

ISSN 1993-3916

Том 26 Номер 1 (82) Март 2020

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

Журнал освещает фундаментальные исследования и результаты прикладных работ по проблемам аридных экосистем и борьбы с антропогенным опустыниванием в региональном и глобальном масштабах. Издается с 1995 года по решению Бюро Отделения общей биологии Российской академии наук.

МОСКВА: Товарищество научных изданий КМК



2020

© Журнал основан в 1995 г.
Издается при поддержке
Прикаспийского института биологических ресурсов и
Института геологии Дагестанского научного центра Российской академии наук,
Института водных проблем Российской академии наук,
Товарищества научных изданий КМК
и содействии региональных отделений секции
"Проблемы изучения аридных экосистем и борьбы с опустыниванием"
Научного совета "Проблемы экологии биологических систем"
отделения биологических наук Российской академии наук.
Подписной индекс русской версии журнала 39775 в 1 томе каталога «Пресса России»

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) ELIBRARY.ru, в базу научной электронной библиотеки “КИБЕРЛЕНИНКА” CYBERLENINCA.ru, в базу Российской государственной библиотеки (РГБ) rsl.ru, в базу данных Библиотеки по естественным наукам Российской академии наук (БЕН РАН), в базу данных Russian Science Citation Index, размещенную на платформе Web of Science, входит в число реферируемых журналов и Базы данных Scopus, ВИНИТИ, Google Scholar, AGRICOLA, EBSCO Discovery Service, OCLC, Summon by ProQuest, включен в Перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, передается в Российскую книжную палату, переводится на английский и распространяется издательством Springer за пределами России.
Сведения о журнале ежегодно поступают в международную справочную систему «Ulrich’s Periodicals Directory».
Информация о журнале, правила для авторов располагаются на сайте <http://aridecosystems.ru/>;
архив полнотекстовых статей по адресам: <http://aridecosystems.ru/архивы/>;
http://elibrary.ru/title_about.asp?id=8404&code=99990527,
<https://cyberleninka.ru/journal/n/aridnye-ekosistemy#/1009295>

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ОТДЕЛЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ НАУК РАН
ПРИКАСПИЙСКИЙ ИНСТИТУТ БИОЛОГИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ
ДАГЕСТАНСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН
ОТДЕЛЕНИЕ НАУК О ЗЕМЛЕ РАН
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ РАН
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ ДАГЕСТАНСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН

*СЕКЦИЯ "Проблемы изучения аридных экосистем и борьбы с опустыниванием"
Научного совета по проблемам экологии биологических систем*

АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

Том 26, № 1 (82), 2020, март

Журнал основан в январе 1995 г.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор

доктор биологических наук, профессор

З.Г. Залибеков**

Заместитель главного редактора

доктор географических наук

Ж.В. Кузьмина*

Редакционная коллегия:

Б.Д. Абатуров, С.-В. Брекле (Германия), К.Б. Гонгальский, А. Джилили (Китай),
Т.В. Дикарева, Л.А. Димеева (Казахстан), Т.Д. Зинченко, И.С. Зонн, К.Н. Кулик,
Г.С. Куст, В.В. Неронов, К.З. Омаров, Л. Орловская (Израиль), Н.И. Рабазанов,
А.А. Тишков, В.И. Черкашин, А.А. Чибилев, З.Ш. Шамсутдинов

Редакционный совет:

Д.Б. Асгерова, А.Б. Биарсланов, Э.А. Рустамов (Туркмения), Н.З. Шамсутдинов

Ответственные за выпуск:

Ж.В. Кузьмина*, О.С. Гринченко*(*Ответственный секретарь*)

Адреса редакции:

*Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3, ИВП РАН

Телефон: (499) 135-70-41. Факс: (499) 135-54-15

E-mail: arid.journal@yandex.ru

**Россия, 367025, г. Махачкала, ул. Гаджиева, д. 45, ПИБР ДНЦ РАН

Телефон: (872-2) 67-09-83

E-mail: arid_journal@mail.ru

Москва: Товарищество научных изданий КМК

2020

СОДЕРЖАНИЕ

Том 26, номер 1 (82), 2020 март

СИСТЕМНОЕ ИЗУЧЕНИЕ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

- Эволюция технологий в земледелии: от «серых» до «зеленых»
Е.М. Гусев 3-12
- Ландшафтный подход к моделированию динамики влажности
почвенно-растительного покрова дистанционными методами
Т.И. Харитонова, Н.В. Сурков 13-20
- Популяция и структура сообществ *Juniperous polycarpus* К. Koch
под влиянием климатических изменений
в холодной пустыне Гималаев (Индия)
А. Сингх, С.С. Самант 21-32
- К вопросу о времени и причинах возникновения солонцового процесса
в почвах пустынных степей юго-востока Русской равнины
А.В. Борисов, А.О. Алексеев 33-42

ОТРАСЛЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ ЗАСУШЛИВЫХ ЗЕМЕЛЬ

- Сохранившиеся участки степей как основа будущего
экологического каркаса Белгородской области
*А.А. Тишков, Е.А. Белоновская, Н.И. Золотухин, С.В. Титова,
Н.Г. Царевская, Ю.Г. Чендев* 43-53
- Изменения состава флоры Волго-Ахтубинской поймы
после зарегулирования водного стока р. Волги
В.Б. Голуб, А.В. Чувашов, В.В. Бондарева, К.А. Герасимова, Л.Ф. Николайчук 54-61
- Мелиоративная эффективность кустарниковых кулис
на аридных пастбищах юга России
Н.В. Тютюма, Г.К. Булахтина, А.В. Кудряшов, Н.И. Кудряшова 62-68
- К вопросу о показателе ассимиляционного потенциала почв
как составной части паспорта почв и ассимиляционного потенциала ландшафтов
Н.М. Исмаилов, С.И. Наджафова, Ф. Кейсеровская, А.С. Гасымова 69-75
- Пространственно-временная динамика состояния микробных сообществ
почв степей Волго-Донского междуречья
Т.С. Дёмкина 76-83
- Разработка методических подходов для оценки состояния орошаемых земель
юга европейской части России на основе материалов космической съемки
И.Н. Горохова, Е.И. Панкова, И.Н. Чурсин 84-93
- Галофильные микробные сообщества и их биоразнообразие
в засушливых регионах Прикаспийской низменности
*Э.А. Халилова, С.Ц. Котенко, Э.А. Исламмагомедова, Р.З. Гасанов, А.А. Абакарова,
Д.А. Аливердиева* 94-101

УДК 502/504+579.6:574.64

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ В ЗЕМЛЕДЕЛИИ: ОТ «СЕРЫХ» ДО «ЗЕЛЕННЫХ»¹

© 2020 г. Е.М. Гусев

Институт водных проблем РАН

Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3. E-mail: sowaso@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.03.2018. После доработки 12.08.2019. Принята к публикации 30.09.2019

Рассмотрена эволюция сельскохозяйственных технологий в процессе развития человеческой цивилизации. На ее примере показано, что в XX веке начался новый этап технологии обработки почвы, связанный с переходом от «серых» экстенсивных технологий управления природными ресурсами, жестко ориентированным только на сиюминутную экономическую целесообразность, на нетрадиционные (природоохранные, природоподобные – «nature-based») «green» технологии земледелия. Произошел закономерный переход от стратегии ее развития, основанной на принципе максимума производства энтропии Г. Циглера, к стратегии минимума производства энтропии И. Пригожина, в основе которого лежит рационализация использования доступных ресурсов для такой диссипативной структуры планеты, как человеческая популяция. Фундаментом рационализации служат природоподобные технологии использования человеком природных ресурсов. На примере долговременного биосферного эксперимента развития сельскохозяйственных технологий подтверждено теоретическое обоснование неизбежности «зеленого земледелия». Такой тип земледелия характеризуется более экономичным способом обработки почвы: частичным или полным отказом от отвальной вспашки, отсутствием вертикального перемешивания пахотного слоя, минимальным нарушением почвенного покрова сельскохозяйственными машинами и обязательным мульчированием почвы («no-till» или «mulch tillage») с целью сохранения почвенной влаги и уменьшения эрозии почвы. Система нулевой обработки почвы (не пахать – «no-till»), т.е. отсутствие вмешательства в естественные процессы почвообразования, – это современная система земледелия, при которой почва не обрабатывается, а её поверхность укрывается специально измельчёнными остатками растений – мульчей. Проиллюстрировано, что в настоящее время в различных регионах планеты внедряется технология прямого посева «no-till» и мульчирования, при этом используют мелкое, поверхностное рыхление или даже полный отказ от обработки почвы. Показано, что применение технологий «зеленого земледелия» ведет не только к рационализации использования энергетических и почвенных ресурсов, но и водных, ситуация с которыми становится все более напряженной для человеческой цивилизации.

Ключевые слова: принцип максимума производства энтропии Г. Циглера, принцип минимума производства энтропии И. Пригожина, эволюция технологий земледелия, зеленое земледелие, no-till, мульчирование.

DOI: 10.24411/1993-3916-2020-10078

Данная статья является продолжением работы, ранее опубликованной автором (Гусев, 2019) и посвященной теоретическому физико-экологическому обоснованию неизбежности применения в различных областях человеческой деятельности так называемых «зеленых технологий», в том числе в рассматриваемых в настоящей статье сельском и водном хозяйствах. В предыдущей работе (Гусев, 2019) обоснован переход в указанных областях человеческой деятельности от традиционных, так называемых «серых» технологий (Palmer et al., 2015) управления природными ресурсами, жестко

¹ Работа выполнена в рамках темы № 0147-2018-0001 (№ государственной регистрации АААА-А18-118022090056-0) Государственного задания ИВП РАН (раздел «Краткое изложение теоретических основ неизбежности перехода к технологиям “зеленого земледелия”») и при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-17-10039; разделы «Эволюция технологий земледелия» и «Выводы»).

ориентированных только на сиюминутную экономическую целесообразность, к нетрадиционным (природоохранным, природоподобным, «nature-based», «green»; Palmer et al., 2015) технологиям. Необходимость такого перехода все чаще обсуждается в литературе (ряд работ приведен в упомянутой статье Е.М. Гусева (2019), в международных программных докладах (Sustainable Management ..., 2010; WWAP, 2018), на различных международных конференциях и симпозиумах (XII Международный форум «Зеленая экономика», состоявшийся 21-23 мая 2018 года в Санкт-Петербурге). Это обстоятельство подчеркивает необходимость перехода к принципам и технологиям «зеленой экономики». Цель настоящей работы – на примере развития человеческой цивилизации продемонстрировать эволюцию сельскохозяйственных технологий, которая ведет в ближайшем будущем к ориентации сельского хозяйства на использование природоподобной («nature-based») агротехники, и тем самым подтвердить на примере фактически долговременного биосферного эксперимента представленное в предыдущей статье (Гусев, 2019) теоретическое обоснование неизбежности «зеленого земледелия».

Краткое изложение теоретических основ неизбежности перехода к технологиям «зеленого земледелия». В предыдущей работе (Гусев, 2019) дано физическое обоснование основных законов экологии Б. Коммонера (1974), являющихся ориентиром создания технологий рационального использования природных ресурсов. Показано, что эволюция диссипативных структур на Земле, к которым относятся в том числе и живые организмы, и надорганизменные системы, на разных этапах развития подчиняется двум фундаментальным принципам: принципу максимального производства энтропии Г. Циглера (1966) и принципу минимума производства энтропии И. Пригожина (Гленсдорф, Пригожин, 1973), периодически преобладающими друг над другом во время появления, эволюции и разрушения различных структур биосферы планеты. В первой статье (Гусев, 2019) продемонстрировано, что человечество на современном этапе голоцена оказалось именно в ситуации действия принципа И. Пригожина – ситуации необходимости и неизбежности рационального использования человечеством доступных ему ресурсов, включая области сельского хозяйства и связанного с ним сектора водного хозяйства. Данное обстоятельство неизбежно ведет к использованию человечеством стратегии «зеленого земледелия». Проявляется это через переход в сельском хозяйстве от традиционных «серых» технологий управления природными ресурсами, жестко ориентированных на максимальное их использование (согласно *принципу максимального производства энтропии Г. Циглера*), на нетрадиционные (природоохранные, природоподобные – «nature-based») «зеленые», «green» технологии. Технологии, основанные на использовании природных или близких к ним (природоподобных) процессов, обеспечивают меньшее производство энтропии, т.е. вносят меньше разрушения в биосферу, чем созданные разумом человека техногенные «серые» технологии, поскольку природные процессы с точки зрения *минимума производства энтропии И. Пригожина*, уже были оптимизированы Природой в конце предыдущего шага эволюции Земли (в отсутствие человека). Поэтому на данном этапе голоцена, когда ресурсы доступной человечеству (как наиболее активной диссипативной структуры планеты) энергии истощаются и на первый план выходит рационализация использования этих ресурсов (очередной в процессе эволюции Земли этап действия принципа И. Пригожина), появление таких технологий, ориентированных на постулате Б. Коммонера «природа знает лучше», просто неизбежно.

Эволюция технологий земледелия: этап действия принципа Г. Циглера. Попытаемся указанные выше теоретические выводы подтвердить «экспериментально», т.е. подтвердить на основе своеобразного долговременного биосферного эксперимента развития человеческой цивилизации на планете, рассмотрев эволюцию технологий земледелия, развитие которого началось более 10 тыс. лет назад.

Исследований по эволюции технологий земледелия очень много (Краснов, 1968; Андрианов, 1978; Шпаковский, 2007; Мареев, 2014; Бобровский, Гин, 2006; Скорняков, 1977; Гумилев, 1994; Noulin, 1995). Основываясь на этих исследованиях, мы попытаемся продемонстрировать, как в период развития земледелия произошел переход от технологий обработки почвы и использования ирригации, в основе которых лежал принцип максимума производства энтропии Г. Циглера, на технологии, основанные на принципе минимума производства энтропии И. Пригожина.

Земледелие существовало уже в то время, когда еще практически отсутствовали специальные почвообрабатывающие орудия. Зерна сеяли в землю без всякой обработки, создавая лунки для них заостренной палкой. Фактически это и была нулевая обработка почвы, только на примитивном

уровне. Так действовали инки Анд Южной Америки, древние египтяне и самые первобытные культуры по всему миру (рис.). Борьба с сорняками и удобрение почвы осуществлялось фактически одновременно: поджигали дикую растительность на месте будущего поля. Она сгорала, а оставшаяся зола служила прекрасным удобрением.

Как отмечается в работе Н.А. Шпаковского (2007), следующим шагом в земледелии стало использование сохи, которую тянули люди или животные. Применение сохи, позволившей создавать вместо лунок узкие борозды, подняло производительность обработки почвы, но технология возделывания зерновых при этом мало изменилась.

Развитие на планете такой активной диссипативной структуры, как человеческая популяция (Гусев, 2019), рост численности населения наряду с увеличением площадей сельскохозяйственных угодий требовали еще большего повышения урожайности сельскохозяйственных посевов. В связи с этим в земледелии возникла такая технология, как плужная обработка почвы (рис.).



Рис. Схематизация эволюции технологий обработки почвы (Шпаковский, 2007; Мареев, 2014; Гусев, 2019).

Хотя плуг появился еще до нашей эры (в Древней Греции, в Китае), он имел мало общего с современным плугом. Плуги, которые переворачивали слои почвы и таким образом способствовали борьбе с сорняками, не разрабатывались до XVII в. (Дерти, 2016; Бобровский, Гин, 2006). С XVIII в. конструкция плугов усложнялась, и в конце XVIII в. в Германии, Голландии и Великобритании появился отвальный плуг, который переворачивал почву под углом 135° и являлся эффективным

средством для борьбы с сорняками. Верхняя часть пахотного слоя в этом случае сбрасывалась в борозду, а на поверхность выворачивался нижний, рыхлый слой. Глубокая вспашка на первых порах способствовала накоплению в почве влаги, уничтожению сорняков и вредителей культурных растений и усиливала жизнедеятельность полезных микроорганизмов. Поскольку современный плуг спас Европу от голода и бедности (победив распространившегося по всей территории Европы пырея ползучего), он стал синонимом «современного» сельского хозяйства и используется в таком понимании многими представителями сельскохозяйственных школ, исследовательских институтов, университетов и прочих (Дерти, 2016). Европейские колониальные державы способствовали перенесению плуга в Северную и Южную Америку, Азию, Африку, где он стал важным орудием обработки почвы.

Таким образом, описанный выше этап эволюции технологий экстенсивного земледелия, направленный на удовлетворение растущих потребностей человеческой популяции, логично развивался *в соответствии с принципом максимума производства энтропии Г. Циглера*. Плужная обработка почвы требовала значительно более высоких энергетических затрат, чем предыдущие технологии земледелия (использование энергии тягловых животных, а затем тракторов). Соответственно, росла и диссипация энергии, т.е. рост производства энтропии в системе сельскохозяйственного производства. Повышение урожайности оставалось самым важным требованием, и экстенсивный путь развития земледелия, основанный на типично технократических «серых» технологиях, казался единственно правильным. Работал принцип максимума производства энтропии, требующий использования в сельском хозяйстве все больших ресурсов: энергетических, почвенных, водных. Технология обработки почвы включала все новые дополнительные операции. Технология, применявшаяся в середине XX века, включала вспашку, несколько культиваций, боронование и предпосевное выравнивание. Затем следовали посев и дополнительное прикатывание почвы (рис.). Мощность тракторов, глубина вспашки и ширина захвата плугов постоянно росли.

При этом также росли затраты, связанные с использованием в земледелии водных ресурсов. Орошаемое земледелие, как и обработка почвы, эволюционировало в сторону большего использования энергетических затрат на основе применения «серых» технологий. Ирригационные системы, появившиеся в Древнем Египте, Месопотамии, Китае, Передней Азии и бывшие при этом достаточно простыми, на современном этапе включают элементы организации водозабора, создания искусственных каналов, конструирования распределительной и оросительной сети, водорегулирующих устройств, использования специальной техники и т.п. (Irrigation, 2019). Особенно широко ирригационное земледелие распространено в странах аридной зоны (Северная Африка, Сахара, юг Европы, Передняя, Средняя и Южная Азия, Южная Америка и др.). Оно также требовало все большего использования человечеством энергетических и других природных ресурсов.

Таким образом, до середины XX в. эволюция земледелия, подчиняясь принципу максимума производства энтропии Г. Циглера, шла по пути все большего использования свободной энергии, поступающей с солнечным излучением и запасенной в элементах окружающей среды (газе, нефти, угле, сапропеле, гумусе). Но в конце концов указанная эволюция логично подошла к моменту смены приоритета принципа Г. Циглера на приоритет принципа И. Пригожина (Гусев, 2019). Увеличение возможностей использования свободной энергии, особенно за счет ресурсов окружающей среды, подошло к своему пределу.

Эволюция технологий земледелия: начало этапа действия принципа И. Пригожина. Человечество оказалось в ситуации, когда на продукцию сельского хозяйства тратятся огромные ресурсы, в первую очередь энергоносители, затраты труда на проведение большого числа операций превышают все мыслимые пределы. Состояние биосферы выведено из стабильного: верхний слой почвы разрыхлен, как пух, слой ниже плужной подошвы сильно переуплотнен колесами тракторов (Скуратович, 2007), в аридных областях вспаханный плодородный слой уносится с полей пылевыми бурями, оставляя за собой пустыню, происходит массовое сведение лесов под сельскохозяйственные угодья, эрозия почв охватила десятки миллионов гектаров, произошла деградация почв вследствие их засоления на больших площадях орошаемых земель, содержание гумуса даже в лучших черноземах упало с 10-12 до 5-6% (Шпаковский, 2007).

Таким образом, для поддержания и сохранения своего гомеостаза человечество вынуждено переходить к этапу, когда на первый план выходит принцип минимума производства энтропии И. Пригожина, ориентирующий развитие соответствующей диссипативной структуры (в данном

случае человеческой популяции) на путь рационального использования имеющихся ресурсов. А данная стратегия, как показано ранее (Гусев, 2019), основана на так называемой «зеленой экономике» (European Commission ..., 2013; Hall, Dorai, 2010; Palmer et al., 2015; WWAP, 2018), базирующейся на следующих постулатах: невозможно бесконечно расширять сферу влияния в ограниченном пространстве, невозможно требовать удовлетворения бесконечно растущих потребностей человека в условиях ограниченности ресурсов, технологии использования природных ресурсов в своей реализации должны быть ориентированы на *принципы и закономерности, заложенные природой* и доказавшие свою эффективность сотнями миллионов лет существования жизни на Земле.

Эмпирически понимание необходимости ориентации земледелия на технологии, основанные на использовании природных или природоподобных процессов, т.е. необходимости перехода от «серых» технологий на «зеленые», возникло и стало развиваться в XX в. Одним из основоположников почвозащитной системы земледелия, показавших ненужность и вредность плуга, был русский ученый-агроном И.Е. Овсинский (2004). В своей работе, опубликованной еще в 1909 г., он писал, что при глубокой вспашке затрачиваются громадные суммы на увеличение тяглового усилия, на удобрения, количество которых при рациональной обработке можно значительно уменьшить или же совсем не применять, теряются миллиарды рублей вследствие неурожаев при засухе, которая разоряет хозяйство при глубокой вспашке. Он отмечал, что знаменитый Ф. Крупп своими снарядами для военного разрушения не принес столько вреда человечеству, сколько принес завод плугов для отвальной вспашки, и что никакие военные контрибуции не сравнятся с теми убытками, которые приносит земледелию глубокая вспашка. Справедливости ради следует сказать, первые указания о роли органической мульчи в рационализации земледелия и необязательности пахоты дал лет за двадцать до И.Е. Овсинского русский ученый-энциклопедист Д.И. Менделеев (1991).

На западе развитие ресурсосберегающего земледелия связано с именем Эдварда Фолкнера. Его можно назвать «американским Овсинским» – так схожи их системы земледелия. Опыты Э. Фолкнера в штате Огайо в 30-е годы XX в. показали ошеломляющие результаты в улучшении структуры почвы и повышении ее плодородия. В 1943 году в США вышла его книга «Безумие пахаря» (Faulkner, 1943), посвященная вопросам обработки почвы. В ней Э. Фолкнер критикует плужную обработку почвы, считая ее вреднейшим приемом, приведшим земледелие США и других стран к упадку, бесплодию почв и многим другим бедам. Фактически с публикации «Безумия пахаря» в США начинается внедрение ресурсосберегающих технологий в земледелие. В СССР идеи и предложения Фолкнера позднее получили отражение в системах земледелия, разработанных Т.С. Мальцевым (Иванов, 1977) для Зауралья, а также А.И. Бараевым (1975) для Казахстана и Сибири.

С работ указанных выше исследователей начался поворот в земледелии на так называемые нетрадиционные (адаптивные, почвозащитные, природоохранные, минимальные, нулевые, «green», «no-till») технологии обработки почвы (рис.; Ломакин, 1988; Scopel et al., 2004; Батурин, 2007; Двуреченский, 2009; Мареев, 2014; Hall, Dorai, 2010; Доманов, 2017; Palmer et al., 2015; Balwinder-Singha et al., 2016). В настоящее время использование указанных технологий становится все более широким, особенно в аридных и полуаридных регионах. Эти агротехнологии характеризуются более экономичными способами обработки почвы: частичным или полным отказом от отвальной вспашки, отсутствием вертикального перемешивания пахотного слоя, минимальным нарушением почвенного покрова сельскохозяйственными машинами и обязательным мульчированием почвы («no-till» или «mulch tillage») с целью сохранения почвенной влаги и уменьшения эрозии почвы. Система нулевой обработки почвы – современная система земледелия, при которой почва не обрабатывается, а ее поверхность укрывается специально измельченными остатками растений – мульчей. В различных регионах планеты внедряется технология прямого посева «no-till» и мульчирования, при этом используют мелкое, поверхностное рыхление или даже полный отказ от обработки почвы (Сельскохозяйственные экосистемы, 1987; Hall, Dorai, 2010). При этом важно, что ряд производственных операций в целях экономии энергии совмещается во времени, т.е. производится одновременно (рис.).

Как было указано выше, «no-till» технологии очень эффективны с точки зрения сохранения почвенных ресурсов. Так, отмечается, что только при безотвальной обработке почвы по оценкам некоторых авторов (Работа водных потоков, 1987; Kirkby, Morgan, 1980), полученным на экспериментальном материале, смыв почвы в период снеготаяния снижается в два раза, а вызванный

ливневым стоком – в 1.7 раза. По данным, полученным в Молдавии (Константинов, 1987) и США (Kirkby, Morgan, 1980), применение другого элемента «no-till» – мульчирование поверхности почвы соломой даже в количестве 4-6 т/га снижает эрозию в 8-10 раз. Одно из главных условий «no-till» технологии – создание на почве «одеяла» из пожнивных остатков. При этом процесс образования мульчирующего слоя из растительных остатков может длиться несколько лет. После создания мульчи биоценоз в почве постепенно восстанавливается и работает на воспроизводство ее плодородия. При использовании нулевых технологий более 20 лет достигается идеальная ситуация для почвы: высокий круговорот питательных элементов, высокий коэффициент содержания углерода, минимизация использования минеральных удобрений для получения урожая и *практически полное исключение почвенной эрозии* (Сафин и др., 2013, 2014).

Следует отметить, что применение «no-till» технологий ведет не только к рационализации использования энергетических и почвенных ресурсов, но и водных, ситуация с которыми становится все более напряженной для человеческой цивилизации. Так, в программном Всемирном докладе Организации Объединенных Наций о состоянии водных ресурсов (WWAP, 2018) говорится, что человечеству нужны новые решения для управления водными ресурсами, чтобы компенсировать растущие вызовы водной безопасности в условиях роста населения и изменения климата. Примером одного из таких решений является «ресурсосберегающее земледелие». При этом в докладе ООН (WWAP, 2018) утверждается, что, хотя природоподобные технологии предполагают значительные достижения в ирригации, *основным направлением должно стать увеличение урожайности в богарных системах, не нарушающих естественную циркуляцию гидрологического цикла*.

Таким образом, на примере сельского хозяйства мы видим, что в XX в. начался новый этап в эволюции такой диссипативной структуры на планете, как человеческая популяция. Произошел закономерный переход стратегии ее развития, основанной на принципе максимума производства энтропии Г. Циглера, к стратегии минимума производства энтропии И. Пригожина, в основе которого лежит рационализация использования диссипативной структуры доступных ресурсов. Фундаментом рационализации служат природоподобные, «nature-based» технологии (WWAP, 2018) использования человеком природных ресурсов.

Хотя справедливости ради надо отметить, что технологии без вспашки включают элемент и традиционной «серой» технологии. Это относится к проблеме борьбы с сорняками. Конечно, частично она решается за счет весенней обработки почвы плоскорезными культиваторами. Но, тем не менее приходится так же, как и при работе по традиционной технологии, пока применять гербициды, использование которых вряд ли можно отнести к природоподобным решениям.

Уже в настоящее время использование в земледелии технологий без вспашки становится все более широким, особенно в аридных и полуаридных регионах. Создание новейших технических средств, конструирование соответствующих сельскохозяйственных машин способствуют увеличению производительности земледельческих комплексов, применяющих минимальную и нулевую технологии обработки почв (Ресурсосберегающие..., 2019). Сберегающее земледелие является долгосрочным видом ресурсосбережения. При рациональном его введении удастся достичь максимальных показателей минимизации затрат, сокращения ущерба экономике и экологии, существенно повышается эффективность производства.

Использование «no-till» технологий в мире. Сегодня «no-till» технология применяется в хозяйствах от Полярного круга (Финляндия), через тропики (Кения, Уганда) до 50°С южной долготы (Фолкленские и Мальдивские о-ва); на высоте до 3000 м н.у.м. БС (Колумбия, Боливия); от территорий повышенной влажности (Бразилия, Чили) до крайне засушливых (Западная Австралия). Но в разных странах степень ее применения различна. Нулевая технология – не только отказ от пахоты, это целостная система земледелия, требующая проведения всех необходимых агротехнических приемов своевременно, качественно и в полном объеме. Она не прощает ошибок, малейшее отклонение от технологии оборачивается потерей урожая. И, прежде всего, требуется радикальная перестройка мышления, изменение самой философии подхода к земледелию (Сафин и др., 2013, 2014). Все это требует либо государственного управления, либо оперативной реакции на растущие вызовы текущей ситуации в земледелии самих сельскохозяйственных производителей (включая и создателей оборудования для «no-till»), совместной работы ученых, преподавателей, консультантов, фермеров и представителей бизнеса. В разных странах это происходит по-разному.

В настоящее время в наибольшей мере природоподобная «no-till» технология используется фермерами-механизаторами в Южной Америке: на 45% посевной площади в Бразилии, на 80% – в Аргентине и на 60% – в Парагвае, а также в Австралии, где на нулевую систему перешли 70% фермеров (Hall, Dorai, 2010; Дерти, 2016). Аргентина, Парагвай и Австралия – лидирующие страны в мире по проценту внедрения метода «no-till». В США лишь около 17% общей посевной площади занято под «no-till» обработку почвы (Дерти, 2016; Прямой посев ..., 2017).

В Европе, Африке и Азии по сравнению с американскими континентами устойчивая производственная система по сбережению природных ресурсов «no-till» пока применяется в небольшой степени. Такая же ситуация и в России, в которой технология «no-till» используется фрагментарно. На постсоветском пространстве довольно широко технология «no-till» применяется в Казахстане, обеспечивая его качественным зерном твердых сортов пшеницы (в отличие от России, где в связи с другими климатическими условиями 90-95% пахотных земель занимают более низкокачественные сорта мягкой пшеницы).

Приведем несколько примеров, показывающих, что при соблюдении технологии «no-till» урожайность (в масштабах как отдельных хозяйств, так и государства в целом) не только не уменьшается, а наоборот – увеличивается.

Так, фермер Ральф Хольцварт, округ Брукингс, Южная Дакота, за 6 лет в начале XXI в. произвел на 7% больше зерна кукурузы при осадках на 125 мм ниже, а также при меньшей плотности посевов, чем другие производители округа, выращивающие кукурузу в системах, основанных на традиционной обработке почвы. Отдельное растение кукурузы на его ферме производит на 45% больше зерна, чем растение кукурузы в округе Брукингс (Прибавка к урожайности ..., 2014).

В Казахстане последовательное применение нулевой технологии сева позволяет дополнительно сберечь 50-60 мм полезной влаги в год, что приводит к повышению урожая зерновых (Сафин и др., 2013, 2014). Этот факт иллюстрирует таблица, в которой приведены данные по урожайности пшеницы при использовании различных агротехнологий в районе Костанайского НИИСХ.

Таблица. Рост урожайности яровой пшеницы в связи с переходом на минимальную и нулевую технологии возделывания (Костанайский НИИСХ; Сафин и др., 2014).

Традиционная технология		Минимальная технология		Нулевая технология	
1991-1995 гг.		1996-2000 гг.		2004-2009 гг.	
ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%
12.8	100	19.5	152	28.7	224

В Аргентине применение прямого сева дает возможность дополнительно сберечь 100-150 мм полезной влаги в год. Благодаря «no-till» технологии сухие годы преобразуются в засушливые, а засушливые – в благоприятные (Сафин и др., 2014). В работе «Прямой посев ...» (2017) отмечается, что фермеры Аргентины за последние десять лет увеличили производство зерна почти в два раза и вывели его в число ведущих на планете экспортеров продовольствия. При этом в Аргентине (в отличие от США и ЕС) фермеры не получают какой-либо помощи от государства и вынуждены полагаться только на самих себя, искать пути сокращения затрат и повышения урожая. Стремительный экономический взлет был обусловлен быстрым внедрением нулевой обработки в производство основных сельскохозяйственных культур. Это стало возможно во многом еще и потому, что производители посевной техники в этой стране оперативно отреагировали на растущие потребности в оборудовании для «no-till» технологии. Столь быстрая реакция машиностроителей на потребности рынка характерна для всех стран Южной Америки.

«No-till» технологии в России. В России в настоящее время темпы перехода на «no-till» весьма скромные. Как было сказано выше, для указанного перехода необходима или централизованная государственная программа, или оперативная реакция самих сельскохозяйственных производителей (включая работу ученых, фермеров, представителей бизнеса и создателей оборудования для «no-till» технологий). По разным причинам (в первую очередь в силу сырьевой стратегии социально-экономического развития страны) ни того, ни другого в России нет. Поэтому, как было отмечено,

в России технология «no-till» используется лишь фрагментарно в Башкортостане, Зауралье, на Алтае, в Южной Сибири, тем не менее демонстрируя в большинстве случаев неплохие результаты. В частности, на примере Сельскохозяйственного производственного кооператива «Красная Башкирия» Абзелиловского района Республики Башкортостан за 2013 год показано, что прибыльность производства пшеницы при использовании традиционной агротехнологии в расчете на 1 га меньше на 2.7 тыс. руб. (или на 37%), чем при возделывании данной культуры по нулевой технологии (Сафин и др., 2013, 2104).

Несмотря на небольшой опыт применения в стране «no-till» технологий, многие специалисты в области земледелия считают, что использование «nature-based» технологий в России неизбежно будет расширяться (Мареев, 2014; Сафин и др., 2013, 2014). В связи с отсутствием в стране длительных полевых исследований (~20-30 лет) по использованию нулевой технологии мы продемонстрируем лишь некоторые теоретические (модельные) оценки возможных перспектив использования «no-till» в России.

В частности, в работе Е.М. Гусева и Л.Я. Джоган (2019) показано, что технология нулевой (минимальной) обработки почвы в сочетании с мульчированием поверхности почвы растительными остатками является наиболее перспективным путем повышения влагообеспеченности и урожайности посевов пшеницы в степных районах Крымского полуострова (особенно в условиях осуществленной Украиной в 2014 г. водной блокады Крыма). При этом влагообеспеченность посевов пшеницы (определяемая отношением реальной транспирации посевов к потенциальной) на богарных полях степных районов Крыма увеличится в среднем на 13%, а урожайность пшеницы возрастет по сравнению с использованием традиционной технологии обработки почвы (с учетом повышения содержания гумуса в почве при долговременном (порядка 8-10 лет) мульчировании ее поверхности) в среднем на 12% (~ на 5.3 ц/га).

В работе Е.М. Гусева (2012) продемонстрировано, что в степной и лесостепной зонах России, являющихся важнейшими регионами страны для получения продовольственного и фуражного зерна, в отсутствие орошения на продуктивное испарение (транспирацию) на полях зерновых в среднем расходуется примерно 50% от всего суммарного испарения (еще 50% является непродуктивным испарением с почвы). При проведении мульчирования доля транспирации возрастает до 70-75%.

Еще один пример перспективности применения «nature-based» технологий в земледелии России рассмотрен в более ранних наших работах (Гусев, Джоган, 2018; Gusev et al., 2018), в которых исследуемым регионом также являются степная и лесостепная зоны Русской равнины. В них проведено сравнение двух стратегий повышения урожайности пшеницы в российской части рассматриваемого региона: 1) повышение среднемноголетнего годового валового урожая за счет увеличения доли орошаемых земель в регионе до 10% (Колганов и др., 2016), 2) получение такого же годового валового урожая пшеницы на тех же пахотных землях за счет использования на некоторой части площадей мульчирования почвы растительными остатками в сочетании с сокращенной обработкой почвы (вместо увеличения орошаемых площадей). При проведении оценок энергетических составляющих затрат на производство продукции и выхода с производимой продукцией (с учетом статистических данных по площадям пахотных земель, занятых под посевы пшеницы, для каждой административной области РФ, рассмотренного региона), оказалось, что одинаковые (для двух указанных выше стратегий) годовые валовые урожаи пшеницы для региона в целом (~50 млн. т/год) достигаются, если для второй стратегии культивирование с мульчированием используется на 30% пахотных земель. При этом ежегодные затраты для второй стратегии примерно на 1 миллиард US\$/год дешевле использования первой.

Указанная экономия для рассмотренного в работе региона при осуществлении второй стратегии относительно мала. Но главный аспект здесь заключается в том, что экологически более обоснованная и более природоподобная («nature-based») агротехнология, связанная с минимальной обработкой почвы (без несвойственного биосфере оборота пласта) в сочетании с мульчированием ее поверхности растительными остатками (заменяющих присутствующий в естественных степных экосистемах растительный войлок, уменьшающий непродуктивное испарение с почвы и ее эрозию), оказывается не дороже использования агрессивной по отношению к биосфере традиционной агротехнологии, основанной на глубокой вспашке (связанной с оборотом пласта) и применением орошения (приводящего к нарушению естественных структур гидрологического цикла), а в какой-то мере даже дешевле.

Выводы

В предыдущей статье (Гусев, 2019) был обоснован переход в указанных областях человеческой деятельности от традиционных так называемых «серых» технологий управления природными ресурсами, жестко ориентированным только на сиюминутную экономическую целесообразность, на нетрадиционные (природоохранные, природоподобные – «nature-based», зеленые – «green») технологии. В настоящей работе, являющейся продолжением предыдущей (Гусев, 2019), на примере развития человеческой цивилизации продемонстрирована эволюция сельскохозяйственных технологий, ведущая к неизбежности ориентации сельского хозяйства в ближайшем будущем на использовании «nature-based» агротехники. Тем самым на примере фактически долговременного биосферного эксперимента подтверждено представленное в предыдущей статье (Гусев, 2019) теоретическое обоснование неизбежности «зеленого земледелия».

Анализ истории развития сельского хозяйства показал, что в XX в. начался новый этап в эволюции такой диссипативной структуры на планете, как человеческая популяция. Произошел закономерный переход от стратегии ее развития, основанной на принципе максимума производства энтропии Г. Циглера, к стратегии минимума производства энтропии И. Пригожина, в основе которого лежит рационализация использования диссипативной структуры доступных ресурсов. Фундаментом рационализации служат природоподобные («nature-based») технологии использования человеком природных ресурсов. Уже в настоящее время использование в земледелии «no-till» технологий становится все более широким, особенно в аридных и полуаридных регионах. Создание новейших технических средств, конструирование соответствующих сельскохозяйственных машин способствуют увеличению производительности земледельческих комплексов, применяющих минимальную и нулевую технологии обработки почв. Сберегающее земледелие является долгосрочным видом ресурсосбережения. При рациональном его введении существенно повышается эффективность производства, удастся достичь максимальных показателей минимизации затрат, сокращения ущерба экономике и экологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андрианов Б.В. 1978. Земледелие наших предков. М.: Наука. 167 с.
- Бобровский М.В., Гин А. 2006. Земледелие в Европе. Хронология с картинками. ТРИЗ-профи: Эффективные решения в сельском хозяйстве. М. Кушнир. 220 с.
- Глендорф П., Пригожин И. 1973. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации. М.: Мир. 280 с.
- Гумилев Л. 1994. Этногенез и биосфера Земли. М.: ТанаисДи-Дик. 640 с.
- Гусев Е.М. 2012. Ресурсы почвенных вод и экология наземного растительного покрова. Концепции, эксперимент, расчеты. Palmarium Academic Publishing: Saarbrücken. 116 с.
- Гусев Е.М. 2019. Неизбежность и перспективы использования человечеством стратегии «зеленого земледелия» // Аридные экосистемы. Т. 25. № 3 (80). С. 3-10. [Gusev E.M. 2019. Inevitability and Prospects of the Use of the “Green Farming” Strategy by Humanity // Arid Ecosystems. Vol. 9. No. 3. P. 143-149.]
- Гусев Е.М., Джоган Л.Я. 2018. Влияние различных агротехнологий на формирование водного режима, урожайность, эколого-энергетическую и экономическую эффективность посевов пшеницы в степной и лесостепной зонах Русской равнины // Природообустройство. № 3. С. 81-87.
- Гусев Е.М., Джоган Л.Я. 2019. Мульчирование как важный элемент стратегии использования ресурсов естественного увлажнения в агроэкосистемах степного Крыма // Почвоведение. № 3. С. 348-354.
- Двуреченский В.И. 2009. Ресурсосберегающие технологии в засушливой степи Казахстана [Электронный ресурс http://zarechnoe.ucoz.kz/HTML_documents/nashi_ststyi/Resyrsovlagotehnologii.htm (дата обращения 22.03.2018)].
- Дерти Р. 2016. Так что же было раньше: обработка или «ноль»? [Электронный ресурс <http://agrotehnoogy.com/no-till/teoriya/tak-cto-zhe-bylo-ranshe-obrabotka-ili-nol> (дата обращения 12.01.2019)].
- Доманов М.Н. Минимальная обработка почвы: разрушение мифов. 2017 [Электронный ресурс <http://www.agbz.ru/articles/minimalnaya-obrabotka-pochvyi--razrushenie-mifov> (дата обращения 04.01.2019)].
- Иванов Л.И. 1977. Терентий Мальцев – народный академик. М.: Советская Россия. 224 с.
- Колганов А.В., Сухой Н.В., Шкура В.Н., Щедрин В.Н. 2016. Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения в России. Новочеркасск: РосНИИПМ. 222 с.
- Коммонер Б. 1974. Замыкающийся круг. Л.: Гидрометеоздат. 274 с.
- Константинов И.С. 1987. Защита почв от эрозии при интенсивном земледелии. Кишинев: Штиинца. 240 с.

- Краснов Ю.А.* 1968. О возникновении пашенного земледелия в лесной полосе Восточной Европы // Советская археология. № 2. С. 3-22.
- Ломакин М.М.* 1988. Мульчирующая обработка почвы на склонах. М.: Агропромиздат. 183 с.
- Мареев М.А.* 2014. No-till – время пришло [Электронный ресурс <http://www.tambov-apk.ru/articles/3519/> (дата обращения 21.02.2019)].
- Менделеев Д.И.* 1991. С думою о благе российском: Избранные экономические произведения. Новосибирск: Наука. 231 с.
- Овсинский И.Е.* 2004. Новая система земледелия. Перепечатка публикации 1909 г. М.: АГРО-СИБИРЬ. 47 с.
- Почвозащитное земледелие. 1975 / Ред. А.И. Бараев. М.: Колос. 304 с.
- Прибавка к урожайности при No-Till. 2014 [Электронный ресурс <http://agropost.ru/rastenievodstvo/zemledelie/pribavka-k-urozhaynosti-pri-no-till.html> (дата обращения 5.04.2019)].
- Прямой посев: южноамериканская и австралийская модель. 2017 [Электронный ресурс http://agropraktik.ru/blog/Direct_seed/1029.html (дата обращения 12.04.2019)].
- Работа водных потоков. 1987 / Ред. Р.С. Чалов. М.: Издательство МГУ. 194 с.
- Ресурсосберегающие технологии в АПК. 2019 [Электронный ресурс <https://solarfields.ru/blog/primenyaemye-tehnologii-v-apk/resursosberegayushchie-tehnologii-v-apk/selskohozyaystvennaya-tehnika> (дата обращения 12.01.2019)].
- Сафин Х.М., Шварц Л.С., Фахрисламов Р.С.* 2013. Технология No-till в системе берегающего земледелия: теория и практика внедрения. Уфа: Мир печати. 72 с.
- Сафин Х.М., Шварц Л.С., Фахрисламов Р.С.* 2014. No-till берегает почву и деньги крестьянина // Поле деятельности. № 2 [Электронный ресурс <https://apc-intech.ru/no-till-sberegayet-pochvu-i-dengi-krestyanin> (дата обращения 11.04.2019)].
- Сельскохозяйственные экосистемы. 1987 / Ред. Л.О. Карпачевский. М.: Агропромиздат. 4 с.
- Скорняков С.М.* 1977. От шумеров до наших дней (очерк истории развития земледелия). М.: Россельхозиздат. 271 с.
- Скуратович А.* 2007. Не давите, мужики! Не давите!... (Обзор: как выращивать растения и не утапывать почву?). История великого дела // ТРИЗ-профи: Эффективные решения. М.: Кушнер. Ver 2.0. С. 87-101.
- Циглер Г.* 1966. Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механика сплошной среды. М.: Мир. 136 с.
- Шпаковский Н.А.* 2007. Эволюция технологии обработки почвы [Электронный ресурс <https://www.trizland.ru/trizba/pdf-articles/triz-prof2/008.pdf> (дата обращения 12.02.2019)].
- NO-TILL – шаг к идеальному земледелию. 2007 / Ред. В. Батулин. М.: Издательство Листерра. 127 с.
- Balwinder-Singha, Humphreys E., Gaydond D.S., Eberbach P.L.* 2016. Evaluation of the effects of mulch on optimum sowing date and irrigation management of zero till wheat in central Punjab, India using APSIM // Field Crops Research. Vol. 197. P. 83-96.
- European Commission. Building a Green Infrastructure for Europe. 2013. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 24 p.
- Faulkner E.H.* 1943. Plowman's Folly. Norman. University of Oklahoma Press. 174 p.
- Hall A., Dorai K.* 2010. The greening of agriculture. Agricultural innovation and sustainable growth. Link Limited. Brighton, United Kingdom. 60 p.
- Irrigation. 2019 [Электронный ресурс <https://en.wikipedia.org/wiki/Irrigation#References> (дата обращения 17.01.2019)].
- Gusev Y.M., Dzhogan L.Y., Nasonova O.N.* 2018. Modelling the impact of mulching the soil with plant remains on water regime formation, crop yield and energy costs in agricultural ecosystems // Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. Vol. 376. P. 77-82.
- Kirkby M.J., Morgan R.P.* 1980. Soil erosion. John Wiley & Sons, New York. USA. 312 p.
- Noulin J.* 1995. Moissonneuses et batteuses en France. E/P/A Editions. 120 p.
- Palmer M.A., Liu J., Matthews J.H., Mumba M., D'Odorico P.* 2015. Water security: Gray or green? // Science. Vol. 349. No. 6248. P. 584-586.
- Scopel E., Da Silva F., Corbeels M., Affholder F., Maraux F.* 2004. Modelling crop residue mulching effects on water use and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions // Agronomie. Vol. 24. P. 383-395.
- Sustainable Management of Water Resources in Agriculture. 2010. OECD publishing, Paris. France. 120 p.
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme)/UN-Water. 2018. The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water. Paris. UNESCO. 139 p.

УДК 911.52; 911.2

ЛАНДШАФТНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДИНАМИКИ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

© 2020 г. Т.И. Харитонова, Н.В. Сурков

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, ГСП-1. E-mail: kharito2010@gmail.com

Поступила в редакцию 10.05.2019. После доработки 29.08.2019. Принята к публикации 30.09.2019

В статье рассматриваются дистанционные методы описания внутрисезонной динамики влажности почвенно-растительного покрова. Полевая влажность почвенно-растительного покрова описывается интегральным показателем, который учитывает влагосодержание верхнего горизонта почв (5-10 см), травяной фитомассы и листьев древесно-кустарниковой растительности. Полевая интегральная влажность демонстрирует достоверную связь с нормализованным разностным влажностным индексом (NDWI) с коэффициентом детерминации R^2 , достигающим значений 0.91 для отдельных классов урочищ. Наиболее значимыми факторами, определяющими потерю влаги за летний период, являются объем фотосинтетически активной фитомассы, потенциальное поступление солнечной радиации за исследуемый период и запас влаги в почве и растительности в начале вегетации. Эти факторы описывают 67% разницы NDWI в период с мая по август 2016 года в лесных участках и 89% в степях. Полученные результаты могут быть использованы для поиска пожароопасных участков в степях и лесах, а также для мониторинга виноградников.

Ключевые слова: Карадагский заповедник, влажность почвенно-растительного покрова, NDWI, семиаридные ландшафты Крыма.

DOI: 10.24411/1993-3916-2020-10079

Мониторинг влажности почвенно-растительного покрова важен в первую очередь для прогноза биологической продукции экосистем, расчета поливных норм в сельском хозяйстве, обеспечения своевременных противопожарных мер. Разработано три подхода к дистанционному определению влажности: на основе отражения земной поверхностью солнечного излучения в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн (0.4-2.5 мкм), на основе отражения и собственного излучения земной поверхности в тепловом (10-13 мкм) и в микроволновом (2.7 мм – 30 см) диапазонах.

Распознавание данных *микроволновой съемки* основано на тесной связи диэлектрической постоянной почвы с ее влажностью: с увеличением влажности растет диэлектрическая постоянная и увеличивается поток микроволнового излучения (Dobson, Ulaby, 1985). Одновременно микроволновый сигнал зависит от рельефа, шероховатости поверхности и свойств растительного покрова. Так как влажность почвы изучается главным образом в динамике, то характеристики рельефа и шероховатость поверхности принимаются неизменными за исследуемый период. При всех вышесказанных допущениях модели влажности почв, созданные по данным активных и пассивных микроволновых приемников, показывают относительно высокую точность с R^2 от 0.49 до 0.67 (Escorihuela, Quintana-Seguí, 2016). Более высокую достоверность (R^2 до 0.85) показывают модели, построенные для ровных поверхностей с более или менее однородной растительностью, то есть для сельскохозяйственных полей (Wigneron et al., 1995).

Главным преимуществом систем дистанционного зондирования, работающих в микроволновом диапазоне, является широкополосная съемка, позволяющая получать данные о состоянии земной поверхности ежедневно или даже дважды в сутки (AMSR-E, AMSR2). Существенным их недостатком является мелкий масштаб: у приемников AMSR пространственный масштаб составляет 5.4-56 км в зависимости от длины волны; у приемника SMAP разрешение повышено до 1-3 км при снижении частоты съемки до 2-3 дней.

Интерпретация данных *тепловой съемки* основана на зависимости разницы температуры воздуха

и земной поверхности от интенсивности испарения (Seneviratne et al., 2010). Повышение разницы температур сигнализирует о замедлении испарения и, соответственно, о недостатке воды в почве. Данная методика дает довольно точный результат для расчета поливных норм на полях с более или менее сходными посевами (Ghulam et al., 2008). При исследовании более сложного ландшафтного покрова неоднородность растительности создает ошибки моделирования. Температура поверхности почвы и листьев рассчитывается на основе данных тепловой спутниковой съемки, температура воздуха должна быть получена инструментально, что создает дополнительную сложность данного подхода.

Более распространенным методом, предложенным M.S. Moran с соавторами (1994), является статистическое моделирование дефицита почвенной влаги в факторном пространстве яркостной температуры земной поверхности и вегетационного индекса NDVI. Суть метода заключается в том, что каждый фитоценоз имеет нижнюю и верхнюю границы яркостной температуры, соответствующие состояниям полного насыщения влагой почвы и ее полного иссушения. Температура оголенной почвы меняется в более широких диапазонах. Все сочетания температуры и NDVI формируют в признаковом пространстве фигуру трапецоида. Форма трапецоида имеет региональную специфику и для точного определения требует большого объема полевого материала, собранного в разных ландшафтных условиях и климатических состояниях (Carlson, 2007). При хорошей калибровке модели достоверность определения дефицита влажности высокая – $R^2=0.6-0.9$ (Sadeghi et al., 2017), а спутниковая съемка, производимая одновременно в оптическом и тепловом диапазоне, позволяет довольно оперативно получать информацию о состоянии земной поверхности.

Исследование влажности земной поверхности по данным *оптической* съемки основано на изменении отражательной способности листа в ближнем и среднем инфракрасных диапазонах (БИК 700-1300 нм, СРИК 1300-3000 нм), которая определяется изменением клеточной структурой листа при обезвоживании (Peuelas et al., 1993) и напрямую зависит от фактического содержания воды в листе (Gillon et al., 2004; Yebra et al., 2013). Метод оценки содержания влаги в растительном покрове по дистанционным данным обоснован в работах В.-С. Gao (1996) и Р. Сeccato с соавторами (2002). Все методы опираются на соотношение отражения в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне, выраженное в разных вариантах спектральных влажностных индексов с различными поправками.

Вышеперечисленные методы имеют одинаковые особенности. Во-первых, все они базируются на аксиоме о тесной зависимости влажности почвы и растительности. Принимается, что отражение незадернованной почвы дает информацию о влажности верхних 5-10 см почвы, а растительность – о влажности корнеобитаемого слоя, при этом все методы стремятся привести данные съемки либо к влажности почвы (применяется при интерпретации микроволнового и теплового излучения), и тогда растительность является помехой (Швецов и др., 2013), либо к влажности фитомассы (в случае интерпретации оптических каналов), и в этом случае большие ошибки наблюдаются на территориях с разреженной растительностью. Во-вторых, все модели калиброваны не на абсолютные значения содержания влаги в почве и растительности, а на ее отклонение от минимального или максимального содержания, чаще всего на дефицит влажности. В-третьих, процесс потери влаги идет по-разному в разных природных условиях, и чаще всего модели калибруются для разных типов растительного покрова (Сeccato et al., 2002), но уже встречаются работы, где учитывается ландшафтная неоднородность, так W. Nijland с соавторами (2015) при исследовании влагозапасов в лесной кроне использовали эдафическую матрицу Погребняка. В-четвертых, все модели дают высокие показатели достоверности на относительно выровненных территориях, их применение в горных территориях либо невозможно, как для микроволновой съемки, либо плохо изучено.

Целью данного исследования являлось построение статистической модели, позволяющей оценить сезонную динамику влажности почвенно-растительного покрова ландшафтов восточной оконечности Крымских гор по данным оптической съемки Landsat-8. Проблема разделения вклада почвенной влаги, влаги травяного, кустарникового и древесного яруса в интегральное отражение была решена введением показателя, учитывающего доленое участие каждого яруса в общем сигнале. Прогрессирующее иссушение территории в летний период (Трансформация ..., 2009), позволило нам оценить динамику влажности почвенно-растительного покрова в отношении к наиболее увлажненным условиям, которые наблюдались в середине мая. Моделирование проведено для классов урочищ, отражающих разнообразие растительности, экспозиции и морфометрии рельефа.

Материалы и методы

На территории Карадагского заповедника и заказника Эчкидаг было заложено 38 точек ландшафтных описаний и отбора проб (рис. 1). Отбирались пробы древесной листвы (при наличии), укос травяной растительности с площади 50x50 см, при значительном проективном покрытии отдельно отбирались пробы опада, сухой массы злаков или мохового покрова. Пробы почвы отбирались методом конверта с глубины 5-10 см. Отбор проб из верхних 5 см не производился, т.к. в них сильнее выражены внутрисуточные колебания влажности и за ними «теряется» её динамика на более длинных временных отрезках (Горбунов и др., 2015). Определение влажности образцов проводилось весовым методом и рассчитывалось как отношение потери массы при высушивании к массе влажного образца.

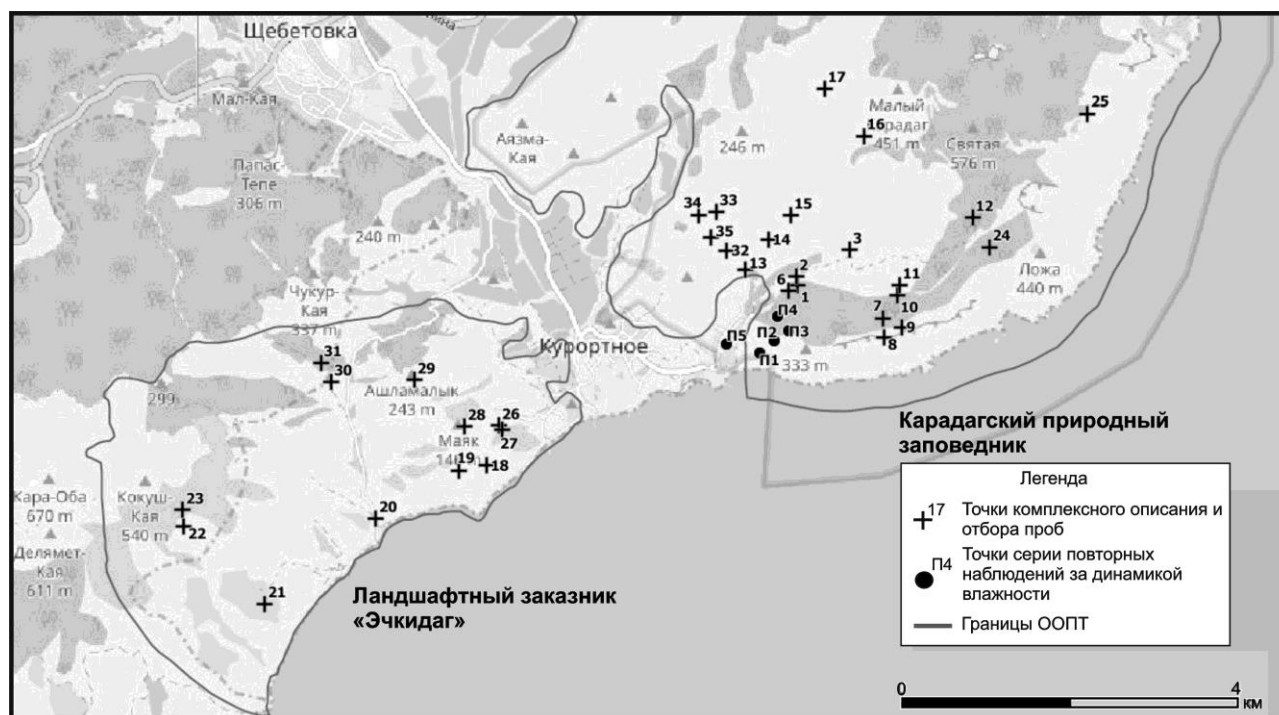


Рис. 1. Территория исследования и точки отбора проб.

Морфометрический анализ рельефа производился на основе цифровой модели рельефа с пространственным разрешением 30 м, построенной методом ординарного кригинга по горизонталям, оцифрованным с топографической основы масштаба 1:50000. Потенциальное перераспределение влаги по рельефу оценивалось по влажностному индексу SAGA Wetness Index, рассчитанному как логарифм отношения удельной площади водосбора к уклону данной ячейки растра (Böhner, Selige, 2006). Потенциальная солнечная радиация вычислена в программе SAGA на основе морфометрии рельефа, высоты солнца и продолжительности светового дня (Сысуев, 2003).

Действительная влажность почвенно-растительного покрова определена как гипотетическая толщина слоя воды в листе растения или тонком приповерхностном слое субстрата, которая оценивается с помощью нормализованного разностного влажностного индекса NDWI с формулой $NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$, где NIR – отражение в ближнем диапазоне, SWIR – отражение в среднем инфракрасном диапазоне длин волн (Maki et al., 2004). В работе использованы безоблачные снимки Landsat-8 за 14 мая, 15 июня, и 27 августа 2016 г. По тем же снимкам был рассчитан нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI.

Так как значение яркости пикселя формируется за счёт отражения от всей поверхности в его границах, то ей может оказаться частично крона дерева или куста, ярус травяной растительности или голая почва. В данной работе влажность почвенно-растительного покрова описывается интегральным показателем, который комбинирует значения влажности почвы, травяной фитомассы и листвы деревьев. Таким образом, мы получаем полевой слой воды в видимом для спутниковой съемки

почвенно-растительном покрове. Он рассчитывается, как:

$$V = a * V_{\text{лист}} + b * V_{\text{трав}} + c * V_{\text{почв}},$$

где V – интегральная влажность, $V_{\text{трав}}$ – влажность травяной фитомассы, $V_{\text{почв}}$ – влажность верхнего слоя почвы, $V_{\text{лист}}$ – влажность древесной листвы, a – сомкнутость крон деревьев, b – проективное покрытие травяного яруса в долях от единицы в случае, когда $(a+b) \leq 1$; принимается равным $(1-a)$ в случае, когда есть частичное перекрытие ярусов, c – доля оголённой почвы, вычисляется как $1-(a+b)$; принимается равным нулю при $(a+b) > 1$. Сумма коэффициентов a , b и c равна 1, а учитываются они в порядке ярусности.

Анализ динамики влажности проводился с учетом ландшафтных условий территории. Для построения карты классов урочищ применена управляемая классификация многозональных снимков Landsat-8, к которым был применён метод извлечения трёх главных компонент. Внутри каждого класса ландшафтного покрова проведено деление по рельефу. Рельеф описан с помощью двух параметров: крутизны и экспозиции склона. В этой работе выделены три класса крутизны (поверхности с наклоном до 10° , $10-25^\circ$ и свыше 25°) и два класса экспозиции (холодные и тёплые, границей между которыми выбраны азимуты 125° и 305°). Всего получено 17 классов природных комплексов, из которых 14 охарактеризованы сетью наблюдений (рис. 2).

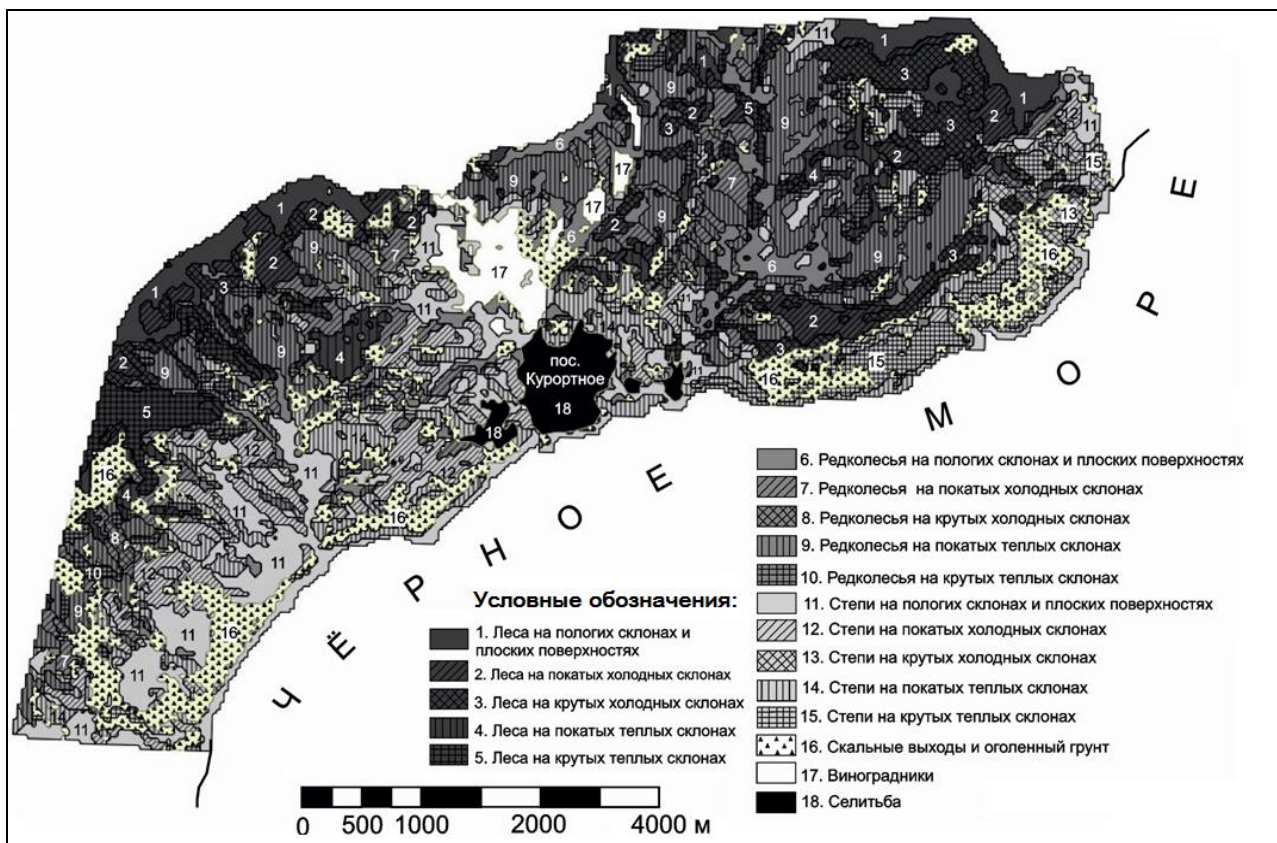


Рис. 2. Классы урочищ.

Результаты и их обсуждение

Ландшафтная структура территории. Территория исследования отличается высоким ландшафтным разнообразием, обусловленным различием абсолютных высот, геологической основы и экспозиции склонов. Верхние этажи гор заняты скальнодубовыми лесами с грабниником, ясенем и кизилом на бурых лесных почвах и пушистодубовыми лесами с фисташкой, ясенем и можжевельником на коричневых почвах. На выходах плотных известняков и вулканических пород выше 200 м формируются петрофитные степи с разреженным и низким травостоем, чередующиеся с обнажённым грунтом. На делювиально-коллювиальных шлейфах и нижних частях склонов, сложенных неоген-четвертичными рыхлыми породами, распространены фисташково-дубовые

редколесья с держидеревом. На южных склонах и плоских морских террасах их сменяют степи: от сухих эгилопсово-типчачковых до более влажных ковыльно-разнотравных. На отдельных участках террасированных склонов находятся посадки сосны. К северу от пос. Курортное расположены виноградники. Всего на лесные ПТК приходится 21.2% площади, на редколесные – 31.9%, степные занимают 29.1%, на обнажения скальных и рыхлых пород приходится 12.5%, а селитебные земли и виноградники занимают 2.6 и 2.7% площади соответственно.

Полевая влажность почвенно-растительного покрова. Ландшафтное разнообразие определило высокую вариативность влажности почвы и растительности. Наибольшая влажность почвы (34%) зафиксирована в днищах балок, покрытых редколесьями из ясеня и держи-дерева и дубово-ясеневыми лесами с развитым травяным и моховым покровом, и на покатых северных склонах, сложенных рыхлыми породами. Точки с наиболее сухой почвой (13%) приурочены к крутым южным и юго-западным склонам с разреженными пушистодубовыми лесами или с петрофитными степями. Также сухие почвы характерны для средних частей склонов или коллювиальных шлейфов с каменистыми почвами, способными быстро проводить влагу вниз из верхних горизонтов. Для природных комплексов, подвергающихся выпасу скота или неорганизованной рекреации, характерны меньшие значения влажности почвы (до 10-12%), чем для их аналогов в заповедной зоне.

Запас влаги в листьях древесно-кустарникового яруса зависит, в первую очередь, от породного состава. Меньше влаги содержится в листе дуба пушистого (44-47%), но при густом подлеске из грабинника, что характерно в большей степени для затененных склонов северной экспозиции, средняя влажность листы таких лесов достигает 68-71%. Максимальная влажность травяной фитомассы зафиксирована под густым пологом пушистодубовых лесов и сосновых лесопосадок (75-80%). Высоким запасом влаги обладают и сообщества луговых степей (67-73%). Наименьшая влажность травяного яруса зафиксирована в степных ПТК террас и коллювиальных шлейфов и в лесных ПТК плоских расширенных днищ балок (43-51%).

Максимальные значения интегральной влажности почвенно-растительного покрова (63-69%) зафиксированы в точках, приуроченных к залесённым или закустаренным днищам балок либо к «холодным» пологим склонам под закустаренными остепнёнными лугами. Природные комплексы, подверженные антропогенному воздействию, способны удерживать меньше влаги в сравнении с заповедными аналогами (47-52% и 58-63% соответственно). Минимальные значения интегральной влажности (18-27%) определены на крутых, почти осыпных южных склонах со слаборазвитой растительностью. Низкая интегральная влажность редколесных и степных ПТК южных склонов и ровных поверхностей террас усугубляется небольшим проективным покрытием травостоя (15-40%) или низкой сомкнутостью крон, не превышающей 0.3. Важным обстоятельством является большая доля злаков (например, эгилопса) с высохшими надземными частями в растительном покрове. На редколесных точках с минимальной интегральной влажностью преобладает кустарниковая растительность (держи-дерево, груша лохолистная, у которых немного листы) или дуб пушистый.

Валидация значений нормализованного разностного влажностного индекса (NDWI). Интегральный показатель влажности почвенно-растительного покрова описывается значениями NDWI, рассчитанными на 15 июня 2016 года, с коэффициентом детерминации $R^2=0.72$. Зависимость нарушается за счет проб, отобранных в степных урочищах гребней и крутых северных склонов, где, очевидно, происходит искажение дистанционной информации за счет рельефа и светотени (на рисунке 3 эти точки отмечены знаком «X»). Если же рассмотреть эту связь отдельно для разных типов ландшафтного покрова, то точность описания увеличится до $R^2=0.90-0.91$. Заметно различается зависимость полевой влажности и влажностного индекса NDWI на южных склонах, занятых степной и кустарниково-степной растительностью, где NDWI оказывается более чувствительным к изменению полевой влажности (на рисунке 3 показаны квадратными значками), и на остальных точках – лесов и степей плоских вершинных поверхностей и пологих северных склонов, где NDWI нарастает медленнее (на рисунке 3 показаны круглыми значками).

Высокая достоверность описания интегральной влажности почвенно-растительного покрова с помощью влажностного индекса NDWI, рассчитанного на период отбора проб, позволяет перейти от динамики весового содержания полевой влаги к пространственной картине динамики значений NDWI.

Сезонная динамика влажности. Скорость потери влаги почвенно-растительным покровом выражается через разницу индексов NDWI (NDWI-Dif), рассчитанных для условий максимального насыщения почвы и растительности влагой и на интересующую дату. В работе рассмотрено

изменение влажности почвенно-растительного покрова с 14 мая по 27 августа 2016 г. Для построения точной статистической модели были проверены многие факторы, наибольшую связь с разницей индексов NDWI-Dif показали: вегетационный индекс NDVI на 27 августа 2016 г. (относительный показатель количества фотосинтетически активной фитомассы), количество потенциальной приходящей солнечной радиации (ППСП, определяет интенсивность испарения) и влажностный индекс NDWI за 14 мая 2016 г. (характеризует запас влаги, накопленный в почвенно-растительном покрове к началу засушливого периода). Они включены в статистическую модель, описывающую сезонную разницу NDWI. Интересно, что морфометрические характеристики рельефа не показали связь со скоростью потери влаги. Влияние рельефа сказывается косвенно через показатель ППСП, а также «включается» в днищах эрозионных форм.

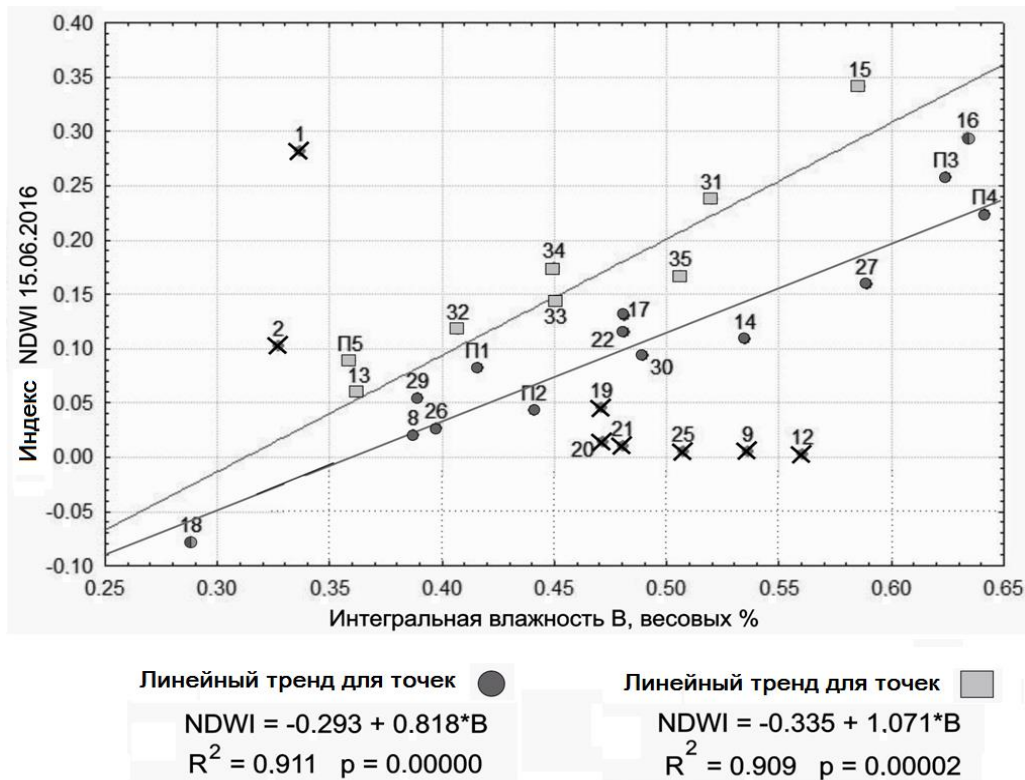


Рис. 3. Связь интегральной полевой влажности (B) и нормализованного разностного водного индекса (NDWI).

Самым мощным фактором, определяющим величину сезонной потери влаги, является количество фотосинтетически активной фитомассы, описанное с помощью NDVI. Коэффициент детерминации для связи NDVI за 27 августа с NDWI-Dif составляет $R^2=0.63$. ПТК с большой долей оголенных почв и интенсивным развитием склоновых процессов обладают низкой способностью к сохранению влаги, низким NDVI как в начале лета, так и осенью, но значительной разностью NDWI, достигаемой, очевидно, за счет иссушения почвы. Сухостепные и степные ПТК в начале лета имеют более высокий NDVI, но к августу сильно иссушаются как почва, так и травяная растительность (снижается NDVI, а вслед за ним и NDWI), поэтому NDWI-Dif в них также велика. В редколесьях NDVI выше, как и способность их к сохранению влаги в растительном покрове, а снижение NDVI за сезон меньше, поэтому и общая потеря влаги также снижена. Наконец, леса обладают максимальными значениями и минимальной разницей NDVI за засушливый период, и запасы влаги в их листе и травяном покрове испытывают минимальное падение. Стоит заметить, что совокупности точек достаточно сильно перекрываются: так, например, ясеневые леса с высоким держи-деревом имеют примерно такое же значение NDWI-Dif, как дубовые редколесья с сомкнутостью крон около 0.3 и долей оголенной почвы около 0.2. Причиной этого в первом случае служит сильное высыхание листы ясеня и держи-дерева и частичное её опадение, во втором – быстрое иссушение оголенной почвы.

Для пространственных расчетов был использован модуль Multiple Regression Analysis в программе SAGA, который принимает на вход растровые данные переменных (факторов) и моделирует каждый пиксель зависимой переменной. Каждый тип ландшафтного покрова проанализирован отдельно, а территории населённых пунктов исключены. Результаты этого анализа представлены в таблице. Наилучшая точность модели зафиксирована для виноградников ($R^2=0.94$), типичных степей ($R^2=0.83$) и редколесий ($R^2=0.89$), чуть менее приемлемые результаты моделирования – у сухих и петрофитных степей с крутыми склонами-«бедлендами» ($R^2=0.76$). Наименее четко модель работает в лесных ПТК.

Ведущая роль растительного покрова проявляется и при переходе от точек полевого исследования к пикселям дистанционных изображений. NDVI описывает от 39% (в лесах) до 75% (в типичных степях) варьирования сезонной разности NDWI. В сухих степях с малой фитомассой растительности решающую роль играет количество приходящей солнечной радиации, нагревающей почву и способствующей испарению из неё влаги. В типичных степях возрастает роль растительности. Травяной покров, даже сплошной, сильно теряет влагу за засушливый период (Морозова, Вронский, 1989), поэтому увеличение фитомассы в степных ПТК ведет к возрастанию в них NDWI-Dif. Это объясняет, почему большинство природных пожаров на востоке Крымских гор – степные, и может быть использовано для распознавания пожароопасных участков. В редколесьях ещё возрастает роль растительного покрова, но меняется знак его влияния: чем больше активной фитомассы, тем меньше NDWI-dif. Значимой величиной оказывается исходный запас влаги. В лесах, лучше всего удерживающих влагу, основными факторами становятся фитомасса растительности (NDVI) и количество приходящей солнечной радиации.

Таблица. Результаты множественного регрессионного анализа интенсивности потери влаги почвенно-растительным покровом для разных типов ландшафтного покрова.

Тип ландшафтного покрова	R^2	Стандартная ошибка	Регрессионный коэффициент для факторов		
			NDVI за 27.08	ППСР	NDWI за 14.05
Степи сухие и петрофитные, бедленды	0.76	0.054	0.114	0.212	0.002
Степи типичные	0.83	0.029	0.547	0.075	0.102
Редколесья	0.89	0.028	-0.660	0.302	0.757
Леса	0.67	0.033	-0.370	0.337	0.057
Виноградники	0.94	0.005	-0.811	0.174	1.596

Выводы

1. Моделирование влажности почвенно-растительного покрова на основании нормализованного разностного водного индекса NDWI показывает более высокую достоверность при учете ландшафтной структуры территории. Исследование выявило высокую значимость вклада не только растительных формаций, но экспозиции и крутизны склонов. При ландшафтном подходе точность моделирования для отдельных типов урочищ достигает $R^2=0.90-0.91$.

2. Перераспределение влаги по рельефу не играет существенной роли в формировании условий увлажнения в семиаридных низкогорьях Крымских гор. Атмосферные осадки либо быстро испаряются, либо быстро выносятся эрозионной сетью, не задерживаясь ни на вогнутых, ни на пологих склонах. Исключения составляют днища крупных эрозионных форм, сложенные рыхлыми отложениями, способными удерживать влагу.

3. Растительность является фактором, стабилизирующим динамику влажности почвенно-растительного покрова. Наиболее стабильными являются лесные ПТК. Максимальная потеря влаги за вегетационный период наблюдается в степных ландшафтах.

4. При прогнозах динамики влажности почвенно-растительного покрова в статистическую регрессионную модель включаются: вегетационный индекс, количество потенциальной приходящей

солнечной радиации и исходный (весенний) влагозапас. Лучше всего прогнозу поддаются ПТК виноградников, редколесий, хуже – лесов.

5. Ограничением применения данного метода являются крутые северные склоны, на которых искажается дистанционная информация.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Горбунов Р.В., Зуев А.В., Смирнов В.О. 2015. Воднобалансовые исследования на территории Карадагского ландшафтно-экологического стационара // 100 лет Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского. Симферополь: Н. Орианда. С. 734-747.
- Морозова А.Л., Вронский А.А. 1989. Природа Карадага. Киев: Наукова думка. 286 с.
- Сысуюев В.В. 2003. Физико-математические основы ландшафтоведения. М.: Географический факультет МГУ. 175 с.
- Трансформация ландшафтно-экологических процессов в Крыму в XX веке – начале XXI века. 2010. Симферополь: ДОЛЯ. 304 с.
- Швецов Е.Г., Ружичка З., Миронов В.Л. 2013. Исследование применимости данных спутника SMOS для оценки уровня пожарной опасности на территории Красноярского края // Вестник СибГАУ. № 2 (48). С. 110-115.
- Böhner J., Selige T. 2006. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalization // Göttinger Geographische Abhandlungen. Vol. 115. P. 13-27.
- Carlson T. 2007. An Overview of the “Triangle Method” for Estimating Surface Evapotranspiration and Soil Moisture from Satellite Imagery // Sensors. Vol. 7. P. 1612-1629.
- Ceccato P., Gobron N., Flasse S., Pinty B., Tarantola S. 2002. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1. Theoretical approach // Remote Sensing of Environment. Vol. 82. P. 188-197.
- Dobson M.C., Ulaby F.T. 1985. Active microwave soil moisture research // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. GE-24. No. 1. P. 23-36.
- Escorihuela M.J., Quintana-Seguí P. 2016. Comparison of remote sensing and simulated soil moisture datasets in Mediterranean landscapes // Remote Sensing of Environment. Vol. 180. P. 99-114.
- Gao B.-C. 1996. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. Vol. 58 (3). P. 257-266.
- Ghulam A., Li Z.-L., Qin Q., Yimit H., Wang J. 2008. Estimating crop water stress with ETM+NIR and SWIR data // Agricultural and Forest Meteorology. Vol. 148. P. 1679-1695.
- Gillon D., Dauriac F., Deshayes M., Valette J.C., Moro C. 2004. Estimation of foliage moisture content using near infrared reflectance spectroscopy // Agricultural and Forest Meteorology. Vol. 124. P. 51-62.
- Maki M., Ishiahrab M., Tamura M. 2004. Estimation of leaf water status to monitor the risk of forest fires by using remotely sensed data // Remote Sensing of Environment. Vol. 90. P. 441-450.
- Moran M.S., Clarke T.R., Inoue Y., Vidal A. 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index // Remote Sensing of Environment. Vol. 49. P. 246-263.
- Nijland W., Coops N.C., Macdonald S.E., Nielsen S.E., Bater C.W., White B., Ogilvie J., Stadt J. 2015. Remote sensing proxies of productivity and moisture predict forest stand type and recovery rate following experimental harvest // Forest Ecology and Management. Vol. 357. P. 239-247.
- Peuelas J., Filella I., Biel C., Serrano L., Sav R. 1993. The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status // International Journal of Remote Sensing. Vol. 14 (10). P. 1887-1905.
- Sadeghi M., Babaeian E., Tuller M., Jones S.B. 2017. The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations // Remote Sensing of Environment. Vol. 198. P. 52-68.
- Seneviratne S.I., Corti T., Davin E.L., Hirschi M., Jaeger E.B., Lehner I., Orlowsky B., Teuling A.J. 2010. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review // Earth-Science Reviews. Vol. 99 (3-4). P. 125-161.
- Yebra M., Dennison P.E., Chuvieco E., Riaño D., Zylstra P., Hunt Jr. E.R., Danson F.M., Qi Y., Jurdao S. 2013. A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment: Moving towards operational products // Remote Sensing of Environment. Vol. 136. P. 455-468.
- Wigneron J.-P., Chanzy A., Calvet J.-C., Bruguier N. 1995. A Simple Algorithm to Retrieve Soil Moisture and Vegetation Biomass Using Passive Microwave Measurements over Crop Fields // Remote Sensing of Environment. Vol. 51. No. 3. P. 331-341.

УДК 58.03; 58.009; 58.01/.07

**ПОПУЛЯЦИЯ И СТРУКТУРА СООБЩЕСТВ *JUNIPEROUS POLYCARPOS* К. КОХ
ПОД ВЛИЯНИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ
В ХОЛОДНОЙ ПУСТЫНЕ ГИМАЛАЕВ (ИНДИЯ)**

© 2020 г. А. Сингх*, С.С. Самант**

*Центр высокогорной биологии Института технологий биоресурсов Гималаев
Индия, 175132, Риблинг, Танди, Лахул-Спити, Химачал-Прадеш. E-mail: ashoksingh@ihbt.res.in

**Национальный институт окружающей среды и стабильного развития Гималаев им. Г.Б. Панта
Индия, 175126, Химачал, Мохал-Куллу, Химачал-Прадеш. E-mail: samantss2@rediffmail.com

Поступила в редакцию 19.12.2018. После доработки 12.08.2019. Принята к публикации 30.09.2019

Можжевельник восточный (*Juniperus polycarpus* К. Koch) – растительный вид Гималайского региона, существование которого находится под самой высокой угрозой исчезновения. Данное исследование предоставляет информацию по мониторингу можжевельниковой популяции и степени его распространения в высотных областях Гималайских гор. В своей работе мы собрали исчерпывающие данные о *J. polycarpus*, такие как широта распространения, характеристики местообитания, состав, структура, размер популяции, области применения вида и статус многообразия. Его распространение и плотность были максимальными в чистых лесных местообитаниях, в отличие от смешанных. Средневысотная лесная зона (3100-3500 м н.у.м. для сообществ с доминирующим *J. polycarpus*, 2710-3100 м н.у.м. для смешанных) продемонстрировала подходящие качества для развития можжевельника и достижения им высокой плотности. Встречаемость видов над верхней границей произрастания лесов (4100 м н.у.м.) показывает влияние климатических изменений. В общей сложности в популяции зафиксирован 281 вид растений из 158 родов и 48 семейств: 37.04% – местные, 2.06% – эндемики, 23.87% – эуэндемики, 74.44% – экономически значимые, 20.28% – находящиеся под угрозой. Рекомендуется постоянный мониторинг популяции, подверженной влиянию климатических изменений.

Ключевые слова: структура популяции, разнообразие, исследования климатических изменений, этно-ботанические исследования, местные виды, виды под угрозой исчезновения.

DOI: 10.24411/1993-3916-2020-10080

Стремительное вмешательство климатических изменений в регион индийских Гималаев вынудил научное сообщество задокументировать свои знания о высокоценных видах, находящихся под угрозой исчезновения. Исследования по оценке популяции рода *Juniperus* в этом регионе ранее не проводились. В регионе зарегистрировано 7 видов *Juniperus*: *Juniperus communis*, *J. indica*, *J. polycarpus*, *J. recurva*, *J. recurva* var. *coxii*, *J. semiglobosa* и *J. squamata* (Aswal, Mehrotra, 1994; Kachroo et al., 2002; Sahani, 1990), 4 из которых были найдены в зоне холодной пустыни в Химачал-Прадеш (Singh, 2007; Kachroo et al., 2002; Singh et al., 2009). *J. polycarpus* К. Koch (или *J. macropoda* из семейства кипарисовых) – вид, находящийся под угрозой по всему миру, но широко распространенный в Лахул-Спити и в некоторых частях Киннаура и Чамбы (регион Панги) в Химачал-Прадеш, а также в долине реки Кишанганга (районы Джамму и Кашмир). Это один из трех видов, востребованных в зоне холодной пустыни и экологически подходящих для жизни в ней (Singh, 2007; Singh, Samant, 2010). Исследования по оценке сообщества *J. polycarpus*, структуры его популяции, встречаемости в смешанных древесных сообществах, разнообразия, структуры распространения, локальности и эндемичности обитания, редкости встречаемости, роли в экосистеме и природоохранной ценности до сих пор не предпринимались.

Материалы и методы

Область исследования. За последнее десятилетие (между 2004 и 2016 гг.) были проведены

обширные исследования по оценке популяции *J. polycarpus* на высоте между 2760-4300 м н.у.м. (склон 20-50°, координаты с 32° 30.099' по 32° 43.656 с.ш. и с 76° 39.665' по 77° 12.847' в.д.) вокруг выбранных деревень в районе Лахул-Спити, северозападный регион Гималаев (рис. 1). Климат в данной области сухой, умеренно-альпийский. Регион подвержен воздействию экстремальных климатических процессов (температура варьирует от -20°C до +33°C), небольших осадков (100-500 мм/год), обильных снегопадов (120-400 см/год) и высокой почвенной эрозии; скудная растительность и короткие периоды ее развития изучены плохо (Singh, 2007).

Исследование, сбор образцов, определение, анализ данных. На основе физических свойств и местообитаний мы подсчитали количество видов по всем возможным аспектам на различных высотах (Samant et al., 2002). Экологические исследования проводились на площадках с доминированием *J. polycarpus* в популяции и в смешанных лесах, где было замечено присутствие *J. polycarpus*. Прибегнув к случайной выборке проб, на специально выбранной большой площадке 50x50 м мы выделили десять квадратов размером 10x10 м для деревьев; 20 квадратов размером 5x5 м для кустарников; двадцать квадратов размером 1x1 м для растительности. Образцы собрали и определили с помощью местных ботаников (Aswal, Mehrotra, 1994; Murti, 2001; Polunin, Stainton, 1984). Экологические данные мы собрали и проанализировали, следуя методикам J.T. Curtis и R.P. McIntosh (1950), а также D. Muller-Dombois и H. Ellenberge (1974); видовое разнообразие проанализировали с помощью работы С.Е. Shannon и W. Wiener (1963), а видовое доминирование – с помощью работы Е.Н. Simpson (1949). По данным измерений (на высоте 1.37 м от земли), растения принимались за дерево при диаметре (d) ствола ≥ 31.5 см, за молодые деревья – при $d=10.5-31.4$ см и за подрост – при $d < 10.5$ см. Древесные сообщества оценивали с помощью индекса их значимости (IVI).

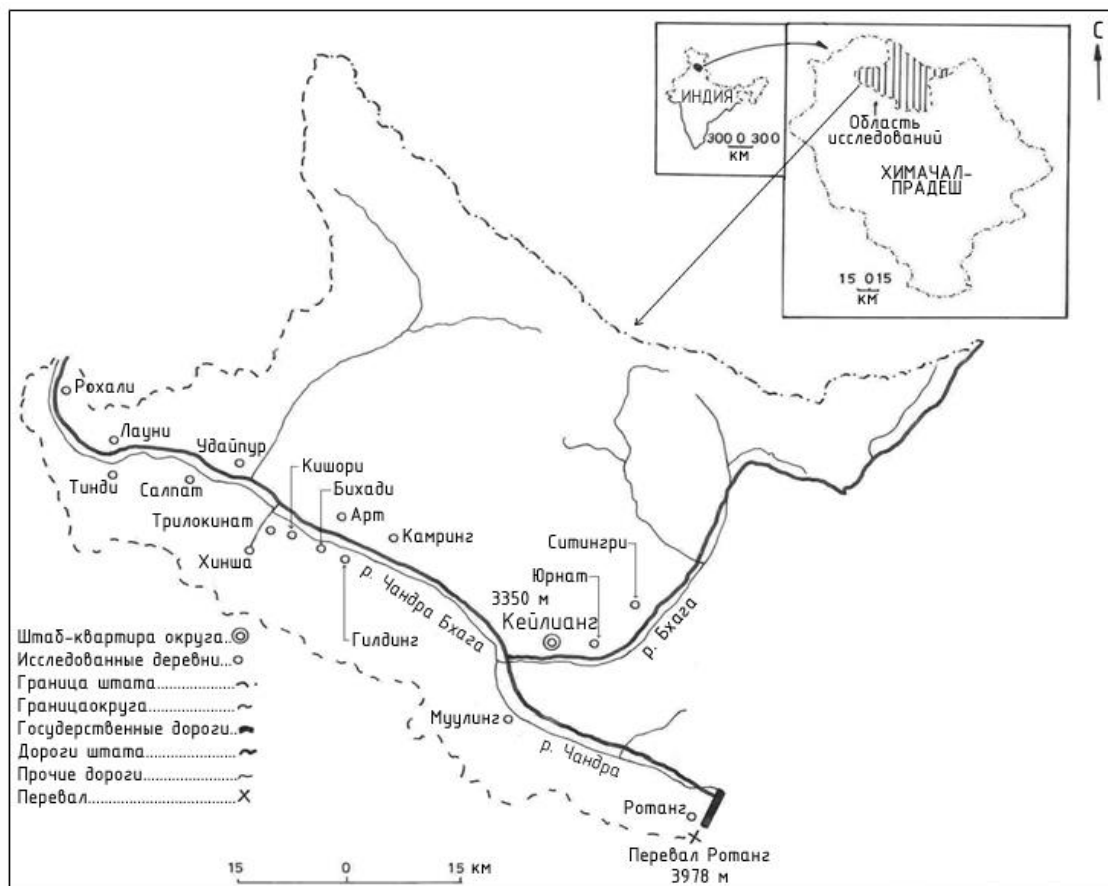


Рис. 1. Картограмма долины Лахул (часть региона Лахул-Спити) в Химачал-Прадеше, Индия.

Принадлежность видов к местным мы определяли по работам нескольких авторов: S.S. Samant с соавторами (2007) и Anonymous (1883-1970); эндемичность и эуэндемичность – по работам

S.S. Samant и U. Dhar (1993, 1997), а также S.S. Samant с соавторами (2000a). Также с каждой площадки мы собрали комбинированные образцы почв глубиной 20 см, а затем проанализировали их по методике S.E. Allen (1974).

Этноботанические исследования мы провели, используя основную информацию и доступные нам знания о местных регионах, а также метод экспресс-оценки (Samant et al., 2002; Singh, 2007; Singh et al., 2009). Дерево на растопку собирают каждый год с мая по ноябрь; мы исследовали 15 деревень (один человек в семье собирает дерево на растопку на 30 дней), чтобы составить тренд по добыче (Samant et al., 2000б).

Редкость видов определяли с помощью шести параметров, показанных в таблице 1 (Samant et al., 2002; Rana, Samant, 2010).

$$\text{Среднее количество собранной древесины (кг)} = \frac{\text{(Общее количество по всем площадкам)}}{\text{(Количество площадок)}}$$

$$\text{Среднее количество собранной древесины (площадок в день)} = \frac{\{ \text{Сумма } i^{ro} \text{ по 15 деревням (среднее количество собранных видов)} \times \text{ (Общее количество людей, собравших древесину в } i^{oi} \text{ деревне)} \}}{\{ \text{Сумма } i^{ro} \text{ по 15 деревням (общее количество людей, собравших древесину в } i^{oi} \text{ деревне)} \}}$$

Среднее количество древесины на семью в день = 1 x среднее количество образцов в день,

Среднее количество древесины на семью в год = 30 x среднее количество семей в день,

$$\text{Вероятность использования по назначению} = \frac{\text{Сумма } i^{ro} \text{ по 15 деревням (частота сбора одного вида в } i^{oi} \text{ деревне)}}{\text{Сумма } i^{ro} \text{ по 15 деревням (количество жителей в } i^{oi} \text{ деревне)}}$$

$$\text{Индекс использования ресурса} = \frac{\text{(среднее количество собранной древесины на семью в год)} \times \text{(вероятность использования по назначению)}}{\text{}}$$

Таблица 1. Разные критерии статуса угрозы флористическому разнообразию.

Количество местобитаний	Высота, м н.у.м	Популяция (количество особей/количество мест обнаружения)	Количество областей применения	Добыча	Местные и эндемики	Количество видов
1	<500	<250 / 2	4 и >4	На продажу	Местные и эндемики	10
2-3	500-1000	250-1000 / 3-5	2-3	Для личного использования	Местные или эндемики	6
>3	>1000	>1000 / более 5	1	Не используется	Не местные	2

Результаты

Оценка структурной схемы популяции в сообществе *J. polycarpus*. Общая плотность роста деревьев составила 441 шт./га, площадь ствола у основания – 13.65 м²/га, общая плотность подроста – 166 шт./га, общая плотность молодых деревьев – 535 шт./га, установленная для всех видов на площадках/местах обитания (45 квадратов) исследуемой территории. *J. polycarpus* (437 шт./га, площадь ствола у основания – 13.45 м²/га, индекс значимости (IVI) – 297.18) был доминирующим видом. Низкие значения мы зарегистрировали для других сопутствующих видов, таких как *Pinus wallichiana* (3 шт./га, площадь ствола у основания – 0.08 м²/га, IVI – 1.48) и *Picea smithiana* (1 шт./га, площадь ствола – 0.12 м²/га, IVI – 1.34). *J. polycarpus* – единственный вид, присутствующий в ярусе подроста. Среди молодых деревьев наиболее высокая плотность роста была у *J. polycarpus* (529 шт./га), а низкая – у *Cedrus deodara* (3 шт./га) и *Robinia pseudoacacia* (2 шт./га; рис. 2). Общая

плотность роста кустарников – 2663 шт./га, среди них больше всего *Rosa webbiana* (42.60%) и *Caragana versicolor* (23.07%). Общая плотность травяного покрова – 34 шт./м, среди которого больше всего *Agrostis munroana* (5.58%), *Thymus linearis* (5.44%), *Polygonum plebeium* (5.36%) и *Eragrostis minor* (5.07%).

Оценка популяции в сообществе с доминирующим J. polycarpus по ее местообитанию. В общей сложности было исследовано 45 квадратов (50x50 м) в пяти местах обитания, пяти аспектах и на шести локациях при различных топографических условиях (табл. 2). Наибольшее количество площадок (12) представлено валунистой местностью, а также сухими склонами (11 площадок), каменистыми склонами (10), деградировавшими местообитаниями (6) и речными берегами (6). 12 площадок представлены юго-восточной экспозицией, 11 – восточной, 9 – юго-западной и 8 – западной. В таблице 2 показаны: максимальная плотность роста деревьев и площадь их стволов у основания по сухим склонам, а также в валунистых и каменистых местообитаниях; минимальное значение зарегистрировано по речным берегам (475 шт./га). В таблице также представлены значения максимального возобновления молодых деревьев по сухим склонам (752 шт./га), каменистым (636 шт./га) и деградировавшим (628 шт./га) местообитаниям. Показана связь с *C. deodara* на сухих склонах, с *P. wallichiana* и *C. deodara* в валунистых и с *P. smithiana* в каменистых местообитаниях. Максимальная плотность проростков наблюдалась в каменистых (133 шт./га), деградировавших (115 шт./га) и валунистых (113 шт./га) местообитаниях.

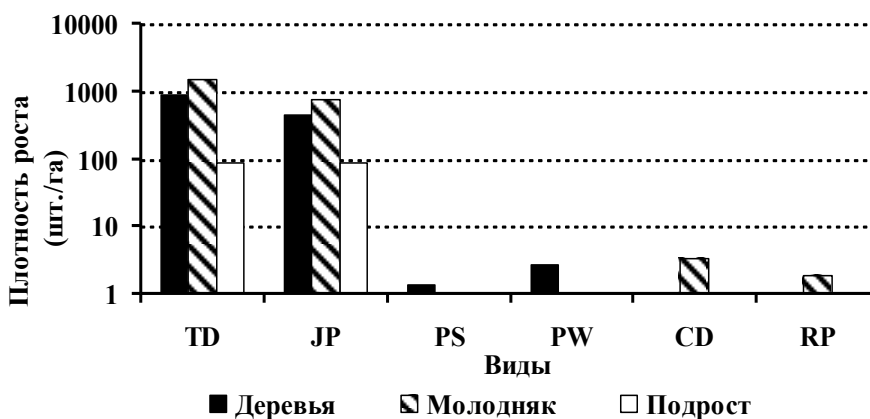


Рис. 2. Структура популяции сообщества *Juniperus polycarpus* в холодной пустыне долины Лахул, Индия. Условные обозначения: TD – общая плотность роста, JP – *Juniperus polycarpus*, PS – *Picea smithiana*, PW – *Pinus wallichiana*, CD – *Cedrus deodara*, RP – *Robinia pseudoacacia*.

J. polycarpus и его связь с другими древесными сообществами. В сообществе *Pinus wallichiana*: *J. polycarpus* продемонстрировал очень низкие значения (4 шт./га, площадь ствола у основания – 3.25 м²/га, IVI – 3.25) по сравнению с максимальными значениями у *P. wallichiana* (346 шт./га, 24.44 м²/га, 258.80) и *Betula utilis* (80 шт./га, 4.52 м²/га, 37.70). Максимальная плотность подроста наблюдалась у *P. wallichiana* (205 шт./га) и сравнительно гораздо меньшая плотность – у *B. utilis* (19 шт./га) и *J. polycarpus* (3 шт./га). Максимальная плотность молодых деревьев – у *P. wallichiana* (316 шт./га), несколько меньшая – у *B. utilis* (28 шт./га), *Cedrus deodara* (12 шт./га) и *J. polycarpus* (5 шт./га).

В сообществе *Cedrus deodara*: у *J. polycarpus* очень низкая плотность (4 шт./га, 0.01 м²/га, 6.50). Максимальная плотность подроста – у *J. polycarpus* (166 шт./га) и *C. deodara* (102 шт./га). Максимальная плотность молодых деревьев – у *C. deodara* (392 шт./га) и *J. polycarpus* (286 шт./га). Максимальные значения для подроста *J. polycarpus* указывают на то, что в ближайшем будущем он может заменить *C. deodara*.

В сообществе *Picea smithiana*: *P. smithiana* (293 шт./га) – доминирующий вид, а *J. polycarpus* (64 шт./га, 1.17 м²/га, 31.72) и *P. wallichiana* (43 шт./га, 2.64 м²/га, 31.20) – основные сопутствующие виды. Максимальная плотность подроста – у *J. polycarpus* (134 шт./га), *Corylus jacquemontii* (70 шт./га) и *P. smithiana* (54 шт./га). Максимальная плотность молодых деревьев – у *J. polycarpus*

(156 шт./га), *P. smithiana* (79 шт./га) и *P. wallichiana* (22 шт./га). Максимальные значения для подроста и молодняка *J. polycarpus* указывают на то, что в ближайшем будущем этот вид заменит *P. smithiana*.

В сообществе *Betula utilis*: возобновление подроста *J. polycarpus* здесь гораздо ниже (3 шт./га). Хотя доминантом выступает *B. utilis* (516 шт./га), *Abies pindrow* (57 шт./га) и *P. wallichiana* (15 шт./га) являются содоминантами. Встречаемость подроста *J. polycarpus* указывает на высотный сдвиг в структуре распространения *J. polycarpus*.

В смешанном сообществе *Juniperus polycarpus*–*Cedrus deodara*: *J. polycarpus* (283 шт./га, 22.70 м²/га, 102.77) и *C. deodara* (278 шт./га, 85.96 м²/га, 147.32) выступают основными доминантными деревьями, а *P. wallichiana* и *Juglans regia* – сопутствующими видами. Максимальная плотность – у *J. polycarpus* (подрост – 178 шт./га, молодые деревья – 444 шт./га), *C. deodara* (подрост – 39 шт./га, молодняк – 78 шт./га). Это указывает на то, что в ближайшем будущем сообщество станет чистым *J. polycarpus*.

Таблица 2. Разнообразие в зависимости от места обитания, картина распределения *J. polycarpus* в холодной пустыне долины Лахул, в Индии.

Местообитания	Общее количество площадок	Диапазон высот (м н.у.м.)	Экспозиции склонов*	Регионы**	Средняя плотность роста (шт./га)	Средняя площадь ствола у основания у <i>J. polycarpus</i> (м ² /га)	Общая площадь ствола у основания всех видов (м ² /га)	Индекс значимости (IVI)	Сопутствующие древесные виды***	Плотность роста молодых деревьев (шт./га)	Плотность роста подроста (шт./га)
Показатели для чистого лесного сообщества <i>J. polycarpus</i>											
Валунистые	12	2805-3570	ЮВ, ЮЗ, В, З, Ю	I-VI	430	14.38	–	277.92	<i>PW, CD</i>	566	113
Дегради-ровавшие	6	2960-3410	ЮЗ, В, З	III, IV, VI	332	9.63	–	300.00	–	628	115
Сухие склоны	11	3150-3425	ЮВ, В, ЮЗ, ЮЗ	II-V	636	24.01	–	283.30	<i>CD</i>	752	48
Речные берега	6	2760-3415	ЮЗ, ЮВ, В, Ю	II, III, V	332	18.86	–	298.24	–	475	75
Каменистые	10	2940-3445	ЮВ, ЮЗ, В, З	II-VI	344	10.81	–	294.23	<i>PS</i>	636	133
Показатели для смешанного редколесья с <i>J. polycarpus</i>											
Каменистые	3	2740-3450	Ю, В, СВ	V-VII	95	1.79	19.98	51.03	<i>PW, PS, CD</i>	–	180
Тенисто-влажные	1	2760	СВ	VI	100	1.74	21.49	54.39	<i>PS</i>	–	213
Валунистые	4	2710-2820	СВ, Ю, З	V, VII	150	8.55	73.41	68.96	<i>PS, CD</i>	403	248
Сухие склоны	5	2760-2850	В, З, Ю, СЗ	V, VII	135	10.20	152.34	45.72	<i>PS, CD</i>	561	379
Дегради-ровавшие	2	2940-3100	СВ, СЗ	VI	160	4.27	42.13	60.82	<i>PS</i>	285	–
Речные берега	2	2760-2900	Ю, СЗ	V, VIII	20	0.02	0.25	49.97	<i>PW, CD</i>	60	–

Примечания к таблице 2: *Экспозиции склонов: С – север, Ю – юг, З – запад, В – восток. **Регионы: I – Килонг, II – Стингри, III – Юрнат, IV – Камринг, V – Удайпур, VI – Бихади, VII – Трилокинат, VIII – Муулинг. ***Сопутствующие древесные виды: *PW* – *Pinus wallichiana*, *CD* – *Cedrus deodara*, *PS* – *Picea smithiana*.

В смешанном сообществе *Salix fragilis–Fraxinus xanthoxyloides*: максимальная плотность подроста (80 шт./га) и молодых деревьев (140 шт./га) наблюдалась у *J. polycarpus*. Однако также мы выделили такие виды, как *Fraxinus xanthoxyloides* с плотностью роста подроста 50 шт./га и *C. deodara* с плотностью роста молодняка 60 шт./га. Это указывает на то, что в ближайшем будущем *J. polycarpus* заменит собой данное сообщество.

Оценка популяции *J. polycarpus* в смешанных сообществах (отличающихся от чистых сообществ из *J. polycarpus*) по местообитанию. *J. polycarpus* был встречен на 17 площадках, 6 местообитаниях, в четырех диапазонах высот и на пяти экспозициях на высоте 2710-3450 м н.у.м. (табл. 2). Он был встречен в разных сообществах, таких как *C. deodara* (9 площадок, 4 местообитания, 2 аспекта), *P. smithiana* (6 площадок, 5 местообитаний, 2 аспектов) и *P. wallichiana* (2 площадки, 2 местообитания, 2 аспекта). В таблице 2 показано, что максимальная плотность роста деревьев наблюдалась в деградировавшем местообитании в Бихади, а также в валунистом в Удайпуре и Трилокинате и на сухих склонах там же. Общая площадь основания ствола у *J. polycarpus* была максимальной по сухим склонам – 10.20 м²/га и в валунистых местообитаниях – 8.55 м²/га. Плотность роста молодняка была максимальной по сухим склонам – 561 шт./га, в валунистом 403 шт./га и деградировавшем местообитании – 285 шт./га, а минимальная – по речным берегам, где она составила 60 шт./га. Возобновление подроста (379 шт./га) было максимальным по сухим склонам. Однако в валунистых (248 шт./га), тенисто-влажных (213 шт./га) и каменистых (180 шт./га) местообитаниях возобновление подроста оказалось почти таким же. Плотность роста и площадь ствола у основания были максимальными в зоне средней высотности – 2801-3800 м н.у.м.

Таблица 3. Оценка популяции *Juniperus polycarpus* по местам распространения в холодной пустыне долины Лахул (Индия).

Район	Места обитания*	Диапазон высот, м н.у.м.	Экспозиция склона	Средняя плотность роста (количество/га)	Средняя площадь ствола у основания (м ² /га)	Индекс значимости (IVI)	Количество площадок	Сопутствующие виды
Килонг	D	3200-3210	ЮЗ	820.00	16.91	300.00	2	–
Стингри	A, B, C, D	3255-3465	ЮВ, Ю	462.00	10.08	300.00	9	–
Юрнат	A, B, C, D, E	3180-3570	ЮЗ, В, ЮВ	429.58	7.88	300.0	17	–
Бихади Кишори	A, B, C	2940-3040	ЮВ, В	350.00	37.61	259.59	3	<i>Picea smithiana</i> , <i>Pinus wallichiana</i>
Удайпур	B, C, D	2760-2805	З, Ю	332.78	51.34	201.38	4	<i>Cedrus deodara</i>
Камринг	A, B, C, D	2960-3310	З, ЮВ, В	435.47	14.63	300.00	10	–

Примечания к таблице 3: *Места обитания: А – каменистые, В – валунистые, С – речные берега, D – сухие склоны, E – деградировавшие.

В чистом лесном сообществе (рис. 3) наблюдалось положительное соотношение плотности роста и диапазона высот их произрастания; мы изучили плотность роста молодых деревьев и высоту, на которой они произрастали. Однако при этом наблюдалось отрицательное соотношение между плотностью подроста и диапазоном высоты произрастания; мы измерили площадь стволов у основания и высотные показатели. В случае смешанных лесных сообществ (рис. 4) замечено положительное соотношение между плотностью роста взрослых и молодых деревьев; мы измерили плотность и площадь стволов у основания.

Оценка *J. polycarpus* в зависимости от места произрастания. Максимальную плотность роста мы зарегистрировали в Кейланге – 820 шт./га и Стингри – 462 шт./га. А максимальную площадь стволов у

основания – в Удайпуре (51.34 м²/га) и Бихади (37.61 м²/га), а минимальную – в Юрнате (7.88 м²/га). Максимальная плотность роста молодняка – в Кейланге (950 шт./га) и Юрнате (709 шт./га); подростка – в Удайпуре (200 шт./га) и Камринге (126 шт./га), что отображено в таблице 3.

На новых площадках, в долинах Чандры и Бхадры, в последние десятилетия изучалось влияние климатических изменений, выраженное в смещении широты распространения до 4100 м н.у.м. выше границы произрастания лесов (3800 м н.у.м.).

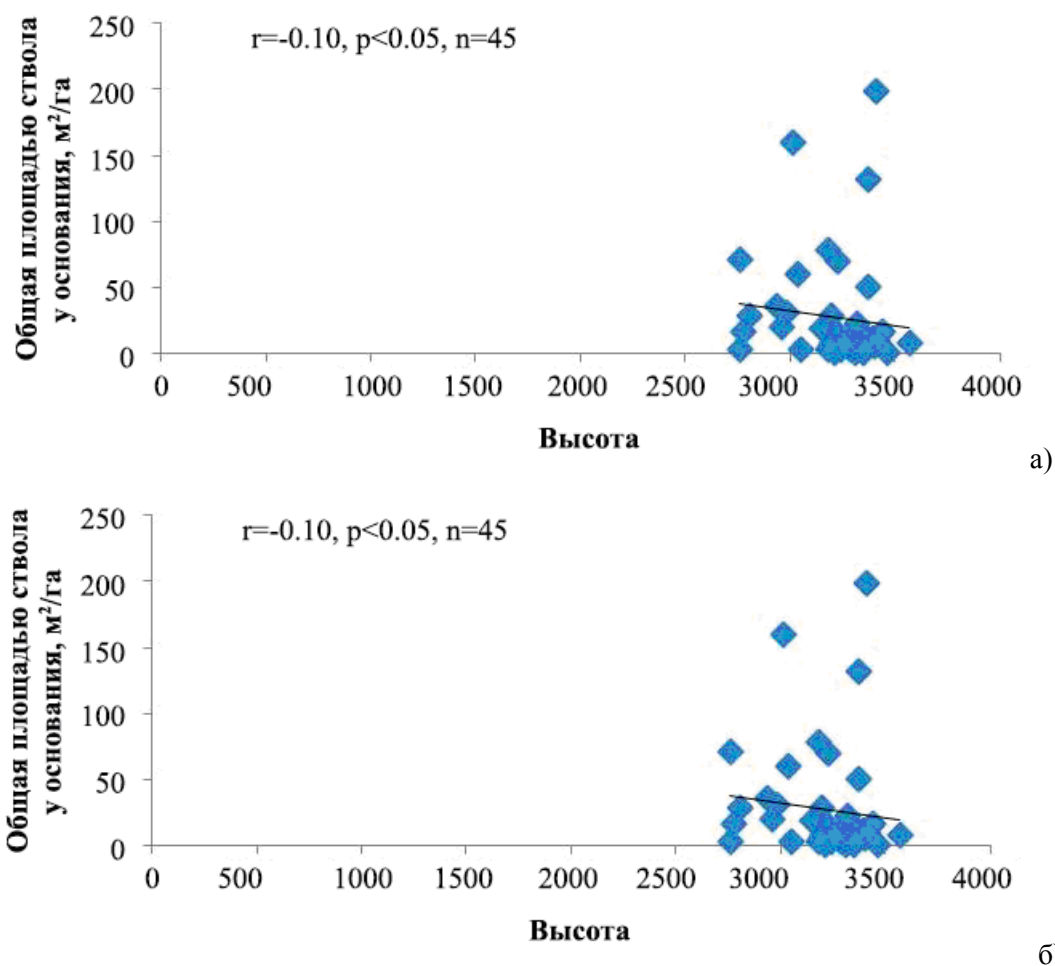


Рис. 3. Корреляция между биологическими показателями в чистом сообществе *J. Polycarpus*: а) между плотностью роста деревьев и высотностью, б) между общей площадью ствола у основания и высотностью.

Физико-химический анализ почвенных образцов. В чистом древесном сообществе показатели рН почвы составили 7.33-7.59 (диапазон от нейтрального до слабощелочного), органического углерода – 2.02-5.83% (неразложившиеся органические остатки), азота – 0.62-2.60% (достаточно доступный). Однако в случае смешанных лесов, где *J. polycarpus* является сопутствующим видом, показатели рН почвы составили 6.32-7.12 (от слабокислотного до нейтрального), органического углерода – 0.08-12.34% (неразложившиеся органические остатки в чистом хвойном лесу и разложившиеся – в широколиственном), азота – 0.67-0.86% (достаточно доступный). Плотность роста и площадь стволов у основания оказались максимальными при нейтральном рН и составили 6.54 и 7.12 соответственно; это указывает на то, что в условиях нейтральной среды *J. polycarpus* развивается особенно хорошо.

Этно-ботаническая значимость *J. polycarpus*. Использование в качестве материала на растопку. Из всех 42 видов, которые используются для растопки, *J. polycarpus* оказался самым значимым (Singh, 2007). Показатели сбора для этого вида составили 224.73 кг, средний вес – 11.05 кг на семью в

день и 331.43 кг на семью в год, вероятность правильного использования – 0.39%, индекс использования ресурса – 128.16. Это самый важный востребованный вид после *Salix fragilis*.

Использование в религиозных целях. Листья и ветки можжевельника считаются священными подношениями местному богу. Дерево является неотъемлемой частью жизни людей в зоне холодных пустынь Гималаев и используется для празднований и ритуалов.

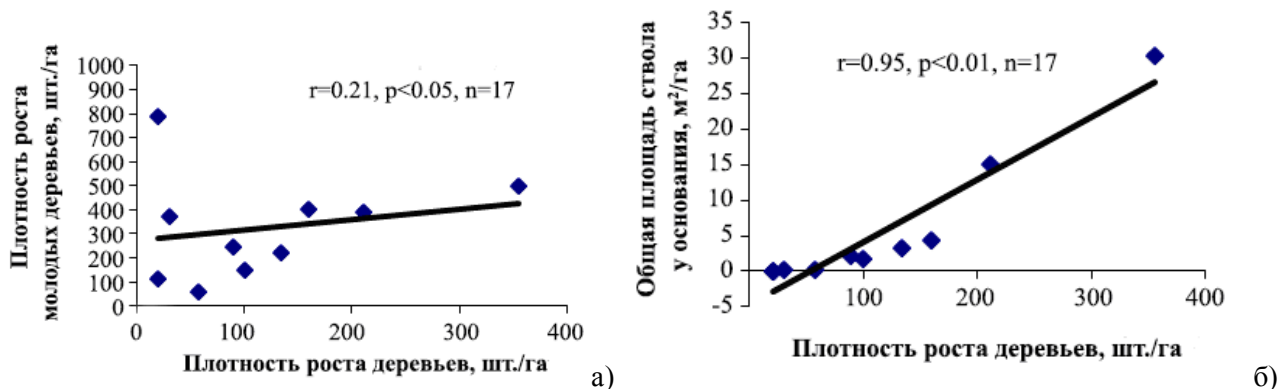


Рис. 4. Корреляция между биологическими показателями в смешанном лесном сообществе с участием *J. polycarpos*: а) между плотностью роста взрослых и молодых деревьев, б) между плотностью роста и общей площадью ствола у основания.

Традиционное использование. Этот вид используется для создания бытовых изделий, таких как «*anwain*» (ванна), «*chujom*» (емкость для переноса воды), «*dannu*» (маслобойка для творога, емкость для хранения напитка ласси), «*takui*» (инструмент для прядения шерсти), «*hadd*» (плуг), «*Par*» (форма для вырезания тонкого хлеба чапати), «*Zowa*» (посуда для приготовления гречневых блинов из *Fagopyrum esculatum*), «*Dau/Chatui/Kadchi*» (кухонные принадлежности), «*Chopcha*» (ложка), «*Chopstick*» (палочки для супа с лапшой), «*Pyala*» (чашка), «*Dongmo*» (кастрюля для приготовления соленого молочного чая), «*Kothadi*» и «*Datha*» (коробочки для хранения круп), «*Halda*» (факел для фестивалей «*Khogla*», «*Dhai*», «*Phagli*», свадеб и ритуальных церемоний), «*Pan/Shid*» (лестница) и другие.

Экологические исследования сообщества J. polycarpos. Видовой состав. Общее число видов составило 281 (5 видов деревьев, 27 кустарников и 249 прочих) из 158 родов и 48 семейств. Среди зарегистрированных нами семейств доминировали Asteraceae (45 видов), Poaceae (25 видов), Fabaceae (22 видов), Lamiaceae (16 видов) и другие. Тринадцать семейств оказались монотипичными.

Видовое разнообразие и концентрация доминирования. Сообщество *J. polycarpos* показало высокое значение видового разнообразия для кустарников – 1.91 и травянистых растений – 4.30, низкое для деревьев – 0.06. Самое высокое доминирование оказалось у деревьев – 0.98, меньшее – у кустарников – 0.25 и травянистых растений – 0.02.

Местные и эндемичные виды в сообществе J. polycarpos. Среди общего количества видов 37% оказались местными, 2% – эндемичными, а 24% – эуэндемичными (табл. 4).

Экономическая значимость видов в сообществе J. polycarpos. Мы обнаружили 198 экономически важных видов для медицинского использования – 159 видов, на корм скоту – 93, съедобных видов – 57, используемых в религии – 30, на растопку – 26, в строительстве – 7, для создания сельскохозяйственных инструментов – 4 и другого использования – 33 (табл. 4).

Виды в сообществе J. polycarpos, находящиеся под угрозой исчезновения. Мы обнаружили 57 видов, из которых 5 находятся под угрозой исчезновения, 20 являются уязвимыми и 32 – в состоянии, близком к угрожаемому (табл. 4).

Обсуждение и выводы

В Индии леса с *J. polycarpos* контролируются с использованием «Системы групповой селекции / Group Selection System» (Pandey, 1993-2007). Независимо от этого из-за полного правительственного запрета на вырубку лесов ради их сохранения здесь по-прежнему не хватает эффективной практики по контролю лесов.

Зарегистрированная нами плотность роста *J. polycarpus* (437 шт./га) выше, чем в пакистанском Белуджистане (332 шт./га; Moinuddin et al., 1990), и меньше, чем в долине греческой р. Нестос (Milos et al., 2007), что является следствием чистого распространения вида. Площадь ствола у основания (13.45 м²/га) меньше, чем в долине Нестоса (19.4-25.5 м²/га; Milos et al., 2007), а рост деревьев в тяжелых климатических условиях оказался таким же, как в Белуджистане (Sarangzai et al., 2012). Общая плотность роста кустарников (2663 шт./га) и травяных растений (34 шт./га) была ниже, чем в Пиндари и Нанда Деви (Samant et al., 2002). Низкие значения видового разнообразия и высокие – концентрации доминирования можно объяснить невысокими показателями развития и многообразия сообществ (Fischer, 1960), а также суровостью окружающей среды (Connel, Orias, 1964). Широкое распространение *J. polycarpus* (в разных местах обитания, аспектах и на разных высотах) и обширные исследования выявили разнообразие видового богатства сопутствующих видов (Singh, 2007; Singh, Samant, 2010).

Таблица 4. Наиболее значимые виды растений (местные, эндемичные, эуэндемичные, под угрозой исчезновения, экономически значимые), найденные в лесном сообществе *J. polycarpus* в холодной пустыне долины Лахул, в Индии.

Характеристика распространения, природоохранного статуса и использования видов	Виды растений по типам ареалов, по степени охраны и экологической значимости
Тип ареала	Распределение видов по типу ареала
Местные	<i>Anaphalis contorta</i> , <i>Aquilegia moorcroftiana</i> , <i>A. fragrans</i> , <i>Aster molliusculus</i> , <i>Bupleurum himalayense</i> , <i>Calamagrostis emodensis</i> , <i>Carex setosa</i> , <i>Chaerophyllum reflexum</i> , <i>C. villosum</i> , <i>Cicerbita macrorrhiza</i> , <i>Cirsium falconeri</i> , <i>Cousinia thomsonii</i> , <i>Cremanthodium decaisnei</i> , <i>Cynoglossum microglochis</i> , <i>C. nervosum</i> , <i>Dianthus angulatus</i> , <i>Dracocephalum speciosum</i> , <i>Elsholtzia strobilifera</i> , <i>Eremurus himalaicus</i> , <i>Gnaphalium thomsonii</i> , <i>Hackelia uncinata</i> , <i>Hedysarum cachemirianum</i> , <i>Iris kemaonensis</i> , <i>Leptorhodos parviflora</i> , <i>Ligusticum elatum</i> , <i>Nepeta laevigata</i> , <i>N. discolor</i> , <i>N. longibracteata</i> , <i>N. nervosa</i> , <i>Pedicularis tenuirostris</i> , <i>Picrorhiza kurrooa</i> , <i>Poa koelzii</i> , <i>Polygonum amplexicaule</i> , <i>Primula denticulata</i> , <i>Pseudomertensia echioides</i> , <i>Rubus foliolosus</i> , <i>Rumex hastatus</i> , <i>Saussurea roylei</i> , <i>S. albescens</i> , <i>S. deltoidea</i> , <i>S. gnaphalodes</i> , <i>S. jacea</i> , <i>Scrophularia dentata</i> , <i>Selinum tenuifolium</i> , <i>Senecio laetus</i> , <i>Silene edgeworthii</i> , <i>S. nepalensis</i> , <i>Swertia cordata</i> , <i>Thalictrum cultratum</i> , <i>T. pauciflorum</i> , <i>Trigonella emodi</i> , <i>Cotoneaster pruinosis</i> , <i>Indigofera heterantha</i> , <i>Lonicera myrtillus</i> , <i>L. quinquelocularis</i> , <i>Ribes glaciale</i> , <i>Rosa webbiana</i>
Эндемичные	<i>Bupleurum lanceolatum</i> , <i>Codonopsis clematidea</i> , <i>Cystopteris montana</i> , <i>Heracleum thomsonii</i> , <i>Saussurea costus</i> , <i>Berberis pseudumbellata</i>
Эуэндемичные	<i>Aconitum heterophyllum</i> , <i>Arabidopsis himalaica</i> , <i>Arenaria festucoides</i> , <i>Astragalus bicuspidis</i> , <i>A. chlorostachys</i> , <i>A. himalayanus</i> , <i>A. rhizanthus</i> , <i>Bergenia stracheyi</i> , <i>Bistorta affinis</i> , <i>Bupleurum falcatum</i> , <i>Cirsium verutum</i> , <i>C. wallichii</i> var. <i>glabratum</i> , <i>Corydalis govaniana</i> , <i>Codonopsis ovata</i> , <i>C. rotundifolia</i> , <i>Euphrasia himalayica</i> , <i>Gypsophila cerastoides</i> , <i>Impatiens glandulifera</i> , <i>Jaeschkea oligosperma</i> , <i>Juncus himalensis</i> , <i>Lactuca lessertiana</i> , <i>Lindelofia longiflora</i> var. <i>falconeri</i> , <i>Meconopsis aculeata</i> , <i>Morina coulteriana</i> , <i>Nepeta eriostachya</i> , <i>N. floccosa</i> , <i>N. glutinosa</i> , <i>N. leucophylla</i> , <i>Pedicularis pectinata</i> , <i>Phlomis bracteosa</i> , <i>Physochlaena praealta</i> , <i>Plantago himalaica</i> , <i>Polygonum somdevae</i> , <i>P. vaccinifolium</i> , <i>Rheum webbianum</i> , <i>Rhodiola heterodonta</i> , <i>Rosularia adenotricha</i> , <i>Scutellaria prostrata</i> , <i>Senecio graciliflorus</i> , <i>Silene moorcroftiana</i> , <i>Stellaria patens</i> , <i>Swertia petiolata</i> , <i>Veronica koelzii</i> , <i>Picea smithiana</i> , <i>Pinus wallichiana</i> , <i>Cotoneaster duthieanus</i> , <i>Lonicera obovata</i> , <i>Salix denticulata</i> , <i>Spiraea canescens</i> , <i>Syringa emodi</i>

Продолжение таблицы 4.

Статус охраны	Распределение видов по статусу охраны
Виды под угрозой исчезновения	<i>Aconitum heterophyllum</i> , <i>Betula utilis</i> , <i>Physochlaena praealta</i> , <i>Rheum webbianum</i> , <i>Saussurea roylei</i>
Уязвимые виды	<i>Arnebia euchroma</i> , <i>Bergenia stracheyi</i> , <i>Bunium persicum</i> , <i>Codonopsis clematidea</i> , <i>Corydalis govaniana</i> , <i>Ephedra gerardiana</i> , <i>Eremurus himalaicus</i> , <i>Hippophae rhamnoides</i> , <i>H. salicifolia</i> , <i>Hyoscyamus niger</i> , <i>Meconopsis aculeata</i> , <i>Rhododendron anthopogon</i> , <i>Ribes glaciale</i> , <i>Picrorhiza kurrooa</i> , <i>Rheum australe</i> , <i>Saussurea albescens</i> , <i>S. deltoidea</i> , <i>Spiraea canescens</i> , <i>Syringa emodi</i> , <i>Swertia petiolata</i>
Виды, близкие к статусу «под угрозой исчезновения»	<i>Arctium lappa</i> , <i>Artemisia maritima</i> , <i>A. minor</i> , <i>Bupleurum falcatum</i> , <i>B. lanceolatum</i> , <i>Chaerophyllum villosum</i> , <i>Codonopsis rotundifolia</i> , <i>Cremanthodium decaisnei</i> , <i>Cystopteris montana</i> , <i>Diplocyclos palmatus</i> , <i>Erophila verna</i> , <i>Carum carvi</i> , <i>Hedysarum cachemirianum</i> , <i>Heracleum candicans</i> , <i>H. thomsonii</i> , <i>Hyssopus</i>
Виды, близкие к статусу «под угрозой исчезновения»	<i>officinalis</i> , <i>Indigofera heterantha</i> , <i>Malaxis muscifera</i> , <i>Morina coulteriana</i> , <i>Rhodiola heterodonta</i> , <i>Pedicularis pectinata</i> , <i>Picea smithiana</i> , <i>Pinus wallichiana</i> , <i>Salix flagellaris</i> , <i>Rosularia adenotricha</i> , <i>Rubus foliolosus</i> , <i>Silene moorcroftiana</i> , <i>S. viscosa</i> , <i>Stellaria patans</i> , <i>Veronica koelzii</i>
Тип использования	Распределение видов по экономическому использованию
Медицина	<i>Aconitum heterophyllum</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Arctium lappa</i> , <i>Arnebia euchroma</i> , <i>Artemisia maritima</i> , <i>Bergenia stracheyi</i> , <i>Bunium persicum</i> , <i>Corydalis govaniana</i> , <i>Ephedra gerardiana</i> , <i>Heracleum candicans</i> , <i>Hippophae rhamnoides</i> , <i>H. salicifolia</i> , <i>Hyssopus officinalis</i> , <i>Meconopsis aculeata</i> , <i>Origanum vulgare</i> , <i>Picrorhiza kurrooa</i> , <i>Rheum australe</i> , <i>Rhodiola heterodonta</i> , <i>Saussurea costus</i> , <i>Thymus linearis</i>
На корм скоту	<i>Agrostis griffithiana</i> , <i>A. munroana</i> , <i>A. pilosula</i> , <i>Avena fatua</i> , <i>Bothriochloa ischaemum</i> , <i>Brachypodium sylvaticum</i> , <i>Bromus pectinatus</i> , <i>B. tectorum</i> , <i>Calamagrostis holciformis</i> , <i>C. scabrescens</i> , <i>Carex setosa</i> , <i>Dactylis glomerata</i> , <i>Danthonia schneideri</i> , <i>Eragrostis minor</i> , <i>E. pilosa</i> , <i>Poa koelzii</i> , <i>P. lahulensis</i> , <i>P. pratensis</i> , <i>Silene edgeworthii</i> , <i>Hippophae rhamnoides</i> , <i>H. salicifolia</i> , <i>Juniperus communis</i> , <i>Lonicera obovata</i> , <i>L. quinquelocularis</i> , <i>Trifolium pratense</i> , <i>T. repens</i> , <i>Salix denticulata</i> , <i>S. fragilis</i> , <i>S. dephnoides</i>
Съедобные	<i>Bunium persicum</i> , <i>Carum carvi</i> , <i>Eremurus himalaicus</i> , <i>Fragaria vesca</i> var. <i>nubicola</i> , <i>Hippophae rhamnoides</i> , <i>H. salicifolia</i> , <i>Origanum vulgare</i> , <i>Rheum australe</i> , <i>R. webbianum</i> , <i>Urtica dioica</i>
В религиозных целях	<i>Achillea millefolium</i> , <i>Arctium lappa</i> , <i>Artemisia biennis</i> , <i>A. maritima</i> , <i>Arnebia euchroma</i> , <i>Betula utilis</i> , <i>Hyoscyamus niger</i> , <i>Lonicera quinquelocularis</i> , <i>Physochlaena praealta</i> , <i>Taraxacum officinale</i> , <i>Juniperus polycarpus</i>
На растопку	<i>Betula utilis</i> , <i>Juniperus polycarpus</i> , <i>J. communis</i> , <i>Picea smithiana</i> , <i>Pinus wallichiana</i> , <i>Cotoneaster obovatus</i> , <i>Hippophae rhamnoides</i> , <i>H. salicifolia</i> , <i>Lonicera obovata</i> , <i>Salix denticulata</i> , <i>S. fragilis</i> , <i>S. flagellaris</i> , <i>S. oxycarpa</i> , <i>S. pycnostachya</i>
В строительстве	<i>Cedrus deodara</i> , <i>Juniperus polycarpus</i> , <i>Picea smithiana</i> , <i>Pinus wallichiana</i> , <i>Hippophae salicifolia</i>
В сельском хозяйстве	<i>Betula utilis</i> , <i>Hippophae rhamnoides</i> , <i>H. salicifolia</i> , <i>Juniperus polycarpus</i> , <i>Cotoneaster obovatus</i> , <i>Salix fragilis</i>

J. polycarpus предпочитает соседство с лесными засухо- и морозоустойчивыми видами. Следовательно, в чистом сообществе вид показал обильный рост по сухим склонам (плотность роста 636 шт./га, площадь ствола – 24.01 м²/га) и в валунистых (430 шт./га, 14.38 м²/га) местообитаниях (табл. 2).

В случае смешанных сообществ доминировали деградировавшие местообитания с рано появившимся *J. polycarpus* (IVI – 60.82, плотность – 160 шт./га, площадь – 4.27 м²/га) и валунистые с участием взрослых деревьев (68.96, 150 шт./га, 8.55 м²/га; табл. 2). Также *J. polycarpus* продемонстрировал максимальную плотность роста деревьев (283 шт./га) в смешанном сообществе *J. polycarpus*–*C. deodara* в Удайпуре, условия которого подходят для его произрастания; и хорошую связь с *Picea smithiana* в Бихади, с максимальной площадью ствола у основания (37.61 м²/га; табл. 3). В Муулинге и Трилокинате он замечен с *Pinus wallichiana*. Максимальная средняя плотность роста молодняка и подроста – в сухих местообитаниях, что объясняется сукцессиями, южной экспозицией с максимумом солнечных часов и подходящими микроклиматическими условиями (Singh, 2007). Достаточное возобновление из семян в некоторых местообитаниях (по сухим склонам, каменистым и деградировавшим) указывает на то, что эти леса выживут в условиях климатических изменений. Наличие возобновления обусловлено прерыванием покоя семян естественной стратификацией, как это происходит и в Пакистане (Mohammad, Ataulah, 1992). Семена начинают прорасти после поглощения и последующего выделения местными птицами, такими как желтоклювая альпийская галка (*Pyrrhocorax graculus*; местное название – «Chang», не находится под угрозой) и красноклювая альпийская галка (*Pyrrhocorax pyrrhocorax*; местное название – «Chang», не находится под угрозой) в зимние месяцы.

Меньшая плотность роста наблюдалась в сухой умеренной нижней высотной зоне (<3100 м н.у.м) в смешанных сообществах; максимальная – в средней (3100-3500 м н.у.м.) в чистом сообществе *J. polycarpus*. В альпийской зоне (>3500 м н.у.м.) развитие растений было слабым, а тренд плотности их роста и площади стволов – нисходящим. Распространение *J. polycarpus* при благоприятных условиях по сухим склонам и на валунистых местообитаниях и выше границы произрастания лесов указывает на влияние стремительных климатических изменений (Bolch et al., 2012).

Количественная оценка топливных ресурсов в верхней высотной зоне Гималаев ограничилась только несколькими видами (Samant et al., 2000a). В среде холодных пустынь высока необходимость в дереве на растопку, и *J. polycarpus* является одним из самых востребованных видов. Его древесина считается не очень подходящей для строительства, однако люди всё равно используют его в отсутствие альтернатив. Во многих местах (Стингри, Камринг, Мууринг, Кейланг) была обнаружена угроза высыхания из-за нападения паразита *Arceuthobium oxycedri* на ветки *J. polycarpus*. Для эффективного контроля ситуации рекомендуется своевременное удаление паразитов с веток.

В сообществе *J. polycarpus* обнаружено 198 экономически значимых и 57 видов растений, находящихся под угрозой исчезновения, что требует должного мониторинга для тренда выборки, адаптивной биологии и их дальнейшего распространения. Мы зарегистрировали достаточное разнообразие сопутствующих местных и эндемических видов.

Благодарности. Авторы хотят поблагодарить директоров G.V. Pant National Institute of Himalayan Environment & Sustainable Development (Национальный институт окружающей среды и стабильного развития Гималаев им. Г.В. Панта) и The Council of Scientific & Industrial Research of Institute of Himalayan Bioresource Technology (Совет научных и промышленных исследований Института технологий биоресурсов Гималаев) за предоставление необходимого оборудования. Мы выражаем благодарность за помощь доктору Л. Манохару и Ministry of Environment, Forest and Climate Change (Министерству окружающей среды и лесного хозяйства Индии; письмо № 08/27/04-CS/BR; 27.06.2005) за финансовую поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Allen S.E. 1974. Chemical analysis of ecological materials. Oxford: Blackwell Scientific Publications. 565 p.
- Anonymous. 1895. Index Kewensis Plantarum Phanerogamarum. Vol 1-2.15 Suppl. Oxford: Clarendon Press. Vol. 1. 1268 p.; Vol. 2. 1299 p.
- Aswal B.S., Mehrotra B.N. 1994. Flora of Lahaul-Spiti (a Cold Desert in North-West Himalaya). Bishen Singh and Mahendra Pal Singh, Dehradun. 761 p.
- Bolch T., Kulkarni A., Kaab A., Huggel C., Paul F., Cogley J.G., Frey H., Kargel J.S., Fujita K., Scheel M., Bajracharya S., Stoffel M. 2012. The state and fate of Himalayan Glaciers // Science. Vol. 336 (6079). P. 310-314.
- Connel J.H., Orias E. 1964. The ecological regulation of species diversity // The Magazine of the American Museum of Natural History. Vol. 48. P. 399-414.

- Curtis J.T., McIntosh R.P. 1950. The interrelation of certain analytic and phytosociological character // Ecology. Vol. 31. P. 434-455.
- Dhar U., Samant S.S. 1993. Endemic diversity of Indian Himalaya. Ranunculaceae and Paeoneaceae // Journal of Biogeography. Vol. 20. P. 659-668.
- Fischer A.G. 1960. Latitudinal variation in organic diversity // Evolution. Vol. 14. P. 64-81.
- Kachroo P., Sapru B.L., Dhar U. 2002. Flora of Ladakh: An Ecological and Taxonomical Appraisal. Bishen Singh Mahendra Pal Singh, Dehradun, India. 172 p.
- Milos E., Pipinis E., Petrou P., Akritidou S., Smiris P., Aslenidou M. 2007. Structure and regeneration patterns of the *Juniperus excelsa* Bieb. Stands in the Central part of the Nestos valley in the northeast of Greece, in the context of anthropogenic disturbances and nurse plant facilitation // Ecological Researches. Vol. 22. P. 713-723.
- Mohammad K., Ataulloh K.R. 1992. Woody plant seed manual (Pakistan). 131 p.
- Moinuddin A., Shahid A., Buzdar S.S., Hafëez A. 1990. Population structure and dynamics of *Juniperus excelsa* in Balochistan Pakistan // Journal of Vegetation Science. Vol. 1. No. 2. P. 271-276.
- Muller-Dombois D., Ellenberge H. 1974. Aims and Methods of Vegetation Ecology. New York: John Willey and Sons. 547 p.
- Murti S.K. 2001. Flora of Cold Deserts of Western Himalaya // Botanical Survey of India. Vol. I. India, Calcutta. 452 p.
- Pandey C.B. 1993-2007. Working plan for Lahaul Forest Division, Department of Forest Farming and Conservation. Himachal Pradesh. 183 p.
- Polunin O., Stainton A. 1984. Flowers of the Himalaya. Oxford: Oxford University Press. 580 p.
- Rana M.S., Samant S.S. 2010. Threat categorisation and conservation prioritization of floristic diversity in the Indian Himalayan region: A state of art approach from Manali Wildlife Sanctuary // Journal of Nature Conservation. Vol. 18. P. 159-168.
- Sahani K.C. 1990. Gymnosperms of India and Adjacent Countries. Bishen Singh Mahendra Pal Singh, Dehradun, India. 169 p.
- Samant S.S., Dhar U. 1997. Diversity, endemism and economic potential of wild edible plants of Indian Himalaya, India // International Journal of Sustainable Development & World Ecology. Vol. 4. P. 179-191.
- Samant S.S., Dhar U., Rawal R.S. 2000b. Assessment of fuel resources diversity and utilization pattern in Askot Wildlife Sanctuary in Kumaun Himalaya, India, for conservation & Management // Environment Conservation. Vol. 27. No. 1. P. 5-13.
- Samant S.S., Joshi H.C., Arya S.C. 2000a. Diversity, nativity and endemism of vascular plants in Pindari area of Nanda Devi Biosphere Reserve-II // Himalayan Biosphere Researches. Vol. 2 (1&2). P. 1-29.
- Samant S.S., Joshi H.C., Arya S.C., Pant S. 2002. Studies on the structure, composition and changes of the vegetation in Nanda Devi Biosphere Reserve of west Himalaya. FTR submitted to MOE&F, New Delhi, India. P. 878-890.
- Samant S.S., Pant S., Singh M., Lal M., Singh A., Sharma A., Bhandari S. 2007. Medicinal plants in Himachal Pradesh, northwestern Himalaya, India // International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management. Vol. 3. P. 234-251.
- Sarangzai A.M., Ahmed M., Ahmed A., Leghari S.K., Umerjan S. 2012. Juniper forests of Baluchistan: A brief review // FUUAST Journal of Biology. Vol. 2. No. 1. P. 1-79.
- Shannon C.E., Wiener W. 1963. The mathematical theory of communication. Urbana: University of Illinois Press. 144 p.
- Simpson E.H. 1949. Measurement of diversity // Nature. Vol. 163. No. 688. P. 163.
- Singh A. 2007. Assessment of plant diversity and conservation status of forest vegetation in a Cold Desert Biosphere Reserve of the Western Himalaya. Ph.D. Thesis submitted to Kumaun University Nainital, India. 97 p.
- Singh A., Lal M., Samant S.S. 2009. Diversity, Indigenous uses and conservation prioritization of medicinal plants in Lahaul valley, proposed Cold Desert Biosphere Reserve, India // International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management. Vol. 5. No. 3. P. 132-154.
- Singh A., Samant S.S. 2010. Conservation prioritization of habitats and forest communities in the Lahaul valley of proposed Cold Desert Biosphere Reserve, North Western Himalaya, India // Applied Ecology and Environmental Research. Vol. 18. No. 2. P. 101-117.

УДК 631.48:930.26

К ВОПРОСУ О ВРЕМЕНИ И ПРИЧИНАХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СОЛОНЦОВОГО ПРОЦЕССА В ПОЧВАХ ПУСТЫННЫХ СТЕПЕЙ ЮГО-ВОСТОКА РУССКОЙ РАВНИНЫ¹

© 2020 г. А.В. Борисов, А.О. Алексеев

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
Россия, 142290, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, д. 2а. E-mail: a.v.borisovv@gmail.com*

Поступила в редакцию 16.05.2019. После доработки 12.08.2019. Принята к публикации 30.09.2019

В статье рассмотрены временные рамки и роль антропогенного фактора в возникновении солонцового процесса в почвах пустынно-степной зоны юго-востока Русской равнины. На основании изучения разновозрастных почв, погребенных под курганами эпохи бронзы и средневековья (6200-700 лет назад) в пределах Сальско-Маньчской гряды, установлено, что до начала III тыс. до н.э. почвы региона не несли признаков солонцового процесса на макроуровне. Первые солонцы в регионе начали формироваться 4800-4700 лет назад. Их появление хронологически совпало с началом усиления аридизации климата. В этот период пустынные степи стали активно заселяться древними скотоводами, специализирующимися на разведении мелкого рогатого скота, в результате чего резко возросла нагрузка на почвы и экосистемы степи. В статье рассматриваются возможные причинно-следственные связи в системе «климат – хозяйственная модель – солонцовый процесс».

Ключевые слова: пустынно-степная зона, Сальско-Маньчская гряда, почвы, солонцовый процесс, курганы, эпоха бронзы, аридизация, скот, выпас.

DOI: 10.24411/1993-3916-2020-10081

Изучение физико-химических свойств солонцов, их генезиса и участия в структуре почвенного покрова сухо- и пустынно-степной зон началось с фундаментальных работ К.К. Гедройца в 20-х годах (Гедройц, 1955), резко активизировалось в середине и второй половине XX в. (Ковда, 1937; Антипов-Каратаев, 1953; Иванова, Фридланд, 1954; Роде, 1968; Роде, Польский, 1961; Иванова, 1964) и продолжается до наших дней (Хитров, 2003, 2004, 2005; Чижикова и др., 2009; Алексеева и др., 2010). Столь пристальное внимание к солонцовому процессу обусловило глубокую теоретическую и практическую изученность этого феномена в современных почвах и широкий спектр методов оценки интенсивности его проявления (Алексеева и др., 2010).

Принято считать, что в восточно-европейских степях солонцовый процесс получил развитие лишь в суббореальном периоде голоцена, причем в различных географических зонах этот процесс возникал асинхронно в зависимости от геоморфологических и литологических условий (Демкин, Лукашов, 1987; Геннадиев, Пузанова, 1990; Иванов, 1992). Итоги изучения вопросов, связанных с возникновением солонцового процесса в южнорусских степях, были подведены В.А. Демкиным в 1997 году. Имеющиеся на тот момент данные позволили автору заключить, что на большей части степной зоны солонцеватость появилась в эпоху средней и поздней бронзы (II тыс. до н.э.). Несколько позднее, во второй половине II тыс. до н.э. солонцовый процесс начался в почвах не дренированных равнин. Ранее всего признаки солонцового процесса выявлены в почвах восточного склона Ергенинской возвышенности и Приволжской полосы (Демкин, 1997).

Предложенная в конце XX в. В.А. Демкиным концепция развития солонцового процесса разрабатывалась на основе археологической периодизации культур эпохи бронзы; радиоуглеродное датирование на тот момент еще не получило широкого распространения. В результате накопления

¹ Работа выполнена в рамках Госзадания № 0191-2019-0046 «Развитие почв в условиях меняющегося климата и антропогенных воздействий». Химические анализы выполнены за счет средств гранта РФФ № 17-18-01406 «Экологический детерминизм развития древних обществ: хозяйственные модели населения эпохи бронзы Кавказа и степи в условиях меняющегося климата».

новых калиброванных радиоуглеродных дат по археологическим культурам произошло удревание хронологических позиций культур эпохи бронзы (Трифонов, 2001). Поэтому выводы по эволюции почв, сделанные в работах 70-90 гг. на основе археологических датировок, нуждаются в пересмотре и привязке к абсолютным калиброванным радиоуглеродным данным.

Помимо этого, существенные сдвиги произошли и в самой археологической науке. Так, еще в середине 1980-х гг. начало формироваться направление, получившее название «ландшафтной археологии», как комплексной методики изучения взаимодействия человека и окружающего ландшафта (Aston, 1985; David, Thomas, 2008). Позднее Дж. Бинтлифф предложил концепцию «off-site» (с англ. – территория за пределами археологического поселения), предполагающую выделение хозяйственной периферии древнего поселения (Bintliff, 2000). В итоге вопросы взаимоотношений древних социумов с окружающей средой стали привлекать пристальное внимание исследователей и появились работы, в которых показана существенная роль древней антропогенной деятельности в трансформации почв и ландшафтов (Гольева, 2008; Lisetskii et al., 2017; Bobrovsky et al., 2018; Novenko et al., 2018).

В данной работе предпринята попытка обозначить в рамках абсолютных радиоуглеродных дат начало возникновения солонцового процесса в Сальско-Маньчских степях и рассмотреть древнюю антропогенную деятельность как один из факторов появления солонцов.

Объекты и методы исследований

В качестве объектов для исследования развития солонцового процесса в почвах Сальско-Маньчской гряды были выбраны два участка с различными литологическими и геоморфологическими условиями в окрестностях с. Ремонтное Ростовской области.

Исследовались современные и погребенные почвы разновозрастных курганов в пределах курганных могильников Песчаный, Сухая Термиста-1 и Сухая Термиста-2 (рис. 1).

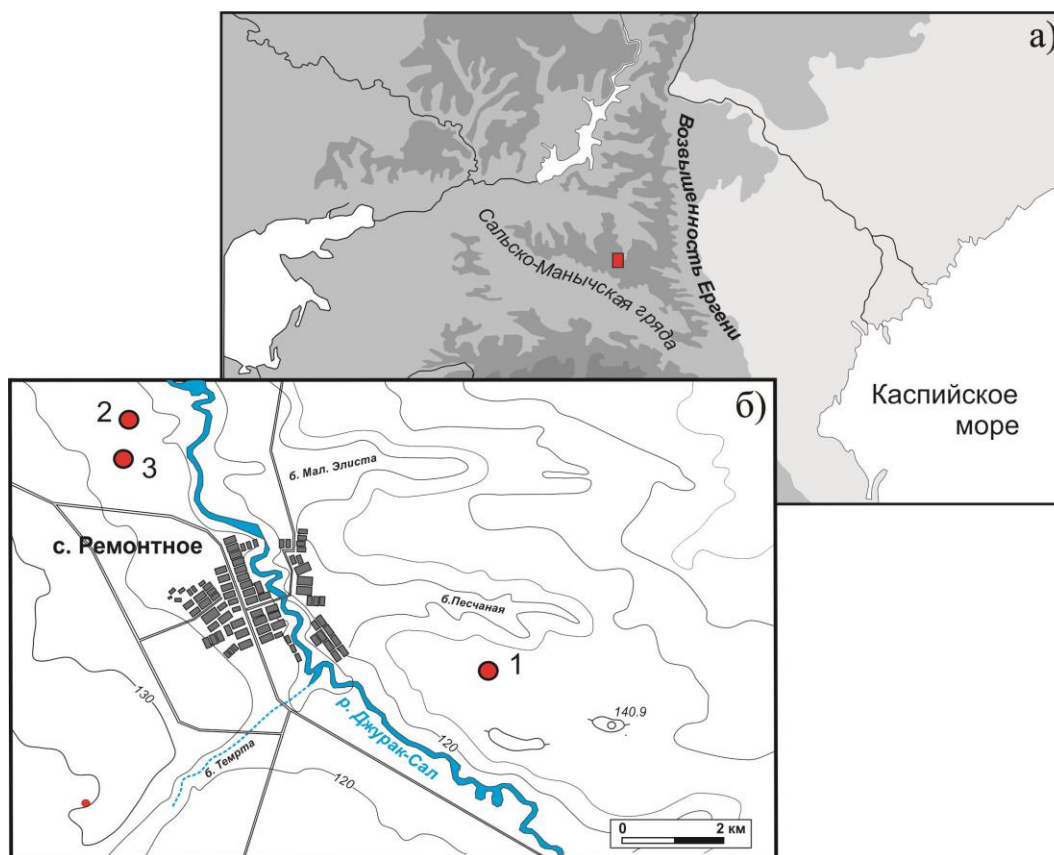


Рис. 1. Расположение объектов исследования. 1 – курганный могильник Песчаный-5 ($46^{\circ} 33' 04.4''$ с.ш. $43^{\circ} 41' 36.7''$ в.д.), 2 – курганный могильник Сухая Термиста-1 ($46^{\circ} 35' 21.5''$ с.ш. $43^{\circ} 38' 00.3''$ в.д.), 3 – курганный могильник Сухая Термиста-2 ($46^{\circ} 33' 03.8''$ с.ш. $43^{\circ} 41' 37.9''$ в.д.).

Курганы могильника Песчаный расположены, в геоморфологическом плане приурочены к привершинной зоне склона южной экспозиции (уклон местности 2-3°) на правом берегу р. Джурак-Сал. Почвообразующие породы представлены опесчаненными суглинистыми отложениями Ергенинской свиты.

Могильники Сухая Термиста-1 и Сухая Термиста-2 расположены в 2-2.5 км северо-западнее с. Ремонтное, на пологом склоне, переходящем в высокую террасу левого берега р. Джурак-Сал. Почвообразующие породы представлены лессовидными суглинками более тяжелого гранулометрического состава по сравнению с могильником Песчаный-5. Территория представляет собой целинные участки, проективное покрытие – менее 50%.

Высота всех курганов, рассматриваемых в данной статье, составляет от 1.5 до 2.3 м, диаметр – 40-50 м (фото). При раскопках насыпь кургана разрезалась серией траншей глубиной до горизонта ВС, при этом мы оставляли 4-5 бровок, на которых можно было с двух сторон исследовать погребенную почву (фото). Общая площадь погребенной почвы, которая вскрывается под курганом, составляла, таким образом, от 1500 до 2500 м². Это позволило получить полное представление о структуре почвенного покрова и исключить возможность пространственной ошибки при оценке особенностей проявления солонцового процесса и комплексности почвенного покрова.



Фото. Вид кургана в момент проведения палеопочвенных исследований.

Погребенные почвы исследованы под разновозрастными курганами, время создания которых охватывает хроноинтервал от эпохи энеолита до Средневековья (6200-700 лет назад). Во всех курганных могильниках проведено морфолого-генетическое описание профилей погребенных почв и их современных аналогов, отобраны образцы по генетическим горизонтам на общие химические анализы. Определение содержания органического углерода, карбонатов, значений pH, гранулометрического состава проведено по традиционным методикам (Аринушкина, 1970) в Центре коллективного пользования «Физико-химические методы исследования почв и экосистем» РАН (ЦКП ИФХиБПП).

Результаты и их обсуждение

В силу того что в погребенных почвах происходит сильное диагенетическое засоление как результат проникновения солей из насыпи, в данной работе в качестве диагностических критериев наличия солонцового процесса в почвах взяты морфологические характеристики верхней части профиля – призматическая структура в горизонте В1 с выраженным превышением вертикального размера призм над горизонтальным, наличие органо-глинистых кутан, осветление и листовато-

слоистая структура в горизонте А1 (Хитров, 2004). В качестве дополнительного диагностического признака, показывающего глубину трансформации почвенной массы под действием солонцового процесса, взята текстурная дифференциация верхней части профиля: отношение содержания ила в горизонтах В1/А1. Рассмотрим свойства почв двух ключевых участков (табл.).

Таблица. Морфологические признаки солонцового процесса в почвах.

№ разреза	Время погребения	Археологическая культура	Почвы	Признаки солонцового процесса			
				Листоватая структура горизонт А1	Палисадная нижняя граница горизонт А1	Призматическая структура горизонт В1	Органо-глинистые кутаны в горизонт В1 ²
<i>Курганный могильник Песчаный (почвы на опесчаненных суглинках Ергенинской свиты)</i>							
Б-327	Современность		солонцы	+	+	+	+
Б-329	4133-4058 cal. BC	энеолит	светло-каштановые	-	-	-	-
Б-368	2916-2876 cal. BC	ямная	светло-каштановые	-	-	-	-
Б-132	2813-2738 cal. BC	катакомбная	светло-каштановые солонцеватые	+	-	+	-
Б-331	2135-2035 cal. BC	посткатакомбная	солонцы	±	±	±	±
Б-328	AD 1300-1400	Средневековье	солонцы	-	-	+	-
<i>Курганный могильник Сухая Термиста (почвы на лессовидных тяжелых суглинках)</i>							
Б-210-	Современность		солонцы	+	+	+	+
Б-210-			светло-каштановые	±	-	±	-
Б-209	2777-2475	ямная	светло-каштановые	-	-	-	-
Б-167-	2669-2475 cal. BC	катакомбная	солонцы	+	±	+	+
Б-176-			светло-каштановые	±	-	-	-

Ключевой участок Песчаный. В современном почвенном покрове ключевого участка Песчаный-5 абсолютно преобладают солонцы мелкие и средние глубокозасоленные карбонатсодержащие гипсосодержащие. Почвы каштанового ряда с менее выраженными признаками солонцового процесса обнаружены лишь на склоновых участках в иных геоморфологических позициях. Рассмотрим свойства наиболее характерной почвы в пределах данного участка (*разрез Б-327*).

Горизонт А1 современного солонца представлен белесовато-серым легким суглинком листовато-порошистой структуры. Нижняя граница ровная, в отдельных местах палисадная; переход резкий по цвету и структуре. Солонцовый горизонт В1 коричневатого-бурый с красноватым оттенком в нижней части; средний суглинок призматической структуры с выраженным превышением вертикального размера над горизонтальным. Структурные отдельности агрегированы в крупные, до 10-13 см блоки-тумбы с округлыми головками. Грани структурных отдельностей хорошо отмыты (залакированы), на поверхности обильные мощные органо-глинистые кутаны.

Наиболее древняя палеопочва эпохи энеолита была погребена под курганом 15 (*разрез Б-329*). Основное захоронение, над которым он был сооружен, относится к интервалу 4133-4059 гг. до н.э.

² На макро-морфологическом уровне.

(Gr-54939)³. Погребенная почва светло-каштановая несолонцеватая. В ней не отмечено признаков солонцового процесса и текстурной дифференциации профиля. Для горизонта [A1] (0-7 см) характерно наличие мелкокомковатой непрочной структуры и постепенный переход в горизонт [B], представленный легким суглинком неясной глыбисто-комковатой структуры без натечных кутан по граням структурных отдельностей.

Следующая по времени почва хроноряда была погребена под курганом 16 (*разрез Б-368*). По археологическим данным она относится к раннему этапу эпохи бронзы – ямная культура, радиоуглеродная датировка 2916-2867 гг. до н.э. (GrA-59133). Погребенная почва – каштановая несолонцеватая глубоко-солончаковатая. Для нее также характерно отсутствие признаков солонцового процесса на морфологическом уровне. Морфологические характеристики профиля довольно близки с описанной выше.

В отличие от рассмотренных выше почв, под курганом 3 (*разрез Б-132*) была относится к раннекатакомбной культуре эпохи средней бронзы. Радиоуглеродная датировка – 2813-2738 гг. до н.э. Погребенная почва идентифицирована как светло-каштановая солонцеватая. В ее профиле выделяются горизонт [A1] (0-10 см), белесовато-серый легкий суглинок листовато-порошистой структуры. Нижняя граница ровная, переход в горизонт [B1] ясный по структуре и цвету.

Солонцовый горизонт [B1] (10-27 см) коричнево-бурый, призматической структуры с хорошо выраженной вертикальной ориентировкой призм. Грани структурных отдельностей отмыты, с обильными органо-глинистыми кутанами. В этой почве хорошо развит горизонт B2, не отмеченный в более древних почвах и характеризующийся постепенным изменением цвета и структуры. Заметно выше степень иллювирирования солонцового горизонта (рис. 2 а).

Следующая почва хроноряда была погребена под курганом 14 (*разрез Б-331*). По археологическим данным время ее погребения относится к финалу эпохи средней бронзы (лолинская культура). Радиоуглеродная датировка – 2135-2035 гг. до н.э. (Gr-55077). Погребенная почва – солонец мелкий каштановый. В ней выявлены две стадии солонцового процесса. На большей части профиля солонцовый процесс находится в активном состоянии, однако в отдельных местах намечается его деградация. На участках с явно выраженным солонцовым процессом отмечается максимальная для данного хроноряда дифференциация верхней части профиля по содержанию ила.

Почва эпохи средневековья была погребена под курганом 10 (*разрез Б-328*). По археологическим данным, время погребения почвы относится к XIII-XIV вв. н.э. (~1300 г. н.э.). Погребенная почва – солонец мелкий каштановый. Для нее характерно затухание солонцового процесса. На фоне хорошо развитой призматической структуры наблюдается ослабление процессов иллювирирования и возрастание содержания ила в горизонте A1.

Таким образом, в целом по ключевому участку Песчаный-5 можно сделать следующие выводы. В почвах эпохи энеолита и ямной культуры солонцовый процесс не проявлялся на макроуровне. Первые признаки солонцового процесса отмечены в почвах, погребенных в 2800-2700 гг. до н.э. под курганами катакомбной культуры. Причем в двух довольно близких по времени курганах (различия лишь в культурной атрибуции погребений) наблюдается совершенно разная ситуация: под курганом ямной культуры признаки солонцового процесса не выражены, в то время как под курганом катакомбной культуры погребен уже вполне сформированный солонец. Радиоуглеродные даты обоих курганов близки и не позволяют их разделить хронологически, что указывает на довольно быстрое развитие солонцового процесса. Здесь следует особо подчеркнуть, что, несмотря на хронологическую близость, эти курганы относятся к разным периодам эпохи бронзы – раннему и среднему (это обстоятельство будет детально рассмотрено в разделе «Заключение»). Затухание солонцового процесса отмечается в почвах, погребенных на рубеже III-II тыс. до н.э. и 700 лет назад.

Ключевой участок Сухая Термиста-1. На территории курганных могильников Сухая Термиста-1 и Сухая Термиста-2, в отличие от вышеописанного участка, развиты средне- и тяжелосуглинистые почвы, что дает возможность оценить особенности возникновения солонцового процесса на почвах различного гранулометрического состава. Современный почвенный покров, в отличие от ключевого

³ Здесь и далее: указан интервал калиброванных радиоуглеродных дат в годах до н.э.; в скобках – индекс радиоуглеродной лаборатории и номер даты.

участка Песчаный, характеризуется комплексностью с участием солонцов и светло-каштановых почв разной степени солонцеватости. В растительном покрове хорошо заметны ареалы с очень изреженной растительностью, представленной преимущественно полынью черной и прутняком на солонцах, и ареалы с полынно-ромашниково-злаковой растительностью на светло-каштановых солонцеватых почвах. Для изучения свойств современных почв была заложена траншея длиной 5 м (*разрез Б-210*). Траншея располагалась таким образом, чтобы одной фронтальной стенкой захватывать солонцовое пятно, а другой – светло-каштановые солонцеватые почвы.

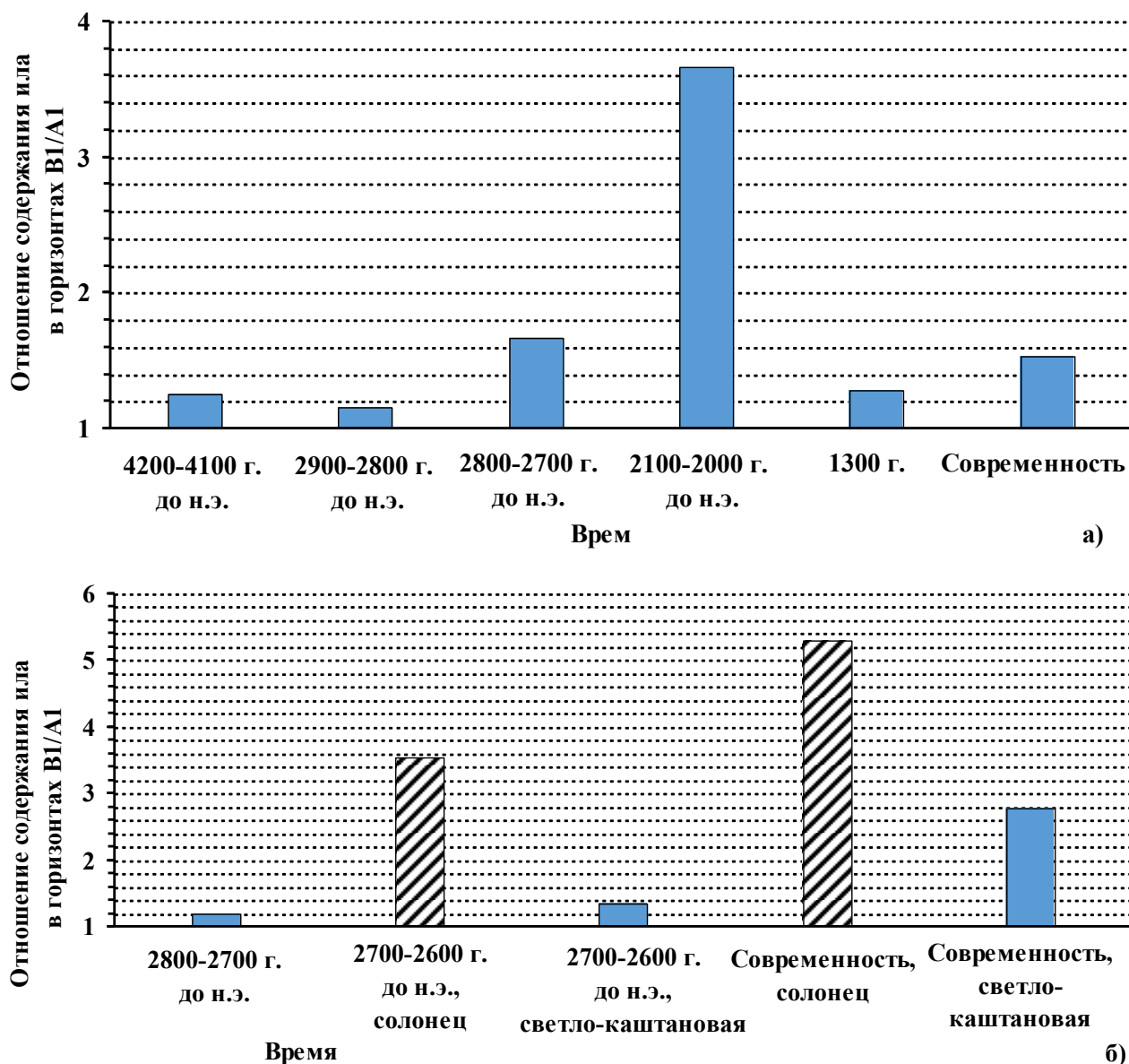


Рис. 2. Отношение содержания ила в горизонтах B1/A1 разновозрастных погребенных и современных почв на: а) – ключевом участке Песчаный и б) – ключевом участке Сухая Термиста.

Современные солонцы солончаковатые (*разрез Б-210-С*) характеризуются наличием горизонта A1 мощностью около 5 см, представленного белесовато-светло-серым легким суглинком листовато-порошистой структуры. Нижняя граница ровная, местами палисадная. Переход резкий. Солонцовый горизонт B1 (5-25 см) представлен тяжелым суглинком, с хорошо заметными красновато-коричневыми тонами в окраске – результат повсеместных мощных кутан на стенках вертикальных призматических структурных отдельностей. Призмы агрегируются в блоки-тумбы диаметром до 10 см с характерными округлыми головками. Для этой почвы отмечено самое значительное

обогащение солонцового горизонта илом (рис. 1 б).

В современных светло-каштановых солонцеватых глубоко-солончаковых почвах (*разрез Б-210-К*) признаки солонцового процесса выражены слабо; горизонт А1 мощностью до 10 см, светло-серый, легкосуглинистый, комковато-порошистой структуры, со слабо заметной слоистостью в нижней части. В солонцовом горизонте В1 органо-глинистые кутаны не заметны на макроуровне, степень обогащения илом по сравнению с солонцом заметно меньше (рис. 2 б), структурные отдельности не формируют вертикальные призмы.

Рассмотрим проявление солонцового процесса в погребенных почвах. В могильнике Сухая Термиста-1 исследованы палеопочвы, погребенные под насыпью кургана 1 (*разрез Б-209*), время создания которого соответствует ямной культуре раннего бронзового века и датируется 2777-2670 гг. до н.э. (GrA-45036). Как и в случае с курганным могильником Песчаный, погребенная почва этого времени не имеет морфологических признаков солонцового процесса на макроуровне, а содержание ила в горизонтах А1 и В1 довольно близкое (рис. 2 б).

Погребенные почвы следующего археологического этапа – катакомбной культуры эпохи средней бронзы – исследованы под курганом 1 в могильнике Сухая Термиста-2, который располагался в 400 м от описанного выше. Основное погребение кургана датировано ранней катакомбной культурой – 2669-2475 гг. до н.э. (ИГАН-3814). В погребенном почвенном покрове явно выражена комплексность с участием солонцов мелких и светло-каштановых солонцеватых почв. Свойства погребенных почв этого кургана изучали в траншее длиной 3 м (*разрез Б-167*), которая вскрыла солонец и светло-каштановую солонцеватую почву.

В профиле погребенного солонца мелкого (*разрез Б-167-С*) резко выделяется горизонт [А1] (0-8 см) белесовато-серый легкий суглинок порошисто-плитчатой структуры с палисадной нижней границей. В горизонте [В1] (8-22 см) хорошо заметны красновато-коричневые тона от обильных органо-минеральных кутан на гранях структурных отдельностей. Структура призматическая с вертикальной ориентировкой призм.

В погребенной светло-каштановой солонцеватой почве (*разрез Б-167-К*) структура горизонта [А1] порошистая, лишь в нижней части горизонта на отдельных участках слабо заметна листоватость. Нижняя граница ровная, переход ясный. Горизонт [В1] коричнево-бурый, средний-тяжелый суглинок, структура глыбисто-призматическая, непрочная. Структурные отдельности неправильной формы, без вертикальной ориентировки. Грани слабо отмыты, натечные органо-глинистые кутаны визуально не выражены. Характерно, что в данной почве очень слабое обогащение иллювиальной части профиля илом, в то время как в солонце на удалении менее 3 м этот показатель превышает 250%.

В целом, в почвах данного ключевого участка так же, как и в почвах ключевого участка Песчаный, признаки солонцового процесса на макроуровне появляются в почвах, погребенных под курганом катакомбной культуры XXVIII-XXVII вв. до н.э., в то время как под курганом ямной культуры, несмотря на очень близкое время его создания, солонцовый процесс визуально не выражен.

Таким образом, в эпоху неолита и ранней бронзы (4200-2800 гг. до н.э.) солонцовый процесс морфологически на макроуровне не проявлялся. Обогащение илом горизонта В относительно горизонта А1 не превышало 20-30%.

Возникновение солонцового процесса пришлось на период 2800-2700 гг. до н.э. После этого солонцовый процесс в почвах региона развивался весьма активно, охватив за очень короткий период времени (судя по радиоуглеродным данным – менее чем за 100 лет) почвы на породах разного генезиса и гранулометрического состава. Ранее предполагалось, что для развития признаков солонцового процесса на макроуровне требуется несколько сотен лет (Демкин, 1997).

В итоге в конце первой четверти III тыс. до н.э. признаки солонцового процесса были заметны как в почвах на тяжелых лессовидных породах, так и на более легких почвах, развитых на опесчаненных суглинках Ергенинской свиты. Весьма показательно, что на легкосуглинистых отложениях к этому моменту светло-каштановые почвы полностью исчезли из почвенного покрова и были замещены солонцами. На более тяжелых отложениях сформировались комплексы с участием солонцов и светло-каштановых солонцеватых почв. Пик интенсивности солонцового процесса пришелся на конец III тыс. до н.э. В почвах, погребенных в 2100-2000 гг. до н.э., все

морфологические признаки солонцового процесса и текстурная дифференциация были выражены наиболее ярко. Но в этот же период начинается деградация солонцовых признаков. Не исключено, что причиной этого может быть эоловое поступление солей (Сеньков, 2004; Славный, 2001). Активизация этого процесса в рассматриваемый период показана для ряда природных зон (Александровский, Александровская, 2005). В этом случае возрастание засоленности верхних горизонтов почвы могло приводить к затуханию солонцового процесса (Хитров, 2005).

Сложно сказать о развитии солонцового процесса в последующий период: памятники эпохи поздней бронзы в пустынных степях практически отсутствуют (Мимоход, 2013). Довольно редко встречаются курганы раннего железного века. Что касается эпохи Средневековья, то в это время явно заметна деградация солонцового процесса, что может быть связано с увеличением нормы осадков и вымыванием солей (Alekseeva et al., 2007).

Теперь, рассмотрев особенности проявления солонцовых признаков в древних почвах, перейдем к рассмотрению культурно-исторических событий, сопровождавших появление солонцов в почвенном покрове региона Сальско-Манчских степей.

К настоящему времени убедительно доказано, что рассматриваемый период 2800-2700 гг. до н.э. совпал с крупными изменениями этнокультурной ситуации в регионе. Существовавшая ранее ямная культура постепенно сменялась новыми культурами катакомбной общности эпохи средней бронзы. Заметно возросло количество археологических памятников этого времени (Шишлина, 2007), что предполагает увеличение численности населения. Для этого же периода показана возросшая нагрузка на почвы (Гольева, 2008) и усиление аридизации (Александровский, Александровская, 2005; Борисов и др., 2005; Демкин, 1997). Изменился и состав стад: по мере развития аридизации сокращалась доля крупного рогатого скота и возрастала доля овец (Мимоход, 2013), выпас которых приводит к гораздо более серьезным нарушениям почвенного покрова по сравнению с выпасом лошадей и крупного рогатого скота (Иванов, 1958). Особо подчеркнем, что аридизация климата во второй половине III тыс. до н.э. и связанное с этим сокращение зимних осадков в пустынно-степной зоне сделали этот регион весьма привлекательным в качестве зимних пастбищ (Борисов и др., 2011). Опасность перевыпаса в этом случае резко возрастает, так как кормовая ценность зимнего травостоя значительно ниже (Кравцова и др., 2011), что обуславливает более интенсивный выпас. Это приводит к резкой деградации не только растительного покрова, но и почв, особенно после оттаивания верхнего слоя (Залибеков, 1997; Магомедов, Муртазалиев, 2001). В такой ситуации складываются безусловные предпосылки для развития солонцового процесса (Иванов, 1958).

Следует отметить, что в традиционных обществах кочевников практикуется чередование зимних и летних пастбищ, длительные меридиональные перекочевки от лесостепи до пустыни (Масанов, 1995). В эпоху бронзы ситуация была иной: общества занимали относительно небольшие ареалы, как правило, не выходящие за пределы одной природной зоны (Шишлина, Булатов, 2000). Выпас был круглогодичным; запасание кормов в пустынно-степной зоне было невозможно, и в условиях сокращения кормовой базы общество было вынуждено увеличивать мобильность, что еще более усиливало нагрузки на почвы и могло провоцировать развитие солонцового процесса.

Таким образом, в период после XXVIII-XXVII вв. до н.э. в пределах пустынно-степной зоны Сальско-Манчской гряды происходит ряд значимых природных и социально-культурных событий: начинается длительный период аридизации, одной из форм проявлений которой является снижение нормы осадков в зимний период. Это обеспечивает благоприятные условия для круглогодичного выпаса скота, но, в свою очередь, обеспечивает приток населения в пустынную степь и из соседних регионов, и, как следствие, усиление антропогенного прессинга на почвы и экосистемы региона. В условиях сокращения кормовой базы возрастет мобильность населения и в составе стад увеличивается доля мелкого рогатого скота, менее требовательного к качеству корма, но способного вызывать резкую деградацию пастбищ. Именно в этот период в почвенном покрове появляются солонцы.

В литературе приводится несколько точек зрения на причины возникновения и развития солонцового процесса: это наличие микрорельефа, взаимное влияние слабой дренированности, тяжелого гранулометрического состава почвообразующих пород, их засоленности, аридности климата, жизнедеятельность роющих животных, первоначальная неоднородность поверхностного засоления пород, деятельность ветра (Демкин, 1997). Среди явлений, поддерживающих солонцовый

процесс в почвах, называлась и хозяйственная деятельность человека (Демкин, 1997). Но поднимать вопрос о том, что антропогенная деятельность в древности могла стать одной из причин появления солонцов, на тот момент не было оснований. И только сейчас в связи с последними достижениями археологической науки мы можем вновь вернуться к этому вопросу.

Выводы

Участие солонцов в современном почвенном покрове Сальско-Маньчских пустынных степей на участках со средне- и тяжелосуглинистыми лессовидными породами превышает 50%. В районах распространения более легких пород Ергенинской свиты солонцы абсолютно доминируют.

Первые признаки солонцового процесса появились в почвах региона в 4800-4700 лет назад. Есть основания предполагать, что антропогенная деятельность в древности может рассматриваться как одна из причин возникновения солонцового процесса в почвах Сальско-Маньчских степей. Мы не склонны настаивать на преобладающей роли этого фактора, так как в это же время появляются первые признаки аридизации, которая также, вероятно, способствовала распространению солонцов. Однако сам факт совпадения времени возникновения солонцового процесса в почвах и времени появления нового населения с новой хозяйственной моделью позволяет ставить вопрос о причинно-следственных связях между этими событиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александровский А.Л., Александровская Е.И.* 2005. Эволюция почв и географическая среда. М.: Наук. 223 с.
- Алексеева Т.В., Алексеев А.О., Демкин В.А., Алексеева В.А., Соколовская З., Хайнос М., Калинин П.И.* 2010. Физико-химические и минералогические признаки солонцового процесса в почвах нижнего Поволжья в позднем голоцене // Почвоведение. № 10. С. 1171-1189.
- Антипов-Каратаев И.Н.* 1953. Вопросы происхождения и географического распространения солонцов в СССР // Мелиорация солонцов в СССР. М. С. 9-266.
- Аринушкина Е.В.* 1970. Руководство по химическому анализу почв. М.: Издательство МГУ. 488 с.
- Борисов А.В., Ельцов М.В., Шишлина Н.И., Демкина Т.С., Демкин В.А.* 2005. Палеопочвенные исследования курганов катакомбной культуры (вторая половина III тыс. до н.э.) в Калмыкии // Почвоведение. № 2. С. 140-148.
- Борисов А.В., Мимоход Р.А., Демкин В.А.* 2011. Палеопочвы и природные условия южнорусских степей в посткатакомбное время // Краткие сообщения института Археологии. Вып. 225. С. 144-154.
- Гедройц К.К.* 1955. Избранные сочинения. Т. 1. Почвенные коллоиды и поглощательная способность почв. М.: Сельхозгиз. 559 с.
- Геннадиев А.Н., Пузанова Т.А.* 1990. Голоценовая эволюция почв и природно-экологических условий в низменной части Калмыкии // Проблемы древней истории Северного Прикаспия. Куйбышев. С. 71-72.
- Гольева А.А.* 2008. Микробиоморфная память почв // Память почв: Почва как память биосферно-антропосферных взаимодействий / Ред. В.О. Таргульян, С.В. Горячкин. М.: Издательство ЛКИ. С. 499-529.
- Демкин В.А.* Почвоведение и археология. 1997. Пушино: ОНТИ НЦБИ АН СССР. 213 с.
- Демкин В.А., Лукашов А.В.* 1987. О скорости и направленности почвообразовательного процесса в зоне сухих степей в голоцене // Почвоведение. № 6. С. 5-14.
- Залибеков З.Г.* 1997. О биологической концепции проблемы опустынивания // Аридные экосистемы. Т. 3. № 5. С. 7-16.
- Иванов В.В.* 1958. Степи Западного Казахстана в связи с динамикой их покрова. М.-Л.: Издательство АН СССР. 289 с.
- Иванов И.В.* 1992. Эволюция почв степной зоны в голоцене. М.: Наука. 140 с.
- Иванова Е.Н.* 1964. Солонцы каштановой зоны междуречья Волга-Урал // Почвы комплексной равнины Северного Прикаспия и их мелиоративная характеристика. М.: Наука. С. 114-155.
- Иванова Е.Н., Фридланд В.М.* 1954. Почвенные комплексы сухих степей и их эволюция // Вопросы улучшения кормовой базы в степной, полупустынной и пустынной зонах СССР. М.-Л., Изд. АН СССР. С. 162-190.
- Ковда В.А.* 1937. Солончаки и солонцы. М.-Ленинград: Издательство АН СССР. 243 с.
- Кравцова Л.П., Никитина М.М., Дмитриева М.А., Кузнецова Т.И.* 2011. Оценка сезонной продуктивности и емкости степных пастбищ для круглогодичного выпаса скота // Достижения науки и техники АПК. Вып. 4. С. 48-50.
- Масанов Н.Э.* 1995. Кочевая цивилизация казахов: основы жизнедеятельности кочевнического общества. Алматы: Социнвест; М.: Горизонт. 320 с.
- Мимоход Р.А.* 2013. Лолинская культура. Северозападный Прикаспий на рубеже среднего и позднего периодов бронзового века // Материалы охранных археологических исследований. М.: Издательство ИА РАН. Т. 16.

568 с.

- Магомедов М.-Р.Д., Муртазалиев Р.А. 2001. Влияние выпаса на продуктивность и структуру растительности пастбищных экосистем Терско-Кумской низменности // Аридные экосистемы. Т. 7. № 14-15. С. 39-53.
- Роде А.А. 1968. Водный режим и баланс целинных почв полупустынного комплекса // Водный режим почв полупустыни. М.: Наука. С. 88-142.
- Роде А.А., Польский М.Н. 1961. Почвы Джаныбекского стационара // Труды Почвенного института им. В.В. Докучаева. Т. 56. С. 3-214
- Сеньков А.А. 2004. Галогенез степных почв. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 152 с.
- Славный Ю.А. 2001. К теории образования автоморфных солонцов // Почвоведение. № 5. С. 517-521.
- Трифонов В.А. 2001. Поправки к абсолютной хронологии культур эпохи энеолита – средней бронзы Кавказа, степной и лесостепной зон Восточной Европы // Материалы международной научной конференции «К столетию периодизации В.А. Городцова бронзового века южной половины Восточной Европы». Самара: Издательство Научно-технический центр. С. 71-82.
- Хитров Н.Б. 2003. Генезис, диагностика, свойства и функционирование глинистых набухающих почв Центрального Предкавказья. М.: Типография Россельхозакадемии. 505 с.
- Хитров Н.Б. 2004. Выбор диагностических критериев существования и степени выраженности солонцового процесса в почвах // Почвоведение. № 1. С. 18-31.
- Хитров Н.Б. Связь почв солонцового комплекса Северного Прикаспия с микрорельефом // Почвоведение. № 3. С. 271-284.
- Чижикова Н.П., Ковда И.В., Борисов А.В., Шишлина Н.И. 2009. Проявление солонцового процесса в современных и подкурганых почвах и его отражение в минералогической памяти почв // Почвоведение. № 10. С. 1266-1277.
- Шишлина Н.И. 2007. Северозападный Прикаспий в эпоху бронзы (V-III тыс. до н.э.) // Труды ГИМ. М.: ГИМ. С. 345.
- Шишлина Н.И., Булатов В.Э. 2000. К вопросу о сезонной системе использования пастбищ носителями ямной культуры в Прикаспийских степях в III тыс. до н.э. // Сезонный экономический цикл населения Северо-западного Прикаспия в бронзовом веке. Труды ГИМ. Вып. 120. М.: ГИМ. С. 43-53.
- Alekseeva T., Alekseev A., Maher B.A., Demkin V. 2007. Late Holocene climate reconstructions for the Russian steppe, based on mineralogical and magnetic properties of buried palaeosols // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. Vol. 249. P. 103-127.
- Aston M. 1985. Interpreting the landscape. Landscape Archaeology and Local History. London; New York: Routledge. 168 p.
- Bintliff J. 2000. The concepts of 'site' and 'offsite' archaeology in surface artefact survey // Non-Destructive Techniques Applied to Landscape Archaeology / Eds. M. Pasquinucci, F. Trément. Oxford: Oxbow Books. P. 200-215.
- Bobrovsky M.V., Kupriaynov D.A., Khanina L.G. 2018. Anthropological and morphological analysis of soils for the reconstruction of the forest ecosystem history (Meshchera lowlands, Russia) // Quaternary International. No. 516. P. 70-82.
- David B., Thomas J. 2008. Landscape Archaeology: Introduction // Handbook of Landscape Archaeology / Eds. B. David, J. Thomas. Walnut Creek: Left Coast Press. P. 27-43.
- Lisetskii F.N., Stolba V.F., Pichura V.I. 2017. Late-Holocene paleoenvironments of Southern Crimea; soils, soil-climate relationship and human impact // The Holocene. Т. 27. № 12. С. 1859-1875.
- Novenko E.Y., Mazei N.G., Kupriyanov D.A., Nizovtsev V.A., Tsyganov A.N., Rudenko O.V., Bobrovsky M.V., Erman N.M. 2018. Paleoecological evidence for climatic and human impact on vegetation in the temperate deciduous forest zone of European Russia during the last 4200 years: a case study from the Kaluzhskiye Zaseki natural reserve // Quaternary International. No. 516 P. 58.

ОТРАСЛЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ ЗАСУШЛИВЫХ ЗЕМЕЛЬ

УДК 581.9:911.8

СОХРАНИВШИЕСЯ УЧАСТКИ СТЕПЕЙ КАК ОСНОВА БУДУЩЕГО
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КАРКАСА БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ¹

© 2020 г. А.А. Тишков^{**}, Е.А. Белоновская*, Н.И. Золотухин^{***}, С.В. Титова*,
Н.Г. Царевская*, Ю.Г. Чендев^{**}

**Институт географии РАН*

Россия, 109017, г. Москва, Старомонетный пер, д. 29. E-mail: tishkov@igras.ru

***Белгородский государственный национальный исследовательский университет
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85. E-mail: sciences@mail.ru*

****Центрально-Черноземный государственный природный заповедник
Россия, 305528, Курская обл., Курский р-он, п/о Заповедное. E-mail: alekhin@zapoved-kursk.ru*

Поступила в редакцию 16.05.2019. После доработки 12.08.2019. Принята к публикации 30.09.2019

Белгородская область – регион древнего хозяйственного освоения с наиболее высоким уровнем аграрного использования земель в России и, соответственно, антропогенной трансформации зональной растительности и почв (черноземов). Несмотря на все усилия последних лет в отношении совершенствования территориальной охраны природы в регионе, все категории особо охраняемых территорий составляют только 1.8%, – это один из самых низких показателей в Российской Федерации. Степные участки занимают менее 10% от площади всех охраняемых территорий, т.е. 0.2% площади области, что не может служить основой для сохранения степного биоразнообразия и формирования экологического каркаса региона, где зональный тип растительности – степи. В статье проведен исторический анализ трансформации степей региона, результаты инвентаризации с помощью методов дистанционного зондирования сохранившихся участков степей, оценки потенциала их флоры для развития восстановительной сукцессии, эффективной для сохранения степного биоразнообразия региональной сети особо охраняемых территорий и формирования экологического каркаса. Показано, что выявленные более 700 участков с сохранившейся степной растительностью (около 47 тыс. га) – мелкоконтурные и фрагментированные и расположены на неудобьях и сильно эродированных склонах балок и логов. Без специальных мероприятий они не способны стать основой экологического каркаса. Предложены подходы и методы стимулирования восстановления степей на постагрогенных и техногенных землях региона.

Ключевые слова: степь, лесостепь, луговые, настоящие и меловые степи, Белгородская область, ООПТ, экологический каркас, черноземы, восстановительная сукцессия, сукцессионная система, заповедник «Белогорье», Лебединский горно-обогатительный комбинат.

DOI: 10.24411/1993-3916-2020-10082

В Белгородской области особо охраняемые территории (ООПТ) всех категорий и уровней управления имеют общую площадь 47.6 тыс. га, что составляет всего 1.8% территории области. Это один из самых низких показателей среди субъектов Российской Федерации. Формирование региональной сети здесь идет за счет участков вторичных лесов, остепненных урочищ и балок, занятых деградированной растительностью и непригодных для ведения сельскохозяйственной

¹ Статья подготовлена по темам: Госзадания №0148209-0007 Института географии РАН «Оценка физико-географических, гидрологических и биотических изменений окружающей среды и их последствий для создания основ устойчивого природопользования», проекту РНФ 19-17-00056 «Трансформация почв и почвенного покрова под влиянием лесополос в агроландшафтах юга Среднерусской возвышенности» (наблюдения за расселением древесной растительности от лесополос и лесных массивов на залежные и степные участки с черноземами), и Программы Президиума РАН "Социально-гуманитарные аспекты устойчивого развития и обеспечения стратегического прорыва России" (подпрограмма "Пространственная реструктуризация России с учетом геополитических, социально-экономических и геоэкологических вызовов").

деятельности. Степи практически не представлены (Смелянский, Титова, 2018; Smelyansky, Tishkov, 2012). Лесные ООПТ сосредоточены в основном рядом с населенными пунктами и выполняют рекреационные функции, а в целом доля лесов на ООПТ достигает 80-85%. В 2012 г. на территории области проведена паспортизация ООПТ. В тот год в кадастр ООПТ включили 351 участок регионального, а также 5 участков федерального значения – заповедника «Белогорье». Средняя площадь ООПТ области не превышает 100-150 га, что практически исключает соблюдение на них заповедного режима и допускает негативное влияние с соседних, используемых в хозяйстве территорий. Из-за высокого уровня аграрной освоенности области степная растительность сохранилась в основном по балкам, занимая при этом довольно крупные площади (до 100 га). Основная часть этих ООПТ представлена кальцефитной флорой: «Меловая гора», «Варваровка» (Алексеевский район), «Священная гора», «Сниженные Альпы» (Волоконовский район), урочище «Сниженные Альпы» (село Коноплянка, Валуйский район). Встречаются участки разнотравно-луговых и разнотравно-ковыльных степей. Среди них можно назвать такие ООПТ, как «Хвощеватое» (Красненский район), участок луговой степи (Ровеньский район), балки «Лог крутенький» и «Гнилое» (Вейделевский район). Примером комплексных заказников в области служат урочища «Борки» и «Городище» с крупными колониями сурка-байбака, уникальные меловые обнажения. Большой интерес представляют ботанические заказники с кальцефитной флорой, например, «Бекарюковский бор», участки разнотравно-луговых и разнотравно-ковыльных степей – урочища «Хвощеватое», «Гнилое».

В настоящее время ситуация с организацией региональной сети ООПТ несколько поменялась. После Постановления Правительства Белгородской области от 15 августа 2016 г. № 299-пп в области функционирует сеть из 290 ООПТ, в т.ч. 76 «природных парков», представляющих собой зеленые (преимущественно лесные посадки) насаждения разной степени сохранности и разного происхождения, 114 региональных природных заказников, среди которых преобладают лесные участки, балки и водоемы, 107 памятников природы (родники, старые деревья, парки), 2 дендропарка и 1 ботанический сад, а также государственный природный заповедник «Белогорье» с участками «Лес на Ворскле», «Ямская степь», «Лысые горы» и «Стенки Изгорья» с общей площадью всего 2.5 тыс. га. Непосредственно степные участки среди всех категорий ООПТ области немногочисленны и составляют менее 10% от площади всех ООПТ, т.е. 0.2% площади области, что не может служить основой для формирования экологического каркаса такого степного региона, как Белгородская область, и её региональной сети ООПТ. Реальная основа будущего экологического каркаса – учеленные участки степной растительности, сохраняющие генофонд степного биоразнообразия области как потенциал для его восстановления.

Цель настоящей статьи – определить потенциал сохранившихся участков степной растительности Белгородской области и их флоры, выявить их способности для формирования ее экологического каркаса и региональной сети ООПТ, а также оценить перспективы полноценной вторичной сукцессии на аграрогенных и техногенных землях.

Материалы и методы

Материалы для настоящей статьи собирались в течение последних лет (с 2014 г.) путем ретроспективного изучения исторических документов и карт (например, оцифровка «Генерального геометрического плана Курского наместничества 1785 года»), анализа современных космических снимков для выявления сохранившихся участков степей и полевой верификации результатов дистанционного зондирования (ДЗЗ) в процессе экспедиций, анализа материалов флористических баз данных, ведущихся в лаборатории биогеографии Института географии РАН. По итогам инвентаризации степей Европейской части России (Рогова, Скворцова, 2016) и исследований Института географии совместно с коллегами из Центрально-Черноземного заповедника и Курского университета (Тишков и др., 2012; Золотухин и др., 2014) в Белгородской области выявлены 702 участка с сохранившейся степной растительностью на площади около 47 тыс. га, что составляет менее 1.7% от территории всей области. Т.е. площадь, занятая степными сообществами, сократилась более чем в 35 раз от своего вероятного исходного состояния на начало массового освоения региона – конец XVI в. (рис. 1). Выявленные участки – мелкоконтурные и фрагментированные, расположены на неудобьях и сильно эродированных склонах балок и логов. Подавляющая их часть имеет площадь менее 100 га. Самый крупный из них, площадью более 850 га, находится на границе Валуйского и

Красногвардейского районов и представляет собой обширные меловые склоны долины реки Полатовка.

Кроме того, начато планомерное изучение флоры выявленных с помощью ДЗЗ участков степей для определения потенциала для стимулирования процессов самовосстановления (развития вторичной сукцессии на деградированных участках) и использования местного генетического материала для экологической реставрации постагрогенных и техногенных земель. Параллельно на участках заповедника «Белогорье», примыкающих к техногенным землям Лебединского горно-обогатительного комбината («Ямская степь», «Лысье горы») с помощью беспилотного летательного аппарата и наземных наблюдений проводится оценка изменений структуры растительного покрова, в т.ч. процессов расселения древесно-кустарниковой растительности в степи. Эти материалы будут ретроспективно проанализированы для установления трендов в динамике растительности заповедника для выявления собственно резерватогенных и климатогенных сукцессий.

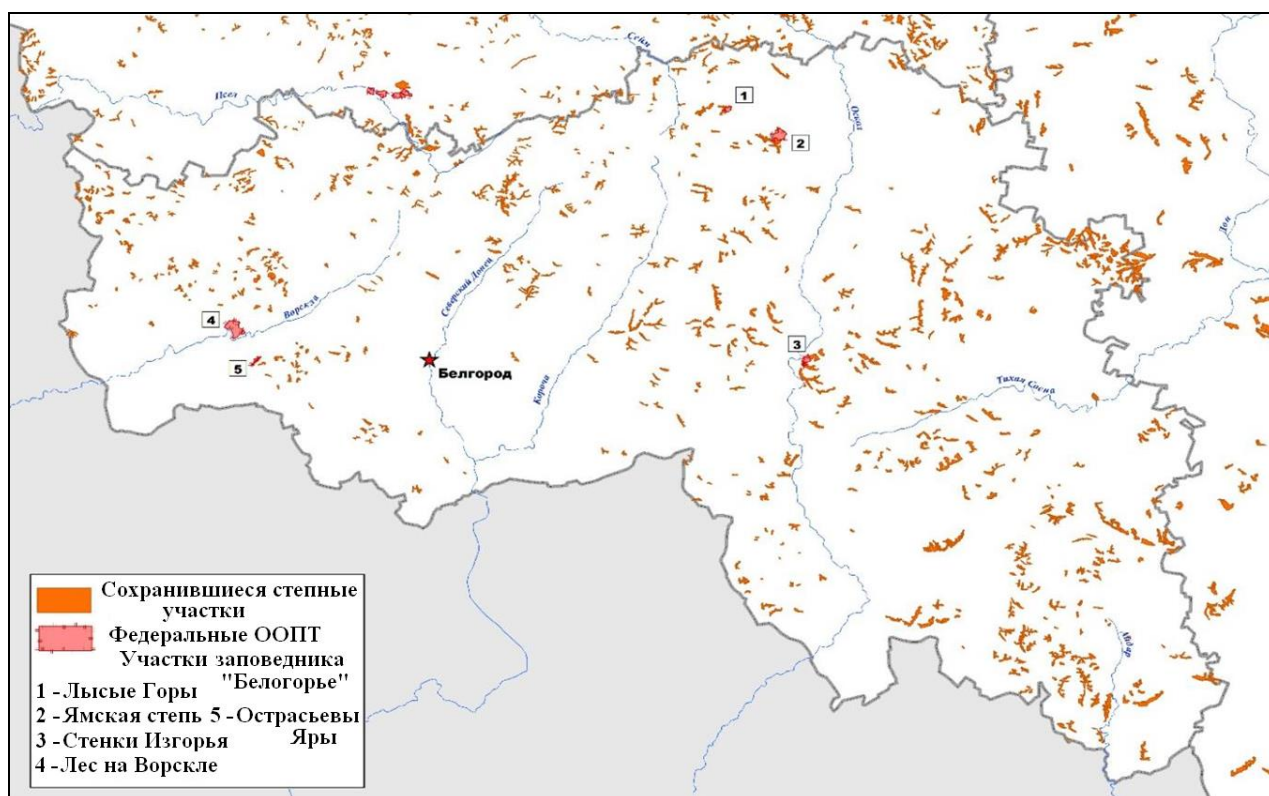


Рис. 1. Сохранившиеся участки степной растительности Белгородской области.

Результаты и их обсуждение

Антропогенная трансформация степей Белгородской области. Ретроспективно крайне трудно проследить этапы антропогенной трансформации степной растительности региона в связи с тем, что на протяжении более 1000 лет административно он входил в разные государственные образования, делился между ними, объединялся, включался и выходил из состава России. В современных границах Белгородская область образована в 1954 г.

Весь период тысячелетней истории региона его ландшафты претерпевали существенные изменения: 1) шла интенсивная распашка черноземных земель (исходно они занимали около 75% территории; Чендев и др., 2017), 2) сводились коренные широколиственные леса (ранее серые лесные почвы занимали до 15%), 3) степные палы периодически нарушали естественный ход почвообразования (Чендев, Геннадиев, 1993), 4) сокращалась густота речной сети региона, росла его маловодность, деградировали пойменные комплексы (с конца XVIII в. суммарная протяженность рек области сократилась более чем на 20%, за счет эрозии и изменений дренажа ежегодно теряется 10-20 км рек).

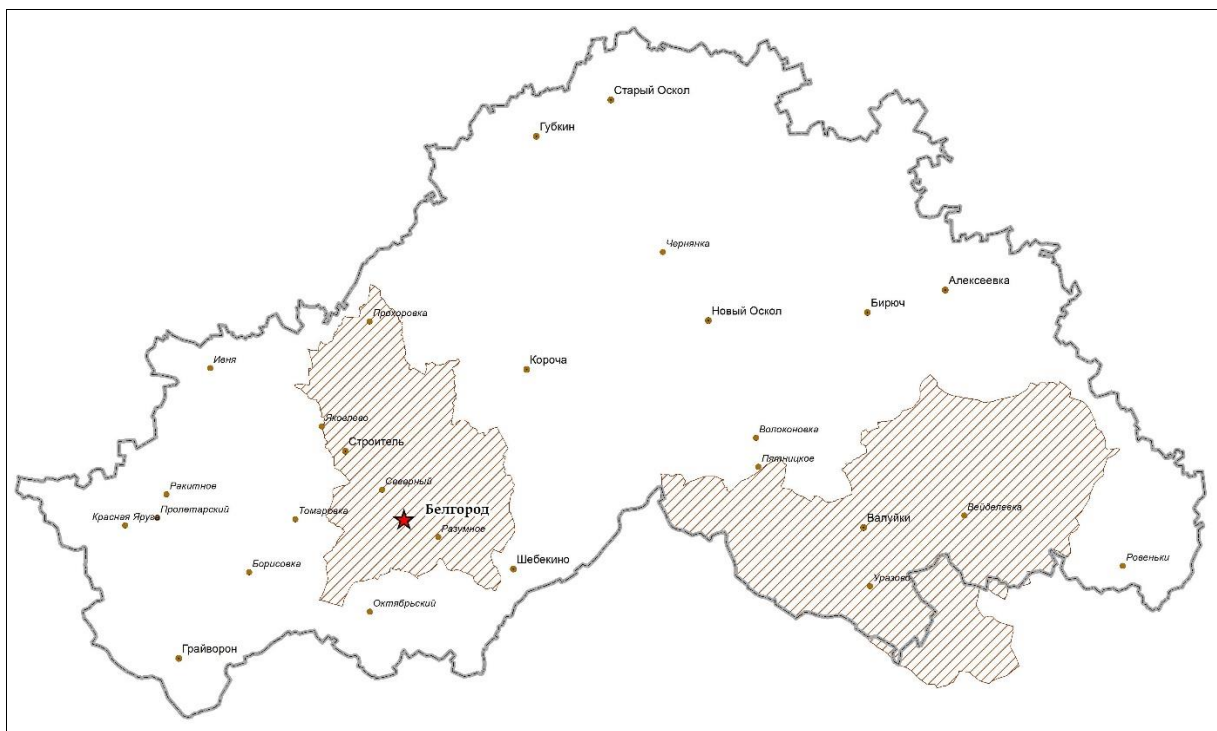


Рис. 2. Белгородский и Валуйский уезды Белгородской губернии согласно «Генеральному геометрическому плану 1785 года».

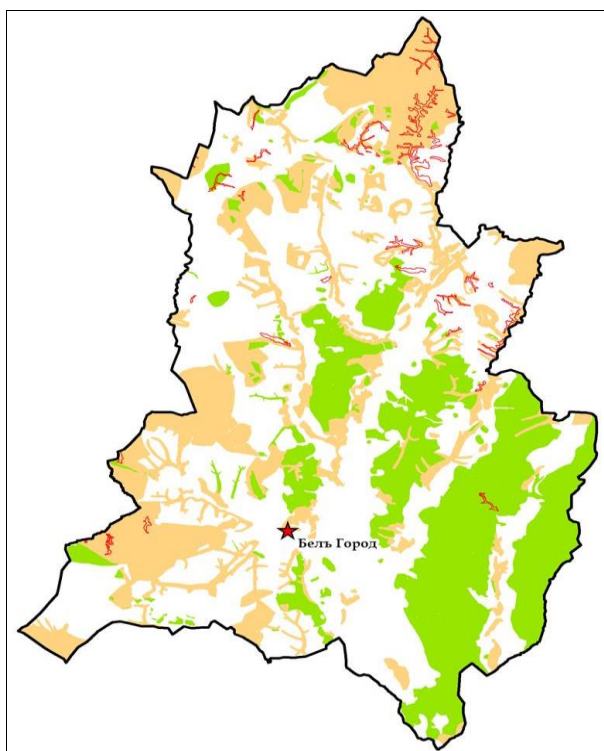


Рис. 3. Распространение лесов (зеленый), степных сенокосов и пастбищ (желтый) на территории Белгородского уезда XVIII в., сопоставлении с площадями современных сохранившихся степей (красный цвет).

Мы провели ретроспективный анализ динамики земель области на основе оцифровки «Генеральных геометрических планов Курского и Воронежского наместничеств 1785-1789 гг.» в границах Белгородского и Валуйского уездов (рис. 2).

В актуальном административном делении области в границы Валуйского уезда входит большая часть Валуйского района, весь Вейделевский, южная часть Волоконовского и Красногвардейского, северо-западная часть Ровенького и крайняя юго-западная часть Алексеевского. В Белгородский уезд входит часть Белгородского района вместе с г. Белгород, восточная часть Яковлевского, южная Прохоровского, западная Корочанского и северо-западная Шебекинского.

В соответствии со схемой ботанико-географического районирования (Исаченко Лавренко, 1980) территория Белгородской области лежит в пределах Евразийской степной области, на стыке Восточноевропейской лесостепной и Причерноморской (Понтической) степной провинций и относится к Восточноевропейской лесостепной провинции, для которой зональными типами

растительности являются широколиственные леса и северные луговые (ковыльно-разнотравные) степи. Зональный тип – плакорные луговые и настоящие (разнотравно-типчаково-ковыльные) степи (в т.ч. их кальцефитные и псаммофитные варианты). Степень их сохранности можно оценить по таблице и рисункам 3 и 4.

Таким образом, к концу XVIII в. травяные экосистемы составили 20.9% от территории *Белгородского уезда*, леса – 24.4%. Практически все остальные земли были пашней. На жилую и хозяйственную застройку приходилось около 1-2% площади. В *Валуйском уезде* степи составили около 38%, леса – 8%, селитебные земли – 10%, остальное – пашня. Пойменные влажные участки и искусственные водоемы – не более 2%. Т.е. можно видеть, что в XVIII в. площадь пашни превышала 40% и сельскохозяйственные земли в целом занимали большую часть плакоров.

Таблица 1. Площади, занятые лесной и травяной растительностью в границах *Белгородского* и *Валуйского уездов* бывшей *Белгородской губернии* XVIII в. в сопоставлении с площадями современных сохранившихся степей (красный цвет на рисунках 3-4).

Регион	Состояние земель в XVIII веке			Сохранившиеся участки степи, га (XXI в.)
	Общая площадь уезда, га	В том числе лесов, га	В том числе травяных угодий (степных и лугово-степных сенокосов и выгонов), га	
Белгородский уезд	244619	59680	51104	2229
Валуйский уезд	394610	31723	149795	6279

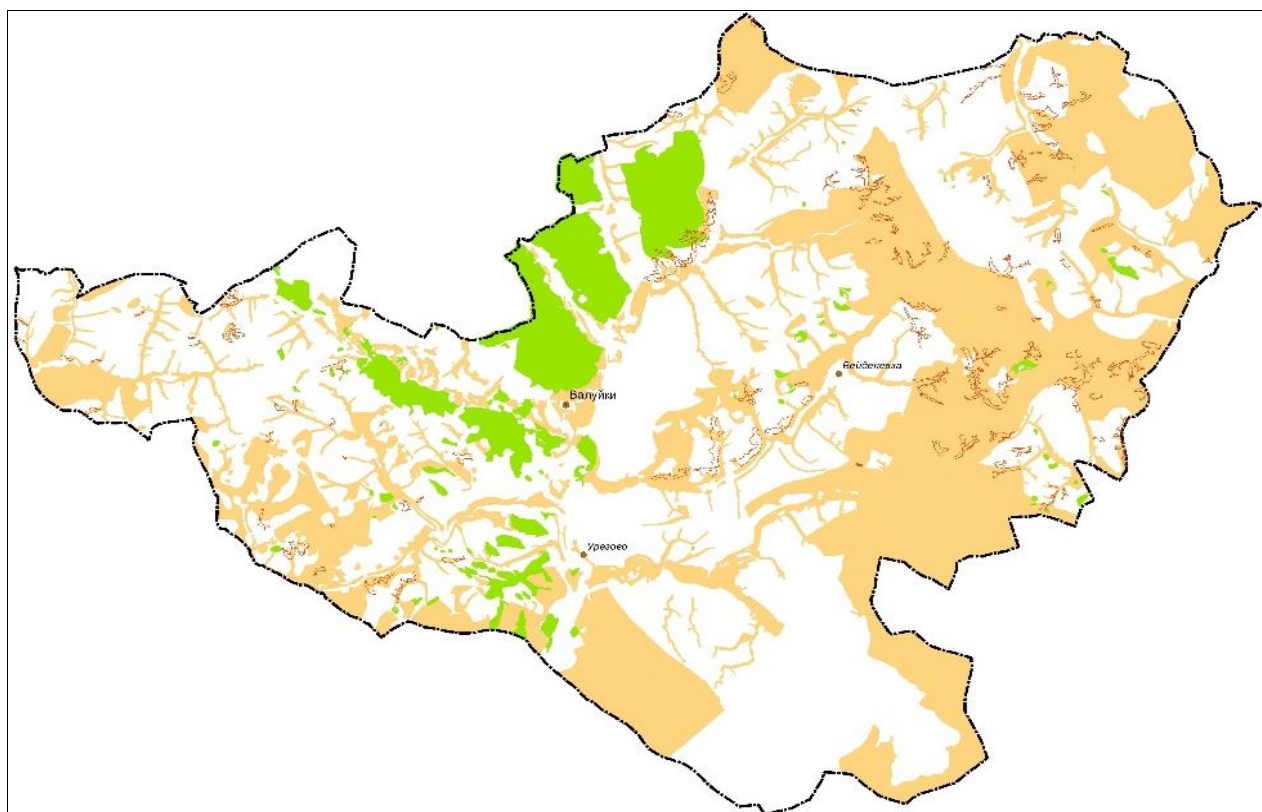


Рис. 4. Распространение лесов (зеленый), степных сенокосов и пастбищ (желтый) на территории *Валуйского уезда* XVIII в., в сопоставлении с площадями современных сохранившихся степей (красный цвет).

Принимая во внимание то, что пойменные луга использовались для сенокосов и выпасов, а также то, что оба эти вида аграрных угодий имеют щадящий режим пользования для степей, можно предположить, что практически вся их площадь в 1785 г. была занята зональной растительностью и ее эдафическими вариантами. За более чем 230 лет их площадь сократилась в 23-24 раза, а скорость потерь составила 624 га в год для Валуйского и 213 га в год для Белгородского уезда.

Флора Белгородской области как потенциал для восстановления степей. Исходно растительный покров рассматриваемой территории был преимущественно степной. И сейчас черноземы занимают около 70% почвенного покрова, т.е. агроценозы созданы на месте луговых злаково-разнотравных и настоящих разнотравно-типчаково-ковыльных степей. По оценкам местных специалистов, флора области включает около 1300 видов, из которых более 310 видов степные, в т.ч. 93 свойственные меловым степям. На лугах, в т.ч. остепненных, отмечено 232 вида. Остальная часть флоры представлена лесными, кустарниковыми и опушечными, водно-болотными и синантропными видами и насчитывает 192 вида. По нашим данным, полученным с использованием материалов базы данных адвентивных видов растений, ведущейся в Институте географии РАН (База данных ..., 2011), в составе флоры Белгородской области насчитывается около 220 адвентивных видов. Учитывая тот факт, что на конец XX века в конспекте флоры было 1230 видов сосудистых растений из 108 семейств, из которых только для 1168 подтверждено произрастание (Еленевский и др., 2004), можно признать, что область является ареной активного освоения инвазивными видами, особенно из *Asteraceae*, *Brassicaceae* и *Poaceae* (Сухоруков, Кушнина, 2012).

Резерваты степной флоры занимают в области только 2,5 тыс. га, а выявленные и получившие статус региональных ООПТ фрагменты сохранившихся участков луговых, настоящих и меловых степей имеют площадь всего 10-50 га (исключение – степи у с. Ковалево в Алексеевском районе, занимающие 348 га), охраняемые территории не могут рассматриваться как резерв для масштабного восстановления степной растительности области. Другое дело – выявленные в процессе инвентаризации с помощью ДДЗ сохранившиеся участки степей, в т.ч. меловых (около 47 тыс. га). Несмотря на обедненность флоры этих участков на неудобьях, они вполне подходят для роли поставщиков семян и для стимулирования восстановительной сукцессии (рис. 5).

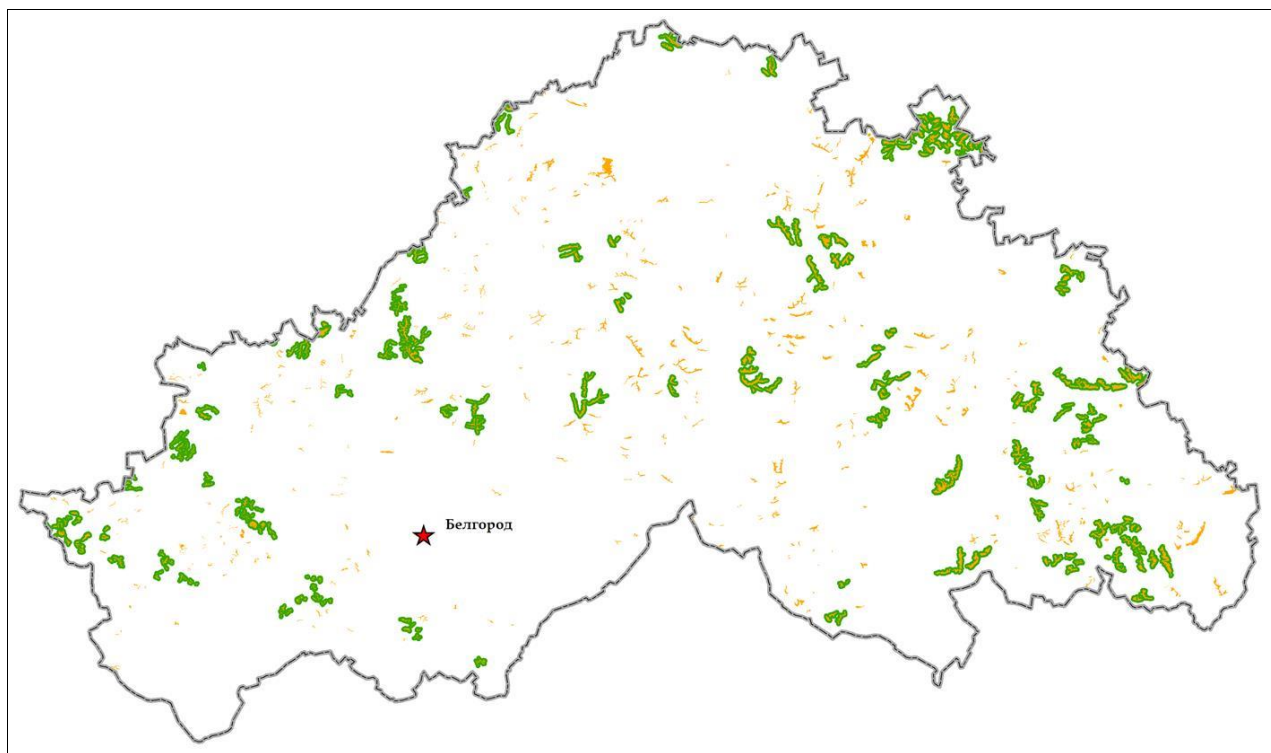


Рис. 5. Группы сохранившихся степных участков, расположенных на расстоянии не более 1000 м друг от друга и принадлежащих к системам разных балок («степная» основа будущего экологического каркаса Белгородской области).

Насколько правильно делать такой вывод? На каждом из выявленных 702 участков представлено до 100-200 видов степных и луговых растений, а совокупно – практически весь пул степной флоры, включая охраняемые виды из федеральной и региональной Красных книг, – до 14 видов на учетную площадь (Красная книга ..., 2005, 2008)! Для сравнения: разнообразие флоры на степных федеральных ООПТ области колеблется от 571 (Лысье Горы) до 640-700 видов (Ямская степь, Стенки Изгорья). Первые шаги по реинтродукции редких и эндемичных видов флоры Белгородской области (пион тонколистный, касатик карликовый, иссоп меловой и др.) сделаны (Ермакова, Гусев, 2017).

В Красную книгу Белгородской области (2005) по состоянию на 1 октября 2004 г. было внесено 166 видов сосудистых растений (основной список), из которых 98 являются степными (включая, собственно, степные, лугово-степные, кальцефильно-степные, псаммофильно-степные, галофильно-степные). В основной список нового издания Красной книги рекомендовано 264 вида сосудистых растений (Гусев и др., 2017). Из этого списка 162 вида относятся к степным: собственно степные – 55, лугово-степные – 24, кальцефильно-степные – 52, псаммофильно-степные – 15 видов, галофильно-степные – 16 видов. На территории заповедника «Белогорье» встречаются 77 видов степных растений, рекомендованных в новое издание региональной Красной книги, по участкам: Ямская степь (566 га, с 1935 г.) – 51 вид, Лысье Горы (170 га, с 1993 г.) – 50, Стенки-Изгорья (267 га, с 1995 г.) – 48 видов, Острасьевы яры (90 га, с 1995 г.) – 16 видов, Лес на Ворскле (1038 га, с 1925 г.) – в основном лес, нет охраняемых степных видов во флоре.

В Красную книгу Российской Федерации (2008) внесено 29 видов степных растений Белгородской области, из которых 12 отмечены на участках заповедника «Белогорье»: *Pinus sylvestris* var. *cretacea* (Стенки-Изгорья), *Bulbocodium versicolor* (Ямская степь, Лысье Горы), *Fritillaria ruthenica* (Ямская степь, Лысье Горы, Стенки-Изгорья), *Iris aphylla* (Ямская степь, Лысье Горы, Стенки-Изгорья, Острасьевы яры), *Stipa dasyphylla* (Ямская степь), *Stipa pennata* (Ямская степь, Лысье Горы, Стенки-Изгорья), *Stipa pulcherrima* (Ямская степь, Лысье Горы, Стенки-Изгорья), *Stipa zalesskii* s.l. (Ямская степь), *Pulsatilla pratensis* s.l. (Острасьевы яры), *Hedysarum grandiflorum* (Стенки-Изгорья), *Daphne altaica* s.l. (Стенки-Изгорья), *Androsace kosopoljanskii* (Ямская степь, Лысье Горы). Ещё 10 видов встречаются в Ровенском районе в пределах участков природного парка «Ровеньский»: *Bellevalia sarmatica*, *Iris pumila*, *Genista tanaitica*, *Hedysarum ucrainicum*, *Erucastrum cretaceum*, *Matthiola fragrans*, *Artemisia hololeuca*, *A. salsoloides*, *Scrophularia cretacea*, *Hyssopus cretaceus*. Охрана природного парка «Ровеньский» неудовлетворительная. В качестве крайне отрицательных действий отметим посадку лесных культур (областная программа «Зелёная столица») в 2010 г. на участке «Лысая гора» (правый берег р. Айдар) по степным склонам со многими редкими видами растений, включая *Stipa lessingiana*, *S. pennata*, *Artemisia hololeuca*, *Matthiola fragrans*, *Scrophularia cretacea*. Необходимо решить вопрос о переводе части участков (Айдарский, Сарма и др.) природного парка «Ровеньский» в состав заповедника «Белогорье».

Как уже было отмечено выше, региональные ООПТ не могут рассматриваться как места, сохраняющие регенерационный потенциал флоры (Тишков и др., 2018а, б). Принимая во внимание то, что Белгородская область – это полностью антропогенно измененный регион с высоким уровнем хозяйственной нагрузки, отметим, что ландшафты в близком к природному состоянию здесь отсутствуют, даже на ООПТ (рис. 6). Некоторые из них в процессе длительного аграрного освоения или в результате разрушения при добыче полезных ископаемых потеряли способность к самовосстановлению, т.е. утратили инвариантные свойства, обеспечивающие естественный ход восстановительной сукцессии. Нет уверенности в сохранности всего пула видов, формирующих полноценные ранние, средние и тем более климаксные стадии восстановительных сукцессий. В отношении заключительных (климаксных) стадий сукцессий степей (луговых, настоящих, меловых и петрофильных) отмечается «диаспорический голод» – дефицит семенного материала для формирования близких к естественным сообществ. Большинство участков сохранившихся в регионе степей мелкоконтурны, фрагментированы, приурочены в основном к так называемым «бедлендам», изъятым из аграрного производства, – крутым эродированным склонам, выгонам и пр. Они, как правило, удалены от территорий, приоритетно требующих восстановления растительности, – брошенных карьеров, отвалов, эродированных склонов, т.е. быстрый перенос семян для развития процесса самовосстановления на этих участках исключен.

Грунтовый запас семян в постагрогенных почвах и на экспонированных землях брошенных

карьеров по добыче песка, суглинка и мело-мергельной породы состоит исключительно из семян сорно-бурьянного комплекса, в т.ч. адвентивных и инвазионных видов растений. Каждый по отдельности участок обладает «редуцированной» флорой. Причем степень трансформации можно оценить, сопоставив количественный состав флоры на степных участках заповедника «Белогорье» и выявленных в процессе инвентаризации участках степей. Они флористически беднее в 2-2.5 раза и лишены ключевых видов для восстановления. А это не позволяет за счет местного пула флоры сформировать полноценные стадии сукцессии или, если речь идет о первичном субстрате, – пионерные группировки, которые дают старт почвообразованию по степному тренду.

Несмотря на непригодность для распашки, многие из участков оказались под угрозой исчезновения, особенно меловые степи в связи с директивными лесопосадками (Титова и др., 2014). Исторически, судя по характеру распространения черноземных почв, здесь преобладали зональные экосистемы лесостепи и степи, граница между которыми проходит в Алексеевском, Валуйском, Вейделевском районах, а Ровеньский район практически целиком считался степным (Дохман, 1968). Но, несмотря на сохранившиеся некоторые зональные различия между лесостепью и степью за счет сильной агрогенной трансформации, в области действует, на наш взгляд, филоценогенетически единая региональная сукцессионная система, имеющая при обилии рядов и серий лишь несколько терминальных стадий (как минимум 4: дубравы, луговые и настоящие степи, меловые степи). Они формируются через соответствующие ряды и серии дигрессивно-демутационных смен растительных сообществ, обусловленные генезисом нарушений растительности (агрогенные, пирогенные, пасквальные, техногенные и др.), а также характером исходных местообитаний, определяемых почвенным покровом (от черноземов выщелоченных и оподзоленных к типичным, карбонатно-меловым и др.), условиями увлажнения (от сухих к умеренно влажным) и подстилающими породами (пески, мелы, лессовидные суглинки и глины, щебнистые грунты и пр.). Методологически важно представить, что все это разнообразие формирующихся в процессе сукцессии стадий – от пионерных и длительно-производных к субклимаксным и климаксным – является хранилищем основной части флористического пула (элементарной флоры, конкретной флоры). Для зональной луговостепной растительности прослеживается закономерная редукция восстановительных сукцессий, обусловленная «диаспорическим голодом».

В отношении карьеров, отвалов и эродированных склонов на территории области представления о характере протекания первичных сукцессий в зависимости от субстрата еще не сложились (Корнилов и др., 2015), а потенциал местной флоры, учитывая геологические, геохимические и гидрологические условия техногенных земель, можно рассматривать условно, без приуроченности видов растений к новым субстратам.

Под потенциалом местной флоры для восстановительной сукцессии мы понимаем совокупность видов растений разного сукцессионного статуса, способных участвовать в сложении ранних, средних и заключительных (климаксных) стадий сукцессий (Тишков и др., 2018а). По-видимому, вопрос о месте случайных элементов инвазивной части флоры (эфемерофитов) в данном случае можно не рассматривать. А вот виды, прошедшие все стадии адвентизации и вошедшие в сукцессионную систему этого староосвоенного района, на наш взгляд, вполне могут рассматриваться как новые элементы, получившие свой региональный сукцессионный статус. Важное качество видов, слагающих местную степную флору, – ценофильность, т.е. способность к формированию сообществ и существованию в их ансамбле, при уточнении потенциала местной флоры может стать критерием для исключения из рассмотрения ценофобов – автохорных, антропохорных и, собственно, синантропных. Часть из них в староосвоенных степных регионах получила широкое распространение за счет повсеместного формирования сорно-бурьянных комплексов, блокирующих восстановительную сукцессию на залежах и неудобьях.

Для оценки возможности обмена участков сохранившейся степной растительности и обмена их семенным материалом проведен анализ расстояний между отдельными фрагментами сохранившихся степей, относящихся к системе разных балок (рис. 5). Исходя из предположения, что внутри одной балки нет существенных препятствий для данного обмена при наличии подходящих условий, критическим расстоянием был выбран 1 км. При отсутствии точных данных и практически любых работ по изучению распространения семян степных растений эта цифра выбрана как некий теоретический обоснованный предел распространения семенного материала представленных здесь растений. В результате анализа эти степные участки были сгруппированы в кластеры, внутри

которых возможен такой обмен. Анализ позволяет сделать вывод, что большинство балок с участками степей находится на большем, чем 1 км, расстоянии друг от друга, и, следовательно, в большинстве случаев не может обмениваться генетическим материалом между собой. Т.е. те виды растений, которые имеют меньший радиус распространения семян (меньше 1000 м), уже не могут выйти за пределы конкретного участка. Но они могут служить «степной основой» будущего экологического каркаса, если в области будет начата полномасштабная работа по экологической реставрации степей.

Заключение

Перспективы восстановления степной растительности для формирования экологического каркаса Белгородской области очевидны. Однако в настоящее время реальных возможностей для самовосстановления степной растительности на выводимых из пользования аграрных и техногенно нарушенных землях нет (рис. 6). Их будущее связано исключительно с процессами биологической рекультивации и экологической реставрации, стимулирования восстановительных сукцессий и использования для этого потенциала местной флоры. Выявленные нами 702 участка сохранившихся степей должны получить природоохранный статус «семенных резерватов», выполняющих функцию мест генерации и распространения семян степных растений. Но вероятность того, что они смогут компенсировать «диспорический голод» на крупных территориях, лишенных степной растительности, крайне мала, – расстояния между потенциальными «семенными резерватами» велико (десятки километров; рис. 5), они имеют крайне редуцированный состав степной флоры, находятся на склонах и даже нижней части балок, что затрудняет использование главных для степных растений механизмов распространения семян – анемохории и баллистохории. Именно ветер служит основным агентом распространения семян степных растений не только первого, но и второго, и даже третьего ярусов. Вместе баллисты и анемохоры в степных фитоценозах составляют около 70% (в первом ярусе – только около 30%). Зоохория, как показывают наши наблюдения в регионе, не может рассматриваться среди ведущих факторов естественного распространения семян степных растений. На короткие расстояния распространяются некоторые мирмикохонные растения.

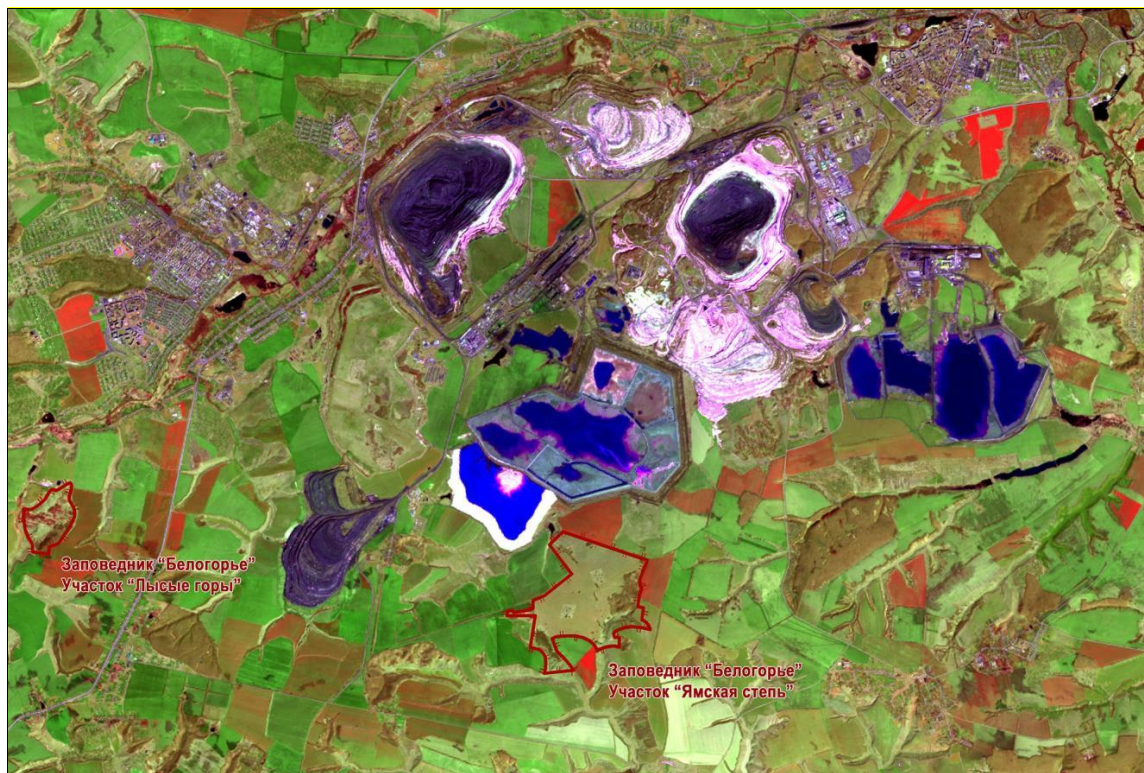


Рис. 6. Положение 2-х участков заповедника Белогорье в аграрном и индустриальном ландшафте Белгородской области. В ближайшем окружении степные участки отсутствуют.

В случае с Белгородской областью следует ориентироваться на использование резервов семян степной флоры на сохранившихся участках степей для экологической реставрации нарушенных земель. В процессе летнего сенокосения и дальнейшего обмолота сена с одного гектара «семенного резервата» можно получать до 1-2 центнеров «сено-семенной трухи», в которой представлены семена десятков видов степных злаков и разнотравья. Если использовать методы восстановления степей, разработанные ранее (Тишков, Данилов, 1998; Тишков, 2000), то имеющиеся резервы флоры области достаточны лишь для получения семян для реставрации примерно 150 тыс. га – около 5% площади области (исходя из того положения, что 1 га степи дает семенной смеси для реставрации 5 га), чего мало для формирования «степной» части экологического каркаса). Это означает, что требуются особые меры охраны растительности, обеспечивающие распространение семян степных растений. Выявленные участки сохранившихся степей области должны получить статус «семенных резерватов», но нужны и специальные «семенные питомники местной флоры» и меры охраны, обеспечивающие распространение степных видов на требующие восстановления земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- База данных по чужеродным видам растений Восточной Европы "Alis". 2011. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2011620495 от 29 июня 2011 г., зарегистрировано в Роспатенте. Хранение и пополнение в лаборатории биогеографии Института географии РАН, часть информации размещена на интернет-ресурсах [Электронный ресурс <http://www.sevin.ru/invasive/index.html> (дата обращения 01.04.2019)].
- Гусев А.В., Золотухин Н.И., Решетникова Н.М. 2017. Материалы ко второму изданию Красной книги Белгородской области. Растения, лишайники, грибы и животные, рекомендуемые для включения в списки охраняемых видов. 2. Раздел Сосудистые растения // Научные ведомости НИУ БелГУ. Серия «Естественные науки». Вып. 38. № 4 (253). С. 16-38.
- Дохман Г.И. 1968. Лесостепь Европейской части СССР. М.: Наука 269 с.
- Еленевский А.Г., Радыгина В.И., Чаадаева Н.Н. 2004. Растения Белгородской области (Конспект флоры). М.: МРГУ. 120 с.
- Ермакова Е.И., Гусев А.В. 2017. Восстановление утраченного биоразнообразия природных биотопов методом реинтродукции (Белгородская область) // Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и на сопредельных территориях: Материалы VII Международной научной конференции памяти профессора Петина А.Н., 24-26 октября 2017 г. Белгород: ПОЛИТЕРРА. С. 413-417.
- Золотухин Н.И., Полуянов А.В., Титова С.В. 2014. О некоторых степных участках на северо-западе Белгородской области // Флора и растительность Центрального Черноземья – 2014: Материалы межрегиональной научной конференции, 5 апреля 2014 г., Курск. С. 122-128.
- Исаченко Т.И., Лавренко Е.М. 1980. Ботанико-географическое районирование // Растительность европейской части СССР. Л.: Наука. С. 10-22.
- Корнилов А.Г., Кичигин Е.В., Калмыков С.Н., Новых Л.Л., Дроздова Е.А., Петин А.Н., Присный А.В., Лазарев А.В., Колчанов А.Ф. 2015. Экологическая ситуация в районах размещения горнодобывающих предприятий региона Курской магнитной аномалии. Белгород: Белгород, НИУ «БелГУ». 157 с.
- Красная книга Белгородской области. 2005. Редкие и исчезающие растения, грибы, лишайники и животные / Ред. А.В. Присный. Белгород. 532 с.
- Красная книга Российской Федерации. 2008. Растения и грибы / Ред. Ю.П. Трутнев и др.; сост. Р.В. Камелин и др. М.: Товарищество научных изданий КМК. 855 с.
- Рогова Н.В., Скворцов В.Э. 2016. Итоги инвентаризации степей в восточной части Европейской России // Степной бюллетень. № 47-48. С. 35-43.
- Смелянский И.Э., Титова С.В. 2018. Представленность степных экосистем в ООПТ России после 2000 года // Степи Северной Евразии. Материалы VIII международного симпозиума / Ред. А.А. Чибилёв. Оренбург: ИС УрО РАН. С. 905-908.
- Сухоруков А.П., Кушунина М.А. 2012. Новые данные по адвентивной фракции флоры Белгородской области // Научные ведомости Белгородского Государственного университета. Серия «Естественные науки». Т. 21. С. 40-46.
- Титова С.В., Кобяков К.Н., Золотухин Н.И., Полуянов А.В. 2014. Белогорье без белых гор? Угрозы степным экосистемам в Белгородской области / Ред. А.А. Тишков. М. 40 с.
- Тишков А.А. 2000. Экологическая реставрация нарушенных степных экосистем // Вопросы степеведения. – Оренбург. С. 47-62.
- Тишков А.А., Белоновская Е.А., Морозова О.В., Царевская Н.Г., Титова С.В., Тохтарь В.К., Чендев Ю.Г. 2018а. Потенциал местной флоры для восстановительной сукцессии степной растительности Белгородской области // Степи Северной Евразии. Материалы VIII международного симпозиума / Ред. А.А. Чибилёв.

Оренбург: ИС УрО РАН. С. 980-985.

- Тишков А.А., Белоновская Е.А., Царевская Н.Г., Титова С.В., Тохтарь В.К., Чендев Ю.Г.* 2018б. Перспективы восстановления степной растительности Белгородской области // Проблемы изучения и восстановления ландшафтов лесостепной зоны: историко-культурные и природные территории / Ред. О.В. Буровая, Е.М. Волкова, О.В. Швец. Вып. 4. Тула: Государственный музей-заповедник «Куликово поле», РГО. С. 46-52.
- Тишков А.А., Данилов В.И.* 1998. Реставрация степей Куликова поля (некоторые итоги) // Степной бюллетень. № 1. Весна. С. 18-20.
- Тишков А.А., Титова (Кобякова) С.В., Кобяков К.Н., Королюк А.Ю., Дулепова Н.А., Смелянский И.Э.* 2012. Подходы и методы выявления сохранившихся и восстанавливаемых массивов степной растительности в России // Степи Северной Евразии. Материалы VI международного симпозиума / Ред. А.А. Чибилев. Оренбург: ИПК «Газпромпечатъ», ООО «Оренбурггазпромсервис». С. 720-726.
- Чендев Ю.Г., Геннадиев А.Н.* 1993. Этапы и тренды техногенной трансформации почвенного покрова Центральной лесостепи (Белгородская область) // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. №2. С. 29-37.
- Чендев Ю.Г., Хохлова О.С., Александровский А.Л.* 2017. Агрогенная эволюция автоморфных черноземов лесостепи (Белгородская область) // Почвоведение. № 5. С. 515-531.
- Smelansky I.E., Tishkov A.A.* 2012. The Steppe Biome in Russia: Ecosystem Services, Conservation Status, and Actual Challenges // Eurasian Steppes. Ecological Problems and Livelihoods in a Changing World, Plant and Vegetation / / Eds. M.J.A. Werger, M.A. van Staalduinen. P. 45-101.

УДК 631.671

ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА ФЛОРЫ ВОЛГО-АХТУБИНСКОЙ ПОЙМЫ ПОСЛЕ ЗАРЕГУЛИРОВАНИЯ ВОДНОГО СТОКА Р. ВОЛГИ¹

© 2020 г. В.Б. Голуб, А.В. Чувашов, В.В. Бондарева, К.А. Герасимова, Л.Ф. Николайчук

Институт экологии Волжского бассейна РАН
Россия, 445003, г. Тольятти, ул. Комзина, д. 10. E-mail: vbgolub2000@mail.ru

Поступила в редакцию 07.03.2019. После доработки 22.07.2019. Принята к публикации 01.08.2019

Проведены исследования на четырех стационарных трансектах, заложенных в Волго-Ахтубинской пойме Прикаспийской экспедицией Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в 1954-1955 гг. Трансекты повторно обследовали в 1982 г. и в 2008-2013 гг. Была сделана оценка встречаемости наиболее распространенных видов растений в каждый из трех периодов исследований. Установлено, что на всех трансектах произошла ксерофитизация и рудерализация флоры. Выраженность этих процессов неодинакова на различных отрезках Волго-Ахтубинской поймы. Наиболее ярко они проявляются вблизи Волгоградской гидроэлектростанции и в местах сужения долины. Основными причинами ксерофитизации и рудерализации растительности являются снижение высоты и длительности половодий после зарегулирования водного стока р. Волги, высокая локальная пастбищная и рекреационная нагрузка. В северной части поймы значительные изменения в растительный покров вносят инвазии в естественные фитоценозы адвентивных видов: *Fraxinus pennsylvanica*, *Bidens frondosa*, *Conyza canadensis*, *Xanthium strumarium* s. l.

Ключевые слова: Нижняя Волга, регулирование водного стока, ксерофитизация растительности, рудерализация флоры.

DOI: 10.24411/1993-3916-2020-10083

После создания к середине 60-х годов прошлого века каскада водохранилищ в долине р. Волги сохранились два больших района с естественной пойменной растительностью, а именно: Волго-Ахтубинская пойма и дельта р. Волги. Здесь в зонах полупустыни и пустыни представлены азональные сообщества с луговыми, болотными и лесными фитоценозами. Их существование обеспечивается за счет специальных сбросов воды в весенне-летний период из Волгоградского водохранилища. Эти искусственно регулируемые попуски воды в Волго-Ахтубинскую пойму и дельту р. Волги заменили естественные половодья.

В нашу задачу входила оценка изменения встречаемости видов растений на территории Волго-Ахтубинской поймы за несколько десятилетий после возведения каскада волжских водохранилищ. Мы дополняем результаты глубоких исследований, проведенных в этом районе Ж.В. Кузьминой, С.Е. Трешкиным и Т.Ю. Каримовой (Кузьмина, Трешкин, 2014; 2017; Кузьмина и др., 2015).

Материалы и методы

Еще до создания наиболее крупных волжских гидроузлов (Камского, Горьковского, Куйбышевского, Волгоградского, Саратовского) в 1954-1955 гг. Прикаспийская экспедиция Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова под руководством И.А. Цаценкина (1962) заложила в Волго-Ахтубинской пойме 5 геоботанических трансект (рис.). Они располагались вдоль полевых дорог, пересекающих пойму. Сохранились вычерченные профили трансект, аэрофотоснимки с указанием мест расположения пробных площадок и геоботанические описания, сделанные на них. В 1982 г. все учетные площадки на трансектах были повторно

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Проекта РФФИ (грант № 14-04-00011А) «Оценка изменений растительного покрова Волго-Ахтубинской поймы под влиянием природных и антропогенных факторов», а также Проекта РФФИ (грант № 18-44-342001 р_мк) «Оценка динамики растительного покрова Волго-Ахтубинской поймы как индикатора экологических процессов».

обследованы. Позднее еще раз были проведены учеты на четырех трансектах: у г. Ленинск (Л) – в 2008 г., у сел Капустин Яр (КЯ) – 2009 г., Хошеутово (Х) – 2010 г., Болхуны (Б) – 2013 г. (рис.). Первые три из названных трансект были заложены в расширенных частях Волго-Ахтубы, где преобладает равнинная центральная пойма. Трансекта у с. Болхуны расположена в суженной части поймы, для которой характерен грядистый рельеф и высокие песчаные бугры эолового происхождения.

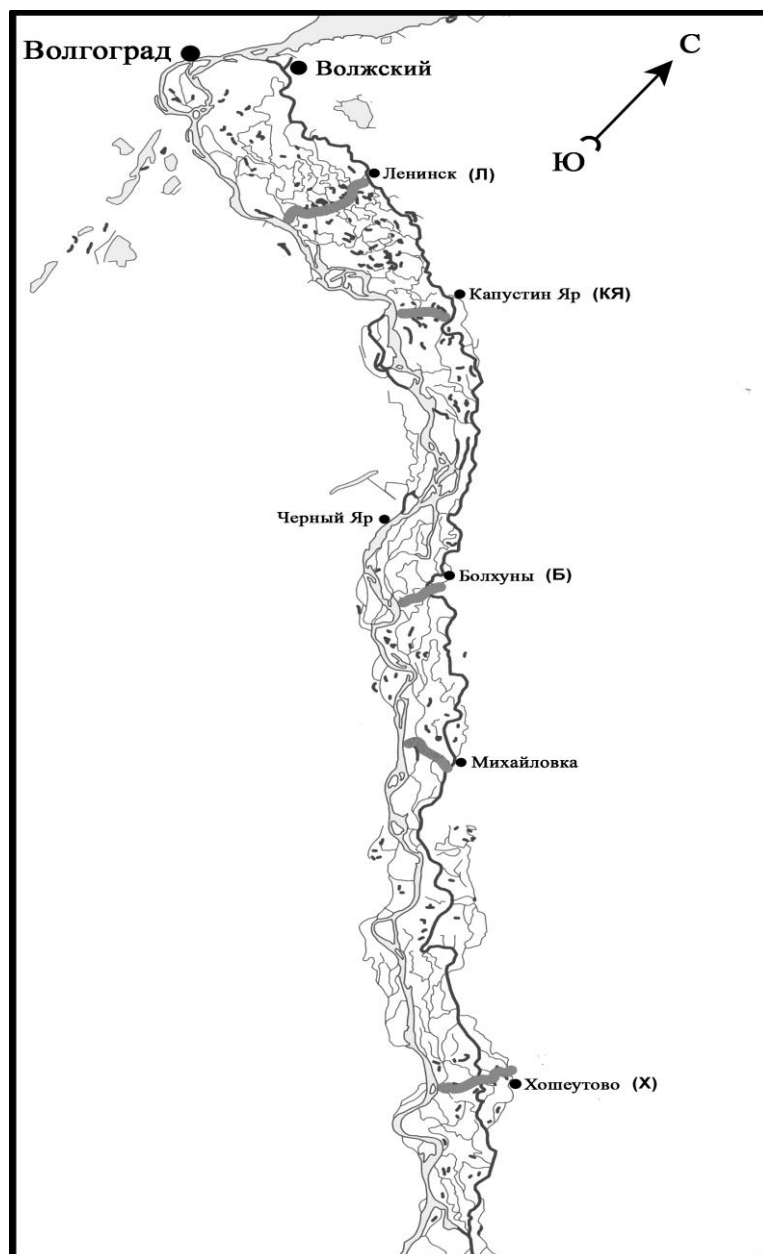


Рис. 1. Картограмма Волго-Ахтубинской поймы с указанием трансект, на которых проводился многолетний мониторинг, с их географическими координатами (трансекты: Л – начало – $48^{\circ} 28' 57.20''$ с.ш., $45^{\circ} 06' 6.27''$ в.д., конец – $48^{\circ} 40' 48.01''$ с.ш., $45^{\circ} 12' 56.46''$ в.д.; КЯ – начало – $48^{\circ} 28' 6.07''$ с.ш., $45^{\circ} 36' 16.75''$ в.д., конец – $48^{\circ} 32' 9.80''$ с.ш., $45^{\circ} 45' 30.08''$ в.д.; Б – начало – $47^{\circ} 54' 41.34''$ с.ш., $46^{\circ} 15' 18.88''$ в.д., конец – $47^{\circ} 58' 10.10''$ с.ш., $46^{\circ} 25' 48.60''$ в.д.; Х – начало $47^{\circ} 00' 1.95''$ с.ш., $47^{\circ} 36' 23.42''$ в.д., конец – $47^{\circ} 05' 0.22''$ с.ш., $47^{\circ} 45' 23.88''$ в.д.)

Для анализа изменений встречаемости видов растений и их агрегаций геоботанические описания по четырем трансектам мы сгруппировали в три периода исследований: I – 1954-1955 гг., II – 1982 г., III – 2008-2013 гг.

Общая длина 4 трансект с естественным растительным покровом в первый период составляла 79.9 км. Ко второму периоду в результате разрушения водой прирусловья Волги, обвалования лугов и превращения их в пашню их длина с естественным покровом сократилась до 70.5 км, к третьему – до 65.7 км.

В 1954-1955 гг. трансекты закладывали вдоль полевых дорог, пересекающих пойму. Такая дорога у г. Ленинск на значительном ее протяжении в 1970-х годах была превращена в асфальтированное

шоссе на сооруженной дамбе, не подверженной затоплению во время половодий.

На каждой трансекте для оценки встречаемости растений были отобраны только те учетные площадки, которые посещали в каждый из трех периодов. На первой трансекте их было 88, на второй – 82, на третьей – 69, на четвертой – 47, всего – 286. Общее количество геоботанических описаний, сделанных за три рассматриваемых периода, составляло 858. Все используемые в данной статье описания учетных площадок представлены в геоботанической базе данных долины Нижней Волги (Golub et al., 2012).

Геоботанические описания в первый период проводили с середины августа до середины сентября, во второй – с конца июня по первую половину июля, в третий – с конца июля по первую половину августа.

Размер пробных площадок в первом периоде геоботаники в своих дневниках указали лишь четыре раза при описании лугов. Он равнялся 100 м². Так как исследованиями в первый период руководил ученик Л.Г. Раменского – И.А. Цаценкин, можно предполагать, что такого размера площадки были и во многих других случаях. Л.Г. Раменский (1937) для луговых и степных сообществ рекомендовал использовать пробную площадь размером в 1 ар (10 м х 10 м = 0.01 га). Во втором периоде наблюдений размер площадок всегда указывали. В среднем он составлял 89 м². В третьем периоде учетов размер пробных площадок также указывался, но их площадь была значительно уменьшена. В среднем она равнялась 28 м². Различие в размерах пробных площадок надо иметь в виду при обсуждении материала, так как этот субъективный фактор влияет на такой показатель, как встречаемость растений (Голуб, 2010).

Названия сосудистых растений даны по «Flora Europaea» (Tutin et al., 2001). Некоторые виды растений, которые плохо различали между собой, мы объединяли в агрегации (agr.), понимали в широком смысле (s. l.) или использовали как сумму двух таксонов:

Atriplex agr. = *A. aucheri* + *A. micrantha* + *A. nitens* + *A. oblongifolia* + *A. patula* + *A. prostrata*;

Alisma lanceolatum + *A. plantago-aquatica*;

Bolboschoenus maritimus + *B. glaucus*;

Bidens frondosa + *B. tripartita*;

Eleocharis palustris + *E. uniglumis*;

Euphorbia esula s. l. = *E. esula* ssp. *esula* + *E. esula* ssp. *tommasiniana*;

Lactuca saligna + *L. serriola*;

Lythrum salicaria + *L. virgatum*;

Polygonum agr. = *P. arenarium* + *P. arenastrum* + *P. arenastrum* x *P. patulum* + *P. aviculare* + *P. bellardii* + *P. neglectum* + *P. patulum* + *P. salsugineum* + *P. samarense*;

Rorippa palustris + *R. brachycarpa*;

Xanthium strumarium s. l. = *X. strumarium* ssp. *strumarium* × *X. strumarium* ssp. *italicum* + *X. strumarium*.

Факторы среды. Объемы весенне-летних половодий во втором и третьем периоде учетов были меньшими, чем в первый. Это привело к сокращению уровней подъема воды во время половодий и их продолжительности (Горелиц, Землянов, 2013). Беспрепятственному поступлению воды в Волго-Ахтубинскую пойму во время весенне-летних половодий стали мешать дамбы, на которых строят дороги. Дамбы также окружают сельскохозяйственные поля с инженерными системами орошения и населенные пункты в пойме.

В северной части поймы на приплотинном участке Волжской ГЭС на отрезке около 100 км углубилось русло реки. Кроме того, здесь произошло формирование мелководных перекатов в устьях вторичных водотоков, по которым вода поступает в пойму. Эти факторы ухудшили поступление полых вод в центральные районы поймы. А повышенные участки, которые раньше изредка затоплялись, полностью перестали покрываться водой во время половодий (Зайцев и др., 2002; Горелиц и др., 2008; Коротаев и др., 2009).

По расчетам Ж.В. Кузьминой и С.Е. Трешкина (2014) в теплый (вегетационный) период происходит аридизация территории в Низовьях Волги.

Кроме гидрологических и метеорологических факторов на растительный покров Волго-Ахтубинской поймы большое влияние оказывает сельскохозяйственная эксплуатация этой территории. До половодья пойма используется под выпас сельскохозяйственных животных. Во время весенне-летнего разлива реки основную массу скота перемещают за пределы долины. После окончания

половодья луга становятся сенокосными угодьями. После уборки трав на сено луга вновь используют как пастбища. В связи с тем что затопление лугов в зарегулированных условиях водного стока более короткое, сенокос начинается примерно на месяц раньше и при современных технических средствах проводится быстрее, чем в первом периоде учетов на трансектах. Соответственно, во втором и третьем периодах раньше начинается и выпас скота по отаве после половодья.

Значительное воздействие на особенности использования земельных угодий Волго-Ахтубинской поймы оказали социальные преобразования в России, имевшие место в конце прошлого века. Произошло дробление больших колхозов и обычных совхозов на более мелкие хозяйства. К началу третьего периода исследований резко сократилось поголовье скота (Старичкова и др., 2009). Однако при уменьшении количества сельскохозяйственных животных из-за небольшого размера фермерских хозяйств и принадлежащих им лугов возросли пастбищные нагрузки вблизи мест содержания скота в пойме. В то же время труднодоступные и удаленные от ферм луга оказались заброшены, травостой на них не скашивают по несколько лет и не используют под выпас. Не выкашиваются также и участки с грубым травостоем низкого кормового достоинства, например, с доминированием *Carex acuta* и *Glycyrrhiza glabra*. В советский период существовали планы, направленные на максимальное количество заготовки сена. Поэтому, невзирая на экономические затраты и качество грубых кормов, надземную массу этих растений тоже скашивали. Причем на участках, на которых невозможно было использовать технику (например, на слонах к водоемам и в депрессиях, где доминировала *Carex acuta*), травостой скашивали вручную – косами. Такое сено обычно заготавливалось для личных подворий работников колхозов и совхозов.

Одним из новых факторов, влияющих на растительный покров Волго-Ахтубинской поймы так же, как и дельты р. Волги, стало их рекреационное использование. Только в Астраханской области к 2018 г. насчитывались 123 туристические фирмы, обслуживающие иногородних рыбаков и охотников (Болгов, Демин, 2018). Но большинство отдыхающих на берегах многочисленных водотоков Нижней Волги приезжает сюда самостоятельно, минуя туристические фирмы. В летнее время тысячи машин с многочисленными туристами – теперь обычная картина в Волго-Ахтубинской пойме.

Влияет на растительный покров Волго-Ахтубинской поймы и такой фактор, как преднамеренный или случайный занос чужеродных растений.

Результаты и обсуждение

Нас, прежде всего, интересует вопрос: идут ли в Волго-Ахтубинской пойме направленные изменения растительности. Для этой цели мы рассмотрели только те виды растений и их агрегации, которые удовлетворяли двум условиям: 1) их постоянство хотя бы в одном периоде на одной из трансект было более 15%, 2) для них было характерно направленное изменение встречаемости от первого к третьему учету. Таких видов оказалось 42.

Однонаправлено увеличили свою встречаемость 23 вида и их агрегации: на трансекте у г. Ленинск – 11, у с. Капустин Яр – 7, у с. Болхуны – 7, у с. Хошеутово – 2 (табл. 1). Восемь из их общего числа можно отнести к рудеральным. Это *Atriplex agr.*, *Cannabis sativa* var. *spontanea*, *Chenopodium album*, *Lactuca saligna*+*L. serriola*, *Sonchus arvensis*, *Convolvulus arvensis*, *Cichorium intybus*, *Polygonum agr.* Пять таксонов среди пойменных видов можно отнести к ксерофитам: *Acroptilon repens*, *Artemisia pontica*, *Carex praecox*, *Glycyrrhiza glabra*, *Medicago sativa* ssp. *caerulea*, *Poa angustifolia*.

В северной части поймы возросла представленность древесного растения – интродуцента – *Fraxinus pennsylvanica*. Этот вид стал чаще встречаться не только в лесных и кустарниковых сообществах, но и в виде всходов на лугах.

Из непреднамеренно занесенных видов в северной части поймы увеличилась встречаемость *Conyza canadensis* и *Xanthium strumarium* s. l. Здесь же возросла встречаемость агрегации *Bidens frondosa*+*B. tripartita*. Причем американский вид *Bidens frondosa* в настоящее время почти полностью вытеснил аборигенный – *B. tripartita*.

Но среди некоторых гигрофитов и мезофитов также увеличилась встречаемость. К ним относятся *Alisma plantago-aquatica*+*A. lanceolatum*, *Euphorbia esula* s. l., *Lythrum salicaria*+*L. virgatum*, *Rubia tatarica*, *Vicia cracca*+*V. tenuifolia*.

Характеризуя виды растений, увеличивших свою встречаемость, можно добавить, что такие высокорослые виды как *Glycyrrhiza glabra*, *Lythrum salicaria*+*L. virgatum* – это растения, которые

плохо переносят регулярное сенокошение. *Rubia tatarica*, по нашим наблюдениям, также отрицательно реагирует на систематическое удаление надземной массы. Что касается *Alisma plantago-aquatica*, то об этом виде известно, что его можно считать синантропным, со свойствами, присущими апофитам (Капитонова, 2010, 2015). К синантропным растениям, нередко являющимся сорняком, относят и *Vicia cracca* (Артохин, 2004; Баздырев и др., 2004).

Таблица 1. Виды растений и их агрегации, однонаправлено увеличивавших свою встречаемость, %.

Порядковый номер	Виды растений	Период			
		Трансекта	I	II	III
1	<i>Acroptilon repens</i>	Б	14	22	23
		Х	23	28	34
2	<i>Alisma lanceolatum</i> + <i>A. plantago-aquatica</i>	КЯ	1	9	21
3	<i>Artemisia pontica</i>	КЯ	15	18	20
4	<i>Atriplex agr.</i>	Л	2	13	18
5	<i>Bidens frondosa</i> + <i>B. tripartita</i>	Л	16	19	20
6	<i>Cannabis sativa</i> var. <i>spontanea</i>	Л	2	10	23
7	<i>Carex praecox</i>	Л	3	27	45
		КЯ	30	41	44
8	<i>Chenopodium album</i>	Л	2	10	25
9	<i>Convolvulus arvensis</i>	Х	51	53	62
10	<i>Conyza canadensis</i>	Л	3	7	19
11	<i>Cichorium intybus</i>	Л	–	14	23
12	<i>Euphorbia esula</i> s. l.	КЯ	52	54	65
13	<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	Л	3	10	22
14	<i>Glycyrrhiza glabra</i>	Б	9	22	32
15	<i>Lactuca saligna</i> + <i>L. serriola</i>	Л	–	23	28
		КЯ	–	1	16
16	<i>Lythrum salicaria</i> + <i>L. virgatum</i>	Б	38	39	45
17	<i>Medicago sativa</i> ssp. <i>caerulea</i>	Б	6	22	25
18	<i>Poa angustifolia</i>	КЯ	5	18	20
19	<i>Polygonum agr.</i>	Л	16	27	33
		Б	19	28	32
20	<i>Rubia tatarica</i>	Б	23	25	35
21	<i>Sonchus arvensis</i>	Л	6	14	27
22	<i>Vicia cracca</i> + <i>V. tenuifolia</i>	Б	–	7	19
23	<i>Xanthium strumarium</i> s. l.	КЯ	13	28	48

Некоторые виды полностью отсутствовали в первом периоде наблюдений на учетных площадках. Так, *Lactuca saligna*+*L. serriola* (преимущественно это *L. serriola*) в северной части поймы в 1954-1955 гг. не были встречены даже однократно. В третьем периоде на трансекте у г. Ленинск они были отмечены на 28% площадок, а у с. Капустин Яр – на 16%. *Vicia cracca*+*V. tenuifolia* на трансекте у с. Болхуны в первом периоде также ни разу не были отмечены, но во втором встречались уже на 7% площадок, а в третьем – на 19%. В 6 раз возросла встречаемость на трансекте у г. Ленинск от первого к третьему периоду *Atriplex agr.*, в 11.5 раз – *Cannabis sativa* var. *spontanea*, в 12.5 – *Chenopodium album*, в 7.3 – *Fraxinus pennsylvanica*, в 6.3 – *Conyza canadensis*, в 15 – *Carex praecox*. Также в северной части поймы, на трансекте у с. Капустин Яр более чем в 20 раз выросла встречаемость *Alisma plantago-aquatica*+*A. lanceolatum*.

Направленно уменьшилась встречаемость в сделанной нами выборке у 31-го вида растений и их агрегаций: на трансекте у г. Ленинск - 15, на трансекте у с. Капустин Яр – 9, на трансекте у с. Болхуны – 5, на трансекте у с. Хошеутово – 11 (табл. 2). Девять из них гигрофиты: *Achillea*

cartilaginea, *Butomus umbellatus*, *Carex acuta*, *Eleocharis palustris*+*E. uniglumis*, *Lysimachia vulgaris*, *Polygonum hydropiper*, *Sagittaria sagittifolia*, *Bolboschoenus maritimus*+*B. glaucus*, *Stachys palustris*.

Таблица 2. Виды растений и их агрегации, однонаправлено уменьшавших свою встречаемость, %.

Порядковый номер	Виды растений	Период			
		Трансекта	I	II	III
1	<i>Achillea cartilaginea</i>	Л	35	27	11
2	<i>Allium angulosum</i>	КЯ	23	21	1
		Х	43	38	15
3	<i>Althaea officinalis</i>	Л	34	28	15
4	<i>Artemisia abrotanum</i>	Л	27	26	24
5	<i>Asparagus officinalis</i>	Л	42	39	27
		Х	60	49	47
6	<i>Bromus inermis</i>	Л	55	52	43
		КЯ	55	54	43
7	<i>Butomus umbellatus</i>	Л	43	25	11
8	<i>Calamagrostis epigejos</i>	КЯ	20	16	12
9	<i>Carex acuta</i>	Л	32	19	14
10	<i>Carex melanostachya</i>	Х	68	40	32
11	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Х	47	9	2
12	<i>Eleocharis palustris</i> + <i>E. uniglumis</i>	Б	70	58	38
13	<i>Elymus repens</i>	КЯ	50	44	26
		Б	43	39	33
14	<i>Euphorbia esula</i> s. l.	Х	62	57	45
15	<i>Euphorbia palustris</i>	Х	32	9	–
16	<i>Galium rubioides</i>	Л	33	23	20
		Х	23	4	–
17	<i>Galium verum</i>	Х	23	13	9
18	<i>Hierochloe repens</i>	КЯ	46	40	35
19	<i>Inula britannica</i>	Б	71	64	48
		Х	72	60	49
20	<i>Lysimachia vulgaris</i>	Л	22	19	15
21	<i>Mentha arvensis</i>	Л	26	23	8
22	<i>Polygonum hydropiper</i>	КЯ	23	11	4
23	<i>Polygonum agr.</i>	КЯ	29	21	17
		Х	40	30	19
24	<i>Rorippa palustris</i> + <i>R. brachycarpa</i>	Б	61	32	12
25	<i>Rumex thyrsoiflorus</i>	КЯ	18	16	5
26	<i>Sagittaria sagittifolia</i>	Л	23	11	1
27	<i>Bolboschoenus maritimus</i> + <i>B. glaucus</i>	Х	60	45	43
28	<i>Scutellaria galericulata</i> + <i>S. hastifolia</i>	Л	19	15	–
29	<i>Senecio jacobaea</i>	Л	19	11	2
		КЯ	49	46	13
30	<i>Stachys palustris</i>	Л	45	41	24
		Б	26	22	14
31	<i>Veronica longifolia</i>	Л	17	15	5

Остальные можно отнести к мезофитам: *Allium angulosum*, *Althaea officinalis*, *Artemisia abrotanum*,

Asparagus officinalis, *Bromus inermis*, *Carex melanostachya*, *Echinochloa crus-galli*, *Elymus repens*, *Euphorbia esula* s. l., *E. palustris*, *Calamagrostis epigejos*, *Galium rubioides*, *G. verum*, *Hierochloe repens*, *Mentha arvensis*, *Inula britannica*, *Polygonum agr.*, *Rorippa palustris*+*R. brachycarpa*, *Scutellaria galericulata*+*S. hastifolia*, *Senecio jacobaea*, *Veronica longifolia*.

Следует обратить внимание на агрегацию растений, которую мы обозначили как *Polygonum agr.* На первой и третьей трансекте ее встречаемость увеличилась, а на второй и четвертой – уменьшилась. Объяснить это явление мы можем тем, что в эту агрегацию входят виды разной экологии. Можно предположить, что на первой и третьей трансекте это были виды, близкие к типичному рудералу *Polygonum aviculare*, а на второй и четвертой – к луговым мезофитам *P. arenarium* и *P. patulum*. Схожим образом ведет себя и *Euphorbia esula* s. l., включающая подвиды с различной экологией. На трансекте у с. Капустин Яр встречаемость *Euphorbia esula* s. l. увеличилась, а на трансекте у с. Хошеутово – уменьшилась.

Полностью выпали из травостоев на трансекте близ с. Хошеутово *Euphorbia palustris* и *Galium rubioides*, а на трансекте у г. Ленинск – *Scutellaria galericulata*+*S. hastifolia*. В 23 раза уменьшилась представленность *Sagittaria sagittifolia* на трансекте у г. Ленинск и почти на столько же сократились встречаемости *Echinochloa crus-galli* на трансекте у с. Хошеутово и *Allium angulosum* на трансекте у с. Капустин Яр.

Тот факт, что число видов, направленно уменьшивших свою встречаемость, больше, чем количество ее увеличивших, отчасти можно приписать сокращению площади учетных площадок во втором и третьем периодах.

Судя по экологии видов растений, направленно увеличивших и уменьшивших встречаемость, наибольшая степень ксерофитизации и рудерализации растительности была выявлена на трансектах у г. Ленинск и с. Болхуны. В первом случае это связано с тем, что в районе ее расположения произошло углубление русла реки. В результате, дополнительно к общему понижению уровней подъема воды во время половодий на всей нижеволжской долине в зарегулированных условиях стока, в этом районе их подъем на абсолютные отметки еще более снизился. Во втором случае на трансекте у с. Болхуны повышенная ксерофитизация растительности связана с тем, что это суженный район поймы с большим количеством высоких грив, увлажнение которых в условиях зарегулированного стока особенно сильно ухудшилось.

Выводы

Направленные изменения флоры в сторону ее ксерофитизации выявлены на всех четырех трансектах. Причиной их является снижение уровней подъема воды во время половодий и сокращение их длительности. Ксерофитизация травостоя сопровождается ее рудерализацией, которую можно объяснить несколькими факторами. 1) Локальным увеличением пастбищных нагрузок вблизи мест содержания скота в условиях появления небольших фермерских хозяйств. 2) Увеличением возможности более длительного использования лугов под выпас скота по причине сокращения длительности их заливания во время паводков. 3) Ростом числа площадей в пойме, полностью не подверженных влиянию половодий, на которых выпас сельскохозяйственных животных может продолжаться весь вегетационный сезон. 4) Выпадением из состава растительных сообществ на повышенных элементах рельефа мезофитных растений. Это приводит к разреженности травостоя в таких местообитаниях, в которые легко внедряются рудеральные виды. 5) Резким возрастанием в последние десятилетия рекреационной нагрузки на экотопы Волго-Ахтубинской поймы.

Степень ксерофитизации и рудерализации растительности в Волго-Ахтубинской пойме неодинакова. Наиболее сильно она выражена в северной части поймы, примыкающей к плотине Волгоградской ГЭС, где произошло углубление русла реки. Эти же явления значительны в местах сужения Волго-Ахтубинской поймы, где шире представлены высокие местоположения. Меньшие изменения флоры произошли вдали от плотины Волгоградской ГЭС и в местах расширения долины, где преобладает рельеф равнинной центральной поймы.

На удаленных от ферм участках, которые стали реже подвергаться регулярному сенокосению и выпасу, начали разрастаться грубостебельные растения, такие как *Glycyrrhiza glabra*, *Lythrum salicaria*, *L. virgatum*, *Rubia tatarica*.

Среди инвазивных видов наибольшую роль в изменении растительного покрова Волго-Ахтубинской поймы играют *Fraxinus pennsylvanica*, *Conyza canadensis*, *Bidens frondosa*, *Xanthium strumarium* s. l.

Таким образом, не все явления, связанные с динамикой состава флоры Волго-Ахтубинской поймы вызваны перестройкой гидрологического режима Волги после зарегулирования ее водного стока. Определенную роль в этом процессе сыграли инвазии чужеродных растений, увеличение рекреационной нагрузки и изменения особенностей хозяйственного использования растительного покрова этой территории.

Благодарность. Авторы выражают благодарность И.М. Микляевой за ценные советы и рекомендации при обсуждении черного варианта статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артохин К.С. 2004. Сорные растения: атлас. Ростов-на-Дону: Книга. 144 с.
- Баздырев Г.И., Зотов Л.И., Полин В.Д. 2004. Сорные растения и меры борьбы с ними в современном земледелии. М.: МСХА. 288 с.
- Болгов М.В., Демин А.П. 2018. Водохозяйственные и экологические проблемы Нижней Волги и пути их решения // Водные ресурсы. С. 211-220.
- Голуб В.Б. 2010. Использование геоботанических описаний в качестве коллекции образцов для классификации растительности // Растительность России. № 17-18. С. 70-83.
- Горелиц О.В., Землянов И.В. 2013. Современный механизм заливания территории Волго-Ахтубинской поймы в период половодий (в пределах Волгоградской области) // Научный потенциал регионов на службу модернизации. № 2 (5). С. 9-18.
- Горелиц О.В., Землянов И.В., Синенко Л.Г. 2008. Оценка морфометрических характеристик русла при планировании мероприятий по водообеспечению территорий Нижней Волги // Сборник докладов Международной конференции «Управление водно-ресурсными системами в экстремальных условиях». Москва, 4-5 июня 2008 г. С. 306-307.
- Зайцев А.А., Иванов В.В., Коротаев В.Н., Лабутина И.А., Лукьянова С.А., Цзунсянь Ли, Римский-Корсаков Н.А., Рычагов Г.И., Свиточ А.А., Сидорчук А.Ю., Сычев В.А., Чернов А.В. 2002. Нижняя Волга: геоморфология, палеогеография и русловая морфодинамика. М.: ГЕОС. 242 с.
- Капитонова О.А. 2010. Флора водоемов г. Ижевска (Удмуртская Республика) // Изучение растительных ресурсов Волжско-Камского края / Ред. В.Г. Папченков. Вып. 1. Чебоксары. С. 50-58.
- Капитонова О.А. 2015. Конспект флоры макрофитов Вятско-Камского Предуралья // Фиторазнообразие Восточной Европы. № 4. С. 4-85.
- Атлас русловой морфодинамики Нижней Волги. 2009 / Ред. В.Н. Коротаев, Д.Б. Бабич, Р.С. Чалов. М.: Издательство МГУ. 232 с.
- Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е. 2014. Климатические изменения в бассейне Нижней Волги и их влияние на состояние экосистем // Аридные экосистемы. Т. 20. № 3 (60). С. 14-32. [Kouzmina J.V., Treshkin S.E. 2014. Climate Changes in the Basin of the Lower Volga and Their Influence on the Ecosystem // Arid Ecosystems. Vol. 4. No. 3. P. 142-157.]
- Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е. 2017. Оценка изменений экосистем Нижней Волги при зарегулировании // Аридные экосистемы. Т. 23. № 4 (73). С. 22-34. [Kuz'mina Zh.V., Treshkin S.E. 2017. Changes in Terrestrial Ecosystems of the Lower Volga Region caused by River Flow Regulation // Arid Ecosystems. Vol. 7. No. 4. P. 234-242.]
- Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е., Каримова Т.Ю. 2015. Динамические изменения наземных экосистем поймы и дельты Нижней Волги под влиянием зарегулирования речного стока и климатических флуктуаций // Аридные экосистемы. Т. 21. № 4 (65). С. 39-53. [Kuz'mina Zh.V., Treshkin S.E., Karimova T.Yu. 2015. Effects of River Flow Regulation and Climate Fluctuations on Dynamic Changes in the Terrestrial Ecosystems of the Lower Volga Delta and Floodplain // Arid Ecosystems. Vol. 5. No. 4. P. 234-242.]
- Раменский Л.Г. 1937. Учет и описание растительности (на основе проективного метода). М.: Издательство ВАСХНИЛ. 100 с.
- Старичкова К.А., Бармин А.Н., Иолин М.М., Шарова И.С., Сорокин А.Н., Николайчук Л.Ф., Голуб В.Б. 2009. Оценка динамики растительности на трансекте в северной части Волго-Ахтубинской поймы // Аридные экосистемы. Т. 15. № 4 (40). С. 39-51.
- Цаценкин И.А. 1962. Растительность и естественные кормовые ресурсы Волго-Ахтубинской поймы и дельты р. Волги // Природа и сельское хозяйство Волго-Ахтубинской долины и дельты р. Волги. М.: Издательство МГУ. С. 118-192.
- Golub V., Sorokin A., Starichkova K., Nikolaychuk L., Bondareva V., Ivakhnova T. 2012. Lower Volga Valley Phytosociological Database // Biodiversity & Ecology. Vol. 4. P. 419.
- Tutin T.G., Heywood V.H., Burges N.A., Valentine D.H., Walters S.M., Webb D.A. 2001. Flora Europaea on CD-ROM. Cambridge: Cambridge University Press.

УДК 631.617

**МЕЛИОРАТИВНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КУСТАРНИКОВЫХ КУЛИС
НА АРИДНЫХ ПАСТБИЩАХ ЮГА РОССИИ¹**

© 2020 г. Н.В. Тютюма, Г.К. Булахтина, А.В. Кудряшов, Н.И. Кудряшова

Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН

Россия, 416251, Астраханская обл., Черноярский р-он, с. Соленое Займище, кв. Северный, д. 8.

E-mail: pniiiaz@mail.ru, gbulaht@mail.ru

Поступила в редакцию 23.04.2019. После доработки 04.07.2019. Принята к публикации 30.09.2019

Статья посвящена многолетнему опыту (2008-2018 гг.) по изучению влияния кустарниковых кулис на растительный покров полупустынных деградированных пастбищ. Были исследованы изменения: высоты снежного покрова в зимний период, запаса продуктивной влаги в почве, видового состава и урожайности аридных пастбищ в динамике роста и развития кустарниковых кулис. Опыты проводились по методикам Всероссийского научно-исследовательского института агролесомелиорации (Павловский, 1973), Всероссийского научно-исследовательского института кормов (Методика ..., 2015) и Б.А. Доспехова (1985). В результате было выявлено, что в сравнении с естественным пастбищем без кулис: с увеличением высоты кустарников терескена увеличивалась высота снежного покрова в среднем в 3.5-11 раз в зависимости от величины выпавших осадков; в первые пять лет продуктивный запас влаги в почве увеличился на 7.2-9.1 мм, при достижении высоты кулис более 1 м – на 8.8-24.8 мм; через десять лет на участке с кулисами произошло увеличение в растительной ассоциации численности доминантов на 4 вида; урожайность пастбища с кулисами, начиная с третьего года вегетации терескена, выросла в 1.3-3.9 раз по годам исследования.

Ключевые слова: пастбищные фитоценозы, деградация, опустынивание, кустарниковые кулисы, запас продуктивной влаги.

DOI: 10.24411/1993-3916-2020-10084

Аридные пастбища юга России – это сотни тысяч гектар равнинных сухих степей. В современных ландшафтах этих территорий отмечаются процессы деградации и опустынивания. В результате увеличиваются территории, имеющие проективное покрытие менее 10%, а также возрастают площади и увеличивается количество открытых, полностью лишенных растительного покрова участков. Основные причины деградации и опустынивания – это сложность климатических условий и возрастающая антропогенная нагрузка (Кулик, 2013). Эти проблемы являются актуальными не только в нашей стране, но и во всем мире. Большинство пастбищ американского штата Нью-Мексико с аридным и семиаридным климатом находится в стадии деградации из-за регулярных засух и высокой пастбищной нагрузки (Gibbens et al., 2005).

Сейчас в земледелии применяется адаптивно-ландшафтный подход при разработке системы почвозащитных мероприятий. Целью ландшафтного земледелия является создание условий для такой деятельности, которая обеспечила бы достижение высокой продуктивности агроландшафтов без нарушения экологического баланса территории (Барабанов, 2014).

О благоприятном влиянии леса на аграрные ландшафты известно давно. Являясь мощным биоэнергетическим фактором, лес оказывает благоприятное влияние на поля, сады, огороды, пастбища, скотные дворы, животноводческие фермы и комплексы. Лесополосы, оказывая мощное воздействие на снегоотложение, способствуют накоплению большего количества снега. Они предохраняют почву от глубокого промерзания, и водопоглощение сохраняется на высоком уровне, лесополосы способствуют

¹ Работа выполнена по государственной теме НИР № 722-2019-0017-С-01 "Разработать научные основы создания, восстановления и рационального использования сельскохозяйственных угодий в целях повышения продуктивности и экологической целесообразности естественных и агроландшафтов, в условиях увеличения антропогенно-техногенной нагрузки и глобальных изменений климата"

сокращению стока талых вод. Таким образом, зная роль влияния лесных полос, можно управлять этим процессом. (Барабанов, 2015). Например, Г.П. Сурмач (1976) установил, что на серых лесных почвах юга Центрального района Нечернозёмной зоны в период снеготаяния в лесополосах в среднем просачивается 326 мм (до 400 мм) талой воды, на чернозёмах ЦЧО и Поволжья – 346 мм (до 500 мм), а на светло-каштановых почвах Нижнего Поволжья – 240 мм (до 430 мм).

Однако применение лесомелиоративных приемов для улучшения пастбищ в условиях полупустыни, особенно в присутствии солонцов и солончаков, создает неустойчивые искусственные ландшафтные образования (Линдеман, 2001). Так, в Узбекистане наиболее эффективные защитные лесные полосы на пустынных пастбищах создают с использованием саксаула черного (*Haloxylon aphyllum* (Minkw) Pjin). Продуктивность этих пастбищ и видовой состав в 2-4 раза выше в сравнении с открытыми пастбищами (Makhmudov, 2007).

Поэтому в аридных полупустынных регионах необходимо создавать мелиоративно-кормовые насаждения из засухо- и солеустойчивых видов растений, обладающих высокой кормовой ценностью и продуктивностью для улучшения качества кормов пастбищ, а также с целью восстановления их деградированных участков.

Целью исследования стало изучение влияния мелиоративно-кормового насаждения – кустарниковых кулис с использованием терескена серого (*Eurotia ceratoides* (L.) С.А. Mey) на фитопотенциал естественных полупустынных пастбищ юга России.

Поэтому основной задачей было проведение исследования изменения высоты снежного покрова в зимний период, запаса продуктивной влаги в почве, видового состава и урожайности аридных полупустынных пастбищ в динамике роста и развития кустарниковых кулис.

Объекты и методы

Опытный участок расположен на естественном пастбище в правобережной степи Астраханской области, с выровненным рельефом. Почвы светло-каштановые солонцеватые тяжелосуглинистые в комплексе с солонцами от 6 до 11%, с содержанием гумуса от 0.7 до 1.2%.

Выбор опытного и контрольного участков был обусловлен типичностью растительного покрова для подзоны – это полынно-эфемеровая ассоциация. Флористический состав представлен такими видами, как: полынь белая (*Artemisia lercheana* Weber ex Stechm.), мятлик луковичный (*Poa bulbosa* L. subsp. *vivipara* (Koel) Arcang.), моргук восточный (*Eremopyrum orientale* (L.) Jaub. & Spach), рогач песчаный (*Ceratocarpus arenarius* L. Wikispecies-logo.svg). Отмечена умеренная животноводческая нагрузка.

Агротехнические мероприятия (подготовка земли, посев) на аридном пастбище проводились по методике Прикаспийского научно-исследовательского института аридного земледелия (Шагайпов и др., 2009). Разработка опыта проводилась по методике Всероссийского научно-исследовательского института агролесомелиорации (Павловский, 1973). Определение урожайности пастбищного травостоя – укосным методом по «Методике эффективного освоения ...» (2015). Определение влажности почвы – термовесовым методом послойно (через 10 см) в метровом слое почвы по «Методике полевого опыта» (Доспехов, 1985). Данные обрабатывались методами математической статистики и дисперсионного анализа.

Схема опыта. Полевой однофакторный опыт по изучению мелиоративной эффективности кустарниковых кулис на полупустынном пастбище: срок посева – осень. Для создания кулис использовался кустарник терескен серый (*Eurotia ceratoides* (L.) С.А. Mey). Контроль – естественное пастбище. На опытном участке площадью 1.25 га были посеяны параллельные кулисы через 25 м, длиной 100 метров. Всего было посеяно шесть кулис, для учета взято четыре. Посев кулис производился в направлении север-юг, перпендикулярном господствующим ветрам.

Терескен серый относится к семейству маревых (*Chenopodiaceae*) – кустарник высотой до 100 и более сантиметров. Обладает высокой засухо- и солеустойчивостью, длительным периодом вегетации, продуктивным долголетием. Корневая система – до 3.5 м.

Регион проведения опыта – это полупустынная засушливая часть юга России. Коэффициент аридности составляет 0.11-0.30, что определяет сильноаридную зону. За год осадков отмечается в пределах 125-265 мм. Продолжительность периода с температурами выше 10°C составляет 165-170 дней. Сумма эффективных температур для пастбищных трав выше 5°C достигает 5800-5900°C. Испаряемость в 3-5 раз превышает количество выпавших осадков. Вероятность сухих и засушливых лет – более 60%.

Наблюдения и описание состояния растительного покрова участков проводилось ежегодно в мае

и сентябре, в период вегетации основных ранних и поздних трав. Отборы проб проводили в двенадцати рендомизированных повторностях, на четырех участках. Места отбора проб располагались на линии условного профиля в самой кулисе и на расстоянии от нее, кратном 5Н и 10Н, где Н – высота кулис. Со второго по четвертый год от посева кулис на опытном и контрольном участках в осенний период проводили кратковременный выпас овец. С пятого года овец выпасали со второй половины лета. Измерение высоты терескена проводилось один раз в год в ноябре.

Результаты и их обсуждение

Посев был произведен 23 ноября 2008 г. К концу первого года вегетации кустарниковые кулисы достигли средней высоты 0.23 м и в дальнейшем прирост по годам составил в среднем 0.2 м. Результаты измерения снежного покрова по годам на опытном участке приведены в таблице 1. Анализ полученных данных показал, что уже в первый год жизни кулисы, имея даже высоту, равную средней высоте растительного покрова участка, создавали барьер для развеивания снега по пастбищу (табл. 1). Это произошло благодаря плотной конструкции кулис.

Таблица 1. Средняя высота снежного покрова на опытном участке по годам исследования.

Год	Средняя высота терескена в кулисах, м	Средняя высота снежного покрова, м					Контрольный участок
		Расстояние от кулис, м					
		0	Н	5Н	10Н		
2009	0.23	0.22	0.11	0.08	0.07	0.05	
2010	0.46	0.28	0.12	0.10	0.10	0.08	
2011	0.64	0.15	0.08	0.06	0.05	0.03	
2012	0.86	0.31	0.12	0.10	0.10	0.06	
2013	1.05	0.27	0.15	0.10	0.07	0.05	
2014	1.20	0.22	0.11	0.05	0.04	0.02	
2015	1.38	0.35	0.18	0.12	0.10	0.07	
2016	1.55	0.18	0.12	0.08	0.05	0.03	
2017	1.63	0.34	0.22	0.22	0.15	0.10	
2018	1.66	0.21	0.16	0.11	0.08	0.04	

С увеличением высоты кустарников уже в первый год вегетации и далее по годам было отмечено увеличение высоты снежного покрова в кулисах и на расстоянии Н от них в сравнении с контрольными показателями в среднем в 3.5-11 раз в зависимости от величины выпавших осадков. На расстоянии 5Н м и 10Н м разница была не существенная в первые три года. Когда высота кулис достигла 0.8-0.9 м, разница с контрольными показателями стала достоверной, так как произошло увеличение общего проективного покрытия (ОПП) таких высокорослых трав, как ковыль Лессинга (*Stipa lessingiana* Trin. & Rupr.) и типчак (*Festuca valesiaca* (Hask.) Gaudin), которые стали защитой для снежного покрова от раздувания.

Продуктивный запас влаги в слое почвы 0-1 м определяли весь период вегетации (апрель-ноябрь). Однако в условиях полупустыни продуктивный запас влаги сохраняется в почве не более чем до середины мая и вновь появляется к ноябрю, если осенью выпадают осадки, вероятность которых составляет 40%. Поэтому для сравнения мы взяли данные по наличию продуктивной влаги за апрель по годам исследования (рис. 1). Анализ полученных данных показал, что достоверная разница между вариантами опыта (расстояние от кулис 0 и Н м) и контролем появилась в первые пять лет вегетации кустарников (9.1 и 7.2 мм). На более отдаленном расстоянии (5 и 10Н м) эта разница (3.5 и 0.2 мм) оказалась недостоверной ($НСР_{05}=4.01$). В последующую пятилетку кулисы высотой более 1 м стали оказывать влияние на увеличение продуктивного запаса влаги в почве по всей линии отдаления (0 м – 24.8 мм, Н м – 21.6 мм, 5Н м – 18.1 мм, 10Н м – 8.8 мм), так как разница была достоверной ($НСР_{05}=3.04$).

Результаты исследования видового состава растительного покрова опытных участков представлены в таблице 2. Был выделен доминирующий состав фитоценозов участков, составляющих полынно-эфемерово-ковылковую ассоциацию (табл. 2, фото 1).

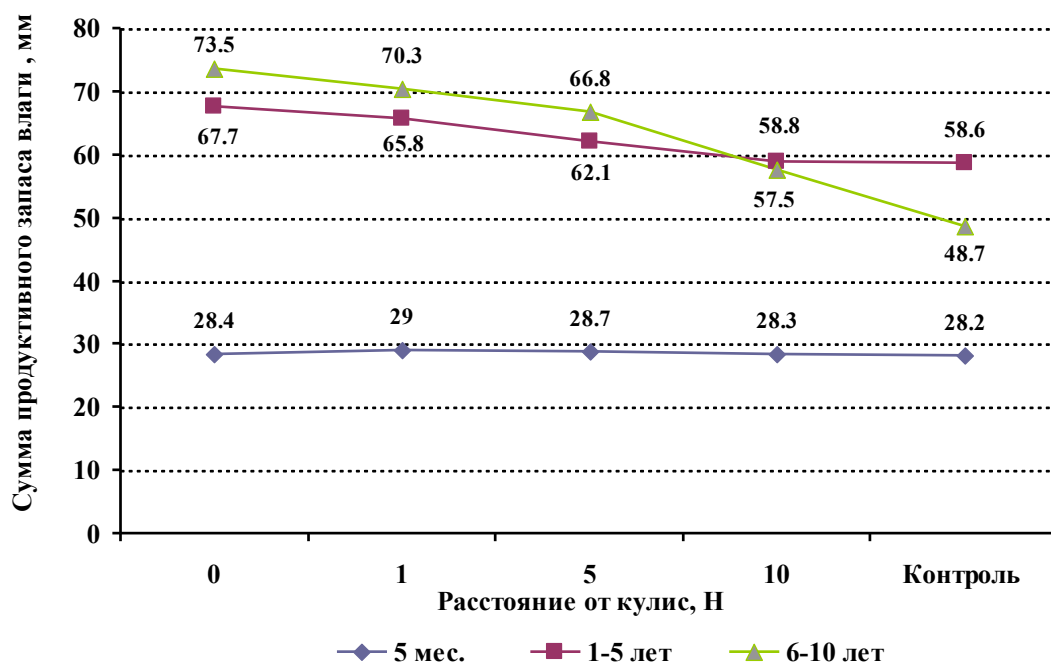


Рис. 1. Изменение продуктивного запаса влаги в слое почвы 0-1 м (мм) по годам исследования в апреле.

Таблица 2. Изменение видового состава опытных участков по годам исследования.

Возраст кулис	ОПШ, %	Доминирующий видовой состав
1 год	32.8	Полынь белая (<i>Artemisia lercheana</i> Web.), полынь холодная (<i>Artemisia frigida</i> Willd.), мятлик луковичный (<i>Poa bulbosa</i> L.), типчак (<i>Festuca valesiaca</i> (Hask.) Gaudin), мортук восточный (<i>Eremopyrum orientale</i> L.), рогач песчаный (<i>Ceratocarpus arenarius</i> L.), ковыль Лессинга (<i>Stipa lessingiana</i> Trin. & Rupr.)
5 лет	58.5	Полынь белая (<i>Artemisia lercheana</i> Web.), полынь холодная (<i>Artemisia frigida</i> Willd.), мятлик луковичный (<i>Poa bulbosa</i> L.), типчак (<i>Festuca valesiaca</i> (Hask.), ковыль Лессинга (<i>Stipa lessingiana</i> Trin. & Rupr.), житняк пустынный (<i>Agropyron desertorum</i> (Fisch. ex Link) Schult.), костер кровельный (<i>Bromus tectorum</i> L.), мортук восточный (<i>Eremopyrum orientale</i> L.), рогач песчаный (<i>Ceratocarpus arenarius</i> L.)
10 лет	77.8	Полынь белая (<i>Artemisia lercheana</i> Web.), мятлик луковичный (<i>Poa bulbosa</i> L.), типчак (<i>Festuca valesiaca</i> (Hask.), ковыль Лессинга (<i>Stipa lessingiana</i> Trin. & Rupr.), житняк пустынный (<i>Agropyron desertorum</i> (Fisch. ex Link) Schult.), костер кровельный (<i>Bromus tectorum</i> L.), костер растопыренный (<i>Bromus squarrosus</i> L.), тонконог гребенчатый (<i>Koeleria cristata</i> (L.) Pers), астрагал лисовидный (<i>Astragalus alopecuroides</i> L.), полынь холодная (<i>Artemisia frigida</i> Willd.), мортук восточный (<i>Eremopyrum orientale</i> L.), рогач песчаный (<i>Ceratocarpus arenarius</i> L.)
Контроль	35.6	Полынь белая (<i>Artemisia lercheana</i> Web.), полынь холодная (<i>Artemisia frigida</i> Willd.), мятлик луковичный (<i>Poa bulbosa</i> L.), мортук восточный (<i>Eremopyrum orientale</i> L.), рогач песчаный (<i>Ceratocarpus arenarius</i> L.), типчак (<i>Festuca valesiaca</i> (Hask.), ковыль Лессинга (<i>Stipa lessingiana</i> Trin. & Rupr.)

Через пять лет нами было отмечено увеличение численности доминирующих видов на участке с кулисами, а именно произошло увеличение проективного покрытия житняка пустынного

(*Agropyron desertorum* (Fisch. ex Link) Schult.) и костра кровельного (*Bromus tectorum* L.). Поскольку коостер – растение более влаголюбивое, то ареал его распространения был в основном около кулис, а житняка – распространился более равномерно по всей площади участка.

В дальнейшем, еще через пять лет на участке с кулисами были отмечены в качестве доминантов тонконог гребенчатый (*Koeleria cristata* (L.) Pers.) и астрагал лисовидный (*Astragalus alopecuroides* L.), которые также в основном сосредоточены были в удаленности до 5Н м от кулис (фото 2).



Фото 1. Естественное пастбище в регионе исследования (2008 г., здесь и далее фото авторов).



Фото 2. Опытный участок пастбища с кустарниковыми кулисами (2018 г.).

Исследование урожайности опытных участков проводилось в мае и сентябре, в период наибольшей вегетации раннеспелых и позднеспелых трав (рис. 2).

Анализ результатов показал, что существенная разница между опытом и контролем появилась только к третьему году вегетации кустарника. Даже в наиболее засушливые года (2011, 2014, 2015, 2018) урожайность растительного покрова пастбищ с кулисами была выше контрольных участков в 1.3-3.9 раз, а в наиболее влажные года (2016, 2017) – в 3.6-3.9 раз. При этом сам кустарник терескен серый является не только хорошо поедаемым видом в течение всего года, но и высокопитательным кормом для всех видов пастбищных животных. Таким образом, созданные на полупустынном пастбище в условиях светло-каштановых почв кустарниковые кулисы терескена серого создают не только высокий мелиоративный эффект, а именно: влияют на увеличение продуктивного запаса влаги в почве, способствуют задержанию на пастбище большого количества снега, – но и биомелиоративный, то есть способствуют увеличению видового разнообразия травостоя, продуктивности и питательной ценности фитопотенциала пастбища.

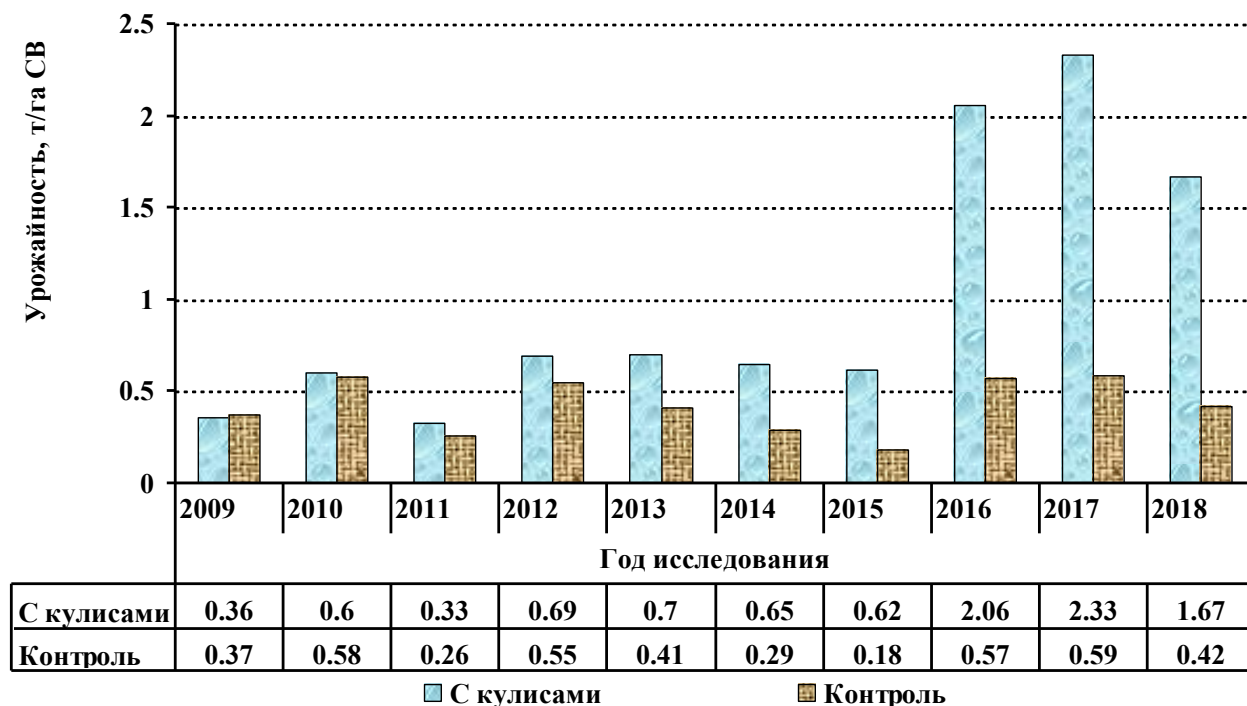


Рис. 2. Среднегодовая урожайность (т/га СВ) фитопотенциала опытных участков по годам исследования.

Выводы

По результатам десяти лет исследования (2008-2018 гг.) были сделаны следующие выводы:

- с увеличением высоты терескена уже в первый год вегетации и далее по годам было отмечено увеличение высоты снежного покрова в кулисах и на расстоянии высоты кустарника в сравнении с контрольными показателями в среднем в 3.5-11 раз в зависимости от величины выпавших осадков;

- на расстоянии 5Н м и 10Н м от кулис разница между опытом и контролем стала существенной, когда высота кулис достигла 0.8-0.9 м, так как произошло увеличение ОПП таких высокорослых трав, как ковыль Лессинга и типчак, которые стали участвовать в снегозадержании;

- созданные кустарниковые кулисы в первые пять лет оказали влияние на увеличение продуктивного запаса влаги в слое почвы 0-1 м в удалении 0-Н м от них в сравнении с контролем на достоверную разницу 7.2-9.1 мм ($НСР_{05}=4.01$);

- при достижении кулис высоты более 1 м они стали оказывать влияние на увеличение продуктивного запаса влаги в почве по всей линии отдаления на соответствующую достоверную разницу: 0 м – 24.8 мм, Н м – 21.6 мм, 5Н м – 18.1 мм, 10Н м – 8.8 мм ($НСР_{05}=3.04$);

- через пять лет на участке с кулисами произошло увеличение проективного покрытия житняка песчаного и ковра кровельного;

- через десять лет после посева кулис на участке пастбища в составе доминантных видов были отмечены тонконог гребенчатый и астрагал лисовидный;

- урожайность пастбища с кулисами, начиная с третьего года вегетации терескена, была выше контрольных участков естественного пастбища в 1.3-3.9 раз по годам исследования.

Если без ущерба для возобновительных процессов изымать 65-75% годичного прироста растений, то будут созданы предпосылки для ежегодного воспроизводства растительной массы, что обеспечит устойчивость и долголетие аридного пастбища до 20 лет и более.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

Барбанов А.Т. 2014. Теория и практика разработки систем агролесомелиоративных почвозащитных мероприятий в адаптивно-ландшафтном земледелии // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. № 4 (48). С. 28-31.

Барбанов А.Т. 2015. Роль и место агролесомелиорации в адаптивно-ландшафтном земледелии // Известия

Нижевожского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. № 2 (38). С. 22-31.

Доспехов В.А. 1985. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат. 336 с.

Кулик К.Н. 2013. Геоинформационный анализ очагов опустынивания на территории Астраханской области // Аридные экосистемы. Т. 19. № 3 (56). С. 87-94. [*Kulik K.N.* 2013. Geoinformation Analysis of Desertification Hotspots in Astrakhan Oblast // Arid Ecosystems. Vol. 3. No. 3. P. 178-183.]

Линдеман Г.В. 2001. Экологическая оценка лесоразведения в полупустыне // Доклад на XIX чтениях памяти акад. В.Н. Сукачева «Экологические процессы в аридных биогеоценозах». М.: Изд-во РАН. С. 84-111.

Методика эффективного освоения многовариантных технологий улучшения сенокосов и пастбищ в Северном природно-экономическом районе. 2015 / Ред. А.А. Кутузова, К.Н. Привалова, Н.И. Георгиади. М.: Угрешская типография. 68 с.

Павловский Е.С. 1973. Устройство агролесомелиоративных насаждений М.: Лесная промышленность. 128 с.

Сурмач Г.П. 1976. Водная эрозия и борьба с ней. Л.: Гидрометеоиздат. 254 с.

Шагайпов М.М., Булахтина Г.К., Пучков М.Ю. 2009. Коренное улучшение пастбищных угодий Астраханской области // Методические рекомендации. Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. М. 40 с.

Gibbens R.P., McNeely R.P., Havstad K.M., Beck R.F., Nolan B. 2005. Vegetation changes in the Jornada Basin from 1858 to 1998 // Journal of Arid Environment. P. 651-668.

Makhmudov M.M. 2007. Pasture agrophytocenoses for small-hummocky sand of the Kyzylkum desert. Samarkand. P. 44-53.

УДК 332.146.6 (447.9)

**К ВОПРОСУ О ПОКАЗАТЕЛЕ АССИМИЛЯЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОЧВ
КАК СОСТАВНОЙ ЧАСТИ ПАСПОРТА ПОЧВ
И АССИМИЛЯЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ЛАНДШАФТОВ**

© 2020 г. Н.М. Исмаилов, С.И. Наджафова, Ф. Кейсеровская, А.С. Гасымова

*Институт микробиологии Национальной академии наук Азербайджана
Азербайджан, AZ 1025, г. Баку, ул. М. Мушвига, д. 103. E-mail: ismaylovn@mail.ru*

Поступила в редакцию 06.05.2019. После доработки 12.08.2019. Принята к публикации 30.09.2019

Объектом исследования являются основные типы почв различных биоклиматических ландшафтов Азербайджана. Основными методами исследований явился сравнительно-почвенно-биологический. Впервые проведена оценка среднегодовых объемов ассимиляции углеводородных загрязнений в почвах различных биоклиматических ландшафтных зон Азербайджана. Результаты проведенных исследований показывают возможность и необходимость введения в показатели «Паспорта» почв данных об их ассимиляционном потенциале в отношении того или иного загрязняющего вещества. Предлагаемый подход, основанный на оценке ассимиляционного потенциала почвенных экосистем как составной и неотъемлемой части экокаркаса страны, и включение этих показателей в паспорта почв позволит объективно оценить уровень деградации почвенного покрова как природного капитала и интенсивность его деградации или восстановления, разработать научные основы природопользования с обеспечением минимальных экологических рисков в соответствии с парадигмой устойчивого развития.

Ключевые слова: почва, загрязнение, ассимиляционный потенциал, коэффициент минерализации, паспорт почв, научные основы природопользования.

DOI: 10.24411/1993-3916-2020-10085

В период все более нарастающего антропогенного и техногенного воздействия на природную среду обитания человека ландшафтное прогнозирование становится одним из важнейших направлений в экологии. Экологическое районирование – один из путей достижения этой цели.

При разработке прогноза изменения почвенного покрова Азербайджана под воздействием антропогенных и техногенных факторов актуальное значение приобретает изучение устойчивости биогеоценозов при загрязнении их различными поллютантами. В то же время до настоящего времени не исследован глубоко и в достаточной степени ассимиляционный потенциал и устойчивость природных сред Азербайджана к загрязнению поллютантами, широко используемыми в агропроизводстве.

В этой связи наряду с изучением закономерностей строения и функционирования природных систем Азербайджана все более актуальной становится разработка принципов и подходов определения ассимиляционного потенциала различных классов почв. В теоретическом и научном плане важность этих исследований определяется необходимостью сохранения сырьевого, средообразующего и рекреационного потенциала ландшафтов страны, сохранения и восстановления почвенного плодородия, охраны и поддержания качества природных вод и воздушного бассейна. Необходимость подобных исследований связана с тем, что в разнообразных средах обитания биогеоценозы в зависимости от их конкретного структурно-динамического состояния, естественно, не будут обладать сходным ассимиляционным потенциалом и степенью устойчивости к воздействию поллютантов. В практическом плане результаты этих исследований должны выявить наиболее чувствительные к загрязнениям типы ландшафтов (выявить наиболее слабое звено в системе ландшафтов страны) и лечь в основу разработки практических мероприятий по охране различных сред обитания в случае их загрязнения, а также своевременного использования технологий по их реабилитации и восстановлению их естественного равновесия.

Очевидно, что ассимиляционный ресурс является непростым для социо-экономической оценки, что объясняется сложностью его количественного измерения. Поэтому необходимо исследование ассимиляционных способностей почвенного покрова страны для решения в дальнейшем перспективных направлений эффективного природопользования и развития органического земледелия. Рациональное использование природных ресурсов, несомненно, должно опираться на положения теории управления, учитывающей устойчивость экосистем и параметрическую чувствительность к антропогенным воздействиям (Кулик и др., 2012).

Практическое значение районирования территории Азербайджана по условиям формирования ассимиляционного потенциала почвенных экосистем состоит в том, что в условиях нарастающего техногенного давления на экосистемы страны оно необходимо для пространственного обобщения биоассимиляционной емкости почв различных биоклиматических ландшафтов в случае загрязнения их органическими поллютантами.

Ассимиляционный потенциал ландшафтов как составной части экологического каркаса страны означает их способность к буферности и нейтрализации негативных воздействий наружных возмущающих причин (естественных и антропогенных). Величина ассимиляционной емкости зависит от множества природных и антропогенных факторов, физических и химических свойств, присущих экосистеме. Но решающую роль при этом играют биологические процессы.

Научные работы по проблеме оценки ассимиляционной емкости различных территорий активно ведутся в рамках изучения воздействия загрязняющих веществ на экосистемы и их компоненты. Показано, что ассимиляционный потенциал ландшафтов на значительной территории Украины уже превышен (Ефремов, 2009). На основе сочетания физических, химических и биологических параметров разработан метод оценки ассимиляционного потенциала водных экосистем и показано, что практически во всех водоемах Украины он нарушен; также осуществлена оценка ассимиляционного потенциала почв Крыма в отношении тяжелых металлов (Ярош, 2014). Показана способность растительных ценозов аккумулировать и осуществлять разложение нефтяных углеводородов (Квеситадзе и др., 2005). Водные экосистемы также обладают определенной способностью участвовать в процессах самоочищения ландшафтов от углеводородных загрязнений (Соколова, 2012). В Азербайджане исследований в области оценки ассимиляционного потенциала почв в отношении к загрязняющим веществам не проводилось.

В этой связи мы сочли необходимым выявить закономерности ассимиляционного потенциала некоторых типов почв Азербайджана в отношении органических загрязняющих веществ. Принимая во внимание, что в настоящее время нефть и нефтепродукты являются одним из основных загрязняющих веществ, на первом этапе нами оценен ассимиляционный потенциал почв в отношении углеводородных загрязнений.

В связи с необходимостью разработки классификации земель по их ассимиляционному потенциалу в отношении органических загрязняющих веществ и районирования почв различных биоклиматических ландшафтных зон Азербайджана и с целью выделения особо чувствительных земель, подлежащих охране, и минимизации экологических рисков в процессе природопользования цель научной работы состояла в проведении исследований по ранжированию основных классов почв страны по их ассимиляционному потенциалу в отношении к загрязняющим веществам органической природы – нефтяным углеводородам.

Объекты и методы исследований

Объектом исследования являлись основные типы почв различных биоклиматических ландшафтов Азербайджана (Бабаев и др., 2006). Основным методом исследований был сравнительно-почвенно-биологический. Использовали данные, отраженные в показателях различных типов почв, отраженных в паспортах этих почв (Бабаев и др., 2006). В пробах почв определялась общая численность сапротрофных, а также углеводородокисляющих микроорганизмов, согласно общепринятым методам (Практикум по микробиологии, 2005). Коэффициент минерализации (K_M) культур определяли по отношению интенсивности продуцирования углекислого газа (А) к интенсивности поглощения кислорода (Б): $K_M = A/B$. Значение этого показателя показывает способность микроорганизма осуществлять процесс деградации углеводорода вплоть до полной минерализации субстрата и интенсивность этого процесса (Исмаилов и др., 1984). Оценку

ассимиляционного потенциала почв определяли по формуле:

$$B=N*K, \quad (1)$$

где B – величина бактериальной биодеградации нефтяных углеводородов (мгУВ/г/сут), N – численность углеводородокисляющих бактерий (КОЕ/г почвы), K – количество углеводородов, которые окисляются одной бактериальной клеткой, рассчитанное К. Зобеллом ($3.76/10^{-8}$ мг/кл/сут; Рубцова, 2003).

Результаты и обсуждение

Оценка ассимиляционного потенциала почв различных классов определялась по показателю бактериальной деградации углеводородов, которая рассчитывалась по численности углеводородокисляющих микроорганизмов в почвах (табл.). Как следует из данных таблицы, ассимиляционный потенциал разных типов почв сильно различается: наименьший ассимиляционный потенциал по утилизации углеводородных загрязнений характерен для солончаков (1 т загрязнений в год на 1 га). Наибольшим ассимиляционным потенциалом обладают горные черноземы и каштановые почвы – 12.2-14.1 т загрязнений в год. В сравнительном плане ассимиляционный потенциал в отношении к загрязняющим веществам углеводородного характера выше для почв, характеризующихся высоким содержанием гумуса и рН среды, близкой к нейтральной (не ниже 6.4 и не выше 7.5). На основании полученных данных можно в первом приближении выявить регионы с наиболее уязвимым ассимиляционным потенциалом, где содержание органических загрязняющих веществ и показатели рН в почвенном покрове может определять ассимиляционную емкость почв. В почвах аридных зон страны наблюдается усиление антропогенной нагрузки, которое еще более усугубляет слабую способность этих природных ландшафтов противостоять процессам деградации.

Таблица. Показатели ассимиляционного потенциала и коэффициента минерализации углеводородов в различных типах почв Азербайджана.

№	Почва	$\Sigma T > 10^\circ$	КУ	Гумус, %	УОМ, КОЕ, титр, тыс./г почвы	Ассимиляционный потенциал, т/год	К _м	рН
1	Горно-луговые	1000-2000	>1	15.5	244980±0.4	4.86	0.18	4.3
2	Горнолесные бурые	2500-3000	1.2-2.0	12.7	185940±0.3	6.7	0.22	5.9
3	Горно-коричневые	3600-4400	0.5-0.4	7.2	280160±0.3	10.0	0.43	7.2
4	Горные чернозёмы	3800-4500	0.6-0.7	7.3	369000±0.4	14.1	0.51	6.4
5	Желтоземно-глеевые	2000-4000	0.64-1.63	4.3	125400±0.2	4.5	0.23	5.8
6	Каштановые	3800-4500	0.3-0.5	4.5	352000±0.5	12.2	0.36	7.2
7	Сероземные	4200-4800	0.10-0.25	2.0	144520±0.3	5.1	0.15	8.0
8	Серо-бурые	4000-4500	0.10-0.15	1.3	115440±0.2	4.0	0.10	8.0
9	Солончаки и солонцы	3600-4400	0.10-0.15	–	28800±0.1	1.0	0.01	>8.6

Примечания к таблице: УОМ – численность углеводородокисляющих микроорганизмов.

Показатели ассимиляционного потенциала (степень устойчивости к загрязнению углеводородными веществами) коррелирует с показателями коэффициента минерализации углеводородов К_м, который характеризует интенсивность разложения углеводородов в почве в случае их загрязнения этими веществами.

Полученные данные свидетельствуют о том, что углеводородокисляющие микроорганизмы

являются составной частью микробиоценоза исследуемых почв и составляют около 5.0-9.0% от численности сапротрофов.

Более высокое соотношение УОМ в общем числе сапротрофных микроорганизмов в горнолесных бурых, горных черноземах, каштановых и горно-коричневых почвах по сравнению с почвами аридных зон – серо-бурых и сероземов может быть связано с более высоким биоразнообразием фитоценозов и их высокой продуктивностью. Так, в горно-коричневых почвах биомасса фитоценозов составляет 11.8-27.4 т/га, а в сероземах и серо-бурых почвах – 5-9.4 га (Бабаев и др., 2006). Нефтяные углеводороды структурно являются одними из природных компонентов почв, и в этой связи выработался процесс их окисления с участием почвенных микроорганизмов (Скрябин, Головлева, 1976). Наличие УОМ в комплексе микробиоценозов в этих почвах может быть связано с фоновым присутствием в этих почвах сходных по своему составу с углеводородами веществ природного происхождения, например, продуктов разложения растительного опада. Так, высокомолекулярные углеводороды обнаружены в кутикулярных клетках насекомых и высших растений, которые выполняют важную защитную функцию, а также могут играть роль феромонов (Cheedbrough, Kolattukudy, 1988). Кроме того, практически все группы микроорганизмов, грибов и водорослей способны синтезировать углеводороды (Дедюхина и др., 1980). Их содержание в микроорганизмах варьирует: для бактерий оно составляет 0.02-2.69%, для грибов – 0.06-0.70%, для водорослей – 0.03-2.88%.

Полученные данные подтверждают мнение о том, что единого ПДК для всех веществ и для всех типов почв вообще не может быть (Добровольский, Никитин, 1986). В то же время ПДК содержания нефти и нефтепродуктов в почвах до настоящего времени не установлены, хотя в законодательствах многих стран Западной Европы ПДК по нефти и отдельным видам углеводородов установлены.

Для повышения эффективности использования земель сельскохозяйственного назначения, предотвращения выбытия таких земель из сельскохозяйственного оборота и их деградационных изменений, а также определения степени пригодности почв для использования в сельском хозяйстве особую значимость приобретают работы по разработке и составлению Паспорта почвы. В связи с этим особую значимость приобретают показатели, характеризующие производительную способность почвы и ее экологическую устойчивость, которые согласно современным требованиям к оценке уровня плодородия почвы, отражаются в документе, называемом «Паспорт почвы» (ГОСТ 17.4.2.03-86 «Охрана природы. Почвы. Паспорт почвы»). Стандарт устанавливает требования к составлению паспорта почв с целью определения и контроля загрязненности и деградации для установления мероприятий по их охране, повышению плодородия и рациональному использованию.

В современной классификации почв Азербайджана (Бабаев и др., 2006) и при разработке «Паспорта» почв эко-биоморфогенетическая диагностика основных типов и подтипов таксономических единиц проведена по генетическим горизонтам (А, В, С) по широкому ряду физико-химических и биологических показателей. Из биологических показателей показана общая численность беспозвоночных животных и их биомасса, ферментативная активность почв, общая численность микроорганизмов. Общая численность микроорганизмов, отраженная в паспортах почв, свидетельствует в определенной степени об их биогенности, однако не дает достоверной информации об ассимиляционном потенциале в отношении загрязняющих веществ, таких как нефтяные углеводороды, пестициды и другие.

Результаты проведенных исследований показывают возможность и необходимость введения в показатели «Паспорта» почв наряду с показателями источников загрязнения и деградации почв данных об их ассимиляционном потенциале в отношении того или иного загрязняющего вещества. Необходимость введения в «Паспорта» почв показателя их ассимиляционного потенциала, в конечном итоге отражающего их самоочищающую способность, диктуется тем, что почвенный покров на всей территории страны подвергается интенсивному антропогенному и техногенному воздействию, в том числе нефтью и нефтепродуктами. Достаточно отметить тот факт, что общая площадь почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами составляет более 12 тыс. га. (Состояние ..., 1997). В паспортах почв показатель ассимиляционного потенциала будет одним из основополагающих показателей, отражающих актуальную буферность и самоочищающую способность почв в различных биоклиматических ландшафтных зонах в отношении тех или иных загрязняющих веществ. Кроме того, в паспортах всех типов и подтипов почв должны быть отражены

показатели ПДК по всем загрязняющим веществам, которые в принципе могут быть рассчитаны в соответствии с их ассимиляционной емкостью по этим веществам. Введение в паспорта почв данных об их ассимиляционном потенциале и интенсивности разложения органических загрязнений придаст им большую экологичность, даст возможность разрабатывать системы управления почвенными ресурсами страны, в том числе и прежде всего почвами аридных экосистем. Принято, что зоны расположения полупустынь относятся к потенциально малоустойчивым к внешним воздействиям и по 7-балльной шкале оцениваются всего в 1 балл, существенен риск деградации природных экосистем (Мартынов, Артюхов, 1994).

С другой стороны проведенные исследования являются только начальным этапом, в ближайшие годы необходимо проведение исследований для оценки ассимиляционного потенциала почв по отношению к пестицидам и другим химическим веществам, широко используемым в агропроизводстве. Достаточно отметить такой факт: Азербайджан по удельному расходу ядохимикатов на каждый гектар орошаемых земель занимал одно из ведущих мест в бывшем Союзе. Так, в целом по Азербайджану ядохимикатами обрабатывалось более 840 тыс. га, в том числе гербицидами – порядка 400 тыс. га (Состояние ..., 1997). Только в 1990 году в республике было использовано 35 тыс. тонн различных ядохимикатов и более 400 тысяч тонн минеральных удобрений. При среднесоюзном уровне 1.5 кг в Азербайджане использовалось 14 кг ядохимикатов. Грубое нарушение правил хранения, применения и транспортировки, а также отсталая технология орошения и промывки почв приводила к тому, что значительное количество их, вымываясь, попадала в реки и дренажные коллекторы, а оттуда – в море. Причина сильного загрязнения почвенного покрова пестицидами в том, что в предшествующие годы в стране не были проведены исследования в области ассимиляционного потенциала почвенного покрова различных биоклиматических и ландшафтных зон в отношении химикатов. Включение в паспорта почв данных об их ассимиляционном потенциале в отношении того или иного пестицида даст возможность научно обоснованного выбора химикатов для использования для каждого типа почв в зависимости от его ассимиляционной емкости.

Было бы стратегически правильным с точки зрения текущих и перспективных экологических рисков в Азербайджане почвы аридных зон – зоны полупустынь, площадь которых составляет более половины всей территории страны и характеризующихся слабым ассимиляционным потенциалом, использовать в рамках концепции адаптивного землепользования в основном под многолетние посадки, например, виноградники, фруктовые сады, лесные насаждения и т.д., в которых будут ослаблены процессы дефляции и эрозии, высока биогенность, соответственно и самоочищающая способность. По крайней мере в ближайшие годы желательно довести площадь зеленых насаждений в этой зоне минимум до 20-30%. И в этом случае уже в ближайшей перспективе постепенно может быть положен конец фрагментированности экологического каркаса страны, а многолетние насаждения будут выполнять роль связующего звена, так называемых коридоров (транзитных территорий), обеспечивающих необходимую ландшафтную взаимосвязь между ключевыми территориями – ландшафтами Большого и Малого Кавказа и Талышских гор. Таким образом, на территории страны сформируется единая, не фрагментированная система экокаркаса (экологическая сеть) с высоким ассимиляционным потенциалом. В этом же ключе необходимо создание вокруг грязевых вулканов, которые занимают большие площади в аридной зоне страны (16 тыс. км²) сплошных многоярусных зеленых насаждений – кустарников и деревьев, которые будут обладать высокой ассимиляционной емкостью поглощения загрязняющих веществ и выполнять роль буферных зон в районах расположения грязевых вулканов. Этот стратегически важный подход позволит повысить мощь, продуктивность и объем природно-ресурсного потенциала с высоким ассимиляционным потенциалом, а также экосистемные услуги ландшафтов аридных зон, ограничит расширение площади аридной территории в условиях современного климатического потепления. Достаточно отметить, что за последние 30 лет среднегодовая температура в Азербайджане повысилась в среднем на 0.5°C. Представляется, что, как и в Израиле (Спринцын и др., 2018), это окажет положительное воздействие на ландшафты аридных зон Азербайджана, в перспективе смягчит влияние климатических факторов на аридизацию этой зоны (Залибеков, 2011).

Предложенный подход соответствует разработанным в науке о природе социально-экономическим принципам поддержания экологического равновесия, в основе которого лежит принцип самодостаточности: развитие природопользования в соответствии с ресурсными

возможностями. Согласно этому принципу, целесообразное экологическое равновесие (100% полезности) имеет место при соотношении площади преобразованных и естественных экосистем 2/3 (Реймерс, 1990). На территории Азербайджана это соотношении полностью обратное (Исмаилов, 2006). Данная стратегическая задача в полной мере соответствует руководящим принципам формирования Общеευропейской экологической сети (Географические основы ..., 2012; Руководящие принципы ..., 2000).

Противодействие техногенным воздействиям со стороны природных ландшафтов обеспечивается природными комплексами, ассимиляционный потенциал которых к внешнему воздействию определяется массой, эффективностью и гармоничностью структуры биоразнообразия. Почвенный покров является составной частью единого ассимиляционного поля ландшафтов, при этом значимость компонентов ассимиляционного потенциала – воздуха, воды и почвы должна быть разной, что обусловлено различием в скоростях ассимиляции загрязнений в разных экосистемах. В этой связи для того, чтобы оценить емкость ассимиляционного потенциала ландшафтов как единого целого, необходимо наряду с почвой оценить также ассимиляционный потенциал всех его составляющих – фитоценозов данной ландшафтной зоны, водных экосистем (водоемов, поверхностных и грунтовых вод, воздушной среды как активных участников процессов самоочищения данной ландшафтной зоны, представляющей собой единую биосистему – биом. Во всяком случае, ассимиляционный потенциал ландшафтов будет определяться структурой и весом составляющих его природных комплексов. Эти данные, которые дадут оценку ассимиляционного потенциала всех ландшафтов страны создадут научную основу системы эко-биомониторинга и управления природными средами и выбора уровня экологического риска в пределах от минимального до максимально допустимого.

Выводы

С использованием первичных данных из исследования М. Бабаева с соавторами (2006) и на основе собственных исследований получены данные о скоростях разложения и ассимиляции углеводородных веществ в различных типах почв Азербайджана, что позволяет выявить из них наиболее чувствительные к загрязнению веществами углеводородного характера и обосновать необходимость включения таких показателей в паспорта почв.

Результаты оценки ассимиляционного потенциала природных ландшафтов страны в отношении к загрязняющим веществам позволит в перспективе оценить экологическую ёмкость как отдельных регионов, так и территории всей страны.

Практическую важность имеют предложения долгосрочного прогнозирования ассимиляционного потенциала в почвах различных биоклиматических зон Азербайджана, а также предлагаемая система показателей для количественной оценки ассимиляционной емкости экосистем страны и регионов.

Почвенные ресурсы страны, как и другие компоненты природных ландшафтов лишь частично можно считать возобновимыми: если нагрузка на природные ландшафты будет превышать их буферность и ассимиляционную емкость, способность к самовосстановлению, то в результате необратимых последствий это может завершиться потерей их устойчивости, приведет к их полной деградации в результате загрязнения, эрозии, засоления и т.д., и к полному исчезновению. Поэтому одним из ключевых вопросов экономики природопользования является исследование способности или возможности ассимиляционного потенциала природных ландшафтов к самовосстановлению. Предлагаемый подход, основанный на оценке ассимиляционного потенциала почвенных экосистем как составной и неотъемлемой части экокаркаса страны, и включение таких показателей в паспорта почв позволит объективно оценить уровень деградации почвенного покрова как природного капитала и интенсивность его деградации или восстановления, а также разработать научные основы природопользования с обеспечением минимальных экологических рисков в соответствии с парадигмой устойчивого развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабаев М.П., Джафарова Ч.М., Гасанов В.Г. 2006. Современная классификация почв Азербайджана. Баку: Элм. 359 с.
- Географические основы формирования экологических сетей в России и Восточной Европы. 2012 // Известия РАН. Серия географическая. № 1. С. 128-130.

- ГОСТ 17.4.2.03-86. Охрана природы. Почвы. Паспорт почв. 1987 [Электронный ресурс <http://docs.cntd.ru/document/1200012799> (дата обращения 06.04.2019)].
- Дедюхина Э.Г., Желифонова В.П., Ерошин В.К. 1980. Углеводороды микроорганизмов // Успехи микробиологии. № 15. С. 84-98.
- Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. 1986. Экологические функции почвы. М: Издательство МГУ. 135 с.
- Залибеков З.Г. 2011. Аридные земли мира и их динамика в условиях современного климатического потепления // Аридные экосистемы. Т. 17. № 1 (46). С. 5-13. [Zalibekov Z.G. 2011. The Arid Regions of the World and their Dynamics in Conditions of Modern Climatic Warming // Arid Ecosystems. Vol. 1. No. 1. P. 1-7.]
- Ефремов А.В. 2009. Природные ресурсы прибрежной зоны Крыма и их оценка // Симферополь: ЧП «Носков А.В.», 508 с.
- Исмаилов Н.М., Гаджиева В.И., Гасанова М.Г. 1984. Коэффициент минерализации углеводов как показатель самоочищающей способности нефтезагрязнённых почв // Известия АН АзССР, серия биологическая. № 6. С. 76-85.
- Исмаилов Н.М. 2006. Глобалистика и экология Азербайджана. Баку: Элм. 192 с.
- Квеситадзе Г.И., Хатисаивили Г.А., Садунишвили Т.А., Евстигнеева З.Г. 2005. Метаболизм антропогенных токсикантов в высших растениях. М.: Наука. 198 с.
- Кулик К.Н., Салугин А.Н., Сидорова Е.А. 2012. Динамическая устойчивость аридных экосистем // Аридные экосистемы. Т. 18. № 2 (51). С. 28-34. [Kulik K.N., Salugin A.N., Sidorova E.A. 2012. Dynamic Stability of Arid Ecosystems // Arid Ecosystems. Vol. 2. No. 1. P. 86-90.]
- Мартынов А.С., Артюхов В.В. 1994. Интегральная оценка устойчивости (уязвимости) экосистем // Состояние биологических ресурсов и биоразнообразия России и ближнего зарубежья (1988-1993 гг.). М.: ВНИИприрода. С. 17-18.
- Практикум по микробиологии. 2005 / Ред. А.И. Нетрусов. М.: Академия. 608 с.
- Реймерс Н.Ф. 1990. Природопользование. М.: Мысль. 638 с.
- Рубцова С.И. 2003. Оценка бактериального самоочищения вод от нефтяных углеводородов в прибойной зоне акватории Севастополя (Черное море) // Экология моря. Вып. 64. С. 95-98.
- Руководящие принципы формирования Общеввропейской экологической сети. 2000 // Рабочая группа по Экологической сети Северной Евразии. Информационные материалы по экологическим сетям / Сост. Г. Бенетт. Вып. 4. М.: ЦОДП. 31 с.
- Скрябин Г.К., Головлева Л.Е. 1976. Использование микроорганизмов в органическом синтезе. М.: Наука. 236 с.
- Соколова В.В. 2012. Углеводородокисляющие бактерии и ассимиляционный потенциал морской воды Северного Каспия. Автореф. ... дисс. канд. биол. наук. Астрахань. 18 с.
- Состояние окружающей среды Азербайджанской Республики. 1997. Баку. 95 с.
- Спринцын С.М., Шапиро М., Спринцын М., Зайденберг Р., Денисюк Е. 2018. Трансформация полупустынных ландшафтов юго-востока Израиля под влиянием лесонасаждений сосны алеппской (*Pinus Halepensis*) // Аридные экосистемы. Т. 24. № 1 (74). С. 34-41. [Sprintsin S.M., Shapiro M., Sprintsin M., Zaidenberg R., Denisyuk E. 2018. Effect of Aleppo Pine Plantations (*Pinus Halepensis*) on the Transformation of the Semi-Desert Landscapes of Southeast Israel // Arid Ecosystems. Vol. 8. No. 1. P. 22-27.]
- Ярош О.Б. 2014. Оценка ассимиляционного потенциала почв Украины // Актуальные проблемы и перспективы развития экономики: XIII Международная научно-практическая конференция. Гурзуф. С. 111-113.
- Cheedbrough T.M., Kolattukudy P.E. 1988. Microsomal preparation from animal tissue catalyzes release of carbon monoxide from a fatty aldehyde to generate an alkane // Journal of Biology. Vol. 263. P. 2738-2743.

УДК 631.46:631.48:930.26

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА СОСТОЯНИЯ МИКРОБНЫХ СООБЩЕСТВ ПОЧВ СТЕПЕЙ ВОЛГО-ДОНСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ¹

© 2020 г. Т.С. Дёмкина

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
Россия, 142290, г. Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, д. 2. E-mail: demkina-t@rambler.ru*

Поступила в редакцию 16.05.2019. После доработки 12.09.2019. Принята к публикации 30.09.2019

Почвенные микроорганизмы являются неотъемлемой составной частью почвы. Практически все процессы, протекающие в ней, в той или иной степени связаны с жизнедеятельностью микроорганизмов. Поэтому характеристика микробного сообщества относится к числу важнейших диагностических показателей, отражающих условия почвообразования. Палеопочвы сохраняют ряд свойств с момента погребения и это отражено в соответствующих параметрах их микробного сообщества: в активной биомассе микроорганизмов, эколого-трофической структуре микробного сообщества, индексе олиготрофности и др. Исследованы микробные сообщества разновозрастных почв различных природных районов Волго-Донского междуречья с целью выяснения закономерностей их пространственно-временного изменения в связи с имеющимися условиями почвообразования. Установлено, что характеристика микробных сообществ современных почв сухо- и пустынно-степной зон юго-востока Русской равнины в большей мере отражает специфику местных условий почвообразования. Так, при одной подтиповой принадлежности почвы, находящиеся в различных литолого-геоморфологических и ландшафтных условиях весьма заметно могут отличаться по микробиологическим параметрам. И наоборот, характеристики микробных сообществ различных почвенных типов (подтипов) могут быть достаточно близки, если последние приурочены к сходным элементам рельефа, почвообразующим породам, уровням залегания грунтовых вод. Состояние микробных сообществ в тот или иной исторический период в значительной мере определяется закономерностями эволюции конкретного почвенного ареала (ландшафта) и вековой изменчивостью биоклиматических условий. В связи с этим возникает местная специфика в динамике состояния микробных сообществ и их структурно-функциональной организации.

Ключевые слова: степь, разновозрастные каштановые и светло-каштановые почвы, микробные сообщества.

DOI: 10.24411/1993-3916-2020-10086

Характеристика микробного сообщества почвы относится к числу важнейших диагностических показателей, отражающих условия почвообразования, поскольку почвенные микроорганизмы участвуют в той или иной степени практически во всех процессах, протекающих в ней. Проведенные микробиологические исследования подкурганых палеопочв сухих и пустынных степей Нижнего Поволжья показали (Демкина и др., 2000, 2004), что в них до настоящего времени сохраняются микробные сообщества, существовавшие во время сооружения археологических памятников. Это подтверждено выявленными закономерностями распределения численности микроорганизмов различных трофических групп в курганных насыпях, погребенных и современных почвах (Демкина и др., 2007), данными определения возраста микробной фракции с использованием метода ¹⁴C атомной масс-спектрометрии (Demkina et al., 2008). Сохранению микроорганизмов прошлых эпох способствовали их адаптационные механизмы выживания (анабиоз, переход бактерий в наноформы и др.) в неблагоприятных экологических условиях (Бухарин и др., 2005; Вайнштейн и др., 2000).

¹ Работа выполнена по теме Государственного задания № АААА-А18-118013190175-5 «Развитие почв в условиях меняющегося климата и антропогенных воздействий».

С применением электронной микроскопии установлено, что в горизонте А1 подкурганых каштановых палеопочвах 80% клеток относятся к наноформам (их объемы не превышают 0.09 мкм^3), а в современном аналоге – 60% (Каширская и др., 2010). Цитологические исследования искусственно образованных наноклеток позволили предполагать, что их формирование представляет универсальную ответную реакцию организма на неблагоприятные условия и стресс-факторы (Вайнштейн и др., 2000). Изложенные доказательства консервации в подкурганых палеопочвах микробных сообществ прошлых исторических эпох дают основания использовать различные микробиологические параметры в качестве индикаторов динамики климата, в частности, степени его увлажненности. Остается открытым вопрос о влиянии на них региональных и местных условий почвообразования.

Поэтому целью исследований было проведение сравнительного анализа состояния микробных сообществ современных и погребенных почв различных природных районов Нижнего Поволжья для выяснения пространственно-временных закономерностей изменчивости микробиологических параметров в связи с существующими региональными и местными условиями почвообразования.

Район, объекты и методы исследований

Исследования проводили в зонах сухих и пустынных степей Нижнего Поволжья в ареалах каштановых и светло-каштановых почв. Объектами изучения послужили разновозрастные подкурганые палеопочвы, приуроченные к различным природным районам и элементам рельефа Приволжской, Ергенинской возвышенностей и Прикаспийской низменности, и их современные аналоги (рис. 1).

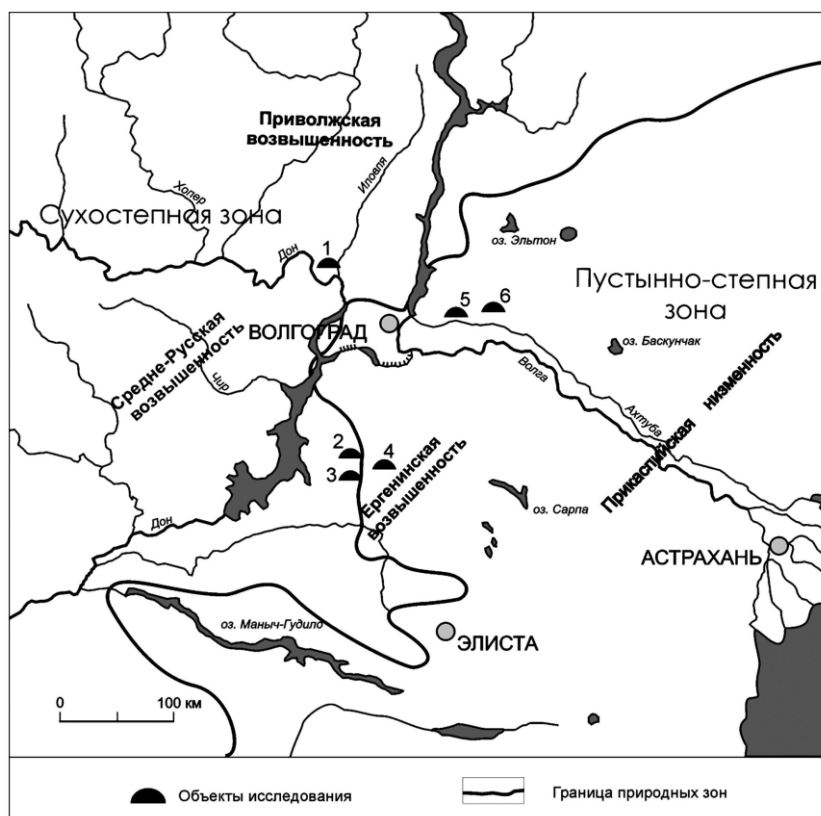


Рис. 1. Картограмма района и местоположение объектов (курганые могильники) исследований. Условные обозначения: курганые могильники в сухостепной зоне с каштановыми почвами: 1 – «Авиловский» ($49^{\circ} 22' 39.89''$ с.ш., $43^{\circ} 59' 55.80''$ в.д.) 2 – «Аксай» ($47^{\circ} 56' 27.25''$ с.ш., $43^{\circ} 59' 37.07''$ в.д.), 3 – «Перегрузное» ($47^{\circ} 53' 49.13''$ с.ш., $44^{\circ} 00' 31.56''$ в.д.); в пустынно-степной зоне со светло-каштановыми почвами: 4 – «Абганерово» ($48^{\circ} 04' 51.20''$ с.ш., $44^{\circ} 10' 48.15''$ в.д.), 5 – «Маляевка» ($48^{\circ} 42' 41.26''$ с.ш., $45^{\circ} 20' 18.22''$ в.д.), 6 – «Колобовка» ($48^{\circ} 40' 14.60''$ с.ш., $45^{\circ} 27' 73.72''$ в.д.).

Курганный могильник «Авиловский» (рубеж III-II тыс. до н.э., I в. н.э., II-III вв. н.э., XIII в. н.э.) расположен на юге Приволжской возвышенности (сухостепная зона) в 1 км к западу от с. Авилон Иловлинского района Волгоградской области на высокой правобережной первой надпойменной террасе реки Иловли (левый приток Дона), на высоте 50-60 м н.у.м. БС. По происхождению терраса аккумулятивная, ее формирование связывают с позднечетвертичной хвалынской трансгрессией Каспийского моря. Она хорошо выражена в рельефе: над уровнем высокой поймы имеет четкий уступ высотой до 10 м, а в водораздел переходит пологим склоном. Терраса расчленена многочисленными оврагами и балками, что обеспечивает хорошие условия дренированности плакорных участков и глубокое (>7-10 м) залегание грунтовых вод, которые имеют незначительную минерализацию (<1 г/л) и гидрокарбонатно-натриевый состав. Почвообразующими породами являются покровные лёссовидные суглинки мощностью 4-5 м и более, подстилаемые мелкозернистыми песками аллювиального происхождения. Естественный растительный покров представлен белопопынно-злаковой и белопопынно-ромашниково-злаковой ассоциациями. В современном почвенном покрове террасы доминируют каштановые солонцеватые засоленные почвы.

Курганный могильник «Перегрузное» (середина IV тыс. до н.э., начало II тыс. до н.э., I в. н.э., II-III вв. н.э.) находится на западном склоне Северных Ергеней в пределах сухостепной зоны (подзона каштановых почв) на плоском межбалочном водоразделе у с. Перегрузное Октябрьского района Волгоградской области. Характерными природными особенностями района являются: лёссовидные суглинистые почвообразующие породы, засоленная и карбонатная почвенно-грунтовая толща, расчлененность рельефа, сравнительно хорошие условия дренированности, комплексный почвенно-растительный покров. Грунтовые воды залегают глубже 15 м. В составе комплексов доминируют каштановые почвы различной степени солонцеватости и засоленности, а также выщелоченные лугово-каштановые почвы и солонцы. Естественный растительный покров представлен типчаково-попынной ассоциацией.

Курганный могильник «Аксай» (XVII-XVI вв. до н.э., VI в. до н.э., I в. н.э., II-III вв. н.э.) расположен в северной части Ергенинской возвышенности в зоне сухих степей в 2.5 км юго-восточнее с. Аксай Октябрьского района Волгоградской области. Он приурочен к плоской вершине водораздела на высоте 100-110 м н.у.м. БС. Почвообразующими породами являются карбонатные засоленные лёссовидные суглинки. Грунтовые воды залегают на глубине 5-7 м. В современном почвенном покрове преобладают каштановые почвы различной степени солонцеватости и засоленности.

Курганный могильник «Абганерово» (рубеж IV-III тыс. до н.э., XIX-XVII вв. до н.э., III-IV вв. н.э., IV в. н.э.) расположен около с. Абганерово Октябрьского района Волгоградской области в северной части Ергеней. Памятники приурочены к плоскому балочно-речному водоразделу, ориентированному в направлении восток-запад, находятся на высоте 90-100 м н.у.м. БС. Почвообразующими породами являются карбонатные лёссовидные суглинки. Грунтовые воды находятся на глубине свыше 15 м. Растительный покров представлен типчаково-попынной ассоциацией. В почвенно-географическом отношении исследуемый участок находится в западной части ареала светло-каштановых почв, занимающих вершину и восточный склон Ергенинской возвышенности. В 5-10 км к западу пустынно-степная зона сменяется сухостепной с каштановыми почвами.

Курганный могильник «Маляевка» (рубеж III-II тыс. до н.э., XVI-XV вв. до н.э., III-IV вв. н.э., XIII-XIV вв. н.э.) находится в 5 км к северо-востоку от с. Маляевка Ленинского района Волгоградской области. Исследуемая территория, расположенная в пределах Прикаспийской низменности, входит в полупустынную (или пустынно-степную) почвенно-географическую зону. Курганы расположены в краевой части раннехвалынской равнины, характеризующейся слабой естественной дренированностью. Она переходит крутым уступом высотой до 8-10 м во вторую надпойменную террасу Волго-Ахтубы. Участок равнинный со слабым уклоном в сторону речной долины. Расположен на высоте около 20 м н.у.м. БС. Поверхностные отложения представлены древнеморскими желто-бурыми лёссовидными засоленными суглинками мощностью до 10 м. Минерализованные грунтовые воды залегают с глубины 10 м и более. На сохранившихся участках с естественной растительностью, которые используются как пастбища, преобладает типчаково-попынная ассоциация. В составе почвенного покрова доминирует комплекс светло-каштановых почв и солонцов.

Курганный могильник «Колобовка» (1-я половина I в. н.э., I в. н.э., I-II вв. н.э. – 3 кургана, II-III вв. н.э.) расположен в Заволжье в 1 км к северу от с. Колобовка Ленинского района Волгоградской области на второй надпойменной террасе Волго-Ахтубы на высоте 10-15 м н.у.м. БС. В природном отношении район входит в зону пустынной степи Прикаспийской низменности. Участок представляет собой выровненную поверхность со слабым уклоном в западном направлении. С поверхности терраса сложена желто-бурыми лёссовидными засоленными суглинками, которые с глубины 1.5-2.5 м подстилаются песчаными отложениями. Уровень грунтовых вод свыше 10 м. Могильник находится на старозалежном участке с восстановившимся естественным растительным покровом. Доминирует полынная ассоциация. В современном почвенном покрове преобладают светло-каштановые почвы в комплексе с солонцами.

На микробиологические анализы отбирали репрезентативные почвенные образцы (из разрезов) по генетическим горизонтам с соблюдением условий стерильности. Перед проведением анализов почвенные образцы просеивали через сито с диаметром ячеек 3 мм для удаления корней и усредняли. В свежих образцах определяли комплекс различных параметров, характеризующих состояние микробных сообществ. Углерод активной микробной биомассы рассчитывали по скорости субстрат-индуцированного дыхания (Ананьева и др., 1993) с использованием коэффициента пересчета 40.04 (Anderson, Domsch, 1978). Численность микроорганизмов разных трофических групп определяли чашечным методом по общепринятой методике (Звягинцев и др., 1980). Микроорганизмы, довольствующиеся элементами питания из рассеянного состояния, учитывали на почвенном агаре, потребляющие гумус – на нитритном агаре (Теппер, 1976), использующие легкодоступное органическое вещество (растительные остатки) – на богатой органической среде. Рассчитывали индекс олиготрофности (Ко) ПА/БСх100 (Никитин и др., 1978).

Результаты и их обсуждение

Проведенный сравнительный анализ микробных сообществ современных каштановых и светло-каштановых почв различных природных районов Нижнего Поволжья выявил следующие закономерности (табл. 1).

В пределах сухостепной зоны на территории Приволжской возвышенности исследованы две почвы: каштановая слабосолонцеватая глубокосолончаковатая на целинном участке, используемом под пастбище, с проективным покрытием (ПП) 40% и каштановая остаточно-солонцеватая незасоленная на залежном участке (около 40 лет) с ПП 60%. Хотя объекты и расположены на расстоянии 40 км друг от друга, но находятся в однотипных литолого-геоморфологических условиях: высокие первые надпойменные террасы рр. Иловля и Бердия соответственно, сложенные аллювиальными суглинками. Вероятно, именно поэтому состояние микробных сообществ этих почв оказалось практически одинаково. Активная микробная биомасса (МБ) составила 219-220 мкгС/г почвы, суммарная численность микроорганизмов различных трофических групп (СЧ) 17-27 млн. КОЕ/г почвы. Эколого-трофическая структура микробного сообщества, представленная соотношением численности микроорганизмов (% от СЧ), использующих элементы питания из рассеянного состояния (ПА²), минерализующих труднодоступные органические вещества – гумус (НА³), питающихся легкодоступным органическим веществом – растительными остатками (БС⁴), составила 54-59:5-3:41-38. Коэффициент олиготрофности (Ко=ПА:БС*100), характеризующий способность микробного сообщества обитать в условиях с низкими концентрациями питательных веществ и использовать их из рассеянного состояния, сравнительно низкий и составляет 131 и 157 (здесь и далее приведены средневзвешенные величины для профиля А1+В1+В2).

На Ергенинской возвышенности в пределах сухо- и пустынно-степной зон изучены:

– каштановая солонцеватая глубокосолончаковатая почва (К2, табл. 1) на целинном участке (пастбище) с ПП 40-50%. Она приурочена к межбалочному водоразделу, сложенному с поверхности лёссовидными суглинками;

– каштановая остаточно-луговая солонцеватая глубокосолончаковатая почва (К2, табл. 1)

² ПА – почвенный агар.

³ НА – нитратный агар.

⁴ БС – богатая органическая среда.

на залежи (15 лет) с ПП 50-60%. Участок приурочен к низкой первой надпойменной террасе р. Есауловский Аксай с аллювиальными суглинисто-песчаными отложениями;

– светло-каштановая среднесолонцеватая глубокосолончаковатая почва (К1, табл. 1) на целинном участке с ПП 30-40% (пустынно-степная зона). Участок приурочен к межбалочному водоразделу. Почвообразующие породы – лёссовидные суглинки.

Таблица 1. Пространственная изменчивость микробиологических параметров* почв сухих и пустынных степей Нижнего Поволжья в связи с местными условиями почвообразования.

Природный район	Зона, почва	Элемент рельефа	Микробная биомасса, мкгС/г почвы	Суммарная численность микроорганизмов млн. КОЕ/г почвы	Эколого-трофическая структура, % ПА:НА:БС	Ко
Приволжская возвышенность	Сухо-степная, К2	1-я высокая терраса р. Иловля	220	17	54:5:41	130
		1-я высокая терраса р. Бердия	219	27	59:3:38	157
Ергенинская возвышенность	Сухо-степная, К2	Водораздельная поверхность	195	23	57:3:40	145
		1-я низкая терраса р. Ес. Аксай	546	66	74:8:18	412
	Пустынно-степная, К1	Водораздельная поверхность	406	57	50:15:35	145
Прикаспийская низменность	Пустынно-степная, К1	Ранне-хвалынская равнина	107	17	66:4:30	216
		2-я терраса Волго-Ахтубы	35	44	70:6:24	294

Примечания к таблицам 1 и 2: * – даются параметры средневзвешенных величин для почвенного профиля для горизонтов А1+В1+В2.

Таким образом, местные современные условия почвообразования на различных участках Ергенинской возвышенности, к которым приурочены исследованные объекты, заметно отличаются (водоразделы и речные террасы, аллювиальные и лёссовидные отложения, целина и залежь). Это нашло отражение и в характеристике микробных сообществ изученных почв. Активная микробная биомасса изменялась от 195 до 546 мкгС/г почвы, СЧ – от 23 до 66 млн. КОЕ/г почвы, соотношение ПА:НА:БС=50-74:3-15:18-40, коэффициент олиготрофности – от 145 до 412 (табл. 1).

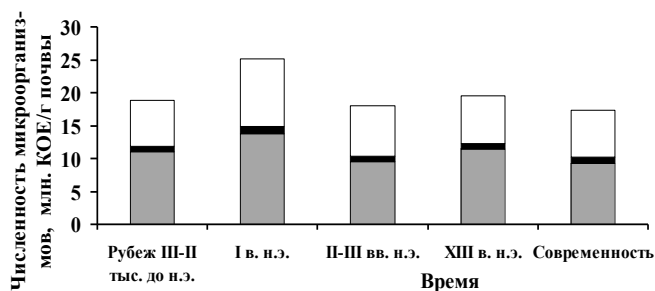
В пустынно-степной зоне Прикаспийской низменности изучено два объекта:

– светло-каштановая солонцеватая глубокосолончаковатая почва (К1, табл. 1) на залежном участке (около 20 лет), используемом под пастбище (сбитый выгон). ПП не превышает 30%. Участок приурочен ко второй надпойменной таррасе Волго-Ахтубы. Поверхностные отложения – аллювиальные суглинки, подстилаемые песками;

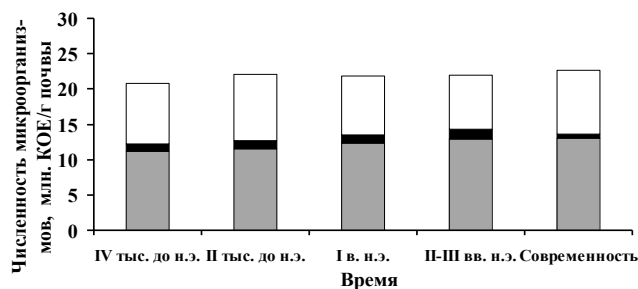
– светло-каштановая среднесолонцеватая глубокосолончаковатая почва (К1, табл. 1) на целинном участке с большим количеством ветоши (пастбище). ПП равно 50%. Участок расположен на раннехвалынской равнине, сложенной древнеморскими суглинками;

Современные условия почвообразования исследованных участков Прикаспийской низменности в целом близки, но имеют и ряд различий, в частности, по геоморфологическому положению, генезису почвообразующих пород. Вероятно, именно поэтому микробные сообщества изученных почв различались по содержанию активной МБ и в некоторых случаях – по СЧ, но имели близкую эколого-трофическую структуру и величину Ко (табл. 1).

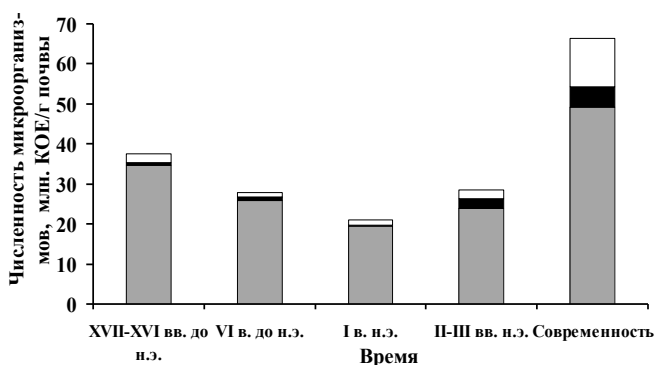
Исследования вековой динамики состояния микробных сообществ на примере нескольких хронологических рядов для светло-каштановых и каштановых почв показали (рис. 2), что изменчивость микробных сообществ в отдельные исторические периоды была значительной (курганские могильники «Акса́й», «Абганерово», «Малаяевка»), в другие – сравнительно небольшой (курганские могильники «Пере́грузное», «Колобовка»). Полученные микробиологические данные свидетельствуют об определенной динамике природных условий в исследованных регионах, которые вызвали изменения в состоянии микробных сообществ почв в разные исторические эпохи.



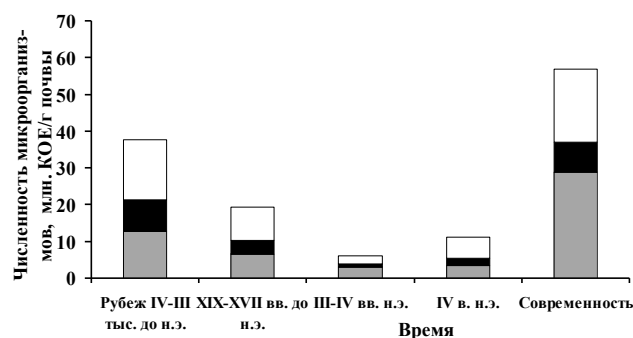
Приволжская возвышенность, K2, 1-я высокая терраса, «Авиловский», 4000 лет назад.



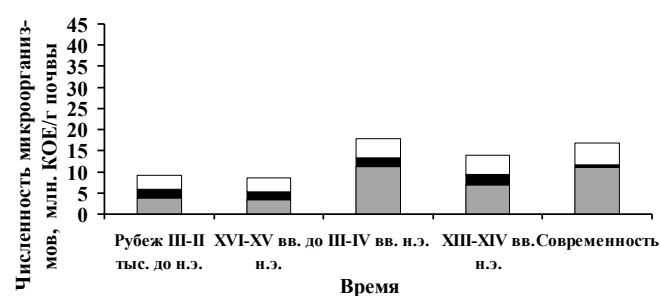
Ергенинская возвышенность, K2, водораздел, «Пере́грузное», 5500 лет назад.



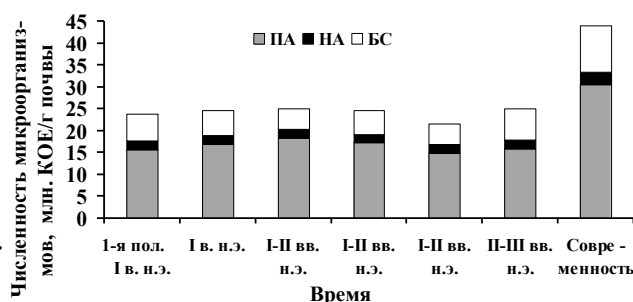
Ергенинская возвышенность, K2, 1-я низкая терраса, «Акса́й», 3600 лет назад.



Ергенинская возвышенность, K1, водораздел, «Абганерово», 5000 лет назад.



Прикаспийская низменность, K1, раннехвалынская равнина, «Малаяевка», 4000 лет назад



Прикаспийская низменность, K1, 2-я терраса, «Колобовка», 2000 лет назад

Рис. 2. Пространственно-временная изменчивость численности микроорганизмов (млн. КОЕ/г почвы) различных трофических групп в подкурганских и современных почвах степей Волго-Донского междуречья. Численность микроорганизмов, выросших на: ПА – почвенном агаре и довольствующихся элементами питания из рассеянного состояния, НА – нитритном агаре и потребляющих гумус, БС – богатой органической среде и использующих легкодоступное органическое вещество – растительные остатки.

Принципиально новыми являются данные о пространственно-временной изменчивости эколого-трофической структуры микробных сообществ (табл. 2), отражающей вековую динамику почвенно-ландшафтных и климатических условий. Для каждого из исследованных природных районов установлены закономерности в соотношении эколого-трофических групп микроорганизмов и характере их трансформации за историческое время. Сравнительный анализ состояния микробных сообществ в исследованных разновозрастных палеопочвах различных природных районов каштановой зоны дает возможность выявить определенные географические закономерности. На территории северных Ергеней выявленные каштановые и светло-каштановые почвы («Аксай», «Абганерово») характеризуются как в настоящее время, так и в эпоху бронзы высокой активной биомассой (406-546 и 21-141 мкг С/г почвы соответственно) и значительной суммарной численностью микроорганизмов (57-66 и 21-44 млн. КОЕ/г почвы соответственно). При этом эколого-трофическая структура микробных сообществ этих почв значительно различается. Так, в сильно засоленных каштановых почвах низкой надпойменной террасы р. Есауловский Аксай на протяжении всего исследованного хроноинтервала абсолютно доминировали (74-93%) микроорганизмы, потребляющие элементы питания из рассеянного состояния. Они же были, как правило, преобладающими (64-73%) и в светло-каштановых почвах Заволжской провинции («Колобовка»), развитых на древнеморских засоленных суглинках в условиях более засушливого климата (количество атмосферных осадков около 250 мм/год). На водораздельных пространствах Ергеней, сложенных сравнительно менее засоленными лёссовидными породами и со среднегодовой нормой осадков более 300 мм, значительное место в составе микробного сообщества разновозрастных светло-каштановых почв занимали микроорганизмы, растущие на богатой органической среде (35-51%; табл. 2).

Таблица 2. Закономерности пространственно-временной изменчивости эколого-трофической структуры микробных сообществ разновозрастных подкурганых и современных почв степей Волго-Донского междуречья.

Параметр	Почвы	Приволжская возвышенность	Ергенинская возвышенность			Прикаспийская низменность		
		К2			К1			
		«Авилковский» 4000 лет назад	«Перегрузное» 5500 лет назад	«Аксай» 3600 лет назад	«Абганерово» 5000 лет назад	«Маляевка» 4000 лет назад	«Колобовка» 2000 лет назад	
Доля микроорганизмов различных трофических групп (% от суммарной численности всех групп)	ПА*	Современная	54	57	74	50	66	70
		Погребенные	53-59	53-59	84-93	31-50	41-64	64-73
	НА**	Современная	5	3	8	15	4	6
		Погребенные	4-5	5-6	1-8	12-23	11-22	8-9
	БС***	Современная	41	40	18	35	30	24
		Погребенные	37-42	35-42	4-8	38-51	25-37	19-28

Примечания к таблице 2: ПА* – выросших на почвенном агаре и использующих элементы питания из рассеянного состояния, НА** – выросших на нитритном агаре и использующих гумус, БС*** – выросших на богатой органической среде и использующих растительные остатки.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что характеристика микробных сообществ современных почв сухо- и пустынно-степной зон юго-востока Русской равнины в большей мере отражает специфику местных условий почвообразования. Так, при одной подтиповой принадлежности почвы, находящиеся в различных литолого-геоморфологических и ландшафтных условиях весьма заметно могут отличаться по микробиологическим параметрам. И наоборот, характеристики микробных сообществ различных почвенных типов (подтипов) могут быть достаточно близки, если последние приурочены к сходным элементам рельефа, почвообразующим породам, уровням залегания грунтовых вод.

Состояние микробных сообществ в тот или иной исторический период в значительной мере определяется закономерностями эволюции конкретного почвенного ареала (ландшафта) и вековой изменчивостью биоклиматических условий. В связи с этим возникает местная специфика в динамике состояния микробных сообществ и их структурно-функциональной организации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананьева Н.Д., Благодатская Е.В., Орлинский Д.Б., Мякишина Т.Н. 1993. Методические аспекты определения скорости субстрат-индуцированного дыхания почвенных микроорганизмов // Почвоведение. № 11. С. 72-77.
- Бухарин О.В., Гинцбург А.Л., Романова Ю.М., Эль-Регистан Г.И. 2005. Механизмы выживания бактерий. М.: Медицина. 367 с.
- Вайнштейн М.Б., Кудряшова Е.Б. 2000. О нанобактериях // Микробиология. Т. 69. № 2. С. 163-174.
- Демкина Т.С., Борисов А.В., Демкин В.А. 2000. Микробные сообщества палеопочв археологических памятников пустынно-степной зоны // Почвоведение. № 9. С. 1117-1126.
- Демкина Т.С., Борисов А.В., Демкин В.А. 2004. Микробиологические исследования подкурганых палеопочв пустынно-степной зоны Волго-Донского междуречья // Почвоведение. № 7. С. 853-859.
- Демкина Т.С., Борисов А.В., Ельцов М.В., Демкин В.А. 2007. Сравнительная характеристика микробных сообществ курганных насыпей, подкурганых и современных почв степной зоны Нижнего Поволжья // Почвоведение. № 6. С. 738-748.
- Звягинцев Д.Г., Асеева И.В., Бабьева И.П., Мирчинк Т.Г. 1980. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во Моск. ун-та. 224 с.
- Каширская Н.Н., Хомутова Т.Э., Дмитриев В.В., Дуда В.И., Сузина Н.Е., Демкин В.А. 2010. Морфология клеток и биомасса микроорганизмов подкурганых и современных степных почв Нижнего Поволжья // Почвоведение. № 10. С. 1229-1238.
- Никитин Д.И., Никитина Э.С. 1978. Процессы самоочищения окружающей среды и паразиты бактерий (род *Vdellovibrio*). М.: Наука. 205 с.
- Tenner E.З. 1976. Микроорганизмы рода *Nocardia* и разложение гумуса. М.: Наука. 199 с.
- Anderson J.P.E., Domsch K.H. 1978. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biology and Biochemistry. 1978. Vol. 10. No. 3. P. 215-221.
- Demkina T.S., Khomutova T.E., Kashirskaya N.N., Demkina E.V., Stretovich I.V., El-Registan G.I., Demkin V.A. 2008. Age and activation of microbial communities in soils under burial mounds and in recent surface soils of steppe zone // Eurasian Soil Science. Vol. 41. No. 13. P. 1439-1447.

ОТРАСЛЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ ЗАСУШЛИВЫХ ЗЕМЕЛЬ

УДК 631.4

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОРОШАЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ ЮГА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ¹

© 2020 г. И.Н. Горохова*, Е.И. Панкова*, И.Н. Чурсин**

**Почвенный институт им. В.В. Докучаева
Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 7, стр. 2. E-mail: g-irina@rambler.ru*

***Научный геоинформационный центр РАН
Россия, 119019, г. Москва, ул. Новый Арбат, д. 11. E-mail: chursin.ivan93@gmail.com*

Поступила в редакцию 18.06.2019. После доработки 15.08.2019. Принята к публикации 30.09.2019

В статье изложены основные положения методического подхода к оценке состояния орошаемых земель на юге Европейской части России на основе космической съемки со спутника Landsat-8 и наземных наблюдений. Используются визуальный и основанный на нем автоматизированный методы дешифрирования орошаемых земель по космическим снимкам, рассмотрена возможность определения по ним показателей, необходимых для наблюдений за состоянием орошаемых земель: 1) площадь орошаемых массивов, 2) площадь многолетней залежи на орошаемых массивах, 3) площадь орошаемых полей под разными сельскохозяйственными культурами, 4) генезис пятнистости орошаемых полей, обусловленных состоянием возделываемых культур и свойствами почв. Выполненная работа является первым шагом к созданию мониторинга орошаемых земель на основе дистанционного зондирования. В статье использованы оптимальный тип и даты съемки материалов космической съемки, разработаны дешифровочные признаки для оценки состояния сельскохозяйственных культур и свойств орошаемых почв, разработана технология автоматизированного дешифрирования космических снимков для выделения пятнистости орошаемых полей на базе алгоритма «деревьев принятия решений».

Ключевые слова: мониторинг, орошаемые земли, показатели состояния, космические снимки, дешифровочные признаки, автоматизированная классификация сельскохозяйственных культур и орошаемых почв.

DOI: 10.24411/1993-3916-2020-10087

Согласно данным Государственного доклада «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году» (2018), основная доля сельскохозяйственной продукции в стоимостном выражении производится в засушливой зоне страны, где сосредоточено 78% пахотных земель. Известно, что для обеспечения стабильного сельскохозяйственного производства на засушливых землях требуется развитие орошения. По данным Росреестра, в настоящее время общая площадь орошаемых земель России составляет 4658.7 тыс. га. При этом 24.6% площади находятся в неудовлетворительном состоянии и только около 50% в хорошем (Государственный доклад ..., 2018).

В России осуществляется государственный мониторинг окружающей среды, представляющий собой «систему наблюдений, оценки и прогнозирования и направленный на получение достоверной информации о состоянии земель, об их количественных и качественных характеристиках, их

¹ Работа выполнена по теме государственного задания Почвенного института им. В.В. Докучаева № 0591-2019-0023 «Изучить влияние природных условий и особенностей землепользования на почвенный покров, в том числе с участием засоленных, солонцовых и слитизированных почв и разработать технологию оценки интенсивности эксплуатации почв сельскохозяйственных угодий», а также по теме государственного задания Научного геоинформационного центра РАН № ААА-А1170213110015-2 «Разработка методов комплексного мультиспектрального анализа природных ландшафтов для мониторинга земель сельскохозяйственного назначения с применением группировок малых космических аппаратов и современных ГИС-технологий».

использовании и о состоянии плодородия почв. Объектами государственного мониторинга земель являются все земли в Российской Федерации независимо от форм собственности, их целевого назначения и разрешенного использования» (Государственный ..., 2016). При осуществлении государственного мониторинга земель необходимые сведения получают с использованием методов дистанционного зондирования, сети наземных наблюдений и из различной документации. При этом основным источником данных о площадях и состоянии орошаемых земель в России является мелиоративный кадастр, который базируется исключительно на наземных наблюдениях и при его составлении не используются дистанционные методы. Кроме того, при определении площадей не учитываются площади заброшенных залежных земель на орошаемых массивах. Также, согласно публикациям последних лет, общепринятой методики для проведения мониторинга орошаемых земель в засушливых регионах России на базе дистанционного зондирования не существует.

Цель данных исследований – разработка методических подходов для оценки состояния орошаемых земель на юге Европейской части России на основе материалов космической съемки и решение задач, необходимых для проведения мониторинга в дальнейшем: 1) определение площади орошаемых массивов, 2) определение площади многолетней залежи на орошаемых массивах, 3) определение площади орошаемых полей под разными сельскохозяйственными культурами, 4) определение генезиса пятнистости орошаемых полей, обусловленных состоянием возделываемых культур и свойствами почв, лимитирующих их плодородие.

Анализ отечественной и зарубежной литературы показал следующее: изучение состояния сельскохозяйственных земель с привлечением дистанционной информации ведется уже несколько десятилетий и количество научных работ на эту тему постоянно растет. Среди множества работ выделяются публикации по исследованиям свойств орошаемых почв на базе космической информации, в том числе засоления почв. Этой проблемой в Средней Азии занимались Е.И. Панкова с Д.И. Соловьевым (1993) и с Д.И. Руховичем (1999). И.Ю. Савин с соавторами (2019) опубликовал обобщающую работу по использованию технологий составления почвенных карт на основе космической съемки. Нами в течение многих лет на примере Светлоярской оросительной системы в Волгоградской области проводилась работа по изучению на основе дистанционной информации состояния орошаемых земель (Горохова и др., 2017).

Влияние орошения на свойства почв анализируется в большом количестве зарубежных работ, при этом чаще всего исследования ведутся с привлечением спутниковых данных. Особое внимание в статьях уделяется изучению засоления орошаемых почв (Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2014; Fourati et al., 2017; Jiang, Shu, 2018). В этих работах подчеркивается, что спутниковая информация позволяет выделять засоленные почвы и проводить количественную оценку засоления. Наиболее широко используются материалы со спутников Landsat (5, 7, 8) и Hyperion EO-1, HJ-HSI. Помимо засоления почв хорошо определяются участки подтопленных земель из оросительных каналов и участки с плохо функционирующим дренажом. Для выделения полей с разными сельскохозяйственными культурами, а также для распознавания солончаков и других засоленных почв используются расчетные, эмпирически выведенные индексы (Fourati et al., 2017); широко применяются также геостатистические методы обработки наземных и спутниковых данных (Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2014). При автоматизированной обработке космического изображения используют значения спектральной яркости и разные спектральные индексы, при картографировании – метод универсального кригинга (Jiang, Shu, 2018). Отмечается, что спутниковые материалы Landsat (5, 7, 8) оптимальны прежде всего для мелко- и среднemasштабного картографирования и эффективны в сочетании с ГИС-технологиями. Предварительное дешифрирование снимков обязательно должно проверяться полевыми наблюдениями. Точность выделения засоленных почв по дистанционным материалам может достигать 78% (Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2014). При анализе космических снимков часто засоление почв увязывается с состоянием возделываемой сельскохозяйственной культуры, при этом солеустойчивые культуры могут не реагировать на засоление и иметь хороший вид на снимке. Однако, как показал обзор литературы, несмотря на ограничения, использование спутниковых данных, ГИС-технологий и современных компьютерных программ по обработке космических изображений для оценки и картографирования орошаемых, в том числе засоленных, подтопленных, переувлажненных почв, позволяет отслеживать происходящие изменения.

Объект и методы исследований

Объектом исследований являются орошаемые земли на юге Европейской части России. В основу работы положен опыт авторов по оценке площадей, состояния орошаемых почв на основе спутниковой информации и полевых исследований, проведенных в Волгоградской области в разных природных районах (Сарпинская низменная равнина, возвышенность Ергени). Обобщение полученных результатов позволило сформулировать некоторые положения в качестве единого методического подхода на первом этапе работ по созданию мониторинга орошаемых земель на юге Европейской части России.

1. В качестве основного источника информации об орошаемых землях предлагается использовать космические снимки со спутника Landsat-8, как наиболее доступные, мультиспектральные (11 каналов), геопривязанные, высокого разрешения (30 м в мультиспектральном и 15 м в панхроматическом диапазонах), получаемые с периодичностью 2.5 недели и шириной полосы съемки 185 км.

При автоматизированной обработке снимков прежде всего необходимо использовать синюю, зеленую, красную, ближнюю инфракрасную (NIR) и панхроматическую зоны съемки, поскольку сочетание красного, зеленого и синего каналов дает приближенное к естественному цветное (RGB) изображение объекта, а наиболее информативными для анализа состояния возделываемых сельскохозяйственных культур и почв, расчета вегетационного индекса (NDVI) являются красная и инфракрасная зоны спектра. Для повышения пространственного разрешения изображения до 15 м необходимо добавление панхроматического канала.

2. Оптимальным периодом съемки для выделения на снимках полей с озимыми зерновыми культурами, кормовыми травами, землями под паром, многолетней залежью, а также для выделения неоднородности (пятнистости) орошаемых полей, определяющих состояние посевов, являются месяцы май и июнь (поскольку в это время культуры и их состояние хорошо дифференцируются на снимках).

3. Для выявления генезиса пятнистости орошаемых земель необходимо проведение полевых работ, т.к. она может быть связана с засолением, переувлажнением, окарбоначиванием почв, а также с плохой обработкой земель или недополивом.

4. При автоматизированной обработке космических снимков необходимо использовать современные ГИС-технологии и специализированные программы (AutoCAD Map, MapInfo, ENVI, ERDAS IMAGINE, ArcGIS Desktop/Workstation и его наиболее распространенные модули Arc/Info, ArcView и др.), которые дают возможность оперативно проанализировать изображение и получить информацию о площадях орошаемых и неиспользуемых земель, а также о структуре посевов и состоянии почв.

5. Для получения сведений об орошаемых землях помимо дистанционной информации нужны: топографические карты крупных или средних масштабов и фондовые материалы (литолого-геоморфологические, почвенные, гидрогеологические карты и др.).

6. Проведение полевых рекогносцировочных и маршрутных исследований позволит получать информацию, необходимую для дешифрирования снимков.

Методически работа, рассматриваемая в данной статье, представлена в двух вариантах – визуального дешифрирования космического снимка и простой автоматизированной обработки мультиспектрального изображения орошаемых земель с использованием стандартных программ ENVI 5.1. и MapInfo Pro 15. Для визуального анализа объектов, отраженных на спутниковых материалах, использовались следующие характеристики: тон, структура, форма и размер объектов, условия почвообразовательного процесса (уровень грунтовых вод (УГВ) в настоящее и прошлое время), характер поверхности (озимые зерновые культуры, кормовые травы, залежь, пашня).

На начальном этапе работ с космическим снимком обязательно проводится коррекция, которая включает яркостные преобразования, направленные на улучшение качества изображения как для визуального дешифрирования на экране, так и последующей автоматизированной обработки. Внесение соответствующих поправок называют радиометрической калибровкой и атмосферной коррекцией. Радиометрическая калибровка предназначена для устранения системных помех спутника, атмосферная коррекция – для устранения влияния атмосферы.

Результаты исследований

Результатом исследований орошаемых земель на основе материалов космической съемки стало определение: 1) площадей орошаемых массивов, 2) площади многолетней залежи в пределах

орошаемых массивов, 3) площадей орошаемых полей под разными сельскохозяйственными культурами, 4) генезиса пятнистости орошаемых полей, обусловленных состоянием возделываемых культур и свойствами почв. Для этого была составлена серия карт, отвечающая по точности и содержанию требованиям к картам примерно средних масштабов (1:100000) и достаточная для выполнения поставленных задач.

Карта орошаемых земель. Орошаемые земли, в отличие от богарных, имеют свои дешифровочные признаки, главные из которых следующие:

1) поля орошаемых земель, как правило, меньше по площади сельскохозяйственных полей, занятых богарными почвами;

2) к орошаемым полям подходят головной оросительный канал и каналы-распределители, которые видны на снимке.

Предварительно рекомендуется найти оросительные системы на топографических картах, а затем полученную информацию использовать для анализа космического снимка. Информация на топографической карте поможет определить оросительные системы, которые функционировали ранее (60-80-е годы прошлого столетия), и выяснить по космическому снимку, что стало с ними в настоящий момент времени.

На рисунке 1 представлены оросительные системы, расположенные вдоль Волго-Донского канала. Сравнивая изображения на топографической карте (1984 г.) и космическом снимке (2016 г.), можно отметить, что в данное время не все системы функционируют, изменилась также конфигурация некоторых массивов орошения за счет включения в орошение дополнительных площадей.

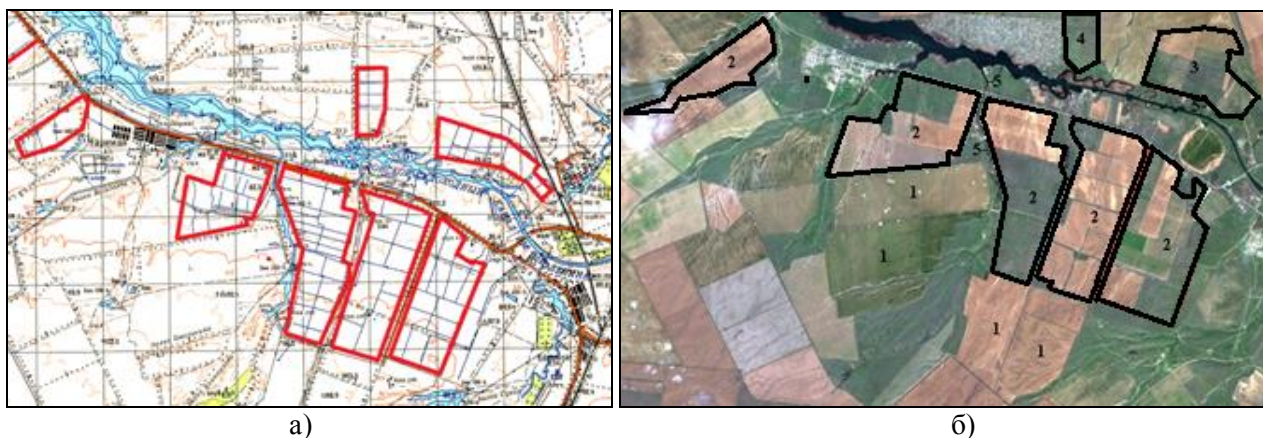


Рис. 1. Оросительные системы вдоль Волго-Донского канала. *Условные обозначения:* а – выделенные на топографической карте (М 1:100000, 1984 г.), б – на космическом RGB-снимке со спутника Landsat OLI-8 (01.05.2016); 1 – богарные земли, 2 – орошаемые массивы, 3 – орошаемые массивы с площадью, увеличенной по сравнению с изображением на топокарте, 4 – заброшенный орошаемый массив, 5 – оросительный канал.

Следует иметь в виду, что в настоящее время часть ранее орошаемых массивов может использоваться без орошения, поэтому относить их к орошаемым неверно, хотя, согласно кадастровому учету, они относятся к орошаемым, а по факту используются как богара. Определить, являются ли земли на данный момент богарными или используются как орошаемые влагозарядковые, можно только по опросу хозяев наделов, что затрудняет точное определение орошаемых земель по космическому снимку.

Карта сельскохозяйственных культур орошаемых земель (включая залежные земли). Предварительный визуальный анализ цветного (RGB) изображения космического снимка (рис. 2) позволил установить, что оросительная система в период проведения съемки являлась частично или полностью заброшенной и орошаемые земли перешли в разряд многолетней залежи. Многолетняя залежь отличается от возделываемых полей отсутствием сельскохозяйственной культуры, темным тоном, а также размытой структурой изображения. Иногда на снимке видно, что подводящие каналы лишены воды или вовсе засыпаны.

В период съемки орошаемых земель в мае-июне месяце находящиеся в стадии зрелости озимые зерновые культуры хорошо отличаются на космическом снимке от полей с кормовыми травами своим светлым тоном и ярко выраженной пятнистой структурой (рис. 2).

Возможна также автоматизированная обработка космического снимка. В настоящее время существует множество программ, позволяющих произвести классификацию изображения, рассчитывая спектральную яркость или яркостные индексы объектов исследования. Такие различия положены в основу автоматизированной классификации изображений.



Рис. 2. Визуальное выделение полей с разными сельскохозяйственными культурами и многолетней залежью на космическом RGB-снимке со спутника Landsat OLI-8 (01.05.2016). Условные обозначения: 1 – озимые зерновые, 2 – кормовые травы, 3 – скошенные кормовые травы, 4 – пашня под паром, 5 – многолетняя залежь.

Например, алгоритм «Анализ главных компонент» в программе ENVI (где используется математический метод главных компонент) дает композитное и более контрастное изображение орошаемых земель. Данное преобразование позволяет выделить массивы орошения, поля с разными сельскохозяйственными культурами, залежью и пашней, визуальное дешифрирование которых в цветном изображении затруднено или невозможно (рис. 3).



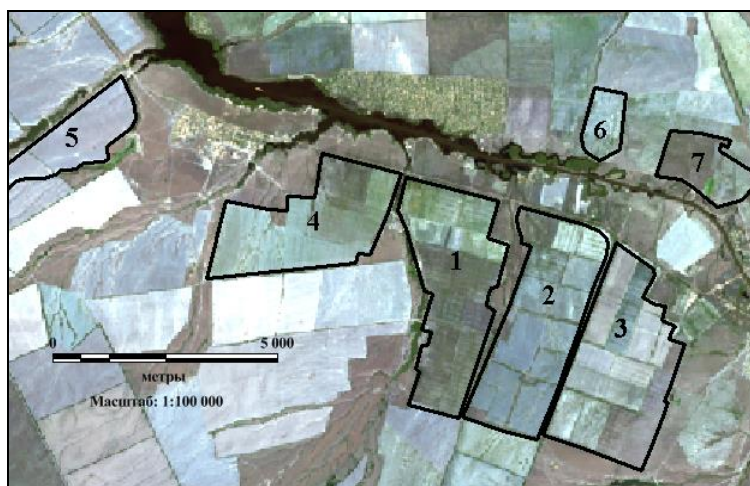
Рис. 3. Композитное изображение оросительных систем вдоль Волго-Донского канала на обработанном алгоритмом «Анализ главных компонент» мультиспектральном изображении со спутника Landsat OLI-8 (01.05.2016.).

Выполнив визуально или с помощью программ (ENVI, MapInfo) векторизацию массивов орошения, полей с разными сельскохозяйственными культурами и залежью, можно автоматизировано подсчитать площади всех объектов (рис. 4, 5).

Карта пятнистости полей. Орошаемые поля часто характеризуются неоднородностью или пятнистостью изображения на космическом снимке, что связано с состоянием сельскохозяйственных культур и свойствами почв, оказывающими влияние на культуры. Возделываемая культура может иметь выпад в виде пятен, вызванные такими неблагоприятными процессами, как подтопление, засоление, окарбоничивание с поверхности почв или плохая агротехническая обработка полей.

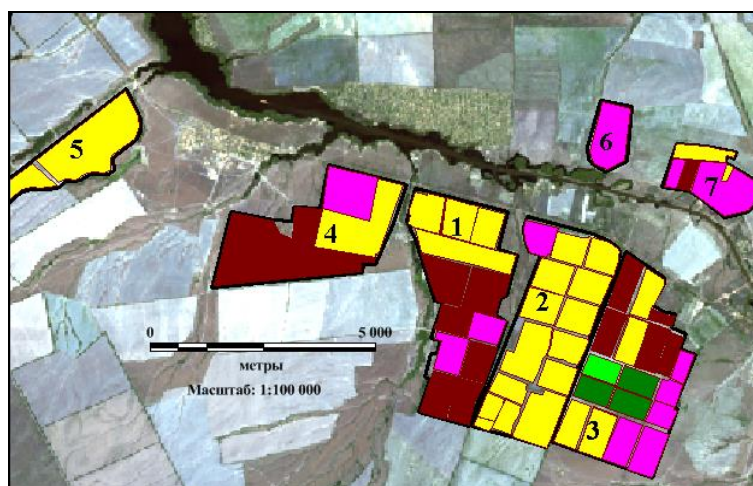
Для составления карты пятнистости полей и определения генезиса пятен были разработаны и использованы дешифровочные признаки, созданные по результатам анализа фондовых, полевых материалов, анализа спутникового изображения орошаемых земель и проведена типизация пятнистости, помогающая провести распознавание почв и их свойства (табл.).

При визуальном дешифрировании объектов, отраженных на дистанционной информации, использовались следующие характеристики: тон, структура, форма и размер пятен, условия почвообразования (УГВ в настоящее время и в прошлом), возделываемая культура или открытая поверхность (озимые зерновые культуры, кормовые травы, залежь, пашня).



Номер_массива	Код	Объект	Площадь_га
1	0	Орошаемый массив	682,00
2	0	Орошаемый массив	749,00
3	0	Орошаемый массив	758,00
4	0	Орошаемый массив	612,00
5	0	Орошаемый массив	300,00
6	0	Орошаемый массив	100,00
7	0	Орошаемый массив	212,00
Всего			3 413,00

Рис. 4. Орошаемые массивы вдоль Волго-Донского канала и их площади, выделенные и просчитанные по синтезированному RGB-снимку Landsat-8 OLI (19.06.2015).



Номер_массива	Код	Объект	Площадь_га
Всего	1	Озимые зерновые	1 708,00
	2	Кормовые травы	38,00
	3	Скошенные кормовые травы	126,00
	4	Пашня под паром	853,00
	5	Залежь	678,00


Рис. 5. Поля с разными сельскохозяйственными культурами и залежью на орошаемых массивах вдоль Волго-Донского канала и их площади, выделенные и просчитанные по синтезированному RGB-снимку Landsat-8 OLI (19.06.2015).

Пятнистость орошаемых полей на юге России, отраженная на космических снимках, имеет разную природу, и поэтому интерпретация дистанционных материалов требует обязательного изучения особенностей района исследований и обоснования причин появления пятнистости на основе полевых работ и лабораторных анализов почвенных образцов.

Установлено, что пятнистость, связанная с окарбончанием почв с поверхности, стабильна и постоянна, хорошо отражается на космических снимках в видимых каналах независимо от природного района, сезона съемки и возделываемой культуры и имеет одну природу происхождения, связанную с планировкой полей и подтягиванием карбонатов к поверхности за счет транспирации влаги растениями. Наличие в верхнем горизонте значительного (>4-5%) количества карбонатов (CaCO_3) делает почвы на пятнах после полива плотными и способствует образованию поверхностной корки, что приводит к гибели растений. На снимке такие почвы выделяются как пятна светлого тона разного размера, часто топографически связанные с бывшими повышениями мезорельефа.

Луговые и луговатые, наиболее прогумусированные и увлажненные почвы характеризуются темным тоном и хорошо визуальны выделяются на снимках с открытой поверхностью, на полях с озимыми зерновыми культурами. Однако пятна луговых почв маскируются под пологом кормовых трав, поэтому в случае визуального дешифрирования (для уточнения их распространения) дополнительно требуется информация с открытой поверхностью почв.

Таблица. Типизация пятнистости орошаемых полей на одновременных RGB-снимках со спутников Landsat.

Пятна на снимке под разными культурами, дата съемки	Природный район	УГВ и способ орошения	Дешифровочные признаки			Название почвы (Классификация ..., 1977)	Причина образования пятнистости на поле
			Тон и структура	Форма	Размер		
Озимые зерновые, июнь, 2015 г.  Пятна поверхностно- и высококарбонатных почв	Сарпинская низменная равнина	>5 м, влагозарядковый	Светлый, светло-серый с неоднородной, пятнистой структурой	Вытянутая, повторяет бывшие повышения мезорельефа	Крупные и средние пятна от 50 м до 800 м в длину и от 10 м до 220 м в ширину	Пахотная, орошаемая светло-каштановая поверхностно- и высококарбонатная, легко- и среднесуглинчатая на средневальских морских отложениях	Окарбончание почв с поверхности и содержание карбонатов >4-5%. Пятна возникли в результате планировки полей и других сопутствующих процессов, наличие в верхнем горизонте значительного количества карбонатов делает почвы после полива плотными, с образованием поверхностной корки
Кормовые травы, июнь, 2015 г.  Пятна поверхностно- и высококарбонатных почв		>5 м, поверхностный, напуском по бороздам		Вытянутая вдоль борозд полива	Крупные и средние пятна от 90 до 800 м в длину и от 30 м до 120 м в ширину		

Продолжение таблицы.

Пятна на снимке под разными культурами, дата съемки	Природный район	УГВ и способ орошения	Дешифровочные признаки			Название почвы (Классификация ..., 1977)	Причина образования пятнистости на поле
			Тон и структура	Форма	Размер		
<p>Озимые зерновые, май, 2016 г.</p>  <p>Пятна луговатых и луговых почв</p>	Сарпинская низменная равнина	>5 м, в прошлом поверхностный, напуском по бороздам; сейчас влагозарядковый	Темный с неоднородной, пятнистой структурой	Вытянутая, повторяет бывшие понижения мезорельефа	Крупные и средние пятна от 300 м до 800 м в длину и 30-120 м в ширину	Пахотная, орошаемая лугово- или луговато-каштановая среднесуглинистая на среднехвалыньских морских отложениях	Диагностирует дополнительное ирригационное, поверхностно-грунтовое или грунтовое увлажнение
<p>Кормовые травы, июнь 1985 г.</p>  <p>Пятна вторично засоленных почв</p>	Северные Ергени	2.5-1.5 м, поверхностный, напуском по бороздам	Светлый, светлосерый	Вытянутая и округлая, с волнистыми границами	Средние пятна 100-200 м в длину и 50-100 м в ширину; мелкие пятна 50-100 м в длину и 20-50 м в ширину	Пахотная, орошаемая светло-каштановая, солончакковая, среднесуглинистая на покровных суглинках	Пятнистость указывает на сильное вторичное засоление почв на глубину 1 м независимо от размера светлых пятен, темный тон на снимке отражает слабосредне засоленные почвы у полей с крупнопятнистым рисунком и незасоленные и слабозасоленные на полях со средне- и мелкопятнистым рисунком

Пятнистость, связанная с вторичным засолением почв, проявляется в условиях высокого уровня грунтовых вод (1.5-2.5 м) и сопровождается образованием выпадов кормовых трав в виде светлых пятен различного размера. Эта пятнистость характеризует сильное засоление почв на глубину 1 м независимо от размера светлых пятен. Темный тон в этом случае на снимке отражает слабо-среднее засоление почв орошаемых полей с крупнопятнистым рисунком и незасоленные и слабозасоленные почвы на полях с мелко- и среднепятнистым рисунком (Горохова и др., 2017).

Примеры описанных дешифровочных признаков разных почв и их свойств представлены в таблице.

Для проведения автоматизированного дешифрирования пятнистости полей и последующего их картографирования применялась технология, разработанная И.Н. Чурсиным с соавторами (2018), на базе алгоритма «деревьев принятия решений». Проверка технологии осуществлялась по пяти снимкам со спутника Landsat-8 за летние сезоны 2015-2018 годов и 11 каналам съемки. Разработанная технология подразумевает создание обучающей выборки на базе карты сельскохозяйственных угодий и значений спектральной яркости выделяемых пятен. Обучающая выборка создавалась с учетом представленных дешифровочных признаков (табл.).

Первым этапом автоматизированного дешифрирования стало выделение группы полей с разными сельскохозяйственными культурами, в том числе полей, на которых выявлены пятна. Второй этап состоял в выделении пятен на полях, когда группа яркостных признаков набиралась исходя из того, что поля с разными сельскохозяйственными культурами имеют пятна одного генезиса, но они могут различаться по яркости: например, выпадения кормовой культуры на поверхностно- и высококарбонатных почвах и светлые пятна с такими же почвами на вызревших озимых зерновых культурах имеют один генезис, но различаются по форме и тону (табл.).

К достоинствам используемого метода классификации типов почв следует отнести то, что, как отмечалось выше, не все типы можно выделить визуально. Например, лугово-каштановые почвы, расположенные на полях с люцерной, хорошо маскируются густым пологом культуры. Включение в классификацию информации из каналов NIR, SWIR1, SWIR2 спутника Landsat-8 помогает решить эту проблему. Более подробно данная технология классификации по снимкам представлена в статье И.Н. Чурсина с соавторами (2018).

По результатам автоматизированной классификации была построена карта пятнистости полей на территорию одного из орошаемых массивов Светлоярской оросительной системы в Волгоградской области (рис. 6). На составленной карте основную долю занимают орошаемые зональные светло-каштановые почвы (45%), далее следуют орошаемые поверхностно- и высококарбонатные светло-каштановые почвы (38%) и наименьшую долю занимают орошаемые луговато- и лугово-каштановые почвы (17%).

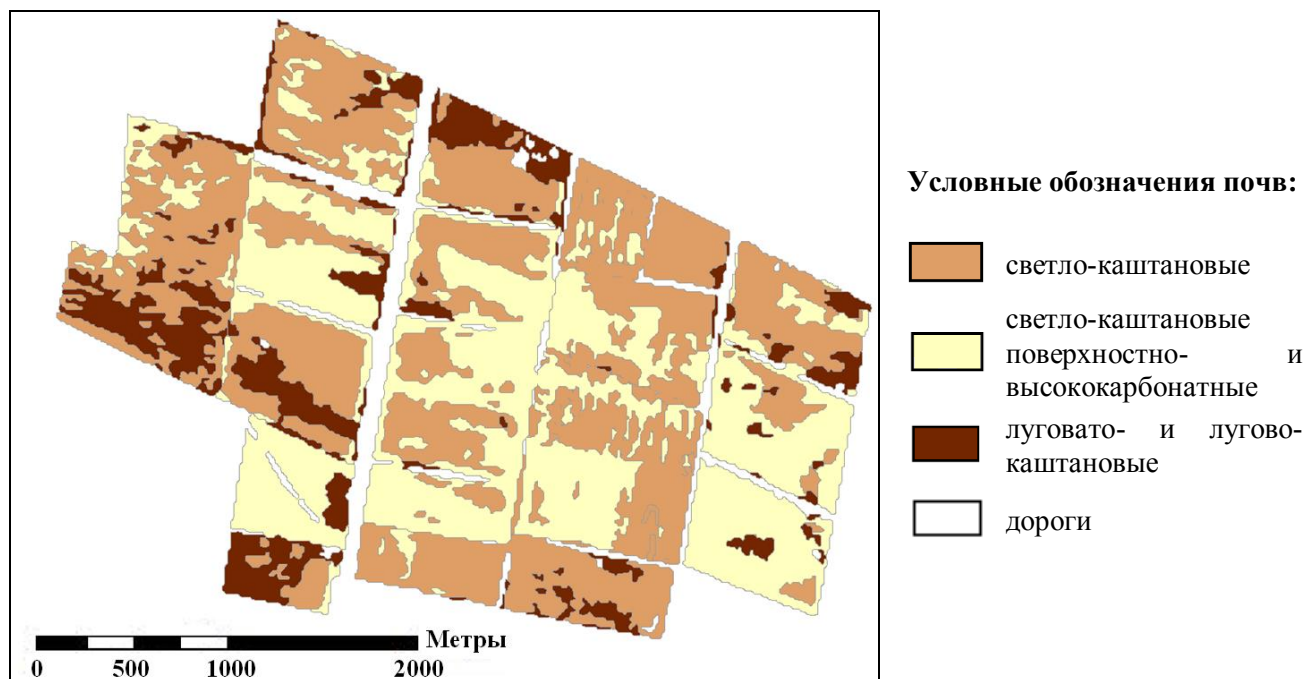


Рис. 6. Картограмма пятнистости орошаемых полей Светлоярского орошаемого участка Светлоярской оросительной системы в Волгоградской области.

Информация с созданных карт может быть использована для уточнения мелиоративного кадастра и при проведении мелиоративных мероприятий по улучшению свойств почв (например, по

представленной карте пятнистости орошаемых полей можно адресно провести такие мелиоративные мероприятия, как разрушение поверхностной корки, внесение органических удобрений и др.).

Выводы

Основным результатом проведенных работ стало решение на дату использованных материалов космической съемки таких задач, как: 1) определение площадей орошаемых массивов, 2) определение площади многолетней залежи на орошаемых массивах, 3) определение площадей орошаемых полей под разными сельскохозяйственными культурами, 4) определение генезиса пятнистости орошаемых полей, обусловленных состоянием возделываемых культур и свойствами почв.

Актуальность результатов представленных исследований обусловлена тем, что основным источником данных о состоянии и площадях орошаемых земель на юге России в настоящее время является мелиоративный кадастр, который ведется исключительно наземными методами и не учитывает площади залежных земель на орошаемых массивах.

Разработанный методический подход к изучению орошаемых земель позволяет считать его в качестве первого этапа работ по созданию методических рекомендаций к мониторингу орошаемых земель юга Европейской части России с привлечением космической информации. Он также может быть рекомендован гидрогеолого-мелиоративным партиям, которые осуществляют регулярный наземный контроль за орошаемыми землями и являются составителями мелиоративного кадастра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Горохова И.Н., Панкова Е.И.* 2017. Природа пятнистости орошаемых почв сухостепной зоны (на примере Светлоярской оросительной системы) // Аридные экосистемы. Т. 23. № 3 (72). С. 44-54. [*Gorokhova I.N., Pankova E.I.* 2017. The Nature of the Patchiness of Irrigated Soils in the Dry Steppe Zone (on Example of the Svetloyarskaya Irrigation System) // Arid Ecosystems. Vol. 7. No. 3. P. 161-170.]
- Горохова И.Н., Панкова Е.И., Шишконова Е.А.* 2017. Опыт использования космических снимков для составления карты землепользования орошаемых и залежных земель Светлоярской оросительной системы // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. № 89. С. 68-89.
- Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году». 2018. М.: Министерство природных ресурсов и экологии РФ. 203 с.
- Государственный (национальный) доклад «О состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2015 году». 2016. М.: Министерство экономического развития, Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии. 202 с.
- Классификация и диагностика почв СССР. Издательство: Колос, 1977 г. 221 с.
- Панкова Е.И., Рухович Д.Н.* 1999. Дистанционный мониторинг засоления орошаемых почв аридных территорий. // Почвоведение. № 2. С. 253-263
- Панкова Е.И., Соловьев Д.А.* 1993. Дистанционный мониторинг засоления орошаемых почв. РАСХН. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева. 191с.
- Савин И.Ю., Столбовой В.С., Иванов А.Л., Прудникова Е.Ю., Жоголев А.В., Воронин А.Я.* 2019. Технология составления и обновления почвенных карт. М.: Перо. 328 с.
- Чурсин И.Н., Филиппов Д.В., Горохова И.Н.* 2018. Разработка метода «Дерево принятия решений» для автоматизированного распознавания сельскохозяйственных культур по мультиспектральным снимкам высокого разрешения на примере орошаемого участка // Материалы X Международной научно-практической конференции по проблемам снижения природных опасностей и рисков. М. Т. 1. С.407-413.
- Jiang H., Shu H.* 2018. Optical remote-sensing data based research on detecting soil salinity at different depth in an arid-area oasis, Xinjiang, China // Earth Science Informatics. P. 1-14.
- Fourati H.-T., Bouaziz S., Benzina M., Bouaziz M.* 2017. Detection of terrain indices related to soil salinity and mapping salt-affected soils using remote sensing and geostatistical techniques // Environmental Monitoring and Assessment. No. 189 (4). 11 p.
- Taghizadeh-Mehrjardi R., Minasny B., Sarmadian F., Malone B.P.* 2014. Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran // Geoderma. P. 15-28.

УДК 631.46:631.461

**ГАЛОФИЛЬНЫЕ МИКРОБНЫЕ СООБЩЕСТВА И ИХ БИОРАЗНООБРАЗИЕ
В ЗАСУШЛИВЫХ РЕГИОНАХ ПРИКАСПИЙСКОЙ НИЗМЕННОСТИ**

© 2020 г. Э.А. Халилова, С.Ц. Котенко, Э.А. Исламмагомедова,
Р.З. Гасанов, А.А. Абакарова, Д.А. Аливердиева

*Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского научного центра РАН
Россия, 367025, г. Махачкала, ул. Гаджиева, д. 45. E-mail: eslanda61@mail.ru*

Поступила в редакцию 16.07.2019. После доработки 12.08.2019. Принята к публикации 30.09.2019

Проведены исследования пространственного распределения галофильных микробных сообществ засоленных почв и высокоминерализованных озер в засушливых регионах Прикаспийской низменности. Обнаружено, что основными компонентами микробной флоры Терско-Кумской и Терско-Сулакской провинций являются хемоорганогетеротрофные бактерии родов *Virgibacillus*, *Bacillus*, *Halomonas* и *Salimicrobium* из филумов *Firmicutes* и *Proteobacteria*. Штаммы демонстрировали способность к продуцированию каталазы, протеазы, амилазы и восприимчивость к 14 антибиотикам из групп фторхинолонов, цефалоспоринов, макролидов. Полученные данные представляют научный и практический интерес для изучения пространственного распределения галофильных бактерий в аридных условиях и их биотехнологической значимости.

Ключевые слова: микробное разнообразие, галофильные бактерии, экосистемы, засоленные почвы, высокоминерализованные озера, концентрация солей.

DOI: 10.24411/1993-3916-2020-10088

Изучение структуры галофильных микробных сообществ представляет интерес для фундаментальной микробиологии, в том числе эволюционной, так как многие обитающие в засушливых условиях микроорганизмы относятся к эволюционно древним ветвям бактерий и архей (Durvasul, Rao, 2018; Namita et al., 2018). Регион исследования является уникальной природной провинцией России с многообразием природных ландшафтов, обусловленных эрозионной деятельностью текучих вод, повторяющимися трансгрессиями и регрессиями Каспийского моря и засушливым климатом. Особый интерес представляют экосистемы Терско-Кумской и Терско-Сулакской низменности Западного Прикаспия, которые находятся под воздействием природных и антропогенных факторов со сформировавшимися микробиоценозами, близкими по своим показателям к классическим образцам полупустынь. Абраинно-аккумулятивные равнины с современными четвертичными песчаными отложениями изучаемых экосистем включают в себя гиперсоленые озера, эфемерные водоемы и засоленные почвы различного типа в качестве компонентов ландшафта. Широкий диапазон экстремофильных биотопов в единой географической зоне способствует созданию в регионе соответствующих условий для изучения биоразнообразия галофильных микроорганизмов.

Галофильные микроорганизмы являются объектом исследований многих ведущих лабораторий мира на протяжении последних 30 лет, однако разнообразие их в природе, экологическая роль и метаболизм изучены недостаточно. Большая заслуга в изучении природных микробных сообществ принадлежит российским ученым (Заварзин, 2004; Намсараев, 2018). Известны фундаментальные работы, посвященные генетическому разнообразию и структуре микробных сообществ засоленных почв (Plassart et al., 2019; Zhang et al., 2019) и соленых озер (Yang et al., 2017), где экстремофильные микроорганизмы могут рассматриваться как значимые компоненты биогеоценозов. Благодаря уникальному метаболизму галофильные микробы являются продуцентами ценных промышленно значимых ферментов, антибиотиков, могут участвовать в биоразложении нефти, обладают повышенной устойчивостью к загрязнению посторонней микрофлорой.

В рамках настоящего исследования изучено биоразнообразие и биотехнологический потенциал

микробного компонента аридных биогеоценозов в засушливых регионах Терско-Кумской и Терско-Сулакской низменностей Западного Прикаспия.

Объекты и методы исследования

Исследовались бактерии, выделенные из соленых озер Берикейского (Дербентский район) и Тарумовского месторождений (Тарумовский район) и солончаков (Тарумовский район, Кочубейская биосферная станция Прикаспийского института биологических ресурсов ДНЦ РАН). Экспериментальные полигоны расположены в экстрасушливых условиях, где коэффициент увлажнения характеризуется величиной $K < 0.3$.

В Терско-Кумской низменности распространены засоленные почвы и эфемерные водоемы, в том числе высокоминерализованное озеро Тарумовского месторождения. Образцы почвы типичного солончака (фото а) отобраны на юго-западе в 3 км от Кочубейской биосферной станции; образцы почвы из солончака коркового (фото б) и воды эфемерного водоема – в 40 км на север от Кочубея. По геологической структуре территория представляет Новокаспийские отложения, являясь частью Терско-Каспийской впадины (Быкова, 2003).



Фото. Объекты исследования экстремофильных микроорганизмов: а) опустыненный ландшафт Терско-Кумской низменности, б) озеро Берикейского месторождения.

Терско-Сулакская низменность представлена дельтовым и полупустынным ландшафтами, грунтовые воды минерализованы, почвы в различной степени засолены. Берикейское озеро расположено в центральной части Западного Прикаспия, имеет техногенное происхождение (фото б), здесь сосредоточено более 260 неуправляемых редкометальных газофлюидных грифонов с глубины 2473 м.

Подготовка образцов почвы, исследование солевого состава почв и инициация микробной сукцессии проводились согласно традиционному используемым методикам (Звягинцев, 1992). Физико-химические показатели воды определены стандартными методами (Государственный контроль ..., 2003). Для выделения и дифференцированного учета галофильных бактерий использованы стандартные среды (Лалов и др., 1998; Кузнецов, Каленов, 2008).

Фенотипические свойства микроорганизмов: G+C, продуцирование ферментов каталазы, амилазы, протеазы, солеустойчивость, термотолерантность, восприимчивость к антибиотикам, проявляемые в засушливых климатических условиях, – изучены с использованием стандартных методов (Нетрусов и др., 2005; Хоулт и др., 1997).

Видовая идентификация микроорганизмов осуществлена сравнением полученных нуклеотидных последовательностей с данными, размещенными в генбанке NCBI (National Center ..., 2018) и базе данных CBS (Westerdijk Fungal ..., 2019). Выделение ДНК из образцов осуществлено модифицированным методом щелочного определения ДНК Бирнбойма-Доли (Birnboim, Doly, 1979) и Wizard-технологии фирмы Promega (США). Секвенирование продуктов амплификации проведено в Центре «Биоинженерии» РАН (Москва) по методу Сэнгера (Sanger et al., 1977) на генетическом анализаторе ABI PRIZM 3730 (Applied Biosystems, Inc., USA). Первичный анализ сходства нуклеотидных последовательностей генов 16S РНК изучаемых штаммов проведен с помощью

программного пакета BLAST (Van de Peer, 1994).

Результаты и их обсуждение

Для исследований выбраны биотопы единого региона: Терско-Кумский (солончаки типичные и корковые, природное соленое озеро) и Терско-Сулакский (техногенное соленое озеро), отличающиеся низким содержанием питательных веществ и высокими концентрациями тяжелых металлов. Из биотопов изолировано 10 видов галофильных бактерий, принадлежащих к филумам *Firmicutes* и *Proteobacteria*. В таксономическом отношении и степени приспособленности к засушливым условиям они представлены видами *Virgibacillus salaries*, *V. marismortui*, *V. olivae*, *Bacillus cereus*, *B. clausii*, *B. pumilus*, *Halomonas ventosae*, *H. gomseomensis*, *H. elongata*, *Salimicrobium halophilum* (табл. 1).

Таблица 1. Галофильные микроорганизмы, выделенные из степных и водных биогеоценозов аридных экосистем Западного Прикаспия.

Экосистема	Высота, м н.у.м.	Географические координаты	t°C	Тип засоления	Виды галофильных бактерий
Терско-Кумская низменность					
Солончак типичный (а)	14	44° 04' 25" с.ш., 46° 32' 10" в.д.	+30 - +43	Хлоридно-сульфатно-натриевый	<i>Bacillus clausii</i> , <i>B. pumilus</i> , <i>Halomonas elongate</i>
Солончак корковый пухлый (б)	150	44° 23' 10" с.ш., 46° 35' 57" в.д.		Сульфатно-хлоридно-натриевый	<i>Salimicrobium halophilum</i> , <i>Bacillus clausii</i> , <i>B. pumilus</i>
Терско-Кумская низменность					
Высокоминерализованное озеро Тарумовского месторождения	15	44° 23' 28" с.ш., 46° 33' 55" в.д.	+40	Хлоридно-гидрокарбонатно-натриевый	<i>Halomonas ventosae</i> , <i>H. gomseomensis</i> , <i>Virgibacillus olivae</i>
Терско-Сулакская низменность					
Высокоминерализованное озеро Берикейского месторождения	29	42° 13' 25" с.ш., 48° 04' 38" в.д.	+50 - +60	Хлоридно-гидрокарбонатно-натриевый	<i>Virgibacillus salaries</i> , <i>V. marismortui</i> , <i>Bacillus cereus</i>

Представленные типичными солончаками, засоленные почвы Терско-Кумской низменности сложены легким и тяжелым суглинком, выделяются признаки оглеения. Распределение солей отмечается по всему профилю. Химизм засоления позволяет установить характерный для солончакового опустынивания хлоридно-сульфатно-натриевый тип засоления (табл. 2), обусловленный климатическими условиями и морским происхождением почвообразующих пород, тяготеющих к остепнению и аридизации (Залибеков, 2010). Солевому составу корковых солончаков (б) характерно гидроморфное сульфатно-хлоридно-натриевое засоление на тяжелосуглинистых древнеаллювиальных отложениях (табл. 2). Поверхностный слой сложен порошистой дефлируемой массой солевых скоплений.

Состав микробиоты солончаковых почв, характеризующихся воздействием климатического режима и антропогенной нагрузки за счет высоких концентраций солей, представлен бактериями родов *Salimicrobium*, *Bacillus* и *Halomonas* (табл. 1). Из результатов исследований (табл. 1, 2) следует, что изолированные бактерии *Bacillus clausii* и *B. pumilus* приурочены к солончаку типичному с хлоридно-сульфатным и солончаку корковому с сульфатно-хлоридным типом засоления почвы. Отличительной особенностью солончака типичного является присутствие нитритрезистентного *Halomonas elongate*, для солончака коркового – хемоорганотрофа *Salimicrobium halophilum*.

По классификации химического состава воды высокоминерализованных озер Тарумовского и

АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2020, том 26, № 1 (82)

Берикейского месторождений их можно отнести к хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатно-натриевым (табл. 3). По степени минерализации изучаемые водоемы относятся к категории рассолов; в водах преобладает кальциевая жесткость, которая может быть обусловлена растворением известняка и мела, разложением органических веществ. Озера аридной зоны, формирующиеся в условиях концентрирования солей за счет процессов испарения, богаты биогенными элементами Na, Ca, K, Mg, Sr, Li и анионами Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻, способными контролировать уровень биологической продуктивности микробных сообществ. В эту группу можно отнести кремниевую кислоту в качестве источника кремния и аммонийный азот в качестве источника азота (табл. 3).

Таблица 2. Результаты химического анализа водной вытяжки засоленных почв.

Глубина отбора проб, см	Гумус, %	Сухой остаток, %	Анионы, мг-экв. %			Поглощенные основания, мг-экв. %		
			HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺ по разности
Солончак типичный хлоридно-сульфатного типа – сел. Тарумовка (а)								
0-10	3.11	0.31	<u>0.41</u> 0.026	<u>22.62</u> 0.790	<u>15.04</u> 0.720	<u>5.50</u> 0.110	<u>11.25</u> 0.123	<u>21.29</u> 0.489
20-30	1.40	1.05	<u>0.11</u> 0.006	<u>33.61</u> 1.176	<u>21.01</u> 1.489	<u>16.75</u> 0.335	<u>10.26</u> 0.123	<u>27.40</u> 0.637
40-50	0.80	1.64	<u>0.21</u> 0.012	<u>22.41</u> 0.784	<u>25.49</u> 1.225	<u>13.26</u> 0.265	<u>9.04</u> 0.108	<u>25.86</u> 0.554
Солончак корковый пухлый сульфатно-хлоридного типа – сел. Кочубей (б)								
0-10	0.27	1.60	<u>1.18</u> 0.045	<u>0.16</u> 0.014	<u>20.85</u> 0.123	<u>10.11</u> 0.030	<u>6.62</u> 0.006	<u>6.17</u> 0.039
20-30	0.20	2.00	<u>0.28</u> 0.029	<u>11.32</u> 0.570	<u>17.71</u> 0.471	<u>5.24</u> 0.059	<u>8.51</u> 0.059	<u>15.60</u> 0.418
40-50	0.19	2.71	<u>0.28</u> 0.029	<u>8.23</u> 1.332	<u>29.34</u> 1.348	<u>8.82</u> 0.456	<u>9.80</u> 0.167	<u>19.31</u> 0.712

Отличительной особенностью химического состава воды Берикейского озера по сравнению с Тарумовским является вдвое большее количество органических веществ, присутствие аммонийного азота, кремниевой и борной кислот, элементов Ba, Br, B, Fe, J, Rb, Cs, As, содержание которых может быть обусловлено геологическими показателями водовмещающих пород, сложенных песчаниками и мергелями.

Содержание микроорганизмов в водоемах аридных регионов коррелирует с макрокомпонентным составом воды, где микрофлора является индикатором их химического состава. Высокоминерализованное озеро Тарумовского месторождения – эфемерный биотоп с быстро меняющимися засушливыми условиями и лимитированным временем существования микроорганизмов. В таких водоемах видовой состав экстремофильных бактерий с определенными жизненными стратегиями специфичен.

По результатам молекулярно-генетического анализа микробов идентифицированы виды *Bacillus cereus*, *Halomonas ventosae*, *H. gomseomensis*, *Virgibacillus olivae*, *V. salaries*, *V. marismortui*. Причем галофильные грамотрицательные γ-протеобактерии семейства *Halomonadaceae*, включая представителей родов *Halomonas*, были присущи только микробному сообществу Тарумовского озера, грамположительные бактерии *Virgibacillus* – Берикейского озера. Несмотря на то что бактерии *Bacillus*, обладая высоким биологическим потенциалом, присутствовали во всех образцах почвы и воды, главной средой их обитания являлась почва.

Сходство между бактериальными сообществами в большей степени может быть обусловлено экологическими факторами регионов (Fieger, Jackson, 2006; Lauber et al., 2009).

По результатам исследований обнаружена следующая закономерность: засоленные почвы и озера регионов по химическому составу имели тенденцию повышенного количества катионов Na⁺, Ca²⁺, K⁺,

Mg^{2+} и анионов Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , что может быть обусловлено формированием факторов почвообразования низменности в аридных условиях, напряженностью геохимических и биологических процессов. Можно полагать, к таким неисчерпаемым источникам элементов, участвующих в процессах соленакопления и седиментации, относятся древнекаспийские четвертичные засоленные породы, погребенные современными дельтовыми отложениями, подпор вод Каспийского моря, разложение богатых катионами растительных остатков галофитов, метаболизм бактерий-деструкторов органического вещества, сезонная миграционная способность и золотой перенос веществ (Залибеков, 2000).

Таблица 3. Химический состав воды соленых озер Берикейского и Тарумовского месторождений, расположенных в засушливых регионах.

№	Компонент	Озеро Берикейского месторождения	Озеро Тарумовского месторождения
1.	Прозрачность	>20	>20
4.	Общая минерализация, мг/л	76504	73530
5.	Взвешенные вещества, мг/л	13	4.5
6.	Механические примеси	4462	–
8.	HCO_3^- , мг/л	1350	1100
9.	Cl^- , мг/л	46000	44000
10.	SO_4^{2-} , мг/л	240	120
11.	Жесткость общая, мг-экв./л	85	87
12.	Жесткость временная, мг-экв./л	20	19
13.	Жесткость постоянная, мг-экв./л	65	68
14.	Ca, мг/л	2500	1560
15.	Mg, мг/л	300	108
16.	Sr, мг/л	270	270
17.	Na, мг/л	25400	23000
18.	K, мг/л	590	136
19.	Li, мг/л	110	80
20.	Cu, мг/л	0.050	0.048
22.	Pb, мг/л	0.018	0.015
23.	Cd, мг/л	0.0012	0.0017
24.	As, мг/л	0.0068	0
25.	Rb, мг/л	3.6	–
26.	Cs, мг/л	1.1	–
27.	Ba, мг/л	230	–
28.	Fe, мг/л	23	–
29.	Br, мг/л	165	–
30.	B, мг/л	330	–
31.	J, мг/л	15	–
32.	NH_4 , мг/л	22	36
33.	H_3BO_3 , мг/л	330	–
34.	H_2SiO_3 , мг/л	150	–

Установлены фенотипические признаки новых видов галофильных бактерий (табл. 4) родов *Bacillus*, *Virgibacillus* и *Halomonas*: *V. salaries*, *B. clausii*, *H. ventosae*, *V. marismortui*, *V. olivae*, *H. elongata*, *H. gomseomensis*, *S. halophilum*. Более полная характеристика микробиологических свойств галофильных бактерий (Халилова и др., 2017) показала, что бактерии являлись спорообразующими, мезофильными и умеренно галофильными. Вместе с тем продемонстрирована

характерная для промышленных штаммов потенциальная ферментативная активность, а именно: каталазная, протеазная и амилазная.

Таблица 4. Определение фенотипических свойств галофильных бактерий родов *Virgibacillus*, *Bacillus*, *Halomonas* и *Salimicrobium*.

Характеристика	<i>Virgibacillus salarius</i>	<i>Virgibacillus marismortui</i>	<i>Virgibacillus olivae</i>	<i>Halomonas ventosae</i>	<i>Halomonas elongata</i>	<i>Halomonas gomseomensis</i>	<i>Bacillus clausii</i>	<i>Bacillus cereus</i>	<i>Bacillus pumilus</i>	<i>Salimicrobium halophilum</i>
Каталазная активность	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-
Протеазная активность	+	-	+	-	-	+	+	+	+	+
Амилазная активность	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Восприимчивость к антибиотикам:										
Ампицилин	+/-	-	+	-	-	+	+	-	-	+
Триметоприм	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Ципрофлоксацин	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Цефтазидим	-	-	-	-	-	+	-	-	+	+
Фосфомицин	-	-	-	-	-	+	-	-	+	+
Цефуроксим	+/-	+	+	+/-	+	+	+/-	-	+	+
Цефепим	-	-	-	-	-	+	+	-	+	-
Цефаклор	+/-	-	-	-	-	+	+	-	+	+/-
Офлоксацин	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Ванкомицин	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Канамицин	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Кларитромицин	+/-	-	-	-	-	+	-	-	+	+
Рифампицин	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Клотримазол	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Таксономический признак принадлежности к виду G+C (моль %)	66.7	66.2	67.2	65.8	66.5	67.3	44.5	42.5	43.9	43.9

Примечания к таблице 4. Для исследований ферментативной активности: плюс – положительный, минус – отрицательный. Восприимчивость к антибиотикам: плюс – положительный, минус – отрицательный, плюс/минус – вариабельный признаки.

Результаты исследований показали, что почти все штаммы демонстрировали устойчивый рост к 5-25% NaCl, причем особую активность в присутствии 25% NaCl проявляли штаммы *H. elongata* и *H. gomseomensis*. Это является следствием особенностей генетического механизма бактерий, позволяющего увеличить толерантность к соли в экстремальных условиях засухливости. Штамм *S. halophilum* отличался ростом практически на всех средах с NaCl, образуя тонкую или плотную пленку роста. Наряду с этим, рост колоний *B. clausii*, *H. ventosae* и *V. marismortui* характерен в присутствии только низких показателей соли.

Микробы засушливой зоны могут изменяться не только под воздействием внешних условий, но и менять среду обитания в соответствии со своими особенностями, выделяя продукты обмена, которые изменяют химический состав, реакцию и соотношение различных веществ. Исследование восприимчивости галофильных бактерий к антибиотикам позволило расположить их по ряду патогенности, как генетическому признаку, в убывающей последовательности следующим образом:

B. cereus > *H. ventosae* > *H. elongata* > *V. olivae* > *V. marismortui* > *V. salaries* > *B. clausii* > *S. halophilum* > *B. pumilus* > *H. gomseomensis* (табл. 4). Отмечена восприимчивость их, за исключением *B. cereus*, к триметоприму из группы сульфаниламидов. Средняя восприимчивость характерна для штаммов *V. salaries*, *B. clausii* к кларитромицину из группы макролидов и цефалоспорином 2-го поколения (наряду с *H. ventosae*). Отрицательная – выявлена для *B. clausii*, *V. salaries*, *V. olivae*, *H. ventosae*, *H. elongata* к 3-му поколению цефалоспоринов; *V. salaries*, *V. marismortui*, *V. olivae*, *S. halophilum* – к 4-му поколению цефалоспоринов; *B. clausii*, *V. marismortui*, *V. olivae*, *S. halophilum*, *H. gomseomensis* – к клоритримазолу из группы производных имидазола; *V. marismortui*, *V. olivae* – к ампицилину из группы пенициллинов.

Заключение

В результате проведенных исследований микробной флоры засоленных почв и высокоминерализованных озер аридного региона Прикаспийской низменности представилась возможность определить пространственное распределение более 40 видов галофильных бактерий. Отмечено участие почвы в жизни элементарных единиц биогеоценозов, представляющих собой единство живых организмов и среды их обитания на небольших однородных территориях. В солончаках микробное сообщество угнетено, выявлено минимальное разнообразие галофильных микроорганизмов.

Основными представителями бактерий изучаемых регионов являлись штаммы родов *Virgibacillus*, *Bacillus*, *Halomonas* и *Salimicrobium*. Штаммы демонстрировали солетолерантность, способность к продуцированию каталазы, протеазы, амилазы; восприимчивость к 14 антибиотикам широкого антимикробного спектра из групп фторхинолонов, цефалоспоринов, сульфаниламидов и макролидов. Выявление доминантов уникальных галофильных микробных сообществ в Терско-Кумской и Терско-Сулакской провинциях является одним из репрезентативных показателей таксономической структуры микробных комплексов, тесно связанных с формированием аридных экосистем.

Общим для биотопов является влияние эрозии почв; трансгрессивной и регрессивной динамики Каспийского моря; засушливого климата. Благодаря адаптивной стратегии взаимодействия со средой, микробы, перемещаясь и колонизируя среду обитания в борьбе с другими видами, приобретают свойства, помогающие им выжить в засушливых условиях (Sriswasdi et al., 2017). Обнаружена также значительная корреляция между изолированными микробными сообществами и концентрациями элементов Na, K, Ca, Mg, Cl, Cu, Sr, SO₄, Cl, HCO₃, как одних из главных регуляторов микробиологической активности в почвах и озерах.

Засоленные почвы и водоемы Прикаспийской низменности представляют территориально изолированные друг от друга и различающихся по физико-химическим, геологическим и трофическим характеристикам биотопы, но олицетворяющие собой при этом единую сложную систему аридных биоценозов. Всестороннее изучение аборигенных микробных сообществ представляет научный и практический интерес в рамках изучения пространственного распределения микробов в различных биотопах отдельно взятой экосистемы; оценки их биоразнообразия и перспективы использования в биотехнологиях различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Быкова Е.П. 2003. Эволюционные ряды почв и аппликации процессов почвообразования равнинного Дагестана в среднем и позднем голоцене // Роль почв в биосфере. Труды Института почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова и РАН. М.: Издательство Института почвоведения МГУ-РАН. Вып. 2. Географическое разнообразие почв. Почвы и биоты. С. 209-234.
- Государственный контроль качества воды. Сборник государственных стандартов (Справочник технического комитета по стандартизации). 2003. Изд. 2, перераб. и доп. М.: Издательство стандартов. 775 с.
- Заварзин Г.А. 2004. Изучение микробного разнообразия в Институте микробиологии им. С.Н. Виноградского // Микробиология. Т. 73. № 5. С. 598-612.
- Залибеков З.Г. 2000. Процессы опустынивания и их влияние на почвенный покров. М.: Издательство РАН. 220 с.

- Залибеков З.Г.* 2010. Почвы Дагестана. Махачкала: Наука. 243 с.
- Звягинцев Д.Г.* 1992. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Издательство МГУ. 304 с.
- Кузнецов А.Е., Каленов С.В.* 2008. Способ получения биомассы галобактерий. Патент РФ № 2323226.
- Лалов В.В., Осокина Н.В., Пиорунский Д.А., Чижиков М.А.* 1998. Способ получения биомассы галобактерий. Патент РФ №. 2115722.
- Намсараев З.Б.* 2018. Микробные сообщества озер центральной Азии – индикаторы климатических и экологических изменений региона // *Микробиология*. Vol. 87. № 4. P. 393-396.
- Нетрусов А.И., Егорова М.А., Захарчук Л.М.* 2005. Практикум по микробиологии: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. М.: Академия. 607 с.
- Халилова Э.А., Котенко С.Ц., Исламмагомедова Э.А., Гасанов Р.З., Абакарова А.А., Аливердиева Д.А.* 2017. Экстремофильные микробные сообщества засоленных почв и их разнообразие в регионах Прикаспийской низменности // *Аридные экосистемы*. Т. 23. № 71 (2). С. 116-120. [*Khalilova E.A., Kotenko S.Ts., Islammagomedova E.A., Gasanov R.Z., Abakarova A.A., Aliverdieva D.A.* 2017. Extremophilic microbial communities of saline soils and their diversity in the regions of the Caspian Depression // *Arid Ecosystems*. Vol 7. No. 2. P. 116-120.]
- Хоулт Дж., Круг Н., Снит П.Г.А., Стэйли Дж.Т., Уиллиамс С.Т.* 1997. Определитель бактерий Берджи. В 2-х т. Т. 2. М.: Мир. 368 с. [*Holt J.G., Krig N.R., Sneath P.H.A., Staley J.T, Williams S.T.* 1997. *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*. MMoscow: Mir. Vol. 2. 368 p. In russian.]
- Birnboim H.C., Doly J.* 1979. A rapid alkaline extraction procedure for screening recombinant plasmid DNA // *Nucleic Acids Research*. Vol. 7. No. 6. P. 1513-1523.
- Durvasula R.V., Rao D.V.S.* 2018. *Extremophiles: From Biology to Biotechnology*. CRC Press. 437 p.
- Fierer N., Jackson R.B.* 2006. The diversity and biogeography of soil bacterial communities // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 103. P. 626-631.
- Lauber CL, Hamady M, Knight R., Fierer N.* 2009. Pyrosequencing-based assessment of soil pH as a predictor of soil bacterial community structure at the continental scale // *Applied and Environmental Microbiology*. Vol. 75. P. 5111-5120.
- Namita S., Govinda C., Bhuvan V., Navanietha R., Rajesh K.S., Venkataramana G.* 2018. Extremophiles for microbial-electrochemistry applications: A critical review // *Bioresource technology*. Vol. 255. P. 318-330. National Center for Biotechnology Information. 2018 [Электронный ресурс www.ncbi.nlm.nih.gov (дата обращения 10.05.2018)].
- Plassart P., Prévost-Bouré N.C., Uroz S., Dequiedt S., Stone D., Creamer R., Griffiths R.I., Bailey M.J., Ranjard L., Lemanceau P.* 2019. Soil parameters, land use, and geographical distance drive soil bacterial communities along a European transect // *Scientific Reports*. Vol. 9. P. 605-622.
- Sanger F., Nicklen S., Coulson A.R.* 1977. DNA sequencing with chain-terminating inhibitors // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 84. P. 5463-5467.
- Sriswasdi S., Yang C., Iwasaki W.* 2017. Generalist species drive microbial dispersion and evolution // *Nature communications*. P. 1-8.
- Van de Peer Y.* 1994. TREECON for Windows: a software package for the construction and drawing of evolutionary trees for the Microsoft Windows environment // *Computer Applications in the Biosciences*. Vol. 10. P. 569-570.
- Westerdijk Fungal Biodiversity Institute. 2019. [Электронный ресурс cbs.knaw.nl (дата обращения 11.04.2019)].
- Yang J., Zhu T.F., Walker V.K., Hepburn H., Lui C., Zuber M.T., Ruvkun G., Carr C.E.* 2017. Microbial diversity in a hypersaline sulfate lake: a terrestrial analog of ancient mars // *Frontiers in microbiology*. Vol. 8 (1). P. 1819-1831.
- Zhang K., Shi Y., Cui X., Yue P., Li K., Liu X., Tripathi B.M., Haiyan C.* 2019. Salinity Is a Key Determinant for Soil Microbial Communities in a Desert Ecosystem // *Applied and Environmental Science*. Vol. 4. No. 1. P. 1-12.

ISSN 1993-3916

ЖУРНАЛ АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ 2020. Т. 26. № 1 (82)

Учредители: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского научного центра РАН (ПИБР ДНЦ РАН), Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем РАН (ИВП РАН), Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии Дагестанского научного центра РАН (ИГ ДНЦ РАН).

Свидетельство о регистрации средства массовой информации в Роскомнадзоре (Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций) – ПИ № ФС77-56164 от 15 ноября 2013 г. Подписано в печать 28 февраля 2020 г.



ТОВАРИЩЕСТВО НАУЧНЫХ ИЗДАНИЙ КМК

Формат 60x 84 ¹/₈

Объем 11 п.л.

Тираж 200 экз.

Заказ №

Тиражировано в типографии ИП Гаджиева С.С.
367025, Махачкала, ул. Юсупова, 47
RIZO-PRESS, Тел. 8(8722) 68-40-21

**Распространяется
только по подписке**

Индекс 39775 (каталог «Пресса России»)