova<sup>1</sup>**

**PRINCIPLES OF INCORPORATING DATA  
ABOUT THE ENVIRONMENTAL CONDITION OF NATURAL-HISTORICAL  
PARKS OF METROPOLISES IN THE ATLAS INFORMATION SYSTEM  
(ON THE EXAMPLE OF THE MOSKVORETSKY PARK)**

**ABSTRACT**

Within the framework of this research, the task of developing the principles of creating an atlas information system (AIS) for assessing the ecological state of specially protected natural areas of the Moscow metropolis was carried out. The research was carried out on the example of the Moskvoretsky park, the largest and most integrated natural-historical park in Moscow, located in the North-West and West administrative districts of the capital. Such parks have environmental, historical, cultural, educational and recreational significance as natural complexes and monuments of national history and culture that are especially valuable for the city.

A general scheme for organizing data in the atlas information system about the protected areas of Moscow and specifically about the Moskvoretsky natural-historical park has been developed. All the various data are hierarchically linked. To obtain concentrated information, data from various sources were used and interconnected.

The landscape and ecological structure of the Moskvoretsky park is considered. The historical and geographical processes that formed the appearance of the cultural landscapes of the natural-historical park – urbanization, hydrotechnical transformations, the construction of sports facilities, landscaping – are revealed.

A map of the Moskvoretsky park with all the protected areas that are part of its structure, other noteworthy objects, infrastructure, green areas was compiled. The role of this map is assumed as the basis for the further creation of an atlas information system and filling it with various data.

A table for individual protected areas that are part of the structure of the Moskvoretsky park, their types and main characteristics, features of natural and cultural heritage, cultural landscape, environmental problems, and conflicts of nature use are given has been compiled. The main environmental problem of the park is the expansion of urban construction, alienating the territory from the field of nature conservation.

Prospects for the creation of AIS are associated with monitoring and solving environmental and cultural problems of a part of the metropolis that is part of the natural-historical park.

**KEYWORDS:** atlas information system, data, ecology, megapolis, natural-historical park.

**ВВЕДЕНИЕ**

Современные способы создания и хранения картографической и сопутствующей информации связаны с перспективой создания атласных информационных систем (АИС). Они представляют собой компьютеризированные геоинформационные системы, посвящённые конкретной территории или теме в сочетании с повествовательной частью и другими видами информации, где доминирующую роль играют карты. Эти системы – синтез достижений в области геоинформационных технологий, картографии и мультимедиа. Они являются электронными версиями бумажных атласов с расширенными

---

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Research Laboratory of the Integrated Mapping, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail*: [solntsevaolga1401@gmail.com](mailto:solntsevaolga1401@gmail.com)

функциональными возможностями. Они позволяют визуализировать и анализировать геопространственные данные, в т.ч. разрабатывать возможные варианты развития комплексных систем «природа–общество–хозяйство» [Яблоков, Тикунов, 2016].

Для поддержания экологического равновесия любых, особенно урбанизированных, регионов важную роль играет система природных территорий, называемая экологическим каркасом [Чижова, Прыгунова, 2004]. Особо охраняемые природные территории (ООПТ) являются его основой; в наибольшей степени это относится к территориям мегаполисов. Экологический каркас городов – совокупность незастроенных и незапечатанных (не покрытых искусственными материалами) территорий с растительным покровом разного характера, предоставляющих экосистемные услуги и связанных с понятием зелёной инфраструктуры [Климанова и др., 2018]. Последняя определяется Европейской комиссией по охране окружающей среды как стратегически спланированная сеть, состоящая из естественных и полустественных природных комплексов в совокупности со всеми особенностями окружающей среды, внутри которой может быть реализован широкий спектр экосистемных услуг, при этом она характеризуется мультифункциональностью, связностью и иерархичностью [European..., 2010; Green..., 2013]. Объекты зелёной инфраструктуры смягчают последствия изменения климата, снижают эффект «острова тепла», регулируют водный сток, сохраняют биоразнообразие, способствуют обеспечению продовольственной безопасности, формируют благоприятные условия для рекреации, способствуют созданию культурной идентичности [Baro et al., 2014; Millenium..., 2005]. Понятие «городская зелёная инфраструктура» шире понятия экологического каркаса по объёму включаемых элементов. Концепция зелёной инфраструктуры учитывает при планировании все незастроенные территории, создаёт иерархичную систему разнородных элементов каркаса, не формирует специальных режимов и конфликтов природопользования [Климанова и др., 2018; 2020].

Пространства мегаполиса часто сосредотачивают конфликты природопользования, важными участниками которых являются ООПТ, выполняющие функции экосистемного потенциала, социальные и экономические функции. Для рационального управления городскими ООПТ с помощью геоинформационных технологий возможно проводить оценку их экосистемного потенциала [Крюков, Голубева, 2020].

Экологический каркас важен для обеспечения условий жизни населения и миграции биотических элементов по экологическим коридорам. Новые исследовательские методы связаны с ГИС-технологиями и практиками «добычи данных» (Data mining) [Климанова и др., 2020]. Особо важны при этом атласные информационные системы, концентрирующие большое количество данных и метаданных (т.е. информации о другой информации, дополнительных данных о признаках и свойствах, характеризующих сущности, позволяющих автоматически искать и управлять ими в больших информационных потоках, субканальной информации об используемых данных [Воройский, 2001]).

Создание АИС, в т.ч. для отдельных ООПТ, пока ещё нетипично для России; существуют ГИС некоторых заповедников и национальных парков, однако проблемой является отсутствие единообразия в структуре данных и метаданных. Наиболее близки по своей концепции к АИС ВебГИС заповедников Таймырский, Кроноцкий и Белогорье – ориентированы на конечного пользователя, представляют результаты в удобной и понятной форме, используют средства мультимедиа в совокупности с картами. Тематические сюжеты отражаются на различных территориальных уровнях, системы имеют черты электронных атласов и простейший ГИС-функционал [Яблоков, Тикунов, 2016].

В рамках настоящих исследований стояла задача разработки принципов создания атласной информационной системы одной из ООПТ Москвы как главного мегаполиса России с острыми экологическими проблемами и наиболее динамичными изменениями городских территорий. Исследования проведены на примере парка «Москворецкий», самого большого природно-исторического парка Москвы, расположенного в Северо-Западном и Западном административных округах столицы.

Природно-исторические парки являются категорией особо охраняемых природных территорий, выделяемых на территории мегаполисов и имеющих природоохранное, историко-культурное, просветительское и рекреационное значение как особо ценные для города природные комплексы и памятники отечественной истории и культуры (в соответствии с Законом г. Москвы от 26 сентября 2001 г.). Они образуются на природных территориях, включающих памятники истории и культуры (садово-паркового искусства). В природно-исторических парках есть объекты как природного, так и культурного наследия, их природно-культурный комплекс формировался в течение длительного периода, а в настоящее время существуют определённые экологические проблемы.

Природно-исторический парк «Москворецкий» интересен для проектирования АИС:

- он является самым большим природно-историческим парком Москвы, состоит из ряда различных парков (36,6 км<sup>2</sup>, 3,5 % площади города, 23 % площади московских ООПТ);
- имеет вытянутую вдоль Москвы-реки (от МКАД до Филёвской поймы), форму, природные комплексы которой разрушаются легче, чем компактные;
- его культурно-исторические объекты и культурные ландшафты имеют разную степень сохранности и были значительно изменены в разные исторические периоды;
- в парке распространены разнообразные природные комплексы;
- на территории парка обитает множество охраняемых животных и растений (122 вида из Красной книги города), его биотический состав весьма богат;
- парк имеет значительные экологические проблемы (городская застройка, неправильное благоустройство, уничтожение растительности, сокращение естественных убежищ, путей миграции и доступов к воде для животных) [Маркова, 2020].

Прежде всего, АИС должна сконцентрировать разные типы данных и метаданных, относящихся к состоянию природной среды и культурных ландшафтов парка.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

На уровне города мы имеем Москворецкий парк в целом, который характеризуется определённым набором данных, позволяющим сравнивать его с другими ООПТ.

Парк состоит из ряда самостоятельных частей, территориально связанных между собой. Это следующий масштабный уровень оценки экологического состояния.

На территории парка находится ряд памятников природы разного масштабного уровня, разного размера и в различном экологическом состоянии. Некоторые из этих памятников природы известны давно, а другие образованы совсем недавно как официальные объекты. Это ещё более подробный масштабный уровень. Нередко памятник природы является и памятником культурного наследия, и даже не может существовать без определённого вида человеческой деятельности. В таком случае можно говорить о природно-культурном наследии и культурном ландшафте.

Культурные ландшафты Москворецкого парка в процессе истории претерпели ряд существенных изменений. Прежде всего они связаны с зарегулированием стока и изменением русла и берегов Москвы-реки, появлением новых гидрографических объектов, расширением территории города, стиранием с лица Земли сельских населённых пунктов, внедрением многоквартирной застройки.

Упорядочение этих разнообразных данных и метаданных и создание их стройной системы и входит в процесс разработки АИС. Основными данными в ней являются карты, схемы и космические снимки (ортофотопланы), а метаданными – тексты, цифровые данные, таблицы, фотографии и описания объектов, картины художников, рисунки, диаграммы, модели, дополняющие картографическую информацию. При традиционном создании бумажных атласов таких данных было весьма мало, и занимали они в основном свободное место, оставшееся от компоновки карт и легенд, и лишь изредка – свободные страницы. Безбумажные технологии позволяют подключать и хранить такие данные в гораздо большем количестве, соответственно, система становится весьма информативной.

На рис. 1 представлена схема организации данных в атласной информационной системе об ООПТ Москвы и конкретно о Москворецком природно-историческом парке. Все данные иерархически связаны между собой. Такие объекты, как памятники природы, как правило, являются частями определённой ООПТ. В то же время могут существовать и самостоятельные памятники природы.

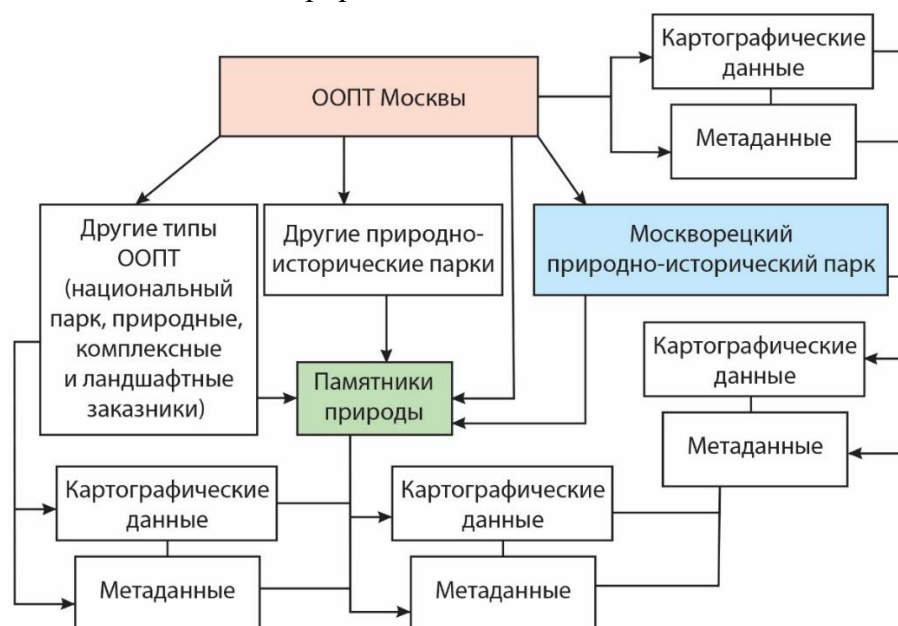


Рис. 1. Схема включения данных и метаданных о Москворецком природно-историческом парке в систему ООПТ Москвы в атласную информационную систему

Fig. 1. Scheme of data and metadata inclusion about the Moskoretsky natural-historical park in the system of protected areas of Moscow to the atlas information system

Парк «Москворецкий» выделяется среди ООПТ Москвы наибольшим ландшафтным, биологическим и историко-культурным разнообразием. Структура парка сложная и разветвлённая. В его составе – различные ландшафтно-экологические участки, рассматриваемые как самостоятельные ООПТ, с разным рельефом и растительностью, отделённые друг от друга реками, заливами, каналами и улицами. Внутри этих ООПТ могут выделяться и другие ООПТ различного статуса, а также памятники культурного наследия регионального и даже федерального значения.

1. Строгинская (Троице-Лыковская) пойма Москвы-реки площадью 13,2 тыс. м<sup>2</sup> отделена излучиной Москвы-реки от острова Серебряный бор. Частями поймы являются также Строгинский мыс, Строгинский и Щукинский полуострова (последний – памятник природы). Пойма получила название от села Строгино (Острогино, первое упоминание – 1570-е гг., в черте города 1960 г., снос всех построек к началу 1980-х гг.). Второе её наименование связано с селом Троице-Лыково, памятником старинного подмосковного культурного ландшафта с двумя храмами – Троицы Живоначальной и Успения Богородицы, единственным селом, снос которого в пределах Москвы не предполагается. На пойме находится Большой Строгинский затон или залив с песчаным дном – самый широкий водоём в черте Москвы (около 1,9 км с запада на восток и около 1,25 км с севера на юг; средняя глубина – около 5 м, перепады глубин и ямы до 15–30 м), возникший после строительства Канала имени Москвы в 1937 г. В настоящее время это излюбленное место рекреации, парусного и воднолыжного спорта. Здесь встречаются 27 видов рыб (окунь, лещ, щука и др.). Официально развитие Строгинской поймы как зелёной зоны признано в 2015 г. На ней развиты заливные и суходольные луга, разнообразные болота, пойменные ивняки, берёзовые и сосновые леса. Флора насчитывает 300 видов, в т.ч. охраняемых – купальница, ландыш, ирис жёлтый, пальчатокоренник и др., 39 видов лишайников. Здесь обитают лисы, зайцы, горностаи, ястребы-тетеревятники, камышовки, ласточки и др. На Щукинском полуострове встречаются канюки, соколы, болотные совы [Северо-Западный..., 1997; Москва..., 1997].

2. Тушинский берег занимает узкую полосу на северо-востоке парка до Строгинского моста, в северной части – на первой надпойменной террасе, далее – на пойме. Он примыкает к Тушинскому аэрополю, в данный момент застроенному, в т.ч. частично – на территории природно-исторического парка. Тушинский берег включает устья двух речек – Сходни и Химки, запруженной в результате постройки Химкинского вдхр. в 1936 г. Водоохранная зона р. Сходни на всём протяжении была утверждена Правительством Москвы как государственный природный заказник в 2010 г.

3. Щукинский берег тянется от Строгинского моста до территории стадиона «Октябрь». В его составе парк, перелески, луговины и пляжи на узкой пойме, на склоне и под склоном Ходынской и Мнёвниковской террас и залесённый Соболев овраг. Дендрофлора Щукинского берега испытала сильную антропогенную трансформацию, но травянистые растения представлены местными видами (всего 77 %). Из охраняемых видов обнаружена гвоздика Фишера. Наиболее интересны Соболев овраг, остепнённые склоны, сосновый парк и самосевные сосны между парком рекой на Мнёвниковской террасе, лес у берега Москвы-реки, парк у Строгинского моста. Многие участки почти не посещаются людьми и благоприятны для сохранения флоры и фауны [Насимович и др., 2011]. В 2010 г. природным заказником признан городской сосновый лес на Живописной улице.

4. Серебряноборское лесничество (Серебряноборское опытное лесничество Института лесоведения РАН) – лесной массив, ограниченный районом Крылатское, Серебряноборской излучиной и МКАД [Гладков, Киселёва, 2008]. В конце XIX в. обширный сосновый массив на правом берегу Москвы-реки (от сёл Троице-Лыкова и Крылатское до Раздор, Ромашкова и Немчиновки) назывался Серебряным бором. Затем название перешло на сосняк, расположенный на левом берегу, а правобережный сосняк приобрёл название Серебряноборского лесничества. Его площадь сократилась из-за активной застройки с 2826 га (конец 1960-х – начало 1970-х гг.) до 533 га в городской черте (в т.ч. Рублёвский и Кунцевский леса). Сохранилось значительное количество участков леса, где возраст древостоя превышает 100 лет, а возраст старых сосняков – более 200 лет. Кроме сосны, в довольно большом количестве



произрастают липа, берёза, клён, рябина. Старовозрастные липняки имеют искусственное происхождение, т.к. на рубеже XIX–XX вв. Лесной департамент старался возобновлять липовые древостои, активно вырубавшиеся для хозяйственных нужд [Татарников, Львов, 2019]. Некоторые фрагменты лесов признаны памятниками природы и перспективными заповедными участками. Само лесничество в целом является памятником природы регионального значения.

5. Серебряный Бор – памятник природы в районе Хорошёво-Мнёвники, расположенный на Серебряноборском острове, образовавшемся в результате спрямления в 1937 г. излучины Москвы-реки (Хорошёвское спрямление). Второе, более раннее название – *Хорошёвский парк* или *бор* по наименованию бывшего села Хорошёво (район Хорошёво-Мнёвники). Площадь памятника природы 203,3 га (по последнему Постановлению Правительства Москвы 2020 г., в результате которого было исключено 0,23 га и включено 0,74 га). Лесной массив известен с XVII в. (название «Серебряный овраг» в межевой грамоте). В начале XX в. рядом с ним возник дачный посёлок Серебряный Бор, а его название затем перешло и на лесной массив [Агеева и др., 2003]. В настоящее время статус памятника природы имеют 2/3 территории острова с природными объектами повышенной природоохранной, познавательной и историко-культурной значимости для города.

6. Ландшафтный парк «Крылатские холмы» – природный заказник площадью 175 га на правом берегу Москвы-реки в северо-западной части Теплостанской возвышенности. В парковую зону входят овражно-балочные системы Каменная Клетва, Каменные Заразы и Татаровский овраг. Парк включает в себя участки искусственного рельефа на месте старых каменоломен и насыпные горнолыжные склоны. Нигде на территории Москвы нет столь сложного, разнообразного и живописного рельефа. Название заказника произошло от села Крылатское (Крылецкое), которое ещё в 1417 г. было упомянуто в духовной грамоте князя Василия Дмитриевича. Парк – убежище для многих, в т.ч. охраняемых, растений и животных, живописные ландшафты, а также множество памятников культуры и археологии. Главным из них является храм Рождества Пресвятой Богородицы, построенный в конце XIX в. под руководством архитекторов Р.Т. Водо и А.Н. Стратилатова на месте известного ещё в XVI в. деревянного храма. На территории парка выявлено более 20 значимых природных объектов геологического, гидрологического, ботанического и зоологического характера, размещаются несколько официальных памятников природы.

7. Крылатская пойма представляет собой участок поймы Москвы-реки, в прошлом называвшийся также Татаровской поймой (в северной её части находилась деревня Татарово). Крылатская пойма в отличие от других ландшафтных комплексов парка в наибольшей степени занята именно пойменным рельефом [Лихачёва, 1997]. Низкая пойма Москвы-реки имеет относительную высоту 1–2 м, абсолютную 121 м, высокая – относительную высоту до 6–8 м, абсолютную 125 м. До поднятия уровня Москвы-реки масштабным гидротехническим строительством в конце 1930-х гг. [Насимович, 1997], в пойме находились карьеры по добыче песка. Впоследствии карьеры были затоплены водой и образовались искусственные озёра. В настоящее время значительная часть поймы занята Гребным каналом, построенным в 1973 г. при подготовке чемпионата Европы по академической гребле [Гейдор, Казусь, 2014]. Для канала протяжённостью 2,3 км и шириной 125 м было проложено искусственное русло (основное и возвратное) глубиной 3,5 м. Изначально в пойме предполагалось строительство только спортивных объектов, однако в 2005 г. там был построен элитный коттеджный посёлок «Остров фантазий».

8. Карамышевский берег, входящий в территорию Москворецкого парка, протягивается от устья канала Хорошёвское спрямление до Карамышевского моста,

включая Карамышевское спрямление (длина приречной полосы около 5 км и ширина 150 м). Исторически территория связана с селом Хорошёво (1572–1960) и деревней Карамышево (1646–1937). Берег протянулся вдоль расширенного после постройки в 1937 г. Карамышевского гидроузла русла Москвы-реки, называемого в народе Карамышевским водохранилищем. Берег в основном занимает крутой склон 3-й (Ходынской) и частично 2-й надпойменных террас, антропогенно трансформированных. Растительность разнообразная – лесная, луговая и болотная с фрагментами бывших садов и огородов. На Карамышевском берегу исходят несколько родников, признанных памятниками природы (ниже Троицкой церкви и ниже Карамышевского моста) [Северо-Западный..., 1997; Аверченков, Насимович, 2011; Воронов, 2013].

9. Мнёвниковская пойма – территория, ограниченная Мнёвниковской (Карамышевской) излучиной р. Москвы и каналом Карамышевское спрямление площадью 353,7 га. Территория была превращена в остров в 1937 г. при строительстве канала, который входит в состав Карамышевской ГЭС. В прошлом здесь находились деревни Мнёвники (1499–1960-е гг.), Карамышево (1646–1937) и Терехово (1645–2020). Последняя была разрушена в связи с планируемым расширением городского строительства. В геоморфологическом отношении не вся эта местность является поймой, здесь есть значительные фрагменты природной первой и второй надпойменных террас; кроме того, в связи с прекращением разливов высокая пойма приобрела свойства надпойменных террас. Здесь расположены последние москворецкие старичные озёра на территории Москвы. В пойме находятся ценные природные объекты: естественные русло и левый берег Москвы-реки с геологическими объектами, старичные озёра и болота, ценные старые деревья, редкие растения и животные (14 видов растений и 88 – животных из Красной Книги Москвы, коростель – из Красной Книги МСОП). В Мнёвниковском луговом и водно-болотном комплексе (проектируемый заповедный участок) водится 26 видов редких и исчезающих позвоночных, что занимает 1-е место в Москворецком парке и 4-е – среди проектируемых ООПТ Москвы. Пойма – место остановки на пролётном пути 60 северных видов птиц, в Москве больше таких территорий нет [Северо-Западный..., 1997; Глазунова, 1999; Насимович, 2011; Бобров, 2014].

10. Фили-Кунцевский лесопарк занимает юго-восточную часть Москворецкого парка; с севера он выходит к Мнёвниковской излучине, а с других сторон окружён жилыми массивами и дорогами. Парк площадью 280 га является историко-культурным комплексом и памятником садово-паркового искусства, самостоятельной ООПТ и объектом культурного наследия народов РФ федерального значения. Разбит на несколько частей: Суворовский, Ворошиловский парки и Филёвский парк культуры и отдыха. Пешеходная Филёвская набережная имеет протяжённость 3,5 км. К её северной части от главного входа в парк ведёт аллея. На набережной располагается пристань «Парк Фили» [Агеева и др., 2007]. Парк расположен на крутом оползневом склоне правого берега Москвы-реки, прорезанном короткими и глубокими оврагами с 70 постоянными водотоками (Кунцевские заразы). Восточная часть расположена на надпойменных террасах. В Фили-Кунцевском лесопарке произрастают самые крупные на западе Москвы массивы широколиственных лесов (липы, дубы, клёны, вязы возрастом более 100 и даже более 200 лет), на переувлажнённых местах – ольшаники. Сохранился старый яблоневый сад. В парке находят убежища многие редкие животные (ласка, горностай, лисица, клёст, ласточка, виды дятлов, тритон, чесночница, виды лягушек и др.). В историческое время на этой территории располагались деревни Фили (1627–1935), Мазилово (1627–1950-е) и село Кунцево (1454 г., с 1870 г. – посёлок с железнодорожной станцией, дачами и развитой промышленностью, с 1925 г. – город, с 1960 г. – в составе Москвы). Объектом культурного наследия федерального значения является усадьба князя К.Л. Нарышкина,

дяди Петра I. В 1975 г. деревянное здание усадьбы сгорело и было восстановлено в кирпиче. В настоящее время она значительно разрушена и требует восстановления; рисунок паркового комплекса также весьма изменён [Данченко, 2010; Тимашиков, Малинов, 2020]. На территории парка находится 10 памятников природы, в т.ч. – холмы Кунцевского городища, одно из древнейших укрепленных поселений на территории Москвы (V–VIII в. до н.э.).

При проведении работ были использованы разнообразные литературные и авторские источники из Интернета: Красная книга г. Москвы [2017], Северо-Западный округ... [1997]; Лихачёва [1997], Насимович, [1997; 1998 а, б, в; 2011; [temnyjles.narod.ru/](http://temnyjles.narod.ru/)], Филиппова [1998], Агеева и др. [2003], Gladkov, Kisel'eva [2008], Данченко [2010], Дякун [2011], Аверченков, Насимович [2011], Насимович, Аверченков, Медведева [2011], Воронов [2013], Гейдор, Казусь [2014], Гнилорыбов [2019], Татарников, Львов [2019], Колодный [<http://testan.narod.ru/>]. Кроме того, использовался ряд электронных ресурсов – материалы официальных сайтов ООПТ России, парка «Москворецкий» и др.:

1. Геоморфологическая особенность района Крылатское. Лекции. Орг (<https://lektsii.org/17-5693.html>).
2. Гребной канал Москва. История (<https://canalmoscow.ru/about/history>).
3. Историческая справка – Сайт храма Рождества Пресвятой Богородицы в Крылатском (<https://www.hramnaholmah.ru/about/2008-09-25-16-27-55.html#content03>).
4. Как убивают Мнёвниковскую пойму и кому это выгодно. Особо охраняемые природные территории Москвы (<https://oopt-msk.livejournal.com/91273.html>).
5. Камышница, чомга и лысуха: Крылатскую пойму облюбовали краснокнижные водоплавающие. Мосприрода ([https://mospriroda.ru/press\\_center/kamyshnitsa\\_chomga\\_i\\_lysukha\\_krylatskuyu\\_poymu\\_oblyubovali\\_krasnoknizhnye\\_vodoplavayushchie\\_/?sphrase\\_id=21288](https://mospriroda.ru/press_center/kamyshnitsa_chomga_i_lysukha_krylatskuyu_poymu_oblyubovali_krasnoknizhnye_vodoplavayushchie_/?sphrase_id=21288)).
6. Крылатские холмы – история и достопримечательности парка. Парк Крылатские холмы: официальный сайт, где находится и как добраться (<https://krylatskoe.com/sovety/encyclopedia/krylatskie-kholmy.html>).
7. Кунцево-портал. Сайт района (<http://kuntsevo-portal.ru/publ/>).
8. Ландшафтный заказник «Крылатские холмы». Московские парки: природно-исторический парк «Москворецкий» (<http://moscowparks.narod.ru/pipmoskv/krylholm/>).
9. Малоизвестные страницы знаменитого строительства. Портал района Строгино ([https://strogino.net/strogino/history/znamenitoe\\_stroitelstvo.html](https://strogino.net/strogino/history/znamenitoe_stroitelstvo.html)).
10. Мневниковская пойма: как уникальный остров дикой природы превращают в очередной жилой район Москвы. Эковики (<https://ecowiki.ru/mnevnikovskaya-poima>).
11. Московские парки. Крылатские холмы и Мнёвники. Отзыв.ru. 2013 (<https://otzyv.ru/review/167411/>).
12. Парк Крылатские холмы. Москва, 2021. Достопримечательности. Туристер (<https://www.tourister.ru/world/europe/russia/city/moscow/parks/30467>).
13. ПИП «Москворецкий». Мосприрода ([https://mospriroda.ru/where\\_to\\_go/territorii/pip\\_moskvoretskiy/](https://mospriroda.ru/where_to_go/territorii/pip_moskvoretskiy/)).
14. Официальный сайт мэра Москвы (<https://www.mos.ru/>).
15. Развитие территории Мневниковской поймы завершат к 2030 году. Seldon News. 15.03.2021 (<https://news.myseldon.com/ru/news/index/247269610>).
16. Серебряноборское лесничество – Википедия ([https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Серебряноборское\\_лесничество&oldid=107690717](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Серебряноборское_лесничество&oldid=107690717)).
17. Серебряный бор. ООПТ России (<http://oopt.aari.ru/oopt/Серебряный-бор>).
18. С. Кузнецов: Активной застройки в Строгинской пойме не будет. Агентство городских новостей. Москва. 16.07.2015 (<https://www.mskagency.ru/materials/2471897>).

19. Строгинская пойма – Википедия ([https://ru.wikipedia.org/wiki/Строгинская\\_пойма](https://ru.wikipedia.org/wiki/Строгинская_пойма)).
20. Суходольные луга в Крылатском. Район. Крылатское.ру (<https://www.krylatskoye.ru/content/today/index33.html>).
21. Татаровский овраг. Система оврагов Каменные Заразы. Овраг Каменная Клетва. Большой карьер. Фили-Кунцевский лесопарк – Москва. Викимания. (<https://wikimapia.org/>).
22. Филёвский парк. Памятники природы. Кунцево Онлайн ([https://kuncevo-online.ru/fil\\_park/pamyatniki\\_vidi\\_travi.php](https://kuncevo-online.ru/fil_park/pamyatniki_vidi_travi.php)).
23. Экология Западного округа Москвы. Библиотеки Западного административного округа (<https://biblioza.ru/kraevedenie/ekologiya-zapadnogo-okruga-moskvyi.html>).

В процессе работ было также необходимо обратиться к ряду законодательных актов Правительства Москвы об особо охраняемых природных территориях:

1. Закон г. Москвы от 26 сентября 2001 г. № 48 «Об особо охраняемых природных территориях в городе Москве» (с изменениями и дополнениями). Статья 21. Природно-исторический парк. ГАРАНТ (<https://base.garant.ru/377326/b5dae26bebf2908c0e8dd3b8a66868fe/>).
2. Закон г. Москвы от 6 июля 2005 г. № 37 «О схеме развития и размещения особо охраняемых природных территорий в городе Москве» (действующий). Официальный сайт мэра Москвы. Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы (<https://www.mos.ru/eco/documents/normativnye-pravovye-akty/view/62752220/>).
3. Правительство Москвы. Постановление от 19 сентября 1995 г. № 783 «О комплексном развитии и системе управления территории «Серебряный бор». 2 с. + Приложение (<http://oopt.aari.ru/doc/Постановление-правительства-Москвы-от-19091995-№783>).
4. Постановление Правительства Москвы от 5 июня 2018 г. № 540-ПП «Об изменении границ особо охраняемой природной территории «Природно-исторический парк «Москворецкий» и внесении изменений в постановления Правительства Москвы от 29 декабря 1998 г. № 1012 и от 19 января 1999 г. № 38» ([http://oopt.aari.ru/sites/default/files/documents/pravitelstvo-Moskvy/N540-PP\\_05-06-2018.pdf](http://oopt.aari.ru/sites/default/files/documents/pravitelstvo-Moskvy/N540-PP_05-06-2018.pdf)).
5. Правительство Москвы. Постановление от 19 ноября 2020 г. № 2013-ПП «Об особо охраняемой природной территории регионального значения «Природно-исторический парк «Москворецкий»» и памятниках природы, расположенных в её границах» (<http://oopt.aari.ru/doc/Постановление-правительства-Москвы-от-19112020-№2013-ПП>).
6. Постановление Правительства Москвы от 2 июня 2020 г. № 579-ПП «Об особо охраняемой природной территории регионального значения «Памятник природы «Серебряный бор»» и её охранной зоне». [http://oopt.aari.ru/sites/default/files/documents/pravitelstvo-Moskvy/N679-PP\\_02-06-2020.pdf](http://oopt.aari.ru/sites/default/files/documents/pravitelstvo-Moskvy/N679-PP_02-06-2020.pdf).
7. Постановление Правительства Москвы от 3 августа 2010 г. № 663-ПП «О внесении изменений в постановления Правительства Москвы и признании утратившими силу постановления Правительства Москвы от 15 января 2008 г. № 13-ПП и пунктов 3 и 5 постановления Правительства Москвы от 2 сентября 2008 г. № 788-ПП». ([http://mosopen.ru/document/663\\_pp\\_2010-08-03](http://mosopen.ru/document/663_pp_2010-08-03)).
8. Постановление Правительства Москвы от 8 июня 2004 г. № 383-ПП «О памятниках природы в городе Москве» (<https://www.mos.ru/authority/documents/doc/14786220/>).

9. Постановление Правительства Москвы от 7 декабря 2004 г. № 854-ПП «О схеме развития и размещения особо охраняемых природных территорий в городе Москве» (<https://www.mos.ru/authority/documents/doc/14805220/>).

10. Решение президиума Московского городского Совета народных депутатов № 201 от 17.10.1991 «О государственных памятниках природы местного значения в г. Москве» (<https://www.krylatskoye.ru/content/today/index33.html>).

При выполнении работы по упорядочению сведений о Москворецком парке пришлось столкнуться с рядом путаниц и ошибок – например, памятник природы овраг Каменная Клетва в литературе часто называют Татаровским, а на самом деле это название относится к другому памятнику природы – оврагу, расположенному севернее, называемому также Верхнетатаровским. Деревня Татарово, от которой произошло название оврага, располагалась в Крылатской пойме [Агеева и др., 2007]. Впервые она была упомянута в духовной грамоте великого московского князя Василия Дмитриевича в 1417–1423 гг. Деревня была включена в состав Москвы в 1960 г. при расширении города до МКАД и просуществовала до 1980 г., когда производились масштабные переделки ландшафта при подготовке к Олимпиаде-80, и жители почти 200 домов были переселены в многоэтажки. Та же история и у более крупного населённого пункта – села Крылатского, единственным сохранившимся и восстановленным элементом которого является церковь Рождества Пресвятой Богородицы, каменное здание которой было построено в 1868 г.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе исследований были собраны разнообразные данные о Москворецком природно-историческом парке, его природном и культурном наследии и культурном ландшафте, а также об экологических проблемах и конфликтах природопользования.

Сложная структура природно-исторического парка (ландшафтный заказник, памятники природы, государственные природные заказники, перспективные заповедные участки) отражена на созданной в процессе исследований карте парка. Карта составлена на основе наиболее подробной карты парка, размещённой на сайте Департамента природопользования и охраны окружающей среды г. Москвы и дополнена собранными современными данными. Кроме природоохранных объектов, на карту нанесены и другие примечательные объекты (например, Живописный мост, построенный в 2007 г. – первый вантовый автодорожный мост в Москве, самый высокий в Европе мост такого типа на момент строительства [Гейдор, Казусь, 2014], или дендропарк в Мнёвниковской пойме – неудавшийся экопроект 2014–2020 гг.).

Карта с природоохранными и другими объектами парка, а также городской инфраструктурой – основа атласной информационной системы.

Для подробного ознакомления с природоохранными объектами, отражёнными на карте, была составлена таблица, в которой отражены основные характеристики ООПТ Москворецкого парка, их природные и культурно-исторические ценности, особенности развития культурного ландшафта и экологические проблемы. По возможности в таблице были указаны все когда-либо упоминавшиеся географические названия объектов ООПТ. Таблица составлена лишь для некоторых ООПТ парка, т.к. рассмотреть их все в рамках данной статьи не представлялось возможным.

Карта и таблица составлены на основе анализа и обобщения множества различных данных, указанных выше.

ООПТ внутри Москворецкого были созданы не одновременно, а некоторые уже существовали ранее до создания парка как особо охраняемой природной территории в 1998 г. Например, это относится к памятникам природы «Горная страна на Крылатских

холмах» и «Овраг Каменная Клетва», статус которых был определён еще в 1987 г. Большая часть памятников природы парка была определена в 2004 г.

Памятники природы являются основным типом ООПТ, входящим в структуру парка. Некоторые памятники природы обширны и внутри них находятся меньшие по размеру памятники (например, Мезотрофное болото в Серебряноборском лесничестве). В парке есть также ландшафтный заказник «Крылатские холмы», определяемый как самостоятельная ООПТ и включающая в себя ряд памятников природы (Горная страна, Суходольный луг, Татаровский овраг, Каменные заразы и др.). Наибольшая часть памятников природы сосредоточена на Крылатских холмах и в Фили-Кунцевском лесопарке.

На территориях и в акваториях парка встречается множество видов растений и животных, в т.ч. охраняемых. Например, на Большом карьере в Крылатской пойме гнездятся такие редкие птицы, как камышница, чомга и лысуха (1–2 категория редкости), хохлатая чернеть, дроздовидная камышовка, северная бормотушка. На суходольных лугах Крылатских холмов встречаются 60 видов растений из Красной книги Москвы.

В современном облике ландшафтов парка отразились в основном события XIX–XXI вв. Строительство канала имени Москвы в 1937 г. подняло уровень реки, вызвало затопление старых песчаных карьеров и образование искусственных озёр, самое большое из которых – Строгинский затон. Карамышевское и Хорошёвское спрямления русла Москвы-реки превратили Мнёвниковскую пойму и Серебряный бор в острова. В середине XX в. осуществлено уничтожение деревень и сёл, сельских полей и садов и распространение многоэтажной городской застройки. Подготовка к Олимпиаде-80 усилила эти процессы, появились новые спортивные сооружения. События начала XXI в. продолжили строительство новых масштабных сооружений; некоторые из них в настоящее время считаются достопримечательностями столицы (например, Живописный мост). Из памятников культурного ландшафта, наилучшим образом сохранившихся и восстановленных в Москворецком парке, выделяются храм Рождества Пресвятой Богородицы в Крылатском с его природным окружением и деревня Троице-Лыково с двумя храмами. Усадьба и парк Филей нуждаются в восстановлении.

Строительство на землях особо охраняемых природных территорий – самая наболевшая проблема Москворецкого парка, да и других московских территорий. Приостановление массовой многоэтажной высокоплотной городской застройки весьма важно для обеспечения активности, эпидемиологической безопасности, сохранения природно-исторических ландшафтов. При этом необходимо соблюдение исторических общинных слободских традиций, с особым отношением к наследию и культурному коду [Тимашков, Малинов, 2020].

Уже после организации Москворецкого парка в 1998 г. у Строгинского моста в 2001 г. Дон-строем было начато возведение элитного жилищного комплекса «Алые паруса» (последний корпус сдан в 2016 г.). Высота корпуса, построенного в 2004 г. – 180,7 м (49 этажей). Строительство вызвало отчуждение значительной территории поймы. Площадь комплекса – более 7 га, там имеются аквапарк, футбольное поле, вертолётная площадка, яхт-клуб и т.д. «Алые паруса» расположены на месте давно снесённой деревни Щукино. Комплекс спроектирован с впечатлением «корабля», плывущего по реке; были даже претензии по сползанию зданий в воду из-за неустойчивых грунтов и плывунов [Яклашкин, 2008]. Подобные «Алым парусам» жилищные комплексы нарушают традиции московского культурного ландшафта, которые призван охранять статус природно-исторического парка.



Рис. 2. Карта Москворецкого природно-исторического парка. Составлена автором  
Fig. 2. Map of the Moskvoetsky natural-historical park. Compiled by the author

Табл. 1. Избранные особо охраняемые природные территории Москворецкого парка и динамика культурного ландшафта

Table 1. Selected specially protected natural areas of Moskvoretsky park and the dynamics of the cultural landscape

№	ООПТ	Время создания, основные характеристики	Природные особенности, охраняемые виды	История и динамика культурного ландшафта	Экологические проблемы
1	Крылатские холмы, ландшафтный заказник	1998 г., 175 га. Разнообразный рельеф, охраняемые животные и растения, спортивные сооружения, памятники культуры и археологии. Высоты до 230 м н.у.м. Третья терраса Москвы-реки. Плато, разрезанное оврагами с запада на восток	3 крупные овражно-балочные системы, искусств. рельеф, растит. сообщества остепнённых лугов, широкол. лесов. Охраняемые виды растений (хохлатки полая и плотная, купена многоцветковая, ландыш майский и др. – всего 44) и животных (заяц-русак, горноста́й, ласка, сокол пустельга, ушастая сова, коростель, редкие пчёлы, шмели и бабочки)	Древнейшее великокняж. село Крылатское, путев. дворец царя. Археол. находки II тыс. до н.э. и позднее (селища, некрополь, курган, могильник – дуб у горнолыж. склона). Храм Рождества Пресв. Богородицы 1868 г. (до этого с XVI в. – 3 дерев.). Разорен. в Смутное время. К 1928 г. застр. до берега Москвы-реки. Снесено в 1980 г.	Весенние поджоги травы губят животных и растения, сбор цветущих растений, пикники, замусоривание, спортивные мероприятия, заезд автотранспорта. Застройка (автостоянка, авторемонтные мастерские). Высотная застройка вблизи заказника
2	Березняк с черникой и брусникой на северном склоне Крылатских холмов, пам. природы рег. значения	Северная часть заказника «Крылатские холмы», 2004 г., перспективный заповедный участок	Реликтовый природный комплекс – берёза, кустарнички	Окружён велотрассой, расположен на краю заказника «Крылатские холмы»	Гибель растений из-за поджогов травы, соседство с велотрассой, близость к застроенной части города
3	Горная страна на Крылатских холмах, памятник природы регионального значения	Северная часть заказника «Крылатские холмы», 1987 г.	Антропогенная трансформация рельефа в виде горной страны (хребты и долины). Суффоз. котловины с сух. дном. Меловые пески. Маломощн. почвы. Уникальн. луга с элементами степной флоры (тимopheевка, клевер, вязель...)	Многовековые карьерные разработки строительных материалов	Гибель растений из-за поджогов травы, соседство с велотрассой, близость к застроенной части города
4	Суходольные луга на	2 участка площадью 7,2 га в	Несколько сотен видов растений	Физкультурно-оздоровительное,	Сбор растений, уничтожение



	Крылатских холмах (Суходол. луг, Крылатская ул.), памятник природы регионального значения	составе заказника «Крылатские холмы», 1991 г., одни из крупнейших в Москве	(клевер, тимоф., берёза и др.), 60 из Красной книги Москвы, 17 видов лишайников, 500 видов беспозвон., 40 – птиц, 10 – млекопитающих (горностай, ласка, сокол, сова и др.)	спортивное, эколого-просветительское назначение	растит. покрова, поджоги, замусоривание
5	Татаровский (Верхнетатар., Костеевский) овраг (Сухой ручей), памятник природы регионального значения	Часть заказника «Крылатские холмы», 2004 г., вблизи Сев. Крылатского, длина около 2 км	Сухой, водой наполняется во время сильных дождей. Внизу оврага – постоян. водоток, к-рый в прошлом тек по пойме. Верховья залесены и живописны	Вблизи была деревня Татарово (1417–1980). Ливневая канализация по тальвегу.	Ливневая канализация разрушена и замусорена. Гибель растений из-за поджогов травы (в 2003 г. уничтож. редкая популяция вереска).
6	Каменные Заразы (Зарасы – заросли, Кладбищенский овраг, Попов, Поповский овраг), система оврагов из прочного песчаника, памятник природы регионального значения	Планирован с 2004 г. Часть заказника «Крылатские холмы», в центре заказника, длина водотока 800 м	Ручей, пр. приток р. Москвы. Водоток временн., обычно в нижн. части. Склоны живописны, внизу заболочены. Ранее внизу были зыбучие пески, теперь с ивами. Эрозион. склоны – песчаник и меловые пески. Реликт. широкол. леса: дуб, липа, вяз	В прошлом впадал слева в Крылатский ручей, теперь – в искусственную песколовушка. Рядом было кладбище. Церковь Рождества Богородицы XIX в., восстановлена в 1990-х гг. – часть бывшего села Крылатского	Очистные сооружения не действуют. Сокращение участка ручья с 300 до 160 м. Уничтожение старинного кладбища.
7	Овраг Каменная Клетва (ошибочно – Татаровский), памятник природы регионального значения «Каменная Клетва на Крылатских холмах с родниками»	1987 г., часть заказника «Крылатские холмы», 5,31 га. До 230 м н.у.м. Самая крупная и древняя овражно-балочная система в Крылатском. Объект геологич. экскурсий. С 2020 г. в состав памятника входят родники Рудненской Божией Матери (Крылатск. чудо), Каменная Клетва и Маленький	Редкий выход меловых аптских песков. Несколько ручьёв и источников, 3 каптированных родника. Крылатский ручей (р. Меленка) дл. 750 м. Болота в низинах. Виды колокольчика, василька, хохлатка плотная и др. Стрекозы-красотки, коростель	Остатки села Крылатского (1417–1980 гг.): огородов, садов, кладбища (1880-е гг.). Место зимней и летней спорт. рекреации. Благоустройство: высадка деревьев и кустарников (био группы – дуб, лещина, берёза, роза и др.), на склонах трава, крест и площадка у некрополя	Поглощение лесом и разрушение последних элементов села и кладбища. Эрозия склонов, искусств. Склон 7 лет не зарастал травой, загрязнение почвы. Конфликт природоохранного и спортивно-рекреационного природопользов. (горные лыжи, санни, дельтаплан)
8	Серебряный бор, памятник	1991 г.; 203,3 га. Самостоятельная часть парка на искусственном	Речные поймы и дельты (82 %), сосновый бор и смеш. лес (18 %),	Известен с XVII в. XIX в. – военная часть. В нач. XX в. – дачи. 1937 г. –	2007 г. – стр-во автотрассы, шум, загрязнение от транспорта и

	природы регионального значения	острове, 5 зон: заповедная, прогулочная, рекреационная, административно-хозяйственная, сторонних пользователей; экологическая тропа, парк «Ветеран» с вольерами птиц	разнообр. ПТК; 400 видов сосуд. раст., из Красн. кн.: борец, ветреница, гудайера и др.; куница, заяц, лиса, барсук, 20 охран. видов птиц (клёст-еловик, хохлатая чернеть, речн. крачка и др.), 3 – рыб (линь, елец, язь), 26 – насекомых (капошонница, червонец, шмелевидка и др.)	стр-во Хорошёвск. судох. канала; обр. остров. Зал. Глубокий (оз. Бездонное) с извил. берегами образ. подъёмом уровня воды Карамышевской плотиной и затопл. песчаного карьера	пром. предпр. округа, превышение рекреационн. ёмкости, климатические изменения (температура, осадки, скорость ветра), строит-во элитного жилья, коммуникаций – конфликт с рекреационным природопользов.
9	Черепковский луг, памятник природы регионального значения	2004 г., вдоль МКАД, к югу от развязки Рублевского шоссе, рядом с НМИЦ кардиологии имени А.Н. Бакулева (была деревня Черепково)	В настоящее время травы с кустарниками и деревьями (ольха, берёза, осина, американский клён, ива, тополь, облепиха и др.), нет ухода. Растения Красной книги Москвы: ландыш, гвоздика Фишера, земляника зелёная, чина весенняя, колокольчик раскидистый, нивяник и пупавка красильная	Луг был известен в XIX в., пасли коров, засеивали кормовыми злаками (ячмень). Деревня Черепково изв. с XVI в. (жил кн. Борис Лыков, была церковь, с 1610 г. – часовня). Уничт. в 1982 г. в связи со строительством кардиоцентра. Был заболоченный пруд, овражек Черепковская балка – начало Рублёвского ручья	Окружён антроп. объект. (дороги, развязка и кардиоцентр). В связи со строительством в 1984–1992 гг. – строительный мусор на лугу. Уничт. пруда и половины балки. Вывод из с/х использован. и зарастание луга. Травяной покров в северной части разрежен и выбит

Элитный коттеджный посёлок «Остров фантазий» был открыт в 2005 г. в Крылатской пойме, хотя её водоёмы ценны как памятники природы и места обитания охраняемых водоплавающих птиц. На прудах Крылатской поймы были проведены природоохранные мероприятия: биоинженерные способы крепления берега, очистки загрязнённых стоков и экологическая реабилитация, способствующая сохранению биоразнообразия и поддержанию качества воды [Кривицкий, 2008].

Масштабная застройка сказывается неблагоприятно и на почвах пойм. На местах плодородных почв образуются техногенные отложения большой мощности и формируются почвоподобные тела – технозёмы. Техногенную толщу отличает слабая оструктуренность, наличие включений бытового и строительного мусора, высокая твёрдость и низкий окислительно-восстановительный потенциал [Иванников, Прокофьева, 2010].

Из экологических проблем Карамышевского берега отмечались сильные нарушения рельефа, гидросети, почв и растительности, высокая замусоренность территории, загрязнение и даже иссякание родников, являющихся памятниками природы. В то же время оползни, в отличие от прошлого, не являются большой проблемой, т.к. река зарегулирована и склоны укреплены растительностью [Аверченков, Насимович, 2011];

Воронов, 2013]. Берег нуждается в сохранении природных объектов, уборке мусора и аварийных деревьев, избегании ненужной застройки и укрепления склонов.

В Мнёвниковской пойме в 2011 г. по заказу фонда «Экология для всех» при участии Департамента природопользования и охраны окружающей среды г. Москвы был осуществлён многомиллионный проект создания Москворецкого дендропарка площадью 3 га на месте старой свалки. Проект предполагал знакомство с уникальной и типичной растительностью, имел водоём и 6 отделов по разным климатическим зонам России. Было высажено более 1000 видов хвойных, лиственных деревьев, кустарников, водных и прибрежных растений. Однако в связи со строительством Северо-Западной хорды в 2019–2020 гг. дендропарк был заброшен и экопроект фактически провален. В 2018 г. для осуществления масштабного строительства 115 га поймы было выведено из состава ООПТ. Освоение поймы до 2030 г. планируется как спортивный кластер, элитный жилой район, транспортный узел и парк. Для этих целей в 2020 г. была снесена при активном сопротивлении жителей почти последняя в Москве деревня Терехово, в которой были старинные купеческие дома возрастом более 150 лет. Градозащитниками она предлагалась для развития здесь фольклорного парка. Таким образом, в районе наблюдается выраженный конфликт природопользования (<https://news.myseldon.com/ru/news/index/247269610>; <https://oopt-msk.livejournal.com/91273.html>).

Следует отметить, что в 2020 г. Постановлением Правительства Москвы границы природно-исторического парка были официально изменены с исключением из них некоторых территорий строек (например, в Мнёвниковской пойме), расширением водоохранных зон и присоединением некоторых других парковых территорий.

## **ВЫВОДЫ**

В результате исследований разработаны принципы создания базы данных атласной информационной системы, проведена инвентаризация памятников природы и других ООПТ, расположенных на территории Москворецкого парка – самого большого природно-исторического парка столицы. В процессе обработки и обобщения большого количества исходных данных составлены структурированные описания ООПТ, входящих в состав парка. Проанализированы основные характеристики этих территорий, их природные и культурно-хозяйственные особенности, история культурного ландшафта.

В основном территории парка были сельскохозяйственными и вошли в состав Москвы во второй половине XX в. Единственной деревней-памятником остаётся Троице-Лыково, где расположены значимые объекты культурного наследия. Были на территории парка и исторические дачные участки (Серебряный бор), и обширное лесничество, где ещё в XIX в. поддерживалось развитое лесное хозяйство. Огромное влияние на облик и функционирование территорий, входящих в парк, оказали масштабные гидротехнические работы 1930-х гг., связанные с подъёмом уровня Москвы-реки и зарегулированием её стока, в результате которых образовались обширные водоёмы, главным из которых является Строгинский затон. Большое влияние на преобразование культурных ландшафтов явилась подготовка к Олимпиаде-80 и другим международным спортивным состязаниям.

Составлена карта парка в масштабе 1: 50 000 с обозначением всех ООПТ в наиболее полном объёме, а также других важных объектов инфраструктуры. По мере поступления новых сведений картографический материал должен обновляться, и система будет дополняться связанными данными и метаданными.

Выявлены экологические проблемы парка в целом и его отдельных территорий: нарушения рельефа, гидросети, почв, растительности, замусоренность территории, загрязнение и иссякание родников, весенние палы травы, из-за которых гибнет луговая флора и фауна, зарастание лугов в результате выведения их из хозяйственного использования,

превышение рекреационной ёмкости. Основной проблемой является строительство высотных жилищных комплексов, коттеджных посёлков и транспортных трасс на охраняемых территориях и в непосредственной близости к ним, которое отчуждает значительные площади ООПТ и перекраивает их границы.

Природоохранное природопользование на территории парка как части мегаполиса вступает в конфликт со строительным, транспортным, а также спортивно-рекреационным, когда превышаются допустимые нагрузки на природную среду. Хозяйственно-экологической проблемой является также неправильное благоустройство и провальные экологические проекты (например, создание Москворецкого дендропарка).

Результатом создания атласной информационной системы должен явиться мониторинг и решение экологических и культурологических проблем природно-исторического парка. По такому же образцу возможно создать АИС прочих природно-исторических парков и ООПТ другого типа в столице, на основе чего возможно будет судить о состоянии экологического каркаса города в целом.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена по гранту РФФИ № 20-47-01001 «Разработка концепции, технологий и сервисов атласной информационной системы нового поколения для мониторинга характеристик экологического состояния регионов и городов Европы и России».

## ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out under the grant of the Russian Science Foundation No 20-47-01001 “Development of the concept, technologies and services of Atlas Information System Next Generation for monitoring the parameters of the environmental situations in the regions and cities of Europe and Russia”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверченков И.М., Насимович Ю.А.* Карамышевский берег реки Москвы и канала Карамышевское спрямление. Научный отчёт для ГПБУ «Управление ООПТ по СЗАО г. Москвы», 2011. Тёмный лес. Электронный ресурс: <http://temnyjles.pagod.ru/Kar-ber.htm> (дата обращения 02.04.2021).
2. *Агеева Р.А., Бондарук Г.П., Поспелов Е.М., Соколова Т.П., Шилов А.Л.* Имена московских улиц: Топонимический словарь. М.: ОГИ, 2007. 608 с.
3. *Бобров В.В.* Анализ репрезентативности сети проектируемых особо охраняемых природных территорий Москвы для сохранения редких и исчезающих видов позвоночных животных (*Vertebrata*). Социально-экологические технологии, 2014. № 1–2. С. 55–69.
4. *Воройский Ф.С.* Информатика. Новый систематизированный словарь-справочник (Вводный курс по информатике и вычислительной технике в терминах). 2-е изд., перераб. и доп. М.: Либерия, 2001. С. 536 с.
5. *Воронов Ю.В.* Родник № 47 на территории района Хорошёво-Мнёвники город Москва. Святой источник, 2013. Электронный ресурс: <http://svyato.info/8389-rodnik-47-na-territorii-rayona-horoshevo-mnevnik.html> (дата обращения 03.04.2021).
6. *Гейдор Т., Казусь И.* Стили московской архитектуры. М.: Искусство-XXI век, 2014. 616 с.
7. *Гладков Д.И., Киселёва В.В.* По природным паркам и заказникам Москвы: путеводитель. М.: Некоммерческое партнерство «Прозрачный мир», Фонд развития экотуризма «Дерсу Узала», 2008. 256 с.

8. Глазунова О.Н. Терехово. Изучаем историю Москвы и Подмосковья. Доклады и сообщения шестой региональной научно-практической конференции «Проблемы изучения селений Москвы и Подмосковья». М.: Всероссийский институт научной и технической информации РАН, 1999. С. 143–147.
9. Гнилорыбов П. Сидя на красивом холме: 5 секретов главной природной достопримечательности ЗАО. Москва 24. Культура, 21.07.2019. Электронный ресурс: <https://www.m24.ru/articles/gorod/21072019/155779> (дата обращения 29.04.2021).
10. Данченко М.В. Наследие Кунцева. Изд. 2-е. М.: Типография «Наука», 2010. 336 с.
11. Дякун Ф.А. Памятник природы Серебряный бор. Экология и жизнь. Лес, 2011. № 11 (120). Электронный ресурс: <http://www.ecolife.ru/les/3736/> (дата обращения 10.04.2021).
12. Иванников Ф.А., Прокофьева Т.В. Техногенные почвоподобные тела речной долины и их трансформация в условия города (на примере долины р. Москвы). Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение, 2010. № 4. С. 10–15.
13. Климанова О.А., Колбовский Е.Ю., Илларионова О.А. Зелёная инфраструктура города: оценка состояния и проектирование развития. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2020. 324 с.
14. Климанова О.А., Колбовский Е.Ю., Илларионова О.А. Экологический каркас крупнейших городов Российской Федерации: современная структура, территориальное планирование и проблемы развития. Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле, 2018. Т. 63. Вып. 2. С. 127–146. DOI: <https://doi.org/10.21638/11701/spbu07.2018.201>.
15. Колодный Л. Края Москвы. Москва. Юго-Запад. Тёплый Стан. Электронный ресурс: [http://testan.narod.ru/knigi\\_moskow/kraumosk/](http://testan.narod.ru/knigi_moskow/kraumosk/) (дата обращения 07.05.2021).
16. Красная книга города Москвы. 2-е изд., перераб. и доп. М., 2017. 452 с.
17. Кривицкий С.В. Использование инновационных технологий в природоохранной деятельности. Природообустройство, 2008. № 1. С. 30–33.
18. Крюков В., Голубева Е. Опыт картографирования экосистемного и общественно-экономического потенциала ООПТ в городе. ИнтерКарто. ИнтерГИС 26. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий. Материалы Совместн. Междунар. конф. 27–28 сентября 2020 г., Тбилиси (Грузия). Тбилиси: Издательство Тбилисского университета, 2020. С. 64–67.
19. Маркова О.И. Особо охраняемые территории Москвы как основа экологического каркаса мегаполиса. Географическая среда и живые системы, 2020. № 4. С. 28–47. DOI: 10.18384/2712-7621-2020-4-28-47.
20. Москва: Энциклопедия. М.: Большая российская энциклопедия, 1997. 976 с.
21. Насимович Ю.А. Болота Москвы. Природа Москвы. М.: Биоинформсервис, 1998 (а). С. 81–88.
22. Насимович Ю.А. Гидрографическая сеть Москвы. Природа Москвы. М.: Биоинформсервис, 1998 (б). С. 50–61.
23. Насимович Ю.А. Гидрографическая сеть. Флора и растительность. Москва. Геология и город. М.: Московские учебники и картолитогрфия, 1997. С. 27–37.
24. Насимович Ю.А. Луга Москвы. Природа Москвы. М.: Биоинформсервис, 1998 (в). С. 74–80.
25. Насимович Ю.А. Мнёвниковская «пойма» реки Москвы. Научный отчёт для ГПБУ «Управление ООПТ по СЗАО г. Москвы», 2011. Тёмный лес. Электронный ресурс: <http://temnyjles.narod.ru/Mnevni.htm#4> (дата обращения 05.05.2021).
26. Насимович Ю.А. Реки, озёра и пруды Москвы. Тёмный лес. Электронный ресурс: <http://temnyjles.narod.ru/Reki3-04.htm> (дата обращения 20.03.2021).

27. *Насимович Ю.А., Аверченков И.М., Медведева Д.А.* Щукинский берег реки Москвы: история и топонимика, общее описание природы, флористический список. Тёмный лес. Электронный ресурс: <http://temnyjles.narod.ru/Shuk-ber.htm> (дата обращения 07.05.2021).
28. Северо-Западный округ Москвы. М.: Энциклопедия российских деревень, 1997. 381 с.
29. *Татарников Д.В., Львов Ю.Г.* Старовозрастные древостои Серебряноборского лесничества. Лесохозяйственная информация: электронный сетевой журнал, 2019. № 4. С. 79–86. Электронный ресурс: <http://hi.vniilm.ru/> (дата обращения 06.05.2021). DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2019.4.07.
30. *Тимашков А.В., Малинов А.А.* Градостроительное значение общинных функций в современном мегаполисе и методы воссоздания гармоничной городской среды. Наука, образование и экспериментальное проектирование, 2020. № 1. С. 196–199. DOI: 10.24411/9999-034A-2020-10040.
31. *Филиппова Н.А.* О благоустройстве Татаровского оврага – памятника природы в ландшафтном заказнике «Крылатские холмы». Лесной вестник. Ландшафтная архитектура и садово-парковое строительство, 1998. № 4. С. 91–95.
32. *Чиждова В.П., Прыгунова И.Л.* Рекреация и заповедное дело: итоги и перспективы взаимодействия. Минск: ДОЛ-Принт, 2004. 145 с.
33. *Яблоков В.М., Тикунов В.С.* Атласные информационные системы для устойчивого развития территорий. ИнтерКарто. ИнтерГИС 22. Материалы Междунар. конф. Протвино, 2016. Т. 1. С. 13–33.
34. *Яклашкин П.* Слух под парусом. Коммерсантъ, 2008. Приложение № 118. С. 36.
35. *Baro F., Chaparro L., Gomez-Baggethun E., Langemeyer J., Nowak D.J., Terradas J.* Contribution of ecosystem services to air quality and climate change mitigation policies: the case of urban forests in Barcelona, Spain. *Ambio*, 2014. No 43 (4). P. 466–479.
36. European Commission. Environment. European Commission Conference on Green Infrastructure implementation. Brussels, 2010. Web resource: [http://ec.europa.eu/environment/nature/ecosystems/green\\_infrastructure.htm](http://ec.europa.eu/environment/nature/ecosystems/green_infrastructure.htm) (accessed 23.03.2021).
37. Green infrastructure. An integrated approach to land use. Position Statement, 2013. Web resource: <http://www.landscapeinstitute.org/policy/GreenInfrastructure.php> (accessed 23.03.2021).
38. Millenium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: Synthesis. Washington: Island Press, 2005. 155 p.

## REFERENCES

1. *Ageeva R.A., Bondaruk G.P., Pospelov E.M., Sokolova T.P., Shilov A.L.* The names of Moscow streets: Toponymic dictionary. Moscow: OGI, 2007. 608 p. (in Russian).
2. *Averchenkov I.M., Nasimovich Yu.A.* Karamyshevsky coast of the Moskva River and the Karamyshevsky straightening of the channel. Science report for State Environmental Budgetary Institution “Management of Specially Protected Natural Areas in the North-West Administrative District of Moscow”, 2011. Dark forest. Web resource: <http://temnyjles.narod.ru/Kar-ber.htm> (accessed 02.04.2021) (in Russian).
3. *Baro F., Chaparro L., Gomez-Baggethun E., Langemeyer J., Nowak D.J., Terradas J.* Contribution of ecosystem services to air quality and climate change mitigation policies: the case of urban forests in Barcelona, Spain. *Ambio*, 2014. No 43 (4). P. 466–479.
4. *Bobrov V.V.* Analysis of the representativeness of the network of projected specially protected natural areas in Moscow for the preservation of rare and endangered species of

- vertebrates (*Vertebrata*). Socio-ecological technologies, 2014. No 1–2. P. 55–69 (in Russian).
5. *Chizhova V.P., Prygunova I.L.* Recreation and nature reserve management: results and prospects of interaction. Minsk: DOL-Print, 2004. 145 p. (in Russian).
  6. *Danchenko M.V.* Heritage of Kuntsevo. Ed. 2nd. Moscow: Nauka Printing House, 2010. 336 p. (in Russian).
  7. *Dyakun F.A.* Natural monument Serebryany Bor. Ecology and life. Forest, 2011. No 11 (120). Web resource: <http://www.ecolife.ru/les/3736/> (accessed 10.04.2021) (in Russian).
  8. European Commission. Environment. European Commission Conference on Green Infrastructure implementation. Brussels, 2010. Web resource: [http://ec.europa.eu/environment/nature/ecosystems/green\\_infrastructure.htm](http://ec.europa.eu/environment/nature/ecosystems/green_infrastructure.htm) (accessed 23.03.2021).
  9. *Filippova N.A.* On the improvement of the Tatarovsky ravine – a natural monument in the landscape reserve “Krylatsky hills”. Forestry Bulletin. Landscape architecture and landscape gardening, 1998. No 4. P. 91–95 (in Russian).
  10. *Geidor T., Kazus' I.* Styles of Moscow architecture. Moscow: Art-XXI century, 2014. 616 p. (in Russian).
  11. *Gladkov D.I., Kiseleva V.V.* On natural parks and reserves in Moscow: a guide. Moscow: Non-commercial partnership “Transparent World”, Ecotourism Development Fund “Dersu Uzala”, 2008. 256 p. (in Russian).
  12. *Glazunova O.N.* Terekhovo. We study the history of Moscow and the Moscow region. Reports and messages of the sixth regional scientific-practical conference “Problems of studying the villages of Moscow and the Moscow Region”. Moscow: All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences, 1999. P. 143–147 (in Russian).
  13. *Gnilorybov P.* Sitting on a beautiful hill: 5 secrets of the main natural attraction of WAD. Moscow 24. Culture, 21.07.2019. Web resource: <https://www.m24.ru/articles/gorod/21072019/155779> (accessed 29.04.2021). (in Russian).
  14. Green infrastructure. An integrated approach to land use. Position Statement, 2013. Web resource: <http://www.landscapeinstitute.org/policy/GreenInfrastructure.php> (accessed 23.03.2021).
  15. *Ivannikov F.A., Prokofieva T.V.* Technogenic soil-like bodies of a river valley and their transformation into urban conditions (on the example of the Moscow-river valley). Herald of Moscow University. Series 17. Soil Science, 2010. No 4. P. 10–15 (in Russian).
  16. *Klimanova O.A., Kolbovskij E.Yu., Illarionova O.A.* Ecological framework of the largest cities of the Russian Federation: modern structure, territorial planning and development problems. Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences, 2018. V. 63. Iss. 2. P. 127–146. DOI: <https://doi.org/10.21638/11701/spbu07.2018.201> (in Russian, abs English).
  17. *Klimanova O.A., Kolbovskij E.Yu., Illarionova O.A.* Green infrastructure of the city: condition assessment and development design. Moscow: Partnership of scientific publications KMK, 2020. 324 p. (in Russian).
  18. *Kolodny L.* The edges of Moscow. Moscow. Southwest. Teply Stan. Web resource: [http://testan.narod.ru/knigi\\_moskow/kraymosk/v](http://testan.narod.ru/knigi_moskow/kraymosk/v) (accessed 07.05.2021) (in Russian).
  19. *Krivitskiy S.V.* The use of innovative technologies in environmental protection. Environmental Engineering, 2008. No 1. P. 30–33 (in Russian).
  20. *Kryukov V., Golubeva E.* Experience in mapping the ecosystem and socio-economic potential of protected areas in the city. InterCarto. InterGIS 26. GI support of sustainable development of territories. Proceedings of the Joint International conference. September

- 27–28, 2020, Tbilisi (Georgia). Tbilisi: Tbilisi State University Press, 2020. P. 64–67 (in Russian, abs English).
21. *Markova O.I.* Specially protected territories of Moscow as the basis of the ecological framework of the metropolis. *Geographical Environment and Living Systems*, 2020. No 4. P. 28–47. DOI: 10.18384/2712-7621-2020-4-28-47 (in Russian, abs English).
  22. Millenium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Washington: Island Press, 2005. 155 p.
  23. *Moscow: Encyclopedia*. Moscow: Great Russian Encyclopedia, 1997. 976 p. (in Russian).
  24. *Nasimovich Yu.A.* Hydrographic network. Flora and vegetation. Moscow. *Geology and the city*. Moscow: Moscow textbooks and carto-lithography, 1997. P. 27–37 (in Russian).
  25. *Nasimovich Yu.A.* Hydrographic network of Moscow. The nature of Moscow. Moscow: Bioinformservice, 1998 (a). P. 50–61 (in Russian).
  26. *Nasimovich Yu.A.* Meadows of Moscow. The nature of Moscow. Moscow: Bioinformservice, 1998 (b). P. 74–80 (in Russian).
  27. *Nasimovich Yu.A.* Mnevnikovskaya “floodplain” of the Moscow River. Science report for State Environmental Budgetary Institution “Management of Specially Protected Natural Areas in the North-West Administrative District of Moscow”, 2011. Dark forest. Web resource: <http://temnyjles.narod.ru/Mnevn.htm#4> (accessed 05.05.2021) (in Russian).
  28. *Nasimovich Yu.A.* Rivers, lakes and ponds of Moscow. Dark forest. Web resource: <http://temnyjles.narod.ru/Reki3-04.htm> (accessed 20.03.2021) (in Russian).
  29. *Nasimovich Yu.A.* Swamps of Moscow. The nature of Moscow. Moscow: Bioinformservice, 1998 (c). P. 81–88 (in Russian).
  30. *Nasimovich Yu.A., Averchenkov I.M., Medvedeva D.A.* Shchukinsky bank of the Moscow River: history and toponymy, general description of nature, floristic list. Dark forest. Web resource: <http://temnyjles.narod.ru/Shuk-ber.htm> (accessed 07.05.2021) (in Russian).
  31. *Northwestern District of Moscow*. Moscow: Encyclopedia of Russian villages, 1997. 381 p. (in Russian).
  32. *Red Book of the city of Moscow*. 2nd ed., rev. and add. Moscow, 2017. 452 p. (in Russian).
  33. *Voroisky F.S.* Informatics. New systematized dictionary-reference (Introductory course on computer science and computing in terms). 2nd ed., rev. and add. Moscow: Liberia, 2001. 536 p. (in Russian).
  34. *Tatarnikov D.V., Lvov Yu.G.* Old-growth stands of the Serebryanoborskoye forestry. *Forestry information: electronic network journal*, 2019. No 4. P. 79–86. Web resource: <http://lhi.vniilm.ru/> (accessed 06.05.2021). DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2019.4.07 (in Russian, abs English) (in Russian).
  35. *Timashkov A.V., Malinov A.A.* The town-planning significance of community functions in the modern metropolis and methods of recreating a harmonious urban environment. *Science, education and experimental design*, 2020. No 1. P. 196–199. DOI: 10.24411/9999-034A-2020-10040 (in Russian, abs English).
  36. *Voronov Yu.V.* Spring No 47 on the territory of the Khoroshevo-Mnevniki district, the city of Moscow. Holy source, 2013. Web resource: <http://svyato.info/8389-rodnik-47-na-territorii-rayona-horoshevo-mnevniki.html> (accessed 03.04.2021) (in Russian).
  37. *Yablokov V.M., Tikunov V.S.* Atlas information systems for sustainable development of territories. *InterCarto. InterGIS 22. Proceedings of the International conference*. Protvino, 2016. V. 1. P. 13–33 (in Russian, abs English).
  38. *Yaklashkin P.* Hearing under sail. *Kommersant*, 2008. Appendix No 118. P. 36 (in Russian).
-



УДК: 912.43, 528.913

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-409-424

Н.В. Бажукова<sup>1</sup>, Е.А. Афонина<sup>2</sup>, К.А. Шишлянников<sup>3</sup>

## ПРИМЕНЕНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ В ЗООГЕОГРАФИЧЕСКОМ КАРТОГРАФИРОВАНИИ (НА ПРИМЕРЕ ПЕРМСКОГО КРАЯ И ГОРОДА ПЕРМИ)

### АННОТАЦИЯ

В различных литературных источниках и ведомственных документах содержатся многочисленные сведения по видовому составу, распространению и численности видов наземных позвоночных животных Пермского края. Обобщение источников информации путём создания тематических баз геоданных и создания зоогеографических карт позволяет не только наглядно представить структуру и распределение животных по территории региона, но и выявить основные закономерности условий их обитания.

В статье рассматриваются принципы разработки и составления серии зоогеографических карт Пермского края и города Перми с целью реализации двух проектов. Первый проект – разработка зоогеографического раздела в комплексном географическом атласе Пермского края; второй – картографическое обеспечение бёрдинга в г. Перми. Оба проекта объединяются одной темой данного научного исследования. Тематическое содержание карт основано на научной систематике животного мира. Серию из 15 карт в зоогеографический раздел комплексного атласа разрабатывали таким образом, чтобы в него вошли карты всех видов, подробно раскрывающие данную тему. В статье рассматриваются принципы создания мелкомасштабных зоогеографических карт учебного назначения для разных возрастных групп (младшего, среднего школьного возраста и вузов). Карта-буклет «Бёрдинг в Перми» в масштабе 1: 65 000 предназначена для начинающих бёрдвотчеров, возраст которых не ограничен. Все карты составлены в среде ArcGIS 10.4.1.

Совершенствование методологии создания зоогеографических карт и легенд путём внедрения геоинформационных технологий и компьютерной обработки данных расширяют современные возможности тематического зоогеографического картографирования.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** геоинформационные технологии, зоогеографическое картографирование, Пермский край, комплексный географический атлас, бёрдинг.

---

<sup>1</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет, Географический факультет, ул. Букирева, д. 15, 614990, Пермь, Россия, *e-mail*: [bazhukova.nv@mail.ru](mailto:bazhukova.nv@mail.ru)

<sup>2</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет, Географический факультет, ул. Букирева, д. 15, 614990, Пермь, Россия, *e-mail*: [catia.afonina2010@yandex.ru](mailto:catia.afonina2010@yandex.ru)

<sup>3</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет, Географический факультет, ул. Букирева, д. 15, 614990, Пермь, Россия, *e-mail*: [sk.andreevich@yandex.ru](mailto:sk.andreevich@yandex.ru)

Natalya V. Bazhukova<sup>1</sup>, Ekaterina A. Afonina<sup>2</sup>, Kirill A. Shishlyannikov<sup>3</sup>

## THE IMPLEMENTATION OF GIS-TECHNOLOGIES IN ZOOGEOGRAPHICAL CARTOGRAPHY (ON THE EXAMPLE OF THE PERM TERRITORY AND PERM CITY)

### ABSTRACT

Nowadays there is a lot of information about species composition, distribution and abundance of terrestrial vertebrates in the Perm Territory in different literature and departmental papers. Consolidation of data by creating the theme geodatabase and zoogeographical maps helps not only imagine the structure and distribution of vertebrates on the territory but also identify the main patterns of their habitat. There are some principles of designing and creating zoogeographical maps of the Perm Territory and Perm City which aim is to realize the two projects. They are considered in the article. The first project is the creation of zoogeographical chapter in the integrated geographical atlas of the Perm Territory; the second – is cartographic support for birding in Perm. The two projects are united by one theme of the given research. The thematic content of the maps is based on the scientific vertebrate system. All the 15 maps in the zoogeographical chapter are designed in such a way that they contain various maps on the given theme. There examined the principles of designing small-scale zoogeographical educational maps for different age groups (primary, secondary and higher education). Map-booklet “Birding in Perm” in scale 1: 65 000 is designed for birdwatchers-beginners with no age limits. All maps are in ArcGIS 10.4.1. The improvement in methodology of creating zoogeographical maps and legends by implementation geoinformational technologies and computer processing expands the modern opportunities for thematic zoogeographical cartography.

**KEYWORDS:** geoinformational technologies, zoogeographical cartography, Perm Territory, the integrated geographical atlas, birding.

### ВВЕДЕНИЕ

Зоогеографические (зоологические) карты – это карты, которые отображают географическое размещение животных, их численность, миграции и связи со средой обитания. В настоящее время одним из наименее разработанных направлений в тематической картографии является именно зоогеографическое картографирование.

Объект картографирования – животный мир – наиболее подвижный компонент природы, он характеризуется определёнными особенностями, затрудняющими его отображение на картах. Животные обычно ведут скрытный образ жизни, постоянно перемещаются, и это требует специальных методов учёта и сбора данных для создания карт. Сложность картографирования животных заключается не только в трудоёмкости сбора информации, но и в обработке данных. Несмотря на то, что зоогеографическое картографирование является наиболее эффективным и наглядным способом представления информации о распространении животных в регионе, можно отметить, что востребованность карт зоогеографической тематики в практическом применении недостаточна. Наиболее популярное использование зоологических карт прослеживается в атласном картографировании. Во многие региональные комплексные атласы включены зоогеографические разделы, и тематика карт в них постоянно расширяется. Однако, в комплексных географических атласах Пермского края [Атлас..., 1999; Атлас..., 2012] таких разделов нет. В данной статье мы более подробно затронем тему разработки зоогеографического раздела в комплексном географическом атласе Пермского края.

<sup>1</sup> Perm State University, Bukirev str., 15, 614990, Perm, Russia, e-mail: [bazhukova.nv@mail.ru](mailto:bazhukova.nv@mail.ru)

<sup>2</sup> Perm State University, Bukirev str., 15, 614990, Perm, Russia, e-mail: [catia.afonina2010@yandex.ru](mailto:catia.afonina2010@yandex.ru)

<sup>3</sup> Perm State University, Bukirev str., 15, 614990, Perm, Russia, e-mail: [sk.andreevich@yandex.ru](mailto:sk.andreevich@yandex.ru)

Карты зоогеографической тематики чаще всего создаются для потребностей разных промышленных и производственных организаций. Наибольшей популярностью пользуются карты зоогеографического районирования, миграции и размещения отдельных видов животного населения, численности охотничьих ресурсов промысловых животных.

Совсем редко карты зоогеографической тематики используются в активном отдыхе недалеко от места проживания. В Перми, как и во многих городах России, набирает популярность такой вид отдыха, как бёрдинг – наблюдение, фотографирование и определение видов птиц. В помощь начинающим наблюдателям (бёрдвотчерам) нами создана карта-буклет «Бёрдинг в Перми».

Нечасто встречаются карты, отображающие оперативную обстановку, связанную с проблемами в городе или в регионе. По всей стране остро стоит проблема бродячих собак. Не менее острыми являются проблемы, связанные с укусами и заболеваемостью бешенством. Это новые сюжеты в создании современных зоологических карт.

Затрудняет развитие зоогеографического картографирования отсутствие единой классификации, несовершенство методов картографирования, недостоверность информации и другие проблемы.

Несмотря на множество проблем, возникающих при составлении карт данной тематики, интерес к ним постепенно возрастает. Множество вопросов, связанных с экологической ситуацией, коснулись и зоогеографического картографирования. Расширяется круг проблем, связанных с охраной и рациональным использованием животных, в связи с этим внимание учёных к зоогеографическому картографированию усиливается. Кроме того, появляются новые методические приёмы для создания карт.

Актуальность данного исследования заключается в том, что, несмотря на множество накопленных текстовых материалов о местах распространения животных и их численности, на сегодняшний день составлены лишь схемы мест обитания, однако ни одной комплексной карты, а тем более серии карт по данной тематике до сих пор в регионе не составлено. Попытаемся ликвидировать этот пробел, применив современные методы и геоинформационные технологии в создании карт зоогеографической тематики.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В своей теоретической части наша работа опирается на труды ведущих картографов и биогеографов, исследователей в области теории картографии, атласного, географического, геоинформационного и зоогеографического картографирования – К.А. Салищева [1976], Н.В. Тупиковой и Л.В. Комаровой [1979]; И.П. Заруцкой и Н.В. Красильниковой [1988], Т.Г. Сватковой [2002], И.К. Лурье [2008], А.М. Берлянта [2010], Л.Г. Емельяновой и Г.Н. Огуреевой [2006; 2017] и других учёных.

В научных исследованиях и в создании карт зоогеографической тематики необходимо применять ГИС-технологии. Современные геоинформационные технологии позволяют эффективно использовать данные в единой системе координат с возможностью пространственного анализа сопутствующих разнородных карт. При создании всех зоогеографических карт нами используются: лицензионное программное обеспечение (ArcGIS 10.4.1, CorelDRAW X6, Adobe Photoshop); материалы полевых наблюдений; космические снимки г. Перми и Пермского края, предоставленные ГИС-центром ПГНИУ; картографические, статистические, литературные материалы; нормативные документы; базы и банки геоданных. Все источники информации подвергались обязательной проверке на достоверность.

Применение ГИС-технологий в зоогеографическом картографировании позволяет разнообразить не только способы картографического изображения явлений, но и компьютерный дизайн карт. Выбор способов изображения и изобразительных средств для карт различного применения – одна из важнейших задач зоогеографического

картографирования. Например, для начинающих бёрдвотчеров изображение птиц на карте должно быть понятным с первого взгляда, поэтому применяется наглядный знак, точно отображающий ту или иную птицу.

Другой пример: серия карт на тему «Численность охотничьих ресурсов (бурого медведя, выдры, барсука, лося, рыси)» содержит статистическую информацию по муниципальным районам. Эту информацию можно отобразить по-разному: способом количественного фона в графике интенсивность цвета; способом картодиаграммы, используя геометрический диаграммный знак с числовым показателем внутри, или применить наглядную диаграмму; совместить способы количественного фона и картодиаграммы; показать это явление точечным способом, сняв с карты административные границы районов, при этом использовать классическую графику (точки) или наглядную графику (следы животного) (рис. 1). Выбор зависит от назначения карты: для младших школьников – следы и наглядные диаграммы, для старших – точки и геометрические диаграммы, для студентов – комбинация нескольких способов изображения.

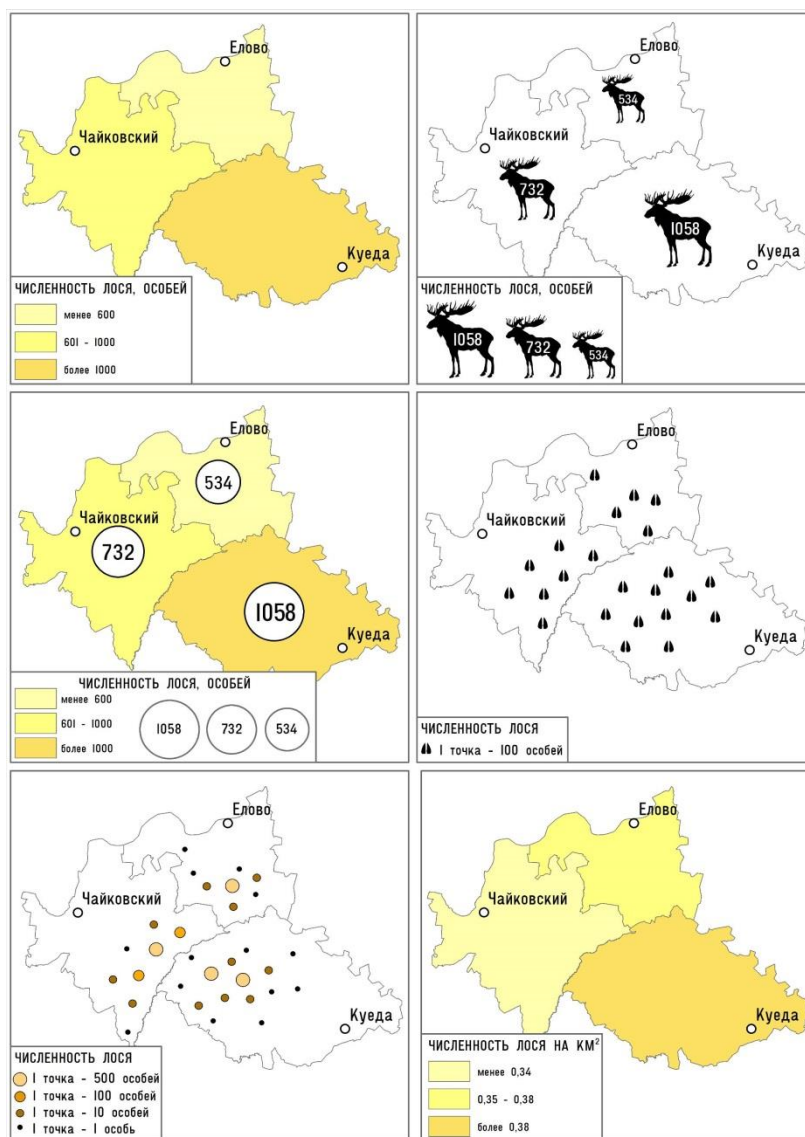


Рис. 1. Выбор способов картографического изображения и изобразительных средств

Fig. 1. The choice of cartographic representation methods and visual aids

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим возможности применения ГИС-технологий в зоогеографическом картографировании на территории Пермского края и города Перми при реализации двух проектов.

*Разработка зоогеографического раздела в проектируемом комплексном атласе «География Пермского края»* – первый проект, реализуемый в рамках темы исследования.

При разработке и создании зоогеографического раздела проектируемого атласа соблюдаются основные принципы комплексного тематического картографирования:

- разрабатывается единая программа для всей серии карт;
- используется единая математическая основа;
- согласованный (сопоставимый) масштабный ряд базовых карт;
- единство элементов географических основ;
- согласованность содержания карт близкой тематики;
- общий подход к генерализации содержания при переходе от одного масштаба к другому;
- одинаковое или сопоставимое построение легенд;
- единство графического оформления.

Содержание карт зоогеографического раздела регионального атласа – информация о составе, структуре, динамическом состоянии и географических закономерностях распространения животных, а также территориальные группировки животных, объединённые общностью их местообитания.

Животный мир Пермского края, расположенного на границе между Европой и Азией, богат и очень разнообразен. На его территории зоологами учтено 339 видов позвоночных животных, из них 37 видов рыб, 9 видов земноводных, 6 видов пресмыкающихся, 225 видов птиц (в том числе пролётных) и 62 вида млекопитающих [Назаров, 2011].

В зависимости от объекта картографирования выделяются несколько групп зоогеографических карт: фаунистические карты, карты животного населения и зооэкологические карты (рис. 2) [Емельянова, Огуреева, 2006].

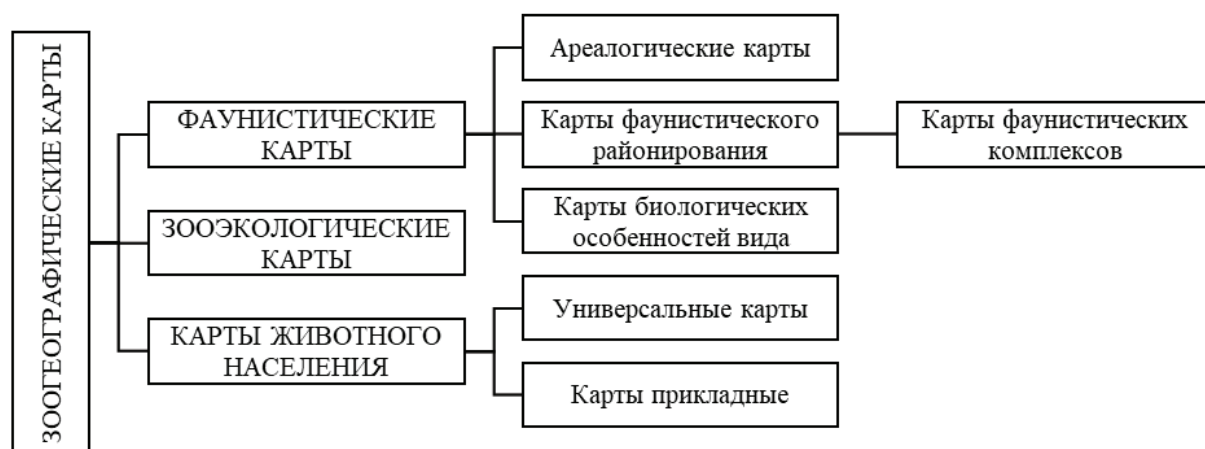


Рис. 2. Основные группы зоогеографических карт

Fig. 2. The main groups of zoogeographic maps

Зоогеографический раздел разрабатывался таким образом, чтобы в него были включены все группы карт данной тематики. Проектируемый учебный комплексный атлас «География Пермского края» для вузов включает в себя 15 карт различной зоогеографической тематики. Группа фаунистических карт представлена ареалогическими картами: «Рептилии», «Амфибии», «Рыбы»; картой фаунистического районирования – «Герпето-географическое районирование» и картами биологических особенностей вида – «Места гнездования перелётных птиц» и карта мест их зимовок. Среди карт животного населения есть и прикладные карты: «Общедоступные и закреплённые охотничьи угодья», «Эпизоотическое состояние по бешенству животных», карты численности охотничьих ресурсов различных животных; есть универсальная карта – «Животный мир». Группа зооэкологических карт представлена картой «Охраняемые виды животных». Карты дополнены справочными и иллюстративными материалами. Наиболее наполненные информацией карты построены в масштабе 1: 2 500 000 и занимают одну страницу формата А4 в атласе. Карты с более простым содержанием строились в масштабе 1: 3 500 000, в альбомном формате две карты занимают одну страницу в атласе. Рассмотрим содержание и принципы создания карт в той последовательности, в которой они будут расположены в проектируемом атласе.

**Карта «Животный мир».** Масштаб карты 1: 2 500 000. Согласно разработанной программе карты, она отображает фаунистические районы и ареалы распространения как многочисленных, так и редких животных, которые представлены двумя классами: млекопитающие и птицы. На территории Пермского края учёные-зоологи выделяют четыре фаунистических района обитания животных: Камско-Вишерское Приуралье, Пермско-Карагайский район, Верхнее Прикамье и Южный (Кунгурский) район. Для показа фаунистических районов выбран способ качественного фона зелёной и зелёно-жёлтой гаммы приглушённого цвета, т.к. вся территория региона расположена в таёжной и лесостепной зонах (средней и южной тайге, и Кунгурской лесостепи). Из большого количества млекопитающих выбраны и показаны на карте обыкновенная лисица, лось, ондатра, рысь, северный олень, выдра, европейская норка, косуля, россомаха и др.; среди птиц – глухарь, грач, лебедь-шипун, болотный лунь, кобчик, скопа, черношейная поганка и др. (рис. 3). Так как карта предназначена для учебных целей в вузе, принято решение использовать для обозначения животных не наглядный знак, а буквенный, где красным цветом показаны малочисленные виды, а чёрным – многочисленные и преобладающие.

В атласах, предназначенных для школьников, не выделяются разделы, поэтому зоогеографическая тематика представлена лишь одной универсальной картой «Животный мир». В отличие от аналогичной вузовской карты, животные показаны наглядными знаками, которые понятны младшим школьникам даже без легенды (рис. 4). В атласе для школьников названы виды зверей и птиц и дано их описание. Обычно для младших школьников применяют не только наглядный знак, но и подрисуночную подпись к нему. В таком случае легенда к карте не требуется.

Рассмотрим технологию изготовления карты «Животный мир», предназначенную для студентов вузов:

1. Создание файловой базы геоданных. Добавление в неё основы, которая включает границу Пермского края, гидрографическую сеть, населённые пункты, аннотации населённых пунктов и гидрографической сети и отмывку рельефа. Основа создана ранее сотрудниками кафедры картографии и геоинформатики ПГНИУ. Создание наборов пространственных объектов: млекопитающие, птицы, фаунистические районы. Создание в них классов пространственных объектов:

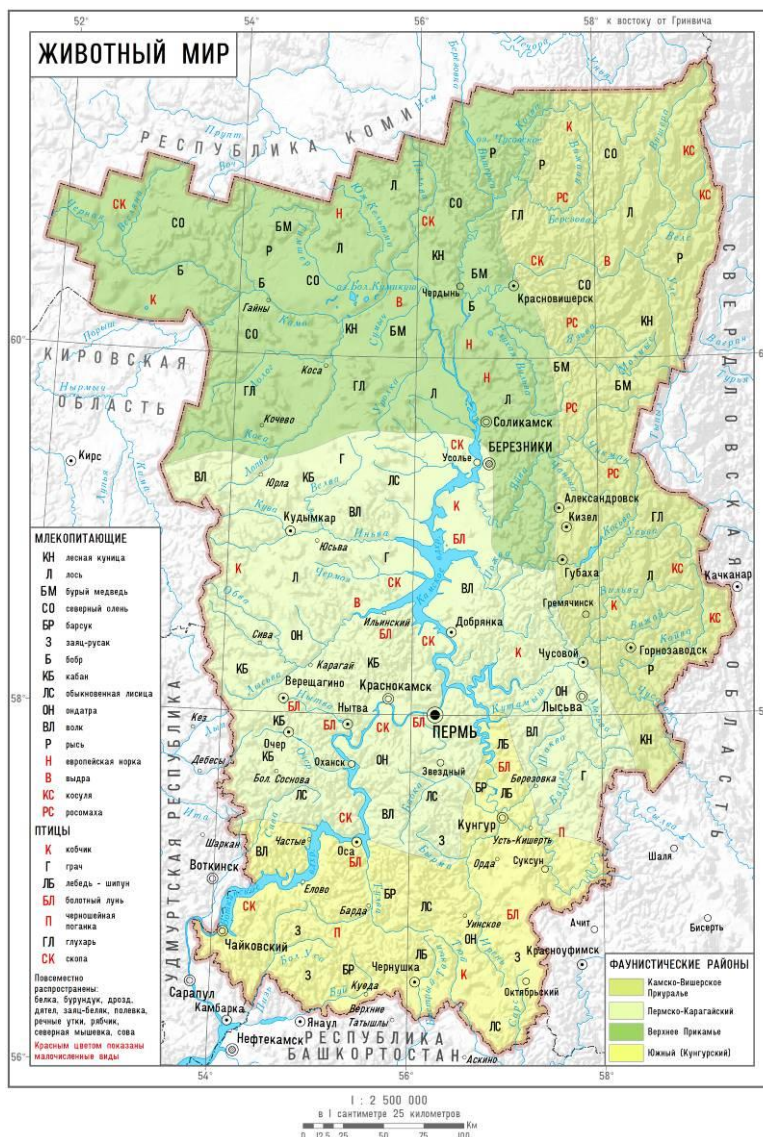


Рис. 3. Карта «Животный мир» для студентов вуза  
Fig. 3. Map “Animal world” for university students

- млекопитающие:
  - лесная куница (тип объекта – точка);
  - лось (тип объекта – точка);
  - бурый медведь (тип объекта – точка);
  - северный олень (тип объекта – точка);
  - барсук (тип объекта – точка);
  - заяц русак (тип объекта – точка);
  - бобр (тип объекта – точка);
  - кабан (тип объекта – точка);
  - обыкновенная лисица (тип объекта – точка);
  - ондатра (тип объекта – точка);
  - волк (тип объекта – точка);
  - рысь (тип объекта – точка);
  - европейская норка (тип объекта – точка);

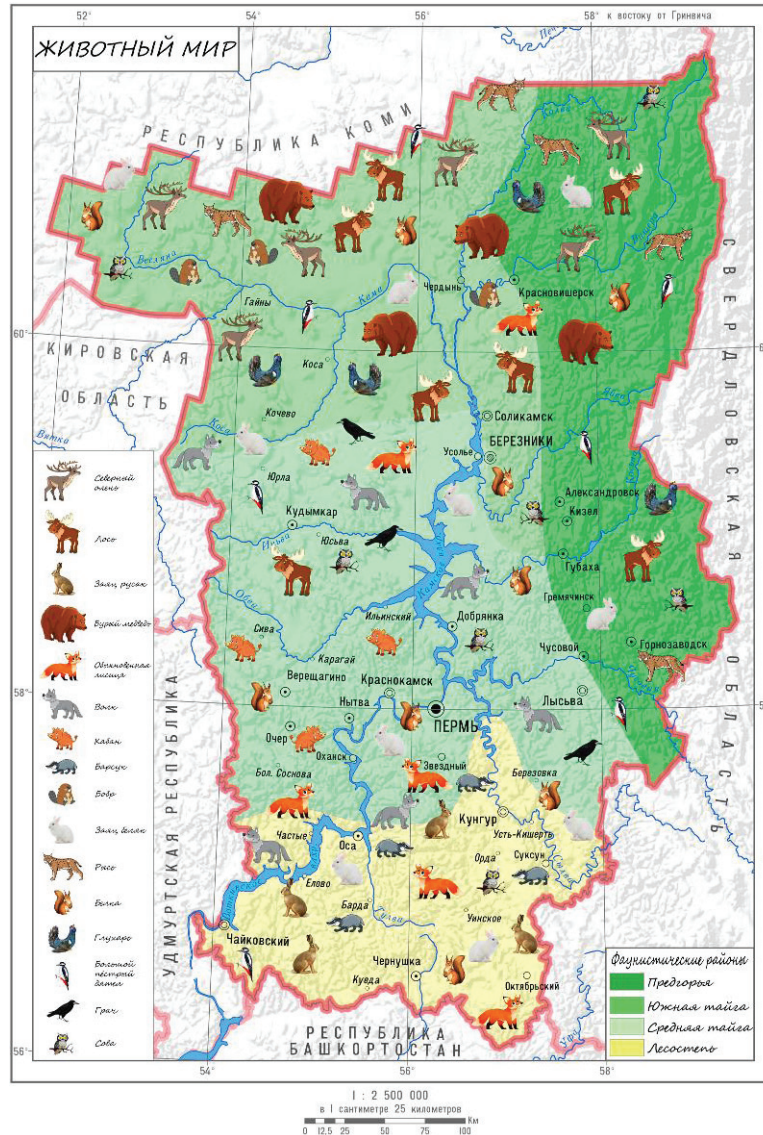


Рис. 4. Карта «Животный мир» для школьников

Fig. 4. Map "Animal world" for school children

- выдра (тип объекта – точка);
- кося (тип объекта – точка);
- росомаха (тип объекта – точка);
- ПТИЦЫ:
  - кобчик (тип объекта – точка);
  - грач (тип объекта – точка);
  - лебедь-шипун (тип объекта – точка);
  - болотный лушь (тип объекта – точка);
  - черношейная поганка (тип объекта – точка);
  - глухарь (тип объекта – точка);
  - скопа (тип объекта – точка);
- фаунистические районы:
  - Камско-Вишерское Прикамье (тип объекта – полигон);
  - Пермско-Карагайский (тип объекта – полигон);



- Верхнее Прикамье (тип объекта – полигон);
  - Южный (Кунгурский) (тип объекта – полигон).
2. Создание проекта карты.
  3. Добавление в проект созданных шейп-файлов и основы.
  4. Оцифровка ареалов животных.
  5. Размещение подписей населённых пунктов и рек с водохранилищами.
  6. Компоновка карты:
    - масштаб 1: 2 500 000 (численный, именованный и линейный);
    - градусная сетка с густотой, равной 2° по широте и долготе;
    - название карты;
    - легенда.
  7. Экспорт карты в формате jpeg или png.
  8. Печать карты.

Таким образом, процесс создания карт зоогеографической тематики состоит из нескольких этапов. Создание карт осуществляется строго по разработанной программе с использованием инструментов ArcGIS. Все карты зоогеографического раздела проектируемого атласа создавались по одинаковому алгоритму.

**Карта «Охраняемые виды животных»** в масштабе 1: 2 500 000 содержит информацию об ареалах животных, занесённых в Красную книгу России и Пермского края [2018]: рыбы, млекопитающие, пресмыкающиеся, земноводные и птицы. Класс рыб представлен обыкновенным тайменем, стерлядью, русской быстрянкой, сазаном. Среди млекопитающих, пресмыкающихся и земноводных особо охраняемыми в Пермском крае считаются только по одному виду из этих классов: русская выхухоль, обыкновенная медянка, обыкновенная чесночница соответственно. На карте показаны занесённые в Красную книгу Пермского края постоянно обитающие в регионе птицы: филин, коростель, большой веретенник, воробьиный сыч, бородачатая неясыть, беркут, ястребиная сова, серая куропатка, тундряная куропатка, среднерусская белая куропатка и перелётные птицы: лебедь-кликун, вертялая камышовка, орлан белохвост, сапсан, перепел, степной лунь.

На карте отображено большое количество животных, ареалы которых могут пересекаться, поэтому для их показа выбирались различные изобразительные средства таким образом, чтобы при наложении они не давали некорректную информацию. Например, для показа животных, распространённых повсеместно, был выбран в качестве условного знака светлый цветовой тон, для показа мест находок животных – буквенный знак, для показа рыб – цветной линейный знак и т.д.

**Карта «Рептилии»** в масштабе 1: 3 500 000 отражает ареалы пресмыкающихся; к ним относятся ящерицы: ломкая веретеница, прыткая ящерица, живородящая ящерица и змеи: гадюка обыкновенная, медянка обыкновенная, уж обыкновенный. Для составления карты были применены несколько видов генерализации, поскольку одни животные имеют рассеянный характер распространения, другие были обнаружены лишь в определённом месте, а на других территориях не встречаются, третьи обитают группами на определённой территории, четвертые – повсеместно. Исходя из этого, для показа рептилий были выбраны разные изобразительные средства таким образом, чтобы при пересечении ареалов карта хорошо читалась.

**Карта «Амфибии»** в масштабе 1: 3 500 000 показывает ареалы земноводных, которые делятся на два подотряда бесхвостые и хвостатые. К бесхвостым относятся зелёная и обыкновенная жаба, обыкновенная чесночница, озёрная, остромордая и травяная лягушка; к хвостатым относятся сибирский углозуб, гребенчатый и обыкновенный тритон. Для обозначения местообитания амфибий были применены различные виды генерализации и

аналогично предыдущей карте выбраны такие изобразительные средства, чтобы при наложении не возникало ошибок чтения карты. Например, амфибии, распространенные повсеместно, были показаны одним цветом, а другие показаны общим контуром или штриховкой.

**Карта «Герпето-географическое районирование»** в масштабе 1: 3 500 000 отражает пять герпето-географических районов, выделенных учёными-зоологами: Юго-западный, Южный, Северный, Низкогорный, район Средневысотных гор. Для обозначения фаунистических районов способом качественного фона были выбраны приглушённые сочетающиеся цвета.

**Карта «Рыбы»** в масштабе 1: 3 500 000 отображает ареалы рыб, среди которых на карте представлен хариус европейский, подуст, белоглазка, судак и чехонь. Кроме этого, на карте присутствуют виды, занесённые в Красную книгу России и Пермского края: хариус европейский (ультракороткоцикловый) и белоперый пескарь. Для составления карты были выбраны наиболее распространённые рыбы, обитающие в реках и водохранилищах Пермского края, равномерно распределённые по территории региона. Ареалы рыб были показаны общим контуром таким образом, чтобы при наложении не возникало проблем чтения карты.

**Карта «Общедоступные и закреплённые охотничьи угодья»** в масштабе 1: 3 500 000 показывает заповедники, заказники (объекты, в которых охота запрещена), охотхозяйства, общедоступные охотничьи угодья, зелёные зоны. На карте изображены не все имеющиеся на территории Пермского края заказники, а лишь государственные природные биологические заказники. Для возможности идентификации объектов цифрами на карте обозначены заповедники и заказники, в легенду вынесена их нумерация с пояснениями. Для показа объектов были выбраны приглушённые сочетающиеся цвета. В качестве дополнительной информации к карте прикреплён перечень охотничьих ресурсов, в отношении которых допускается осуществление промысловой охоты в Пермском крае.

**Карта «Численность охотничьих ресурсов барсука»** в масштабе 1: 3 500 000 отражает количество особей по муниципальным районам Пермского края. Для показа применён способ количественного фона (интенсивность цвета) и выбрана ступенчатая шкала с неравным шагом, однако относительно равномерным: более 400; 301–400; 201–300; 101–200; 51–100; 20–50; менее 20. Такая шкала выбрана, поскольку в каждый класс попадает практически одинаковое количество районов, но имеются такие, где количество животных гораздо меньше средних показателей, что не позволяет нам их объединить в классы с равным шагом. Более точно информацию о численности животных передаёт способ картодиаграмм – круговые диаграммы разного размера с числами внутри. Такое же сочетание способов изображения применяется и на других картах схожей тематики.

**Карта «Численность охотничьих ресурсов бурого медведя»** в масштабе 1: 3 500 000 показывает количество особей по муниципальным районам Пермского края. Карта строилась аналогично предыдущей; также была выбрана шкала с неравномерным шагом: более 550; 301–550; 201–300; 151–200; 101–150; 51–100; менее 50. Такое разделение связано с тем, что в каждый класс попадает разное количество районов, что не позволяет нам их объединить в классы с равным интервалом.

**Карта «Численность охотничьих ресурсов выдры»** в масштабе 1: 3 500 000. На ней отображено количество особей по муниципальным районам Пермского края. Для показателя «численность охотничьих ресурсов выдры» была выбрана шкала с неравномерным шагом: более 200; 121–200; 91–120; 61–90; 46–60; 30–45; менее 15, потому что в районах обитает разное количество особей, большинство из которых имеют показатели от 40 до 80, что не позволяет нам объединить их в классы с равным интервалом.

**Карта «Численность охотничьих ресурсов лося** в масштабе 1: 3 500 000 также отображает количество лосей по муниципальным районам Пермского края, и для показа была выбрана шкала с неравным шагом, однако относительно равномерным: более 3000; 1501–3000; 1101–1500; 801–1100; 501–800; 150–500; менее 150. Связано это с тем, что в каждый класс попадает практически одинаковое количество районов, но имеются такие, где количество животных гораздо больше или меньше; таких районов немного, но их следует определить в отдельные классы.

**Карта «Численность охотничьих ресурсов рыси»** в масштабе 1: 3 500 000, как и предыдущие карты данной тематики, отражает количество особей по муниципальным районам Пермского края. Для показателя «численность охотничьих ресурсов рыси» была выбрана шкала: более 250; 101–250; 51–100; 31–50; 11–30; 5–10; менее 5. Разделение на неравные классы объясняется тем, что средние показатели по территории края составляют от 20 до 30 особей, однако существует несколько районов, которые отличаются намного меньшими или, наоборот, большими показателями, поэтому для них следует сделать отдельные классы.

Карты этой тематики дополнены статистической информацией о динамике численности охотничьих ресурсов на территории региона в 2009–2017 гг. и нормативами допустимого изъятия охотничьих ресурсов.

**Карта «Эпизоотическое состояние по бешенству животных»** в масштабе 1: 3 500 000 показывает районы, в которых зафиксированы случаи бешенства животных, и населённые пункты, в которых был введён карантин по видовому составу больных бешенством животных: барсук, енотовидная собака, лиса, собака. Цифрами на карте обозначены населённые пункты, в которых введён карантин, в легенду вынесена их нумерация и названия. Для обозначения районов, в которых зафиксированы случаи бешенства животных, способом ареалов были выбраны приглушённые сочетающиеся цвета. Карта дополнена диаграммами «Количество лиц, получивших различные повреждения от животных, по годам» и «Количество зарегистрированных случаев бешенства, по годам» (рис. 5).

**Карта «Места гнездования перелётных птиц»** в масштабе 1: 3 500 000 показывает охраняемые виды птиц, такие как болотный лунь, большая выпь, краснозобая гагара, коростель, кулик-сорока, лебедь-кликун, средний кроншнеп.

Для составления карты были выбраны наиболее распространённые перелётные птицы, занесённые в Красную книгу Пермского края, равномерно распределённые по всей территории. Для показа распространения птиц были выбраны разные способы картографического изображения: так, для отображения мест находок гнёзд был выбран способ значков (буквенный значок), для показа распространённых повсеместно птиц – цвет, для птиц, распространённых на определенной территории, – знак ареала.

**Карта «Места зимовки перелётных птиц Пермского края»** построена в двух масштабах 1: 260 000 000 (мир) и 1: 120 000 000 (Европа, Африка, Южная Азия). На картах отображены ареалы зимовки охраняемых перелётных видов птиц: болотный лунь, большая выпь, краснозобая гагара, коростель, кулик-сорока, лебедь-кликун, средний кроншнеп. Одни птицы были показаны линейным знаком, поскольку обитают вдоль водных границ, другие, имеющие обширные ареалы мест зимовки, были показаны штриховкой, границей и цветом.

Таким образом, вся серия карт для зоогеографического раздела разрабатывается и создаётся по единому алгоритму с использованием программного комплекса ArcGIS. Объём зоогеографического раздела в комплексном атласе составляет 10 страниц.

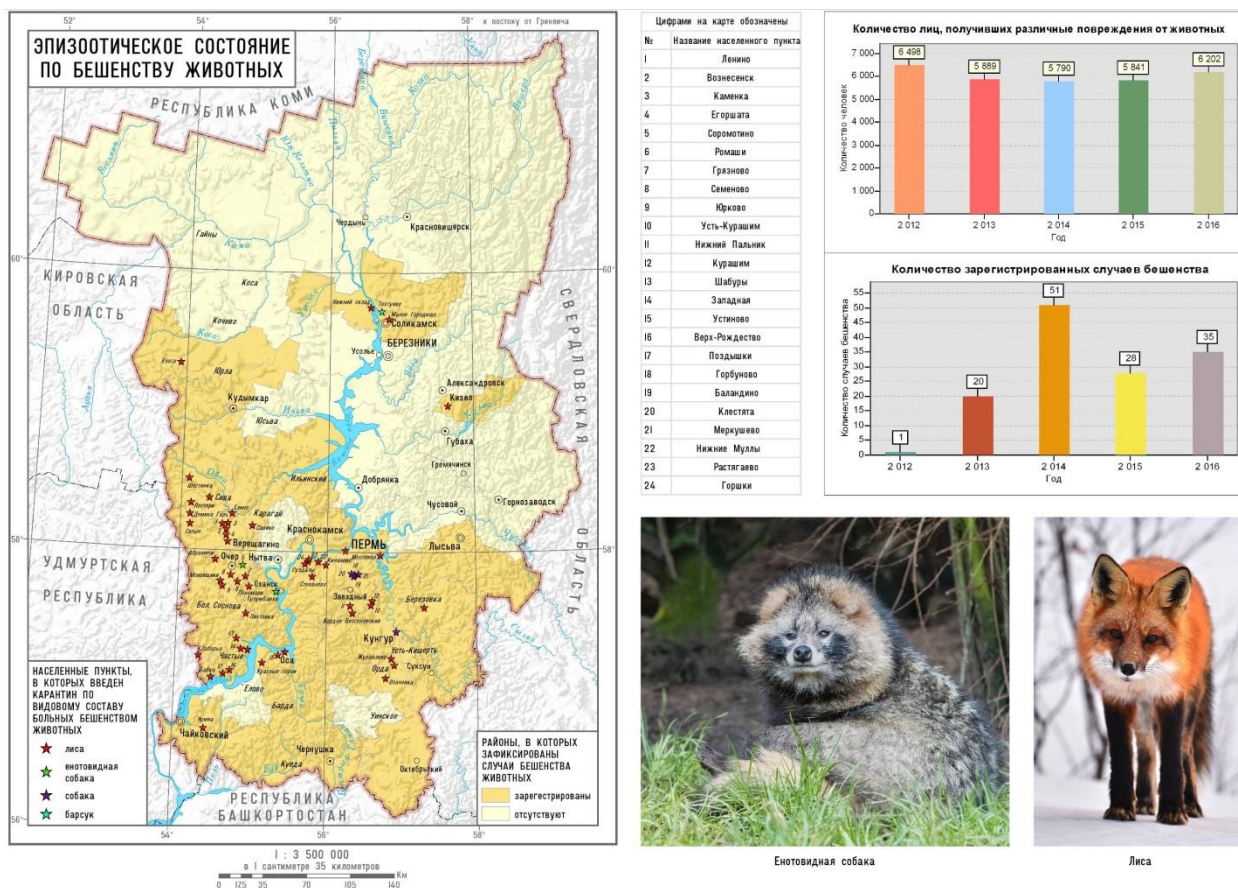


Рис. 5. Карта «Эпизоотическое состояние по бешенству животных»

Fig. 5. Map “Epizootic state of rabies in animals”

**Разработка карты-буклета «Бёрдинг в Перми»** – это второй проект, реализуемый в рамках темы нашего исследования.

Всё большую популярность в мире, в нашей стране и в Перми приобретает такой активный вид отдыха, как бёрдинг или любительская орнитология. В последнее время сотни активных наблюдателей разного возраста участвуют в акциях по учёту птиц, конкурсах, экскурсиях или в соревнованиях по бёрдвотчингу. Данные о распространении птиц на территории г. Перми периодически публикуются в монографиях [Шенель, Матвеева, 2014; 2020]. Орнитологические наблюдения в городе ведутся разными людьми, в том числе специалистами-орнитологами и любителями, постоянно дополняя сведения о птицах, обитающих в Перми. Активное участие в сборе информации для создания карты принимали учащиеся пермской школы № 132 и члены общества «Бёрдинг в Перми» под руководством Е.Ю. Харитоновой.

Карты, содержащие и иллюстрирующие информацию о городской орнитофауне, ранее никогда не создавались и не издавались. Разработка и создание карты «Бёрдинг в Перми» для начинающих наблюдателей на основе уточнённых актуальных данных – это первый уникальный опыт. Для того чтобы сделать карту публичной и удобной при наблюдениях за птицами, изготовили её в виде буклета. Начинающим бёрдвотчерам буклет даст возможность проведения самостоятельных наблюдений на ближайших к месту жительства городских лесов, парков, скверов, долинах рек и жилых кварталов. Сейчас информацию о распространении даже обычных и массовых, но не банальных видов птиц можно найти лишь в специализированной литературе, которая выпускается

очень маленьким тиражом. А карта-буклет предназначена для занятий бёрдингом – наблюдение, изучение, определение и описание птиц на территории г. Перми (в городских парках, долинах малых рек, ООПТ, на улицах и во дворах); в отличие от увесистого определителя, её легко взять с собой.

При создании карты города Перми выбрана равноугольная поперечно-цилиндрическая проекция Гаусса-Крюгера; средний меридиан 56 °в.д., густота градусной сетки составляет 20 минут по широте и долготе. Масштаб карты 1: 65 000 (в 1 см – 650 м), т.е. формат карты в развороте А1. На выбор масштаба в первую очередь повлияло тематическое наполнение, т.к. данная карта требует отображения большого количества ареалов птиц, а при выборе более мелкого масштаба карта будет хуже читаться и содержать меньшее количество информации. Географическую основу карты составляют границы города и прилегающей территории, гидрографическая сеть (Камское и Воткинское водохранилища и основные малые реки), квартальная дорожно-уличная сеть.

Совместно с орнитологами было разработано тематическое содержание карты и выбраны способы картографического изображения и графики. Так как бёрдингом могут заниматься люди любого возраста и разных профессий, карта должна быть простой и понятной каждому пользователю. Распространение птиц и места фиксации некоторых видов показаны способом ареалов – площадными наглядными знаками, для чего с разрешения автора были использованы цветные рисунки птиц В.К. Рябицева [Рябицев, 2020]. Из множества обитающих в городе пернатых были выбраны легко узнаваемые по внешнему виду и часто встречаемые виды птиц, такие как серая цапля, кряква, чирок-свиистунок, хохлатая чернеть, чёрный коршун, перепелятник, тетеревиный, рябчик, чибис, бекас, вальдшнеп, озёрная чайка, сизая чайка, кукушка обыкновенная, ушастая сова, длиннохвостая неясыть, большой пестрый дятел, желна, лесной конёк, обыкновенный жулан, ворон, сойка, свиристель, горихвостка, зарянка, соловей, белобровик, певчий дрозд, длиннохвостая синица, буроголовая гаичка, поползень, черноголовый щегол, чиж, снегирь, обыкновенная овсянка, тростниковая овсянка. Особое внимание уделялось городским лесам и охраняемым природным территориям, которые на карте показаны способом ареалов оттенками зелёного цвета и обозначены цифрами на карте. В легенде указаны названия ООПТ. Фрагмент карты, отображающий орнитофауну в ООПТ, показан на рис. 6.

Технология изготовления карты «Бёрдинг в Перми» в ArcMap 10.4.1.:

1. Создание файловой базы геоданных в ArcCatalog 10.4.1.
2. Добавление в базу геоданных основы: граница города Перми и прилегающей территории, гидрографическая сеть, отмывка рельефа.
3. Создание в базе геоданных наборов классов объектов, а в них классов пространственных объектов:
  - Птицы:
    - серая цапля (тип объекта – точка);
    - кряква (тип объекта – точка);
    - и т.д.
  - ООПТ (тип объекта – полигон).
4. Загрузка в проект созданных шейп-файлов, а также шейп-файлов разработанной географической основы.
5. Оцифровка всех птиц и границ ООПТ.
6. Компоновка карты:
  - Масштаб 1: 65 000 (численный, именованный и линейный);



*Рис.6. Фрагмент карты «Бёрдинг в Перми»  
Fig. 6 Fragment of the map “Birding in Perm”*

- Географическая сетка;
  - Легенда;
  - Название карты;
7. Экспорт карты в формате JPG;
  8. Печать карты.

Полезная для начинающих наблюдателей информация об экологических особенностях показанных на карте видов птиц, их изображения, рекомендации по времени наблюдений, а также изображение и видовые признаки обитающих на всей территории города птиц (полевой воробей, белая трясогузка, большая синица и др.) [Васильева, 2019; Рябицев, 2020] размещена на обратной стороне карты. Карта складывается до формата А4, и её удобно брать с собой в полевые выходы. Таким образом, в декабре 2020 г. издана карта-буклет «Бёрдинг в Перми» в помощь начинающим бёрдвотчерам.

## **ВЫВОДЫ**

При реализации двух проектов – разработка зоогеографического раздела в комплексном атласе «География Пермского края» и создание карты-буклета «Бёрдинг в Перми» – была отработана методика создания карт различной зоогеографической тематики с применением современных ГИС-технологий.

Разработка и создание серии карт для зоогеографического раздела (как и всего атласа) основаны на анализе рабочих учебных программ, базирующихся на федеральном государственном образовательном стандарте (ФГОС). Согласно требованиям этих документов, учащиеся (школьники и студенты вузов) должны знать не только животный мир России, но и родного края – структуру животного мира, географические закономерности распределения и условий обитания, приводить примеры наиболее

характерных обитателей таёжной и лесостепной зон, называть охраняемые виды животных и т.д.

Интересен и опыт коллективной разработки, создания и издания карты-буклета «Бёрдинг в Перми». Карта предназначена для применения в таком активном виде отдыха вблизи от места проживания, как бёрдвотчинг. Благодаря использованию рисунков птиц в виде наглядных условных знаков она понятна любому пользователю. С картой-буклетом начинающие бёрдвотчеры получили не только орнитологическую, но и картографическую поддержку своего увлечения. Разработанный алгоритм создания аналогичных карт может быть транслирован на территории любого города.

Обобщение разрозненных источников информации в виде создания тематических баз данных и создания зоогеографических карт различной тематики и назначения позволяет наглядно представить полную характеристику животного мира региона. Применение современных ГИС-технологий не только упрощает технологический процесс создания карты, но и даёт возможность быстрой актуализации поступающей новой информации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Пермской области. География. История. М.: ДИК, 1999. 48 с.
2. Атлас Пермского края. Пермь: Раритет–Пермь, 2012. 124 с.
3. *Берлянт А.М.* Картография. М.: Книжный дом Университет, 2010. 326 с.
4. *Васильева А.А.* Птицы в городе. М.: Изд-во Манн, Иванов, и Фербер, 2019. 104 с.
5. *Емельянова Л.Г., Огуреева Г.Н.* Биогеографическое картографирование. М.: Географический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, 2006. 132 с.
6. *Емельянова Л.Г., Огуреева Г.Н.* Биогеографическое картографирование. М.: Юрайт, 20017. 134 с.
7. *Заруцкая И.П., Красильникова Н.В.* Картографирование природных условий и ресурсов. М.: Недра, 1988. 239 с.
8. Красная книга Пермского края. Пермь: Алдари, 2018. 230 с.
9. *Лурье И.К.* Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков. М.: Книжный дом «Университет», 2008. 424 с.
10. *Назаров Н.Н.* География Пермского края. Часть 1. Природная (физическая) география. Учебное пособие. Пермь: Пермский университет, 2006. 196 с.
11. *Салищев К.А.* Комплексные региональные атласы. М.: Издательство Московского университета, 1976. 638 с.
12. *Сваткова Т.Г.* Атласная картография. М.: Аспект Пресс, 2002. 203 с.
13. *Рябицев В.К.* Птицы европейской части России: справочник-определитель в 2 т. М., Екатеринбург: Кабинетный учёный, 2020. Т. 2 427 с.
14. *Тупикова Н.В., Комарова Л.В.* Принципы и методы зоологического картографирования. М.: МГУ, 1979. 97 с.
15. *Шепель А.И., Матвеева Г.К.* Птицы города Перми. Пермь: Книжный мир, 2014. 173 с.
16. *Шепель А.И., Матвеева Г.К.* Птицы города Перми. Пермь: Книжный мир, 2020. 362 с.

### REFERENCES

1. Atlas of the Perm region. Geography. History. Moscow: DIK, 1999. 48 p. (in Russian).
2. Atlas of the Permian Region. Perm: Raritet-Perm, 2012. 124 p. (in Russian).
3. *Berlyant A.M.* Cartography. Moscow: Book House University, 2010. 326 p. (in Russian).

4. *Emelyanova L.G., Ogureeva G.N.* Biogeographical cartography. Moscow: Geographical Faculty of Moscow State University named after M.V. Lomonosov, 2006. 132 p. (in Russian).
  5. *Emelyanova L.G., Ogureeva G.N.* Biogeographical cartography. Moscow: Urite, 2017. 134 p. (in Russian).
  6. Red book Perm region. Perm: Aldary, 2018. 230 p. (in Russian).
  7. *Lurie I.K.* Geoinformation cartography. Geoinformatics and digital processing methods of space images. Moscow: Book House University, 2008. 424 p. (in Russian).
  8. *Nazarov N.N.* Geography of the Perm region. Part 1. Natural (physical) geography. Tutorial. Perm: Perm University, 2006. 196 p. (in Russian).
  9. *Ryabitsev V.K.* The Birds of European part of Russia: reference guide in 2 v. Moscow, Ekaterinburg: Office scientist, 2020. (in Russian).
  10. *Salishchev K.A.* Integrated regional atlases. Moscow: Moscow University Press, 1976. 638 p. (in Russian).
  11. *Swatkova T.G.* Atlas Cartography. Moscow: Aspect Press, 2002. 203 p. (in Russian).
  12. *Tupikova N.V., Komarova L.V.* Principles and Methods of zoological cartography. M.: MSU, 1979. 97p. (in Russian).
  13. *Shepel A.I., Matveeva G.K.* The Birds of Perm City. Perm: Books World, 2014. 173 p. (in Russian).
  14. *Shepel A.I., Matveeva G.K.* The Birds of Perm City. Perm: Books World, 2020. 362 p. (in Russian).
  15. *Vasilyeva A.A.* The Birds in the City. Moscow: Publishing House Mann, Ivanov, and Ferber, 2019. 109 p. (in Russian).
  16. *Zarutskaya I.P., Krasilnikova N.V.* Cartography of natural conditions and resources. Moscow: Nedra, 1988. 239 p. (in Russian).
-



УДК: 574.9(470.11)

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-425-442

О.В. Морозов<sup>1</sup>, О.И. Маркова<sup>2</sup>

## НОВЫЕ НАХОДКИ РЕДКИХ ДЛЯ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ ВИДОВ В ЛЯМИЦКОМ ЛАНДШАФТЕ ОНЕЖСКОГО ПОЛУОСТРОВА

### АННОТАЦИЯ

Онежский полуостров расположен на северо-западе России в Архангельской области, выдаётся в Белое море, находится в области переходного климата от океанического к континентальному умеренного климатического пояса, относится к центральному сектору зоны северной тайги. Флора и фауна полуострова отличаются большим разнообразием. Значительная часть природных комплексов имеет высокую степень сохранности и является идеальной для биосферного мониторинга. В связи с интенсивными промышленными лесозаготовками на полуострове существует необходимость выявления редких видов живых организмов и определения мер их охраны.

В статье приводятся данные о находках мест обитаний 11 редких видов, обнаруженных автором в процессе полевых маршрутов по Лямецкому ландшафту в период с 2009 по 2020 гг. Находки 10 из 11 видов ранее не публиковались. В 2020 г. было повторно изучено состояние ещё не образовавших устойчивую популяцию группы особей 1 из 11 видов, находка которого ранее публиковалась. Данный вид (дербянка колосистая) является новым для Архангельской и всех смежных областей и нуждается в занесении в Красную книгу Архангельской области, в которую занесены остальные 10 видов. 4 вида из них занесены также в Красную книгу Российской Федерации. Находки видов относятся к землям разного назначения: к запретной полосе лесов и к землям лесного фонда, арендованным лесозаготовительным предприятием. В статье рассмотрены численность обнаруженных видов и такой их лимитирующий фактор, как рубка леса. Проведена оценка целесообразности мер охраны видов. Выявлено, что одни из них (сплахнумы) увеличиваются в численности благодаря рубкам, численности других рубки не угрожают (гадюка обыкновенная и др.), для сохранения численности третьих необходимы специальные меры охраны (лобария лёгочная, рогатик усечённый и др.). Полученная информация обработана картографически с использованием геоинформационных технологий и может быть использована для пополнения базы данных видов Красной книги и для организации их охраны.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** биогеография, Красная книга, находка, Онежская гряда

<sup>1</sup> Академия Международного эколого-политологического университета, Экологический факультет, Кафедра фундаментальной экологии и природопользования, ул. Космонавта Волкова, д. 20, 127299, Москва, Россия, *e-mail*: [oleg777morozov@ya.ru](mailto:oleg777morozov@ya.ru)

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Научно-исследовательская лаборатория комплексного картографирования, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: [solntsevaolga1401@gmail.com](mailto:solntsevaolga1401@gmail.com)

Oleg V. Morozov<sup>1</sup>, Olga I. Markova<sup>2</sup>

## NEW LOCALITIES OF RARE FOR THE ARKHANGELSK REGION SPECIES IN THE LYAMITSKY LANDSCAPE OF THE ONEGA PENINSULA

### ABSTRACT

The Onega Peninsula is located in the north-west of Russia in the Arkhangelsk Region, juts out into the White Sea, is located in an area of a transitional climate from an oceanic to a continental temperate climatic zone, belongs to the central sector of the northern taiga zone. The flora and fauna of the peninsula are very diverse. A significant part of natural complexes is highly preserved and is ideal for biosphere monitoring. In connection with intensive industrial logging on the peninsula, there is a need to identify rare species of living organisms and determine measures for their protection.

The article provides data on the finds of habitats of 11 rare species discovered by the author during field routes along the Lyamitsky landscape in the period from 2009 to 2020. Finds of 10 out of 11 species have not been previously published. In 2020, the state of a group of individuals of 1 of 11 species that had not yet formed a stable population was reexamined, the find of which was previously published. This species (derbyanka spikate) is new for the Arkhangelsk and all adjacent regions and needs to be entered into the Red Book of the Arkhangelsk Region, which includes the remaining 10 species. 4 species of them are also included in the Red Book of the Russian Federation. The finds of the species belong to the lands of different purposes: to the forbidden zone of forests and to the lands of the forest fund leased by a logging company. The article discusses the number of discovered species and such a limiting factor as logging. The assessment of the feasibility of measures for the protection of species has been carried out. It was revealed that some of them (splachnums) increase in number due to felling, the number of others is not threatened by felling (common viper, etc.), to preserve the number of the third, special protection measures are required (pulmonary lobaria, truncated horn, etc.). The information obtained is processed cartographically using geoinformation technologies and can be used to replenish the database of the Red Book species and to organize their protection.

**KEYWORDS:** biogeography, Red Book, finding, Onega ridge

### ВВЕДЕНИЕ

Онежский полуостров расположен в южной части Белого моря на северо-западе России, на территории Приморского и Онежского районов Архангельской области. Наземная граница, отделяющая полуостров от материка, соединяет устья рек Северная Двина и Онега. Унско-Ухтинским перешейком полуостров разделяется на две части: северо-западную (отдалённую в море) и юго-восточную (причлeнённую к матерiku широким основанием).

На полуострове находится национальный парк «Онежское Поморье», созданный в 2013 г.<sup>3</sup> Парк создан для сохранения нетронутых старовозрастных массивов северной

---

<sup>1</sup> Academy of International Independent Ecological and Political University, Faculty of Ecology, Department of the Fundamental Ecology and Nature Management, Kosmonavt Volkov str., 20, 127299, Moscow, Russia, *e-mail*: [oleg777morozov@ya.ru](mailto:oleg777morozov@ya.ru)

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Research Laboratory of the Integrated Mapping, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail*: [solntsevaolga1401@gmail.com](mailto:solntsevaolga1401@gmail.com)

<sup>3</sup> Онежское Поморье — Википедия. Электронный ресурс: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Онежское\\_Поморье](https://ru.wikipedia.org/wiki/Онежское_Поморье) (дата обращения 26.04.2021).

тайги и сохранения традиционного образа жизни Беломорья. Он занимает площадь 201 668 га, включая земли лесного фонда площадью 180 668 га и водного фонда площадью 21 000 га (без изъятия их из хозяйственной эксплуатации)<sup>1</sup>. Однако первоначально планировалось охватить всю отдалённую часть полуострова; площадь была значительно сокращена в процессе согласования<sup>2</sup>.



*Рис. 1. Местонахождение отдалённой части Онежского полуострова*  
*Fig. 1. Location of a remote part of the Onega Peninsula*

В 2016 г. вышел приказ Минприроды России о присоединении национального парка «Онежское Поморье» к национальному парку «Кенозерский», расположенному в юго-западной части Архангельской области на стыке Плесецкого и Каргопольского административных районов. В 2004 г. национальный парк включён во Всемирную сеть биосферных резерватов ЮНЕСКО<sup>3</sup>.

До создания национального парка на территории полуострова располагались Кяндский и Унский заказники<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> Национальный парк «Онежское Поморье». Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Официальный сайт. Электронный ресурс: <https://onpomor.ru/about/nash-park.php> (дата обращения 26.04.2021).

<sup>2</sup> Проект национального парка «Онежское поморье». В 11 кн. 1998–1999.

<sup>3</sup> Кенозерский национальный парк. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Официальный сайт. Электронный ресурс: <http://www.kenozero.ru/o-parke/materialy/obshchaya-informatsiya/> (дата обращения 27.04.2021).

<sup>4</sup> ООПТ России. Электронный ресурс: <http://oopt.aari.ru/oopt> (дата обращения 25.04.2021).

Кяндский биологический заказник регионального значения, созданный в 1967 г., располагался на территории Нижмозерского лесничества, в южной части Онежского полуострова в устье р. Кянды<sup>1</sup>. Общая площадь заказника составляла 12 500,0 га. Он был создан в целях охраны животного мира, увеличения численности охотничье-промысловых зверей и птиц, улучшения условий обитания речного бобра и усиления охраны диких животных. Ликвидация заказника произошла в 1997 г. в связи с истечением срока действия заказного режима.

Региональный биологический Унский заказник был создан в 1996 г., имел общую площадь 51 507,0 га (из них без изъятия из хозяйственного использования 30 507,0 га) и площадь морской акватории 21 000,0 га, включал в себя всю акваторию Унской губы и часть территории Верхнеозерского участкового лесничества Северодвинского лесничества. Целью создания ООПТ явилось сохранение и воспроизводство рыбных запасов (наваги, кумжи, сёмги) и поддержание общего экологического баланса. Особо редкими охраняемыми видами заказника являлись кольчатая нерпа, морской заяц, белуха, касатка, финвал. Феноменом заказника был уникальный гидрографический режим Унской губы. В 2017 г. заказник включён в состав национального парка [Александров и др., 2011; Беликов и др., 2011].

Несмотря на активную природоохранную деятельность, территории полуострова находятся в интенсивном лесохозяйственном использовании. Это отображено на мировой электронной карте глобальных изменений лесного покрова [Hansen et al., 2013], составленной по материалам спутника Landsat. Негативными процессами при этом являются эрозия почв, снижение биоразнообразия, учащение незаконных рубок, пожаров, браконьерства, заболачивание безлесных пространств, слабое лесовосстановление [Браславская и др., 2020]. На перешейке и континентальной части полуострова наблюдается прирост лесных территорий в результате лесопосадок или естественного возобновления. Однако молодые древостои по меньшей мере в течение 50 лет не могут полноценно регулировать гидрологический цикл [Карпечко, Бондарик, 2010], и процесс заболачивания и задержки лесовосстановления остаётся актуальным [Браславская и др., 2020].

В связи с продвижением интенсивных промышленных лесозаготовок в глубь Онежского полуострова для рационального природопользования становится актуальной тема обитания на полуострове редких видов живых организмов. К необходимым мерам охраны некоторых видов относятся выявление новых мест обитаний и контроль за состоянием популяций. Наравне с видами, нуждающимися в сохранении их мест обитаний от вырубок леса, здесь присутствуют охраняемые в Архангельской области виды, в такой защите не нуждающиеся. Численность некоторых видов (сплахнумов), наоборот, на вырубках увеличивается.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Онежский полуостров находится в области атлантикоарктического влияния умеренного климатического пояса, которая характеризуется избыточным увлажнением [Географический..., 1983]. Полуостров относится к центральному сектору зоны северной тайги Европейской России [Заугольнова, Мартыненко, 2014]. Согласно физико-географическому районированию он входит в Онежско-Двинскую провинцию лесной зоны Русской равнины [Физико-географическое..., 1968, с. 67–68]. По ботанико-географическому районированию полуостров относится к Североевропейской таёжной провинции Евразийской таёжной (хвойнолесной) области [Растительность..., 1980, с. 12,

<sup>1</sup> Онежский полуостров — Википедия. Электронный ресурс: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Онежский\\_полуостров](https://ru.wikipedia.org/wiki/Онежский_полуостров) (дата обращения 25.04.2021).

16] и находится примерно посередине полосы подзоны северной тайги. На территории полуострова сочетаются зональные, интразональные и аazonальные растительные сообщества. Флора и фауна полуострова описаны в проекте национального парка «Онежское поморье» (Проект..., 1998–1999 – см. сноску выше). Они отличаются большим разнообразием, обусловленным морским окружением, обилием водно-болотных угодий, положением на стыке ареалов арктических, арктальпийских, бореальных видов европейской и сибирской флор и сохранностью местообитаний.

Благодаря территориальной автономности, удалённости от транспортных путей и малой населённости отдалённой части полуострова на ней сохранились нетронутые хозяйственной деятельностью коренные северотаёжные ландшафты с комплексом климаксовых экосистем еловых и сосновых лесов, образующие единый компактный массив. Территория является идеальным модельным регионом биосферного мониторинга. Свидетельством исключительной сохранности естественных местообитаний является большое количество на полуострове видов Красной книги. Предположительно 48–61 наземный вид полуострова включён в Красную книгу Архангельской области [2020], что составляет 16–19 % от всех наземных видов Красной книги.

Флора полуострова определяется в целом как европейская, бореально-гипоарктического характера с сибирскими элементами [Ландшафтно-экологическая..., 1998]. Здесь на площади 1 млн га обитает 512 видов сосудистых растений [Морозов, 2013–2021], что составляет 47 % всех видов сосудистых растений Архангельской области без Ненецкого автономного округа [Шмидт, 2005, с. 4], площадь которой превышает площадь Онежского полуострова в 59 раз. Виды флоры сосудистых растений полуострова представлены 81 семейством. Здесь обитает 11 реликтовых видов послеледникового времени и голоценового климатического оптимума [Морозов, 2013–2021].

**Лобария лёгочная** занесена также в Красную книгу Российской Федерации [Истомина, 2008] как уязвимый вид, сокращающийся в численности в результате изменения условий существования, разрушения мест обитания. В Архангельской области он отмечен во всех районах, кроме Вельского и Устьянского [Тарасова и др., 2020]. Уничтожение местообитаний в результате вырубок старовозрастных лесов является одним из основных лимитирующих факторов этого вида. Единица бесполого размножения вида распространяется на расстояние 30–50 м, полового – 150–300 м [Рай и др., 2018], при этом имеет значение наличие подходящих деревьев (чаще всего осина, ива, рябина) и микроклиматических условий в радиусе разлёта единиц размножения. Для обеспечения устойчивости и генетической разнородности популяции необходимо не менее 50 талломов в пределах расстояния, доступного половому размножению. Очень важно сохранять куртины размером не менее 0,15–0,25 га вокруг групп из 10–15 деревьев, на которых произрастает по несколько средних и крупных талломов. Если количество деревьев со средними и крупными талломами в группе 3–7, рекомендуется сохранять куртину размером не менее 0,04–0,1 га. В остальных случаях рекомендуется оставлять отдельно стоящие деревья с талломами в группе с другими 3–5 деревьями или хотя бы в окружении подростка, подлеска, молодняка.

**Рогатик усечённый** в Архангельской области был отмечен ранее в Приморском и Шенкурском районах [Ezhov et al., 2017].

**Строфария сине-зелёная** отмечена в Онежском (в Лямецком ландшафте), Пинежском, Приморском, Шенкурском районах Архангельской области [Ежов, 2020].

**Саркосома шаровидная** занесена также в Красную книгу Российской Федерации [Попов, 2008] как вид, сокращающийся в численности в результате изменения условий существования и разрушения мест обитания. В Архангельской области он отмечен в Вельском, Верхнетоемском, Ленском, Онежском и Пинежском районах Архангельской

области [Ежов, 2012; Ежов, Еришов, 2020; Ефимов и др., 2006]. Очевидно, что малое число мест находок связано с появлением плодовых тел в период малого посещения лесов. Вырубка лесов является лимитирующим фактором.

**Сплахнум бутылковидный** за последние 10 лет отмечен в Вельском, Каргопольском, Коношском, Мезенском и Пинежском районах Архангельской области [Чуракова, Мамонтов, 2020]. Растёт на экскрементах домашнего скота или медведя. Бурые медведи, привлекаемые запахом зрелых фруктов, который источают коробочки, пробуют их на вкус и таким образом разносят споры, не погибающие в процессе пищеварения<sup>1</sup>. Информация об участии медведей в распространении сплахнума заимствована из иностранного источника, поэтому она требует освещения в русскоязычной среде. Сокращение площадей старых хвойных заболоченных лесов – мест обитания видов – является лимитирующим фактором [Чуракова, Мамонтов, 2020]. Для вида желательна сохранение участков заболоченных сосновых лесов по кромкам верховых болот.

**Сплахнум жёлтый** за последние 10 лет отмечен в Няндомском, Мезенском и Пинежском районах Архангельской области [Чуракова, Мамонтов, 2020]. Во всех местах представлен единственной дерновинкой. Растёт на разложившихся экскрементах оленей, домашнего скота, медведя в сырых лесах и на верховых болотах. Прекращение выпаса скота в лесах и вырубка старых заболоченных лесов являются лимитирующими факторами. Необходим поиск новых мест обитания вида и, в случае обнаружения территорий с высокой частотой встречаемости, организация его охраны.

**Дербянка колосистая** является новым для Архангельской области и всех смежных с ней областей видом. Он обнаружен в 2019 г. [Морозов, 2020].

**Гадюка обыкновенная** имеет северной границей своего ареала северную границу полуострова [Красная..., 2020]. Антропогенное изменение территорий является лимитирующим фактором.

**Лебедь-кликун** в Архангельской области гнездится по всей лесотундровой и лесной зонам, но его численность здесь в последнее десятилетие имеет тенденцию к снижению [Красная книга..., 2020]. Вид уязвим по причине негативного отношения к присутствию людей на водоёмах в период размножения. В летнее время озёра интенсивно посещаются рыбаками, и беспокойство со стороны людей, а также разрушение и деградация мест обитаний при рубках леса являются основными лимитирующими факторами. Необходимы меры по сохранению водно-болотных угодий – естественных мест обитаний и гнездований вида, с выделением вокруг них водоохраных зон; сохранение участков леса в пределах 500 м от гнезда или места регулярного появления птиц; организация охраны в местах скопления во время миграций.

Плотность населения многих видов таёжных птиц не уступает средне- и южно-таёжной зонам [Ландшафтно-экологическая..., 1998]. Благодаря чистоте вод рек и озёр и хорошей обеспеченности кормами на высоком уровне поддерживается численность видов ихтиофагов: **скопа** и **орлан-белохвост**. Оба вида занесены в Красную книгу Российской Федерации<sup>2</sup> как виды, для которых достаточно общих мер в области охраны окружающей среды, организации, охраны и использования особо охраняемых природных территорий и охраны и использования животного мира и среды его обитания.

<sup>1</sup> Magie der Moore. Haft J, producer. Deutschland, 2015 [Video]. Laufzeit: ca. 96 Minuten (на нем. языке).

<sup>2</sup> Приказ Минприроды России от 24.03.2020 № 162 «Об утверждении Перечня объектов животного мира, занесенных в Красную книгу Российской Федерации» (Зарегистрировано в Минюсте России 02.04.2020 № 57940). Министр природных ресурсов и экологии Российской Федерации Д.Н. Кобылкин. Приложение к приказу Минприроды России от 24.03.2020 г. № 162.

*Скопа* также занесена в Красную книгу Российской Федерации Приказом Минприроды России как редкий уязвимый вид<sup>2</sup>. В Архангельской области он распространён до лесотундры, и его численность здесь стабильна [Красная..., 2020]. На полуострове в его северо-западной части, на участке морского побережья от мыса Ухтнаволок до Конюховой губы протяжённостью около 30 км отмечено гнездование не менее 3 пар этого вида. Он также встречается в губе Ухта, на Вежмозере и Мяндозере [Ландшафтно-экологическая..., 1998]. В окрестностях последнего водоёма вид, несомненно, гнезвился, т.к. встречался постоянно. В прошлом [Галушин, 1970] жилые гнёзда этого хищника в угодьях полуострова располагались на расстоянии 4–6 км. Оскудение водоёмов рыбой и их загрязнение являются основными лимитирующими факторами [Красная книга..., 2020]. Наиболее действенной мерой в период гнездования является установление охранных зон радиусом до 1000 м вокруг гнёзд.

*Орлан-белохвост* занесён также в Красную книгу Российской Федерации (Приказ Минприроды России... – см. сноску выше) как вид, восстанавливаемый или восстанавливающийся в численности, вызывающий наименьшее опасение угрозы исчезновения. В Архангельской области вид спорадично гнездится по всей таёжной зоне, и численность его здесь стабильна [Красная книга..., 2020]. В зимний период до образования ледового припая на море в декабре и январе одиночные особи отмечались на побережье полуострова. В его северо-западной части, на участке морского побережья от деревни Лопшеньга до Конюховой губы протяжённостью около 70 км в гнездовой период отмечено не менее четырёх территориальных пар этого вида. Весной 1998 г. вид был встречен в губе Ухта [Ландшафтно-экологическая..., 1998]. Фрагментация и деградация среды обитания в результате рубок старовозрастных лесов, развития дорожной инфраструктуры, беспокойство в период размножения птиц являются основными лимитирующими факторами [Красная книга..., 2020]. Наиболее действенной мерой охраны в период гнездования является установление охранных зон радиусом до 1000 м вокруг гнёзд.

На отдалённой части полуострова при проектировании национального парка выделено 7 индивидуальных ландшафтов, относящихся к 4 типологическим видам [Ландшафтно-экологическая..., 1998]. Наиболее высокий гипсометрический уровень занимают ландшафты возвышенных ледниковых (моренных) равнин. К ним относится и самый высокий здесь индивидуальный ландшафт с условным названием Лямецкий, расположенный на юго-западе отдалённой части полуострова. По этому ландшафту проходит граница между Приморским и Онежским районами Архангельской области.

Общая площадь Лямецкого ландшафта составляет 100 000 га. Преобладающие здесь абсолютные высоты – 100–140 (макс. 202,8) м; преобладающие абсолютные высоты кровли коренных пород – 50–100 м; заболоченность – не выше 10 % [Ландшафтно-экологическая..., 1998]. Ландшафт сформировался на цокольной Онежской гряде с близким залеганием (до 20 м на водоразделах) коренных протерозойских пород, обнажающихся на морском побережье. Испытывает современное изостатическое поднятие и имеет много мелких озёрных котловин (заозёрность составляет 4–5 %).

В структуре ландшафта можно выделить две местности: водораздельная часть Онежской гряды с доминированием ПТК ледниковых равнин и прибрежная относительно пониженная равнина с сочетанием ПТК водно-ледниковых и морских равнин. При этом преобладают водораздельные комплексы холмисто-котловинных и грядовых моренных равнин с различными типами еловых лесов с преобладанием свежих и влажных черничных. Склоны гряды, обращённые к морю, заняты комплексами волнистых наклонных, хорошо дренируемых равнин с еловыми, преимущественно черничными лесами. Краевые прибрежные части ландшафта, а также придолинные участки р. Лямцы и

её притоков заняты ПТК водноледниковых супесчаных и суглинистых влажных и сырых водноледниковых равнин с еловыми черничными и долгомошными, местами сосновыми и берёзовыми лесами. Комплексы верхнечетвертичных и современных морских равнин простираются полосой шириной до 2 км вдоль побережья. Они отличаются повышенной продуктивностью как переходные к северо-таёжным. На них преобладают черничные, вороничные и брусничные сосновые леса. Побережье Лямецкого ландшафта с прилегающими к нему лесными насаждениями является одним из самых богатых по биоразнообразию уголков девственной природы [Оценка..., 1998, с. 12–36].

Лямецкий ландшафт характеризуется следующими климатическими показателями: число дней в году со снежным покровом – 170 [Атлас..., 1976]; средняя годовая температура воздуха – +1 °С, при этом среднемесячная температура – –10 °С для января и +13 °С для июля; среднее годовое количество осадков – 650 мм, при этом среднее количество осадков – 250 мм для холодного периода и 400 мм для тёплого периода.

До недавнего времени природные комплексы Лямецкого ландшафта характеризовались очень высокой степенью сохранности. Спелые и перестойные леса составляли здесь до 90 % [Ландшафтно-экологическая..., 1998]. Именно в Лямецком ландшафте наблюдается самый большой разрыв между соседними деревнями на полуострове – при измерении по прямой линии он составляет более 47 км. Здесь находится бассейн малой реки Каменный Ручей, который, учитывая степень сохранности и удобство исследования, на наш взгляд является модельным для биосферного мониторинга полуострова. Однако в последние годы водораздельная часть Онежской гряды, в т.ч. бассейн Каменного Ручья значительно подверглась интенсивным промышленным лесозаготовкам. Леса же прибрежных комплексов обезопасены от лесозаготовок запретной полосой лесов шириной 3 км вдоль берега моря [ЛВЩ..., 2013–2021]<sup>1</sup>. С целью прогнозирования последствий интенсивного лесопользования в отдалённой части полуострова выделено 7 типов речных бассейнов, различающихся по преобладающим в процессах стока тенденциям [Браславская и др., 2020].

Маршрутно-полевым методом в период с 2009 по 2020 г. автором изучено не более 1/4 площади Лямецкого ландшафта (рис. 3, район исследований). Находки видов рода сплахнумов и дербянки колосистой находки 2020 г. хранятся в г. Москве у О.В. Морозова. Образцы дербянки находки 2019 г. переданы в Гербарий Алтайского государственного университета в г. Барнауле [Морозов, 2020].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С 2009 по 2020 г. автором найдено 11 редких видов. Находка одного из них – дербянки колосистой – публиковалась ранее [Морозов, 2020]. В 2020 г. было повторно изучено состояние группы особей этого вида, который ещё не образовал популяцию и является новым для Архангельской и всех смежных областей. Решение о необходимости охраны дербянки колосистой в Архангельской области принято Министерством природных ресурсов и лесопромышленного комплекса области. Остальные 10 видов занесены в Красную книгу Архангельской области [2020] и 4 из них – в Красную книгу Российской Федерации [2008] (растения и грибы); [2001] (животные – дополнение к Книге Приказом Минприроды России 2020 г. – см. сноску выше).

В табл. 1 приведён список новых мест находений О.В. Морозовым редких видов в Лямецком ландшафте. Категории статуса редкости приведены по Красной книге Архангельской области [2020]: 2 – сокращающийся в численности вид, который при

<sup>1</sup> «Лесной кодекс Российской Федерации» от 04.12.2006 № 200-ФЗ (ред. от 09.03.2021). Глава 17. Защитные леса, эксплуатационные леса, резервные леса, особо защитные участки лесов. Статья 115. Ценные леса. Ч. 1. П. 11.



дальнейшем воздействии негативных факторов может в короткие сроки попасть в категорию находящихся под угрозой исчезновения; 3 – редкий вид, для сохранения которого необходимо принятие специальных мер охраны; 4 – неопределённый по современному состоянию и категории вид; 7 – вид вне опасности. Распространение приведено по географическим координатам, либо по их диапазонам, в пределах которых виды были встречены многократно. При указании дат находок в виде интервалов годов необязательно подразумеваются ежегодные встречи. Таблица проиллюстрирована авторскими фотографиями встреченных видов (рис. 2).

По результатам полевых исследований с использованием геоинформационных технологий составлена карта находок редких видов, привязанных к территории Лямецкого ландшафта. Использованы программы ArcGIS, SAS.Планета, Photoshop. На рис. 3 представлена граница Лямецкого ландшафта и отмечены места находок встреченных не повсеместно видов.

Популяции *лобарии лёгочной* обнаружены повсеместно и варьируют по численности от единичных до нескольких экземпляров на 1 га лесной площади. Обнаружены только отдельно стоящие деревья с талломами или их небольшие группы (не более 3-х). Отсутствие подходящих деревьев в радиусе разлёта единиц размножения его затрудняет.

Новое местонахождение *рогатика усечённого*: Онежский район, в 18 км к северу от д. Лямца, на высоте предположительно 147 м н.у.м. Находка отмечена в виде группы плодовых тел гриба. Ближайшее ранее обнаруженное местообитание находится примерно в 80 км к северо-западу, в Приморском районе на Соловецком архипелаге [Ezhov et al., 2017].

Новое местонахождение *строфарии сине-зелёной*: Онежский район, в 15 км к северо-западу от д. Лямца, предположительно 1 м н.у.м. Находка отмечена в виде группы плодовых тел гриба. Местонахождение относится к запретной полосе лесов, в связи с чем ближайшая лесозаготовка возможна на расстоянии 2940 м. Ближайшее ранее опубликованное местообитание находится также в отдалённой части Онежского полуострова примерно в 15 км к юго-востоку: Онежский район, окрестности д. Лямца [Ежов, 2020].

Новое местонахождение *саркосомы шаровидной*: Онежский район, в 16 км к северо-северо-западу от д. Лямца, предположительно 17 м н.у.м. Находка отмечена в виде группы плодовых тел гриба, численность которых составляет не менее 20. Местонахождение относится к запретной полосе лесов, в связи с чем ближайшая лесозаготовка возможна на расстоянии 2260 м. Находка автора отмечена в Красной книге Архангельской области [Ежов, Ершов, 2020]. Ближайшее от неё, ранее обнаруженное В.Н. Мамонтовым местообитание саркосомы шаровидной находится в 169 км к югу в Онежском районе (координаты 63°06'16"N 37°50'29"E 2003–2005) [Ефимов и др., 2006].

На предмет поселения видов рода *сплахнумов*, оба из которых обнаружены повсеместно, изучено несколько субстратов. Виды поселяются на экскрементах лося, питавшегося сочными побегами, и на неустановленном субстрате. На экскрементах медведя и лося, не питавшегося сочными побегами, виды не обнаружены. Однако следует учесть, что экскременты лося, питавшегося сочными побегами, встречались в несколько раз чаще, чем экскременты медведя. В большинстве случаев виды были найдены на вырубках или недалеко от них.

Табл. 1. Список новых мест находений редких видов в Лямыцком ландшафте

Table 1. List of new location rare species in the landscape of Lyamtsa

Таксон		Категория	Распространение (с. ш., в. д.)	Место обитания	Дата на- ход- ки
Семей- ство	Номер, вид				
Lobaria- ceae	1. <i>Лобария лёгочная</i> – Lobaria pulmonaria (L.) Hoffm.	3	64°33'47,63"–64°38' 59,53", 36°52'37,6"–37°7'4,8 7"	на стволах осин и берёз в хвойных лесах	2014 – 2020
Clavaria- delpha- ceae	2. <i>Рогатик усечённый</i> – Clavariadelphus truncatus Donk	3	64°35'54,42", 37°01'54,34"	в еловом лесу	14.10. 2020
Stro- pharia- ceae	3. <i>Строфария сине- зелёная</i> – Stropharia aeruginosa (Curtis) Quél.	4	64°33'01,40", 36°53'20,26"	в смешанном хвойно-мелко- лиственном лесу	29.09. 2017
Sarco- somata- ceae	4. <i>Саркосома шаровидная</i> – Sarcosoma globosum (Schmidel) Rehm.	7	64°33'57,10", 36°53'30,48"	в хвойном лесу на лесной подстилке	24.06. 2017
Spla- chna- ceae	5. <i>Сплахнум бутылковидный</i> – Splachnum ampullaceum Hedw.	2	64°35'25,91"–64°38' 37,03", 36°52'5,09"–37°5'44, 09"	на экскрементах лося, питавшегося сочными	2012 – 2020
	6. <i>Сплахнум жёлтый</i> – Splachnum luteum Hedw.	2	64°38'37,03"–64°36' 52,06", 37°3' 16,74"–37°4'15,89"	побегами, и на неустановлен- ном субстрате	2013 – 2020
Blechna- ceae	7. <i>Дербянка колосис- тая</i> – Blechnum spicant (L.) Roth	–	64°35'39,19", 37°02'44,81"	в хвойном лесу на лесной подстилке	10.07. 2019
Viperi- dae	8. <i>Гадюка обыкновен- ная</i> – Vipera berus (Linnaeus, 1758)	3	64°30'37,73"–64°37' 8,08", 36°48'55,01" –37°3'33,62"	по берегу моря, на верховых бо- лотах, вырубках, в хвойных лесах, постройках	2015 – 2017
Anatidae	9. <i>Лебедь-кликун</i> – Cygnus cygnus (Linnaeus, 1758)	3	64°26'36,02"–64°38' 51,72", 36°47'56,08" –37°6'49,5"	открытые места	2012 – 2020
Pandi- onidae	10. <i>Скопа</i> – Pandion haliaetus (Linnaeus, 1758)	3	64°34'22,22", 36°52'02,53" 64°31'19,13", 36°55'27,78"	литораль	02.07. 2015 30.05. 2017
Accipi- tridae	11. <i>Орлан-белохвост</i> – Haliaeetus albicilla (Linnaeus, 1758)	3	64°40', 36°50'	гнездо на сосне в хвойном лесу в 1,6 км от морс- кого побережья	06.07. 2015

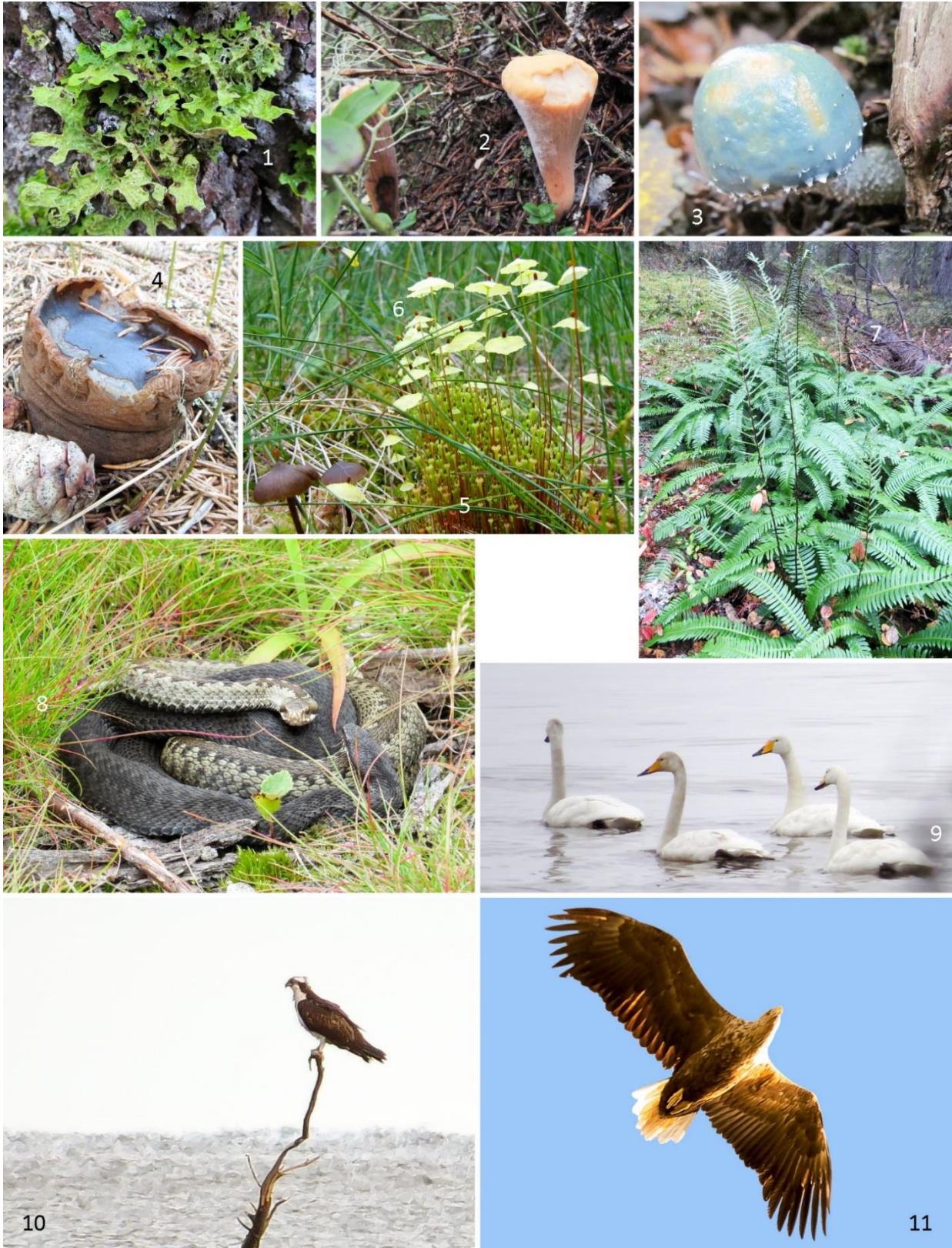


Рис. 2. Встреченные редкие виды (названия см. по номеру в таблице).

Фото О.В. Морозова, монтаж О.И. Марковой

Fig. 2. Met rare species (see names by number in the table).

Photo by O.V. Morozov, editing by O.I. Markova

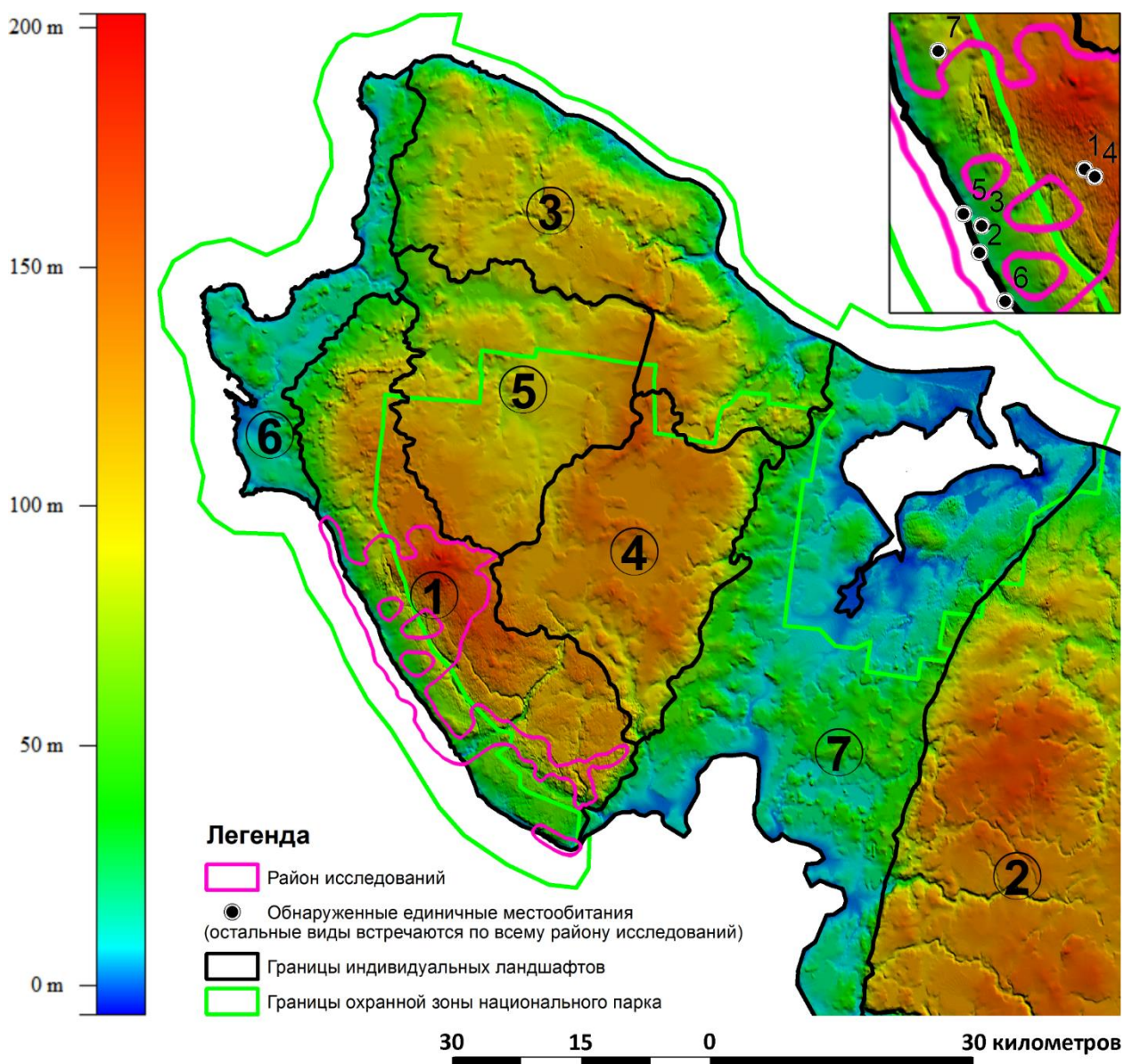


Рис. 3. Находки редких видов в Лямыцком ландшафте Онежского полуострова. Единичные местообитания видов: 1 – рогатик усечённый, 2 – строфария сине-зелёная, 3 – саркосома шаровидная, 4 – дербянка колосистая, 5, 6 – скопа, 7 – орлан-белохвост. Индивидуальные ландшафты возвышенных ледниковых равнин: 1 – Лямыцкий, 2 – Кяндско-Сюзьминский, 3 – Лопшеньгский; возвышенных озёрно-ледниковых и ледниковых равнин: 4 – Мяндский; озёрно-ледниковых и водно-ледниковых равнин: 5 – Быковский; пониженных ледниково-морских равнин: 6 – Летне-Золотицкий, 7 – Унско-Ухтинский

Fig. 3. Rare species in the Lyamitsky landscape of the Onega Peninsula. Single habitats of species: 1 – slingshot truncated, 2 – stropharia blue-green, 3 – sarcosome spherical, 4 – derbyanka spiked, 5, 6 – osprey, 7 – eagle white-tailed. Individual landscapes of elevated glacial plains: 1 – Lyamitsky, 2 – Kyandsko-Syuzminsky, 3 – Lopshengsky; elevated lacustrine-glacial and glacial plains: 4 – Myandsky; lacustrine-glacial and water-glacial plains: 5 – Bykovsky; lowered glacial-marine plains: 6 – Letne-Zolotitsky, 7 – Unsko-Ukhtinsky

Две первые из находок (2012–2013 гг.) *сплахнума бутылковидного* одной точкой на карте на границе районов отмечены в Красной книге Архангельской области

[Чуракова, Мамонтов, 2020]. Количество находок в Лямецком ландшафте в несколько раз превышает количество остальных находок вида в Архангельской области после 1928 г. Ближайшее местообитание находится в 244 км к северо-западу в Лоухском районе Карелии, в 1,1 км к северо-северо-востоку от Беломорской биологической станции Зоологического института РАН «Картеш», (66°20'43,15" с.ш., 33°39'49,79" в.д.), обнаружено 11.08.2017 Д.А. Захарченко [Цифровой..., 2021].

Первая из находок (2013 г.) *сплахнума жёлтого* отмечена в Красной книге Архангельской области [Чуракова, Мамонтов, 2020]. Ближайшее в пределах Архангельской области местообитание, обнаруженное после 1926 г. (12.08.2014), находится в 292 км к востоку в Пинежском районе, в 4 км к северо-западу от д. Першково (64°31'24" с. ш. 43°09'18" в. д.) [Филиппов, Галанина, 2018].

*Дербянка колосистая*, по наблюдению 30 октября 2020 г., ещё не образовала популяцию. Однако у группы особей насчитывается 30 полноценно развитых фертильных вай нового года, что в 2 р. превышает их количество в 2019 г.

*Гадюка обыкновенная* обнаружена повсеместно. Вид представлен в т.ч. меланистами.

Гнёзд *лебедя-кликун* найдено не было, хотя сами птицы были обнаружены в достаточном количестве. Помимо беспокойства, возможно причиняемого непосредственно рубками леса, оно также может причиняться рыбаками и охотниками, использующими лесовозные дороги для доступа в лес.

Распространение *скопы* приведено в таблице и на карте по местам, где вид замечен с добычей, в данных случаях с рыбой в когтях.

Распространение *орлана-белохвоста* приведено в таблице и на карте только по гнезду с замеченными молодой особью и родителем. Находка относится к запретной полосе лесов, в связи с чем ближайшая лесозаготовка возможна лишь на расстоянии 2650 м.

## ВЫВОДЫ

В результате проведённых наблюдений и исследований редких видов в Лямецком ландшафте на геоинформационной основе была составлена карта их местообитаний, которая вместе с полученными в природе фотографиями и описаниями видов и их местообитаний может влиться в базу данных атласных информационных систем, посвящённых экологической и природоохранной тематике. Полученная информация имеет значение для действующего национального парка, его охранной зоны и открытых для хозяйственной деятельности районов полуострова.

На основании наблюдения упомянутых редких видов в природе с анализом ситуации с продвижением лесопромышленной деятельности в глубь Онежского полуострова сделаны выводы и разработаны рекомендации для охраны изученных редких видов.

Места находок видов можно разделить по критерию назначения земель:

1. Территория запретной полосы лесов.
2. Территория, арендованная лесозаготовительным предприятием.

Результаты оценок целесообразности мер охраны видов можно разделить на 3 типа:

1. Целесообразны меры охраны: выявление новых мест обитаний, сохранение их от вырубок леса и контроль за состоянием популяций.
2. Меры охраны нецелесообразны.
3. Меры охраны от вырубок сокращают численность видов.

Для охраны популяций *лобарии лёгочной* в связи с отсутствием участков с компактным произрастанием деревьев со средними и крупными талломами лишайника рекомендуется в процессе лесозаготовок оставлять лишь отдельно стоящие деревья с талломами в группе с другими 3–5 деревьями или хотя бы в окружении подроста, подлеска, молодняка.

Мерой охраны *рогатика усечённого* на полуострове должно явиться сохранение естественных мест обитаний.

Находки грибов *строфарии сине-зелёной* и *саркосомы шаровидной*, а также *орлана-белохвоста* относятся к запретной полосе лесов, где нет лесозаготовительных работ.

Эти работы на полуострове не угрожают численности видов мхов рода *сплахнумов*. Рубка лесов на полуострове способствует увеличению числа дерновинок *сплахнума бутылковидного* и *сплахнума жёлтого* вследствие создания дополнительной кормовой базы лося – на вырубках активнее разрастаются иван-чай, рябина, ива, осина и др. В Красной книге Архангельской области [Чуракова, Мамонтов, 2020] в сведениях по этим видам мхов из абзацев «Численность и лимитирующие факторы» и «Меры охраны» следует исключить лимитирующие факторы в виде вырубок лесов и включить лимитирующие факторы в виде прекращения рубок лесов. В абзацах «Места обитания и биология» следует указать на поселения этих видов на экскрементах лося, питавшегося сочными побегами.

*Дербянку колосистую* рекомендуется занести в список редких видов в следующем издании Красной книги Архангельской области, по согласованию с её авторами. Предлагаемая категория статуса редкости – 3 (редкий вид, для сохранения которого необходимо принятие специальных мер охраны).

Лесозаготовительные работы на полуострове не угрожают численности *гадюки обыкновенной*.

Мерой по охране *лебеда-кликун* и *скопы* на полуострове может являться поиск гнёзд.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем благодарность за организационную поддержку АО «Онежский ЛДК» (Онежский лесопильно-деревообрабатывающий комбинат), филиалу Segezha Group.

## ACKNOWLEDGEMENTS

We express our gratitude for the organizational support of Joint-stock company “Onega sawmill and woodworking plant”, the branch of Segezha Group.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Г., Кобяков К., Марковский А., Носкова М., Мамонтов В., Ильина О., Веселов А., Турунен О., Столповский А., Фёдоров А., Латка В., Харченко О., Иванюк Г., Смирнов Д., Ковалёв Д., Пилипенко Е., Чуракова Е., Вдовин И., Волкова О., Чемякин Р., Филенко С., Эрайя С., Холина Т. Сохранение ценных природных территорий Северо-Запада России. Анализ репрезентативности сети ООПТ Архангельской, Вологодской, Ленинградской и Мурманской областей, Республики Карелии, Санкт-Петербурга. СПб, 2011. 506 с.
2. Атлас Архангельской области. М.: ГУГК, 1976. 72 с.
3. Беликов С.Е., Гаврило М.В., Горин С.Л., Иванов А.Н., Краснова Е.Д., Краснов Ю.В., Кулангиев А.О., Лашманов Ф.И., Макаров А.В., Николаева Н.Г., Попов А.В., Сергиенко Л.А., Спиридонов В.А., Шредерс М.А. Атлас биологического

- разнообразия морей и побережий Российской Арктики. М.: WWF of Russia, 2011. 64 с.
4. *Браславская Т.Ю., Колбовский Е.Ю., Есипова Е.С., Коротков В.Н., Немчинова А.В., Чуракова Е.Ю., Козыкин А.В., Кулясова А.А., Алейников А.А.* Ландшафтно-бассейновый подход в экологической оценке малонарушенных лесов Онежского полуострова. Известия РАН. Серия географическая, 2020. Т. 84. № 6. С. 905–919. DOI: 10.31857/S2587556620060035.
  5. *Галушин В.М.* Хищные птицы. М.: Лесная промышленность, 1970. 136 с.
  6. Географический атлас: для учителей средней школы. 4-е изд. М.: ГУГК, 1983. 238 с.
  7. *Ежов О.Н.* Грибы. Редкие виды растений, грибов и животных Архангельской области: методические рекомендации. Архангельск: Дапринт, 2012. С. 34–36.
  8. *Ежов О.Н.* Семейство Строфариевые – Strophariaceae. Красная книга Архангельской области. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2020. С. 46–47.
  9. *Ежов О.Н., Еришов Р.В.* Семейство Саркосомовые – Sarcosomataceae. Красная книга Архангельской области. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2020. С. 43.
  10. *Ефимов В.А., Цветков В.Ф., Шаврина Е.В., Куратов А.А.* Природа и историко-культурное наследие Кожозерья. Архангельск: УрО РАН, 2006. 310 с.
  11. *Заугольнова Л.Б., Мартыненко В.Б.* Определитель типов леса Европейской России. Версия 4. Под ред. Истоминой И.И. М.: Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, 2014. Электронный ресурс: <http://www.cepl.rssi.ru/bio/forest/> (дата обращения 23.04.2021).
  12. *Истомина Н.Б.* Лобария лёгочная – *Lobaria pulmonaria*. Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). М.: Тов-во научных изданий КМК, 2008. С. 715–716.
  13. *Карпечко Ю.В., Бондарик Н.Л.* Гидрологическая роль лесохозяйственных и лесопромышленных работ в таёжной зоне европейского Севера России. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. 225 с.
  14. Красная книга Архангельской области. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2020. 490 с.
  15. Красная книга Российской Федерации (животные). М.: АСТ: Астрель, 2001. 862 с.
  16. Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). М.: Тов-во научных изданий КМК, 2008. 855 с.
  17. Ландшафтно-экологическая характеристика территории Онежского полуострова: Научный отчёт. Проект национального парка «Онежское Поморье». В 11 кн. Кн. 9. М.: Рос. науч.-исслед. институт культурного и природного наследия, 1998. 67 с.
  18. ЛВПЦ Архангельской области [картографический материал]. Леса высокой природоохранной ценности. WWF России, 2013–2021. Электронный ресурс: <https://hcvf.ru/ru/maps/hcvf-arkhangelsk> (дата обращения 30.04.2021).
  19. *Морозов О.В.* 2013–2021. Флора Онежского полуострова [флористический список]. Плантариум. Растения и лишайники России и сопредельных стран: открытый онлайн-атлас и определитель растений. 2007–2021. Электронный ресурс: <https://www.plantarium.ru/page/flora/id/46.html> (дата обращения 30.04.2021).
  20. *Морозов О.В.* Новое изолированное местонахождение *Blechnum spicant* (L.) Roth (Blechnaceae) в Архангельской области. Turczaninowia, 2020. Т. 23. № 1. С. 129–132. DOI: 10.14258/turczaninowia.23.1.14.

21. Оценка состояния флоры Онежского полуострова. Научный отчет по теме «эколого-экономическое обоснование и схема организации и развития национального парка «Онежское Поморье»». Проект национального парка «Онежское Поморье». В 11 кн. Кн. 5. Архангельск: Сев. науч.-исслед. ин-т лесного хозяйства., 1998. 48 с.
22. Попов Е.С. Саркосома шаровидная – *Sarcosoma globosum*. Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). М.: Тов-во научн. изданий КМК, 2008. С. 755–756.
23. Растительность Европейской части СССР. Л.: Наука, 1980. 429 с.
24. Рай Е.А., Чуракова Е.Ю., Амосова И.Б., Бурова Н.В., Паринова Т.А., Пучнина Л.В., Сидорова О.В., Рыков А.М., Рыкова С.Ю., Амосов П.Н., Слестников С.И., Бабушкин М.В., Кузнецов А.В. Руководство по сохранению объектов биоразнообразия при заготовке древесины в Архангельской области. Архангельск: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2018. 208 с.
25. Тарасова В.Н., Загидуллина А.Т., Глушковская Н.Б. Семейство Лобариевые – Lobariaceae. Красная книга Архангельской области. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2020. С. 141–143.
26. Физико-географическое районирование СССР. Характеристика региональных единиц. М.: Издательство Московского университета, 1968. 576 с.
27. Филиппов Д.А., Галанина О.В. Новые бриологические находки. 11. Новые находки мхов в Архангельской области. 7. *Arctoa*, 2018. Т. 27. № 2. С. 208. DOI: 10.15298/arctoa.27.19.
28. Цифровой гербарий МГУ. Депозитарий живых систем. М.: МГУ, 2021. Электронный ресурс: <https://plant.depo.msu.ru/open/public/item/MW9110993> (дата обращения 03.05.2020).
29. Чуракова Е.Ю., Мамонтов В.Н. Семейство Сплахновые – Splachnaceae. Красная книга Архангельской области. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2020. С. 199–209.
30. Шмидт В.М. Флора Архангельской области. СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2005. 346 с.
31. Ezhov O., Zmitrovich I., Ruokolainen A. Checklist of aphyllorphoroid fungi (Agaricomycetes, Basidiomycota) in boreal forests of the Solovetsky Archipelago (Arkhangelsk Region, European Russia). Check List. The journal of biodiversity data, 2017. V. 13. No 6. P. 789–803. DOI: 10.15560/13.6.789.
32. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 2013. V. 342. Iss. 6160. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.

#### REFERENCES

1. Alexandrov G., Kobayakov K., Markovsky A., Noskova M., Mamontov V., Ilyina O., Veselov A., Turunen O., Stolpovsky A., Fedorov A., Latka V., Kharchenko O., Ivanyuk G., Smirnov D., Kovalev D., Pilipenko E., Churakova E., Vdovin I., Volkova O., Chemyakin R., Filenko S., Eraya S., Kholina T. Mapping of high conservation value areas in Northwestern Russia: gap-analysis of the protected areas network in the Murmansk, Leningrad, Arkhangelsk, Vologda and Karelia Regions, and the city of Saint-Petersburg. St. Petersburg, 2011. 506 p. (in Russian).
2. Assessment of the state of the flora of the Onega Peninsula. Scientific report on the topic “ecological and economic substantiation and the scheme of organization and develop-



- ment of the national park “Onega Pomorie””. The project of the national park “Onega Pomorie”. In 11 books. Book 5. Arkhangelsk: Northern Scientific Research Institute of Forestry, 1998. 48 p. (in Russian).
3. Atlas of the Arkhangelsk Region. Moscow: Main Directorate of Geodesy and Cartography, 1976. 72 p. (in Russian).
  4. *Belikov S.E., Gavrilov M.V., Gorin S.L., Ivanov A.N., Krasnova E.D., Krasnov Yu.V., Kulangiev A.O., Lashmanov F.I., Makarov A.V., Nikolaeva N.G., Popov A.V., Sergienko L.A., Spiridonov V.A., Shreders M.A.* Atlas of marine and coastal biological diversity of the Russian Arctic. Moscow: WWF of Russia, 2011. 64 p. (in Russian).
  5. *Braslavskaya T.Yu., Kolbovsky E.Yu., Esipova E.S., Korotkov V.N., Nemchinova A.V., Churakova E.Yu., Kozykin A.V., Kulyasova A.A., Aleinikov A.A.* The landscape-basin approach for ecological evaluation of intact forest areas on the Onega Peninsula. *Izvestia RAN. Seriya Geograficheskaya*, 2020. V. 84. No 6. P. 905–919. DOI: 10.31857/S2587556620060035 (in Russian, abs English).
  6. *Churakova E.Yu., Mamontov V.N.* Family Splachnaceae. Red Data Book of the Arkhangelsk Region. Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University, 2020. P. 199–209 (in Russian).
  7. *Efimov V.A., Tsvetkov V.F., Shavrina E.V., Kuratov A.A.* Nature and historical and cultural heritage of Kozhozero. Arkhangelsk: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006. 310 p. (in Russian).
  8. *Ezhov O.N.* Family Strophariaceae. Red Data Book of the Arkhangelsk Region. Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University, 2020. P. 46–47 (in Russian).
  9. *Ezhov O.N.* Mushrooms. Rare species of plants, mushrooms and animals of the Arkhangelsk Region: Guidelines. Arkhangelsk: Daprint, 2012. P. 34–36 (in Russian).
  10. *Ezhov O.N., Ershov R.V.* Family Sarcosomataceae. Red Data Book of the Arkhangelsk Region. Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University, 2020. P. 43 (in Russian).
  11. *Ezhov O., Zmitrovich I., Ruokolainen A.* Checklist of aphylophoroid fungi (Agaricomycetes, Basidiomycota) in boreal forests of the Solovetsky Archipelago (Arkhangelsk Region, European Russia). *Check List. The journal of biodiversity data*, 2017. V. 13. No 6. P. 789–803. DOI: 10.15560/13.6.789.
  12. *Filippov D.A., Galanina O.V.* New bryological findings. 11. New finds of mosses in the Arkhangelsk Region. *Arctoa*, 2018. V. 27. No 2. P. 208. DOI: 10.15298 / arctoa.27.19. (in Russian).
  13. *Galushin V.M.* Predator birds. Moscow: Forest Industry, 1970. 136 p. (in Russian).
  14. Geographic Atlas: for high school teachers. 4th ed. Moscow: Main Directorate of Geodesy and Cartography, 1983. 238 p. (in Russian).
  15. *Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G.* High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 2013. V. 342. Iss. 6160. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.
  16. HCVF of the Arkhangelsk Region [cartographic material]. High conservation value forests. WWF Russia, 2013–2021. Web resource: <https://hcvf.ru/ru/maps/hcvf-arkhangelsk> (accessed 04/30/2021) (in Russian).
  17. *Istomina N.B.* Pulmonary lobaria – *Lobaria pulmonaria*. Red Book of the Russian Federation (plants and mushrooms). Moscow: KMK Scientific Publishing Association, 2008. P. 715–716 (in Russian).
  18. *Karpechko Yu.V., Bondarik N.L.* Hydrological role of forestry and timber industry work in the taiga zone of the European North of Russia. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2010. 225 p. (in Russian).

19. Landscape and ecological characteristics of the territory of the Onega Peninsula: Scientific report. The project of the national park “Onega Pomorie”. In 11 books. Book. 9. Moscow: Russian Scientific Research Institute of cultural and natural heritage, 1998. 67 p. (in Russian).
20. *Morozov O.V.* 2013–2021. Flora of the Onega Peninsula [floristic list]. Plantarium. Plants and lichens of Russia and neighboring countries: an open online atlas and plant identification guide. 2007–2021. Web resource: <https://www.plantarium.ru/lang/en/page/flora/id/46.html> (accessed 30.04.2021) (in Russian).
21. *Morozov O.V.* New isolated location of *Blechnum spicant* (L.) Roth (Blechnaceae) in the Arkhangelsk Region. *Turczaninowia*, 2020. V. 23. No 1. P. 129–132. DOI: 10.14258/turczaninowia.23.1.14 (in Russian, abs English).
22. Moscow Digital Herbarium. Depository of Live Systems. Moscow: Moscow State University, 2021. Web resource: <https://plant.depo.msu.ru/open/public/item/MW9110993> (accessed 03.05.2020) (in Russian).
23. Physical and geographical zoning of the USSR. Characteristics of regional units. Moscow: Moscow University Press, 1968. 576 p. (in Russian).
24. *Popov E.S.* Spherical sarcosoma – *Sarcosoma globosum*. Red Book of the Russian Federation (plants and mushrooms). Moscow: KMK Scientific Publishing Association, 2008. P. 755–756 (in Russian).
25. *Ray E.A., Churakova E.Yu., Amosova I.B., Burova N.V., Parinova T.A., Puchnina L.V., Sidorova O.V., Rykov A.M., Rykova S.Yu., Amosov P.N., Slastnikov S.I., Babushkin M.V., Kuznetsov A.V.* Guidelines for the conservation of biodiversity objects during timber harvesting in the Arkhangelsk region. Arkhangelsk: World Wildlife Fund (WWF), 2018. 208 p.
26. Red Book of the Arkhangelsk Region. Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University, 2020. 490 p. (in Russian).
27. Red Book of the Russian Federation (animals). Moscow: AST: Astrel, 2001. 862 p. (in Russian).
28. Red Book of the Russian Federation (plants and mushrooms). Moscow: KMK Scientific Publishing Association, 2008. 855 p. (in Russian).
29. *Schmidt V.M.* Flora of the Arkhangelsk Region. St. Petersburg: St. Petersburg University Press, 2005. 346 p. (in Russian).
30. *Tarasova V.N., Zagidullina A.T., Glushkovskaya N.B.* Family Lobarium – Lobariaceae. Red Data Book of the Arkhangelsk Region. Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University, 2020. P. 141–143 (in Russian).
31. Vegetation of the European part of the USSR. Leningrad: Nauka, 1980. 429 p. (in Russian).
32. *Zaugolnova L.B., Martynenko V.B.* Identifier of forest types in European Russia. Version 4. Moscow: Center for Problems of Ecology and Productivity of Forests, Russian Academy of Sciences, 2014. Web resource: <http://www.cepl.rssi.ru/bio/forest/> (accessed 23.04.2021) (in Russian).

## СОДЕРЖАНИЕ

### ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ И КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ОКЕАНА

<i>Морозов А.Н., Маньковская Е.В.</i> Современные исследования динамики вод в северо-западной части Черного моря по данным LADCP	5
<i>Харитонова Л.В., Алексеев Д.В., Фомин В.В.</i> Математическое моделирование волнового режима бухты Ай-Тодор	16
<i>Лемешко Е.М., Цыганова М.В.</i> Исследование формирования и распространения речного плюма Дуная на основе численного моделирования	32
<i>Goryachkin Y.N., Dolotov V.V.</i> Computer interactive GIS «The coastal zone of the Sevastopol region of Crimea»	42
<i>Казаков С.И.</i> Исследование временной изменчивости параметров вертикальной структуры вод в прибрежной зоне южного Крыма	49
<i>Полозок А.А., Фомин В.В., Фомина И.Н.</i> Численное моделирование сгонно-нагонных колебаний в заливе Донузлав (Черное море)	59
<i>Магаева А.А., Ящук Н.А.</i> Динамика припая Азовского моря в XXI веке	74
<i>Богуславский А.С., Казаков С.И.</i> Особенности литодинамики галечных пляжей южного берега Крыма	85
<i>Химченко Е.Е., Серебряный А.Н., Конюхова А.А.</i> Короткопериодные внутренние волны на крутом шельфе Черного моря летом 2018 года	98

---

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ИЗУЧЕНИЯ  
КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

---

<i>Абиева Д.К., Карагулова Р.К., Нысанбаева А.С., Абаев Н.Н., Уразбаева Г.М., Радуснова О.В., Шарапханова Ж.М., Толепбаева А.К.</i> Геопространственное веб-приложение для поддержки исследований изменения климата Казахстана	108
<i>Шихов А.Н., Абдуллин Р.К., Чернокульский А.В., Ажигов И.О., Ярынич Ю.И., Спрыгин А.А., Коренев Д.П.</i> Создание картографической базы данных и веб-сервиса «Конвективные опасные метеорологические явления на территории Центрального федерального округа»	120
<i>Китов А.Д., Коваленко С.Н.</i> Палеоклиматический анализ палеоледниковых и мерзлотно-каменных образований горного массива Мунку-Сардык (Восточный Саян)	136
<i>Кравцова В.И., Тутубалина О.В.</i> Динамика северных экосистем Норильского промышленного района в условиях техногенного воздействия и потепления климата (обзор исследований)	151
<i>Антонов С.А., Каторгин И.Ю.</i> Картографирование характеристик изменения климата в Ставропольском крае	171
<i>Варенцов М.И., Грищенко М.Ю., Михайлюкова П.Г.</i> Изучение острова тепла Москвы по данным космических снимков и мезоклиматического моделирования	183
<i>Добрякова В.А., Сулкарнаева Л.Д.</i> Построение модели предоставления экосистемной услуги «охлаждающий эффект» на примере г. Тюмень	196
<i>Титов Г.С., А.И. Прасолова А.И., Каргашин П.Е.</i> Веб-картографирование ресурсов солнечной энергии Якутии	210
<i>Лемешко Е.Е.</i> Траектории движения циклонов над Черным морем по данным атмосферных ре-анализов	221

---

---

КАРТОГРАФИЧЕСКИЕ И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ  
МЕТОДЫ ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ  
КОМПЛЕКСОВ И ИССЛЕДОВАНИЙ БИОРАЗНООБРАЗИЯ

---

<i>Боровичёв Е.А., Кожин М.Н., Ахмерова Д.Р., Королёва Н.Е., Петрова О.В.</i> Охраняемые виды сосудистых растений в Хибинах: насколько репрезентативны гербарные коллекции	230
<i>Новиков А.А., Каширина Е.С., Панкеева Т.В., Анкудинова М.Д.</i> ГИС-анализ распространения охраняемых видов растений на Крымском полуострове	242
<i>Коросов А.В., Калинин Н.М., Теканова Е.В., Сярки М.Т., Исакова К.В.</i> Разработка индексов трофности для Онежского озера с помощью экологической информационной системы	256
<i>Васильева Е.А., Николаева О.Н., Трубина Л.К.</i> Опыт подеревной инвентаризации и картографирования городских зеленых насаждений общего пользования	274
<i>Воробьевская Е.Л., Кириллов С.Н., Слипечук М.В., Журавлев В.А.</i> Картографирование эколого-экономической ценности экосистем национального парка «Тункинский» Республики Бурятия	285
<i>Лопаткин Д.А.</i> Картографирование экологической сбалансированности байкальского региона по отдельным категориям земель	297
<i>Давыдов Д.А., Боровичев Е.А., Петрова О.В.</i> Концепция зонирования ООПТ Полярно-Альпийский ботанический сад-институт в целях охраны редких видов и развития туризма	312
<i>Крюков В.А., Голубева Е.И.</i> Оценка изменений природоохранных режимов городской ООПТ в ГИС-среде	323
<i>Огурцов А.Н., Дмитриев В.В., Егоров А.А., Бакунович П.М.</i> Пространственный анализ и интегральная оценка факторов потенциальной опасности биоразнообразию биогеоценозов водосборного бассейна озёр Белое и Липшовское (Кургальский полуостров, Россия)	335

---

---

<i>Полушковский Б.В., Белова А.В.</i> Оценка качественных и количественных характеристик состояния лесополос Новоалександровского городского округа Ставропольского края с использованием геоинформационных технологий	346
<i>Тимофеева В.В., Кутенков С.А., Тарасова В.Н., Андросова В.И., Руоколайнен А.В.</i> Опыт использования ГИС при оценке природоохранной ценности городских лесов (на примере парка «Савин Наволок», г. Петрозаводск, Республика Карелия)	359
<i>Седых С.А., Биличенко И.Н.</i> Классификация горных геосистем Приморского хребта (Приольхонье) и их картографирование	375
<i>Маркова О.И.</i> Принципы включения данных об экологическом состоянии природно- исторических парков мегаполисов в атласную информационную систему (на примере парка «Москворецкий»)	387
<i>Бажукова Н.В., Афонина Е.А., Шишлянников К.А.</i> Применение ГИС-технологий в зоогеографическом картографировании (на примере Пермского края и города Перми)	409
<i>Морозов О.В., О.И. Маркова</i> Новые находки редких для Архангельской области видов в Лямецком ландшафте Онежского полуострова	425

---

**CONTENTS<sup>1</sup>****GIS AND CARTOGRAPHIC SUPPORT  
FOR OCEAN RESEARCH**


---

<i>Morozov A.N., Mankovskaya E.V.</i> Modern studies of water dynamics in the north-western part of Black sea from LADCP measurements	5 (6)
<i>Kharitonova L.V., Alekseev D.V., Fomin V.V.</i> Mathematical simulation of the Ay-Todor bay wave regime	16 (17)
<i>Lemeshko E.M., Tsyganova M.V.</i> Investigation of Danube river plume formation and propagation based on numerical modeling	32 (33)
<i>Goryachkin Y.N., Dolotov V.V.</i> Computer interactive GIS «The coastal zone of the Sevastopol region of Crimea»	42
<i>Kazakov S.I.</i> Study of temporary variability of vertical structure parameters of water in the coastal zone of southern Crimea	49 (50)
<i>Polozok A.A., Fomin V.V., Fomina I.N.</i> Numerical modeling of surge oscillations in the Donuzlav bay (Black sea)	59 (60)
<i>Magaeva A.A., Yaitskaya N.A.</i> Fast ice dynamics of the sea of Azov in the XXI century	74 (75)
<i>Boguslavsky A.S., Kazakov S.I.</i> Features of lithodynamics of pebble beaches at south coast of Crimea	85 (86)
<i>Khimchenko E.E., Serebryany A.N., Konukhova A.A.</i> Short-period internal waves on the steep shelf of the Black sea in summer 2018	98 (99)

---

**GIS SUPPORT FOR CLIMATE CHANGE STUDIES**


---

<i>Abiyeva D.K., Karagulova P.K., Nysanbaeva A.S., Abayev N.N., Urazbayeva G.M., Radusnova O.V., Sharapkhonova Z.M., Tolepbaeva A.K.</i> Geospatial web application to support climate change research in Kazakhstan	108 (109)
---	--------------

---

<sup>1</sup> The page number in brackets corresponds to the English text

<hr/>	
<i>Shikhov A.N., Abdullin R.K., Chernokulsky A.V., Azhigov I.O., Yarinich Y.I., Sprygin A.A. Korenev D.P.</i>	
Development of a GIS database and web service «Hazardous convective weather events on the territory of Central Federal district»	120 (121)
<hr/>	
<i>Kitov A.D., Kovalenko S.N.</i>	
Paleoclimatic analysis paleoglacial and permafrost-rock formations of the Munku-Sardyk mountain range (East Sayan)	136 (137)
<hr/>	
<i>Kravtsova V.I., Tutubalina O.V.</i>	
Dynamics of the northern ecosystems of the Norilsk industrial region under the conditions of technogenic impact and climate warming (a review)	151 (152)
<hr/>	
<i>Antonov S.A., Katorgin I.Yu.</i>	
Mapping the characteristics of climate change in Stavropol region	171 (172)
<hr/>	
<i>Varentsov M.I., Grischenko M.Y., Mikhaylyukova P.G.</i>	
Studying Moscow urban heat island using satellite images and mesoscale climatic modelling	183 (184)
<hr/>	
<i>Dobryakova V.A., Sulkarnaeva L.D.</i>	
Modelling of ecosystem services «cooling effect» supply in the city of Tyumen	196 (197)
<hr/>	
<i>Titov G.S., Prasolova A.I., Kargashin P.E.</i>	
Web-mapping of solar energy potential in Yakutia	210 (211)
<hr/>	
<i>Lemeshko E.E.</i>	
Trajectories of cyclone propagation over the Black sea according to atmospheric re-analysis data	221 (221)
<hr/>	
<p>CARTOGRAPHIC AND GEOINFORMATION METHODS FOR ENVIRONMENTAL CONSERVATION AND RESEARCH OF BIODIVERSITY</p>	
<hr/>	
<i>Borovichev E., Kozhin M., Akhmerova D., Koroleva N., Petrova O.</i>	
Protected species of vascular plants in Khibiny mountains: how many representative herbar collections?	230 (231)
<hr/>	



<i>Novikov A.A., Kashirina E.S., Pankeeva, T.V.</i> <i>Ankudinova M.D.</i> GIS analysis of the protected plant species distribution in the Crimea	242 (243)
<i>Korosov A.V., Kalinkina N.M., Tekanova E.V.,</i> <i>Syarki M.T., Isakova K.V.</i> Development of trophic indices for lake Onego using of the ecological information system	256 (257)
<i>Vasilieva E.A., Nikolaeva O.N., Trubina L.K.</i> A case-study of tree inventory and mapping of public green spaces	274 (275)
<i>Vorobyevskaya E.L., Kirillov S.N.,</i> <i>Slipenchuk M.V., Zhuravlev V.A.</i> Ecological and economic values mapping of Tunkinsky national park ecosystems of the Republic of Buryatia	285 (286)
<i>Lopatkin D.A.</i> Mapping a ecological balance of the Baikal region by individual land categories	297 (298)
<i>Davydov D.A., Borovichev E.A., Petrova O.V.</i> A zoning concept of Polar-Alpine botanical garden-institute as protected area for nature conservation and tourism development	312 (313)
<i>Kryukov V.A., Golubeva E.I.</i> Assessment of urban protected areas regulations changes using GIS software	323 (324)
<i>Ogurtsov A.N., Dmitriev V.V., Egorov A.A.,</i> <i>Bakunovich P.M.</i> Spatial analysis and integral assessment of factors of the potential dangers to the biodiversity of biogeocenoses in the catchment area of Beloye and Lippovskoye lakes (Kurgalsky peninsula, Russia)	335 (336)
<i>Polushkovsky B.V., Belova A.V.</i> Assessment of qualitative and quantitative characteristics of the state of forest lands of the Novoaleksandrovsk city district of Stavropol region with the use of geoinformation technologies	346 (347)
<i>Timofeeva V.V., Kutenkov S.A., Tarasova V.N.,</i> <i>Androsova V.I., Ruokolainen A.V.</i> Experience of using GIS in assessment of conservation value of urban forests (by example of «Savin Navolok» park, Petrozavodsk city, Republic of Karelia)	359 (360)

---

<i>Sedykh S.A., Bilichenko I.N.</i> Classification of mountain geosystems of the Primorskii range (Priolkhonie) and their mapping	375 (376)
<hr/>	
<i>Markova O.I.</i> Principles of incorporating data about the environmental condition of natural- historical parks of metropolises in the atlas information system (on the example of the Moskvoretsky park)	387 (388)
<hr/>	
<i>Bazhukova N.V., Afonina E.A., Shishlyannikov K.A.</i> The implementation of GIS-technologies in zoogeographical cartography (on the example of the Perm territory and Perm city)	409 (410)
<hr/>	
<i>Morozov O.V., Markova O.I.</i> New localities of rare for the Arkhangelsk region species in the Lyamitsky landscape of the Onega peninsula	425 (426)
<hr/>	

## Серия конференций ИнтерКарто. ИнтерГИС

- ИнтерКарто 1 – Москва, 23–25 мая 1994 г.
- ИнтерКарто 2 – Иркутск, 26–29 июня 1996 г.
- ИнтерКарто 3 – Новосибирск, 27–31 января 1997 г.
- ИнтерКарто 4 – Барнаул, 1–4 июля 1998 г.
- ИнтерКарто 5 – Якутск, 17–19 июня 1999 г.
- ИнтерКарто 6 – Апатиты, Мурманской обл., 22–24 августа 2000 г.
- ИнтерКарто 7 – Петропавловск-Камчатский, 30 июля – 1 августа 2001 г.
- ИнтерКарто 8 – Хельсинки (Финляндия), Санкт-Петербург, 28 мая – 1 июня 2002 г.
- ИнтерКарто 9 – Новороссийск, Севастополь (Украина), 25–29 июня 2003 г.
- ИнтерКарто. ИнтерГИС 10 – Владивосток, Чанчунь (Китай), 12–19 июля 2004 г.
- ИнтерКарто. ИнтерГИС 11 – Ставрополь, Домбай, Будапешт (Венгрия), 25 сентября – 3 октября 2005 г.
- ИнтерКарто. ИнтерГИС 12 – Калининград, Берлин (Германия), 25–31 августа 2006 г.
- ИнтерКарто. ИнтерГИС 13 – Ханты-Мансийск, Йеллоунайф (Канада), 12–24 августа 2007 г.
- ИнтерКарто. ИнтерГИС 14 – Саратов, Урумчи (Китай), 24 июня – 1 июля 2008 г.
- ИнтерКарто. ИнтерГИС 15 – Пермь, Гент (Бельгия), 29 июня – 5 июля 2009 г.
- ИнтерКарто. ИнтерГИС 16 – Ростов-на-Дону, Зальцбург (Австрия), 3–8 июля 2010 г.
- ИнтерКарто. ИнтерГИС 17 – Белокуриха, Алтайский край, Денпасар (Индонезия), 14–19 декабря 2011 г.
- ИнтерКарто. ИнтерГИС 18 – Смоленск, Сен-Дье-де-Вож (Франция), 26 июня – 4 июля 2012 г.
- ИнтерКарто. ИнтерГИС 19 – Курск, Богота (Колумбия), 2–7 февраля 2013 г.
- ИнтерКарто. ИнтерГИС 20 – Белгород, Харьков (Украина), Кигали (Руанда), Найроби (Кения), 23 июля – 6 августа 2014 г.
- ИнтерКарто. ИнтерГИС 21 – Краснодар, Сочи, Сува (Фиджи), 12–19 ноября 2015 г.,
- ИнтерКарто. ИнтерГИС 22 – Веллингтон (Новая Зеландия), Мельбурн (Австралия), Протвино (Московская обл.), 31 августа – 14 сентября 2016 г.
- ИнтерКарто. ИнтерГИС 23 – Южно-Сахалинск, Сеул (Республика Корея), Вашингтон (США), 26 июня – 7 июля 2017 г.
- ИнтерКарто. ИнтерГИС 24 – Петрозаводск (Республика Карелия), 19–22 июля, Бонн (Германия), 24–28 июля, Анкоридж (США), 30 июля – 1 августа 2018 г.
- ИнтерКарто. ИнтерГИС 25 – Мурманск, 30 января – 2 февраля, Токио (Япония), 20 июля 2019 г.
- ИнтерКарто. ИнтерГИС 26 – Ташкент (Узбекистан), 1–2 июня, Пятигорск (Россия), 24–26 сентября, Тбилиси (Грузия), 28–29 сентября, 2020
- ИнтерКарто. ИнтерГИС 27 – Апатиты (Мурманская область), 21–23 августа, Нур-Султан (Казахстан), 27 августа 2021 г.

### **InterCarto. InterGIS conference series**

InterCarto 1 – Moscow, May 23–25, 1994

InterCarto 2 – Irkutsk, June 26–29, 1996

InterCarto 3 – Novosibirsk, January 27–31, 1997

InterCarto 4 – Barnaul, July 1–4, 1998

InterCarto 5 – Yakutsk, June 17–19, 1999

InterCarto 6 – Apatity, Murmansk Province, August 22–24, 2000

InterCarto 7 – Petropavlovsk-Kamchatsky, July 30 – August 1, 2001

InterCarto 8 – Helsinki (Finland), St.-Petersburg, May 28 – June 1, 2002

InterCarto 9 – Novorossiysk, Sevastopol (Ukraine), June 25–29, 2003

InterCarto. InterGIS 10 – Vladivostok, Changchun (China), July 12–19, 2004

InterCarto. InterGIS 11 – Stavropol, Dombai, Budapest (Hungary), September 25 – October 3, 2005

InterCarto. InterGIS 12 – Kaliningrad, Berlin (Germany), August 25–31, 2006

InterCarto. InterGIS 13 – Khanty-Mansiysk, Yellowknife (Canada), August 12–24, 2007

InterCarto. InterGIS 14 – Saratov, Urumqi (China), June 24 – July 1, 2008

InterCarto. InterGIS 15 – Perm, Ghent (Belgium), June 29 – July 5, 2009

InterCarto. InterGIS 16 – Rostov-on-Don, Salzburg (Austria), July 3–8, 2010

InterCarto. InterGIS 17 – Belokurikha, Altaysky Kray, Denpasar (Indonesia), December 14–19, 2011

InterCarto. InterGIS 18 – Smolensk, St. Die des Vosges (France), June 26 – July 4, 2012

InterCarto. InterGIS 19 – Kursk, Bogota (Colombia), February 2–8, 2013

InterCarto. InterGIS 20 – Belgorod, Kharkov (Ukraine), Kigali (Rwanda), Nairobi (Kenya), July 23 – August 6, 2014

InterCarto. InterGIS 21 – Krasnodar, Sochi, Suva (Fiji), November 12–19, 2015

InterCarto. InterGIS 22 – Wellington (New Zealand), Melbourne (Australia), Protvino, Moscow Region, August 31 – September 14, 2016

InterCarto. InterGIS 23 – Yuzhno-Sakhalinsk, Seoul (Republic of Korea), Washington DC (USA), June 26 – July 7, 2017

InterCarto. InterGIS 24 – Petrozavodsk (Republic of Karelia), July 19–22, Bonn (Germany), July 24–28, Anchorage (USA), July 30 – August 1, 2018

InterCarto. InterGIS 25 – Murmansk, January 30 – February 2, Tokyo (Japan), July 20, 2019

InterCarto. InterGIS 26 – Tashkent (Uzbekistan), June 1–2, Pyatigorsk, September 24–26, Tbilisi (Georgia), September 28–29, 2020

InterCarto. InterGIS 27 – Apatity (Murmansk region), August 21–23, Nur-Sultan (Kazakhstan), August 27, 2021

**ИнтерКарто. ИнтерГИС**

**ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ**

Материалы Международной конференции  
Апатиты (Мурманская область),  
21–23 августа,  
Нур-Султан (Казахстан),  
27 августа 2021 г.

**ТОМ 27**

**ЧАСТЬ 3**

Оформление обложки К.В. Саутенков  
Корректор Н.П. Репухова  
Компьютерная вёрстка О.Г. Полевич

Подписано в печать 30.09.2021.

Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова  
119234, Москва, ГСП1, Ленинские горы, д. 1, ауд. 2209,  
научно-исследовательская лаборатория комплексного картографирования  
тел.: +7(495)939-23-54  
e-mail: [intercarto@yandex.ru](mailto:intercarto@yandex.ru)  
сайт издания: <http://intercarto.msu.ru/>