
Федеральное агентство по образованию

Научный журнал
УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ
ПЕТРОЗАВОДСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА
(продолжение журнала 1947–1975 гг.)

№ 11 (105). Декабрь, 2009

Серия: Естественные и технические науки

Главный редактор

А. В. Воронин, доктор технических наук, профессор

Зам. главного редактора

Н. В. Доршакова, доктор медицинских наук, профессор

Э. В. Ивантер, доктор биологических наук, профессор,
член-корреспондент РАН

Н. В. Ровенко, кандидат филологических наук,
ответственный секретарь журнала

Перепечатка материалов, опубликованных
в журнале, без разрешения редакции запрещена.
Статьи журнала рецензируются.

Адрес редакции журнала
185910, Республика Карелия,
г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 272.
Тел. (8142) 76-97-11
E-mail: uchzap@mail.ru

uchzap.petrso.ru

Редакционный совет

- В. Н. БОЛЬШАКОВ**
доктор биологических наук,
профессор, академик РАН (Екатеринбург)
- И. П. ДУДАНОВ**
доктор медицинских наук, профессор,
член-корреспондент РАМН (Петрозаводск)
- В. Н. ЗАХАРОВ**
доктор филологических наук,
профессор (Москва)
- А. С. ИСАЕВ**
доктор биологических наук,
профессор, академик РАН (Москва)
- Н. Н. МЕЛЬНИКОВ**
доктор технических наук,
профессор, академик РАН (Апатиты)
- И. И. МУЛЛОНЕН**
доктор филологических наук,
профессор (Петрозаводск)
- В. П. ОРФИНСКИЙ**
доктор архитектуры, профессор,
действительный член Российской академии
архитектуры и строительных наук (Петрозаводск)
- ПААВО ПЕЛКОНЕН**
доктор технических наук,
профессор (г. Йоенсуу, Финляндия)
- И. В. РОМАНОВСКИЙ**
доктор физико-математических наук,
профессор (Санкт-Петербург)
- Е. С. СЕНЯВСКАЯ**
доктор исторических наук, профессор (Москва)
- СУЛКАЛА ВУОККО ХЕЛЕНА**
доктор философии, профессор (г. Оулу, Финляндия)
- Л. Н. ТИМОФЕЕВА**
доктор политических наук, профессор (Москва)
- А. Ф. ТИТОВ**
доктор биологических наук, профессор,
член-корреспондент РАН (Петрозаводск)
- МИЛОСАВ Ж. ЧАРКИЧ**
ведущий профессор Сербской
Академии наук и искусств (г. Белград, Сербия)
- Р. М. ЮСУПОВ**
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАН (Санкт-Петербург)

Редакционная коллегия серии
«Естественные и технические науки»

- А. Е. БОЛГОВ**
доктор сельскохозяйственных наук,
профессор (Петрозаводск)
- Н. Н. НЕМОВА**
доктор биологических наук,
профессор, член-корреспондент
РАН (Петрозаводск)
- В. И. ПАТЯКИН**
доктор технических наук,
профессор (Санкт-Петербург)
- Е. И. РАТЬКОВА**
ответственный секретарь серии (Петрозаводск)
- В. И. СЫСУН**
доктор физико-математических наук,
профессор (Петрозаводск)
- В. С. СЮНЁВ**
доктор технических наук,
профессор (Петрозаводск)
- Б. М. ШИРОКОВ**
кандидат физико-математических наук,
доцент (Петрозаводск)
- В. В. ЩИПЦОВ**
доктор геолого-минералогических наук,
профессор (Петрозаводск)

Federal Educational Agency

Scientific Journal
PROCEEDINGS
OF PETROZAVODSK
STATE UNIVERSITY
(following up 1947–1975)

№ 11 (105). Desember, 2009

Natural & Engineering Sciences

Chief Editor

Anatoly V. Voronin, Doctor of Technical Sciences, Professor

Chief Deputy Editor

Natalia V. Dorshakova, Doctor of Medical Sciences, Professor

Ernest V. Ivanter, Doctor of Biological Sciences, Professor,
The RAS Corresponding Member

Nadezhda V. Rovenko, Candidate of Philological Sciences,
Executive Secretary

All rights reserved. No part of this journal may be used
or reproduced in any manner whatsoever without written permission.
The articles are reviewed.

The Editor's Office Address
185910, Lenin Avenue, 33. Tel. +7 (8142) 769711
Petrozavodsk, Republic of Karelia
E-mail: uchzap@mail.ru

uchzap.petrSU.ru

 Editorial Council

- | | |
|---|---|
| <p>V. BOLSHAKOV
Doctor of Biological Sciences,
Professor, the RAS Member (Ekaterinburg)</p> | <p>PAAVO PELKONEN
Doctor of Technical Sciences, Professor (Joensuu, Finland)</p> |
| <p>I. DUDANOV
Doctor of Medical Sciences, Professor,
the RAMS Corresponding Member (Petrozavodsk)</p> | <p>I. ROMANOVSKY
Doctor of Physical-Mathematical Sciences,
Professor (St. Petersburg)</p> |
| <p>V. ZAKHAROV
Doctor of Philological Sciences,
Professor (Moscow)</p> | <p>E. SENYAVSKAYA
Doctor of Historical Sciences, Professor (Moscow)</p> |
| <p>A. ISAYEV
Doctor of Biological Sciences,
Professor, the RAS Member (Moscow)</p> | <p>HELENA SULKALA
Doctor of Philosophy,
Professor (Oulu, Finland)</p> |
| <p>N. MEL'NIKOV
Doctor of Technical Sciences,
Professor, the RAS Member (Apatiti)</p> | <p>L. TIMOFEEVA
Doctor of Political Sciences, Professor (Moscow)</p> |
| <p>I. MULLONEN
Doctor of Philological Sciences,
Professor (Petrozavodsk)</p> | <p>A. TITOV
Doctor of Biological Sciences, Professor,
the RAS Corresponding Member (Petrozavodsk)</p> |
| <p>V. ORPHINSKY
Doctor of Architecture, Professor,
Full Member of Russian Academy
of Architectural Sciences (Petrozavodsk)</p> | <p>M. CHARKICH
the Leading Professor of Serbian Academy
of Sciences and Arts (Belgrade, Serbia)</p> |
| | <p>R. YUSUPOV
Doctor of Technical Sciences, Professor,
the RAS Corresponding Member (St. Petersburg)</p> |

 Editorial Board of the Series
 «Natural & Engineering Sciences»

- | | |
|---|--|
| <p>A. BOLGOV
Doctor of Agricultural Sciences,
Professor (Petrozavodsk)</p> | <p>V. SISUN
Doctor of Physical-Mathematical Sciences,
Professor (Petrozavodsk)</p> |
| <p>N. NEMOVA
Doctor of Biological Sciences,
the RAS Corresponding Member,
Professor (Petrozavodsk)</p> | <p>V. SYUNEV
Doctor of Physical-Mathematical Sciences,
Professor (Petrozavodsk)</p> |
| <p>V. PATYAKIN
Doctor of Technical Sciences,
Professor (St. Petersburg)</p> | <p>B. SHIROKOV
Candidate of Physical-Mathematical Sciences,
Docent (Petrozavodsk)</p> |
| <p>E. RAT'KOVA
Series Executive Secretary (Petrozavodsk)</p> | <p>V. SCHIPTSOV
Doctor of Geological-Mineralogical Sciences,
Professor (Petrozavodsk)</p> |

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

- Вахрамеева Т. И.*
Одигитриевская церковь в с. Кимжа. Исследования и реставрационные предложения.....7
- Карпенко Н. И., Петров А. Н., Воронин З. А.*
Опыт конечно-элементной аппроксимации железобетонных балок-стенок с проемами13

БИОЛОГИЯ

- Ивантер Э. В.*
Фаунистический анализ и зоогеографическое районирование территорий (на примере Карелии)19
- Шкляревич Г. А.*
Сообщества мидий на литорали Канда-лакшского залива Белого моря26
- Сергиенко Л. А.*
О морфологической изменчивости в роде бескильница семейства мятликовых (*Puccinellia* Parl. семейства *Poaceae*)31

ЛЕСНОЕ И СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО

- Гаврилов В. Н.*
Зональные особенности растительных ресурсов осушенных болот Карелии при их искусственном облесении35
- Евсеева Г. В., Яковлева К. Е., Голубева О. А.*
Формирование злаковых пастбищных агрофитоценозов в условиях Карелии41

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

- Мейгал А. Ю., Ворошилов А. С.*
Динамика нелинейных параметров электромиограммы ребенка в течение первых суток жизни44
- Барышева О. Ю., Хейфец Л. М., Михеева Ю. С., Румянцев А. Ш.*
Гипертрофия миокарда левого желудочка и хроническая болезнь почек50

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Гольдштейн Ю. Б.*
Полная потенциальная энергия конструкции с односторонними связями и ее использование при решении задачи устойчивости56

- Марков Б. Г., Марков О. Б., Доспехова Н. А.*
Геометрические аспекты контактного взаимодействия балансов в корообдирочном барабане 64
- Соколов А. П., Герасимов Ю. Ю., Селиверстов А. А.*
Методика оптимизации парка автомобилей на вывозке сортиментов на основе имитационного моделирования в среде ГИС 72

ФИЗИКА

- Всероссийская школа-семинар для молодых ученых России по теме «Проблемы и приложения электроразрядной обработки в индустрии наносистем и наноматериалов».**
- Белашев Б. З., Ильина В. П., Терновой А. Н.*
Технологии с использованием диатомитов Карелии 78
- Величко А. А., Дутиков Д. А., Кулдин Н. А., Кундозерова Т. В., Параничев Д. К., Пергамент А. Л., Путролайнен В. В., Стефанович Г. Б., Черемисин А. Б.*
Разработка методов микро- и нанолитографии по оксидным пленкам переходных металлов 82
- Голубев М. С., Дзиева Е. С., Ермоленко М. А., Иванов А. Ю., Карасев В. Ю., Эйхвальд А. И.*
Управление плазменными структурами и отдельными частицами в газовых разрядах 95
- Москвин П. В.*
Исследование потерь импульсного электронного пучка при транспортировке в газе низкого давления 104

Научная информация

- Артемьев А. В.*
К 50-летию трудовой деятельности В. Б. Зимина 109

Юбилей

- К 65-летию И. Р. Шегельмана 110
- К 70-летию А. Е. Болгова 111

Информация для авторов 112

Contents..... 113

Учредитель: ГОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет»

Редактор Г. А. Мехралиева. Корректор С. Л. Смирнова. Переводчик Н. К. Дмитриева. Дизайн, верстка И. Г. Лежнев.

Подписано в печать 21.12.2009. Формат 60x90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
10 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. (1-й завод – 130 экз.) Изд. № 257.

Индекс 66093. Цена свободная.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ТУ 10 – 00059
от 25 мая 2009 г. выд. Управлением Россвязькомнадзора по Республике Карелия.

Отпечатано в типографии Издательства
Петрозаводского государственного университета
185910, Республика Карелия,
г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33

УДК 726

ТАТЬЯНА ИВАНОВНА ВАХРАМЕЕВА

кандидат архитектуры, директор архитектурно-реставрационного проектного предприятия ЗАО «ЛАД» (г. Петрозаводск)
vahram@karelia.ru

ОДИГИТРИЕВСКАЯ ЦЕРКОВЬ В с. КИМЖА. ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕСТАВРАЦИОННЫЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Натурные исследования памятника, проведенные в 2008 году, позволили уточнить историю жизни объекта, его архитектурно-конструктивные решения. Зафиксированы сохранившиеся архаичные детали. Подтверждена необходимость проведения срочных мероприятий по его сохранению. Предлагаемые проектные решения нацелены на максимальное сохранение подлинного тела памятника с учетом временных наслоений и выявления его архитектурно-художественной ценности.

Ключевые слова: деревянный храм, шатер на крещатой бочке, архитектурно-археологический обмер, строительные периоды, проект реставрации, подлинность и достоверность

Одигитриевская церковь в с. Кимжа Мезенского района Архангельской области сегодня может быть охарактеризована как уникальная деревянная храмовая постройка. Это единственная сохранившаяся церковь из ряда существовавших ранее в поселениях на реках Мезени и Пинеге храмов с покрытием центрального объема крещатой бочкой, завершенной шатром (рис. 1). К сооружениям подобного типа относились:

- Церковь Михаила Архангела в Юrome, 1685 год.
- Никольская церковь в с. Сура, 1695 год.
- Холодная церковь Св. Артемия в Веркольском монастыре, 1697 год.
- Никольская церковь в Едоме (сохранилась без завершений), 1699 год.
- Воскресенская церковь в Немнюге (Кеврoла), 1710 год.
- Теплая церковь Св. Артемия в Веркольском монастыре, 1712 год.



Рис. 1. Общий вид церкви. Фото В. А. Титова, 2007 год

- Собор Рождества Богоматери в г. Мезени, 1714 год.
- Троицкая Церковь в с. Лампожне (лемех закругленный), 1781 год.

Уникальность церкви в с. Кимжа подтверждается также наличием дошедших до наших дней некоторых архаичных приемов в ее архитектурных и конструктивных решениях.

Поэтому большой интерес и историко-архитектурную ценность приобретают детальные исследования этого памятника, интерпретация следов первоначальных элементов и конструкций. Только после их изучения и анализа оказались возможными принятие обоснованных реставрационных решений и проведение реставрационных работ.

Одигитриевская церковь в с. Кимжа, построенная в 1709 году, один из немногих храмов, в архивных документах о котором выявлены не только описания здания в разные периоды его существования и сведения о периодически проводимых на нем ремонтных работах, но и графическое изображение церкви времени ее постройки, достаточно точно воспроизводящее облик здания (рис. 2).

Обследования и обмеры церкви, выполненные в XX веке (В. А. Крохин, Л. М. Лисенко), зафиксировали основные параметры, определяющие ее общую структуру и конструктивную схему. Однако в них не представлены детали памятника, отсутствуют сведения о тех элементах, которые формируют его индивидуальность на фоне единой типологической группы храмов, имеются некоторые неточности и ошибки. Возможно, это произошло из-за того, что обследование в тот период производилось при наличии обшивки стен как снаружи, так и внутри здания.

Восполнить эти пробелы в изучении памятника, более глубоко прочесть историю реконструкций церкви, увидеть изменения техноло-

гических приемов в народном строительстве с течением времени в значительной степени удалось благодаря обмерам и исследованиям памятника, выполненным летом 2008 года. Работа проведена на основании государственного контракта с Министерством культуры РФ специалистами ЗАО «ЛАД» (г. Петрозаводск) под руководством автора.

В ходе комплексного архитектурно-археологического обмера были подробно зафиксированы следы утраченных конструкций и деталей, каждый оконный и дверной проем со всеми временными изменениями, сохранившиеся элементы перекрытий, покрытий. Анализ материалов натурального обследования позволяет воссоздать более точную картину строительных периодов памятника, его облика на время постройки и в последующие этапы его существования. Изменения памятника происходили в следующие строительные периоды:

1. 1700–1709 – 1875–1878,
2. 1875–1878 – 1899,
3. 1899–1901,
4. 1970-е – 2000-е годы (реставрационные работы).

К 2008 году Одигитриевская церковь представляла собой бревенчатый сруб уже почти полностью без тесовой обшивки, с разобранными перекрытиями и подведенными вновь в 2003–2004 годах новыми венцами от основания до уровня пола. Колокольня находилась в аварийном состоянии, многие бревна имели разрушения различной степени, гниль.

Объемно-планировочное решение храма в своей основе со времени его строительства сохранилось без изменений, за исключением поздней перестройки притвора с надстройкой над ним колокольни (конец XIX – начало XX века).

Храм был возведен в 1709 году в виде четырехчастного здания с высотным объемом кафоликона, имеющего вид четверика, завершенного крещатой бочкой с центральным крутым шатром, и окружающими его четырьмя главами на высоких шейках. Более узкий пятигранный алтарь примыкает к кафоликону с востока, с запада располагается трапезная, сруб которой шире сруба главного помещения храма. Притвор первоначально имел каркасную конструкцию [2; 140], являясь равным по ширине трапезной. К настоящему времени утраченными оказались нижние бревна трапезной, что не позволяет определить характер первоначальной перевязки между нижними бревнами трапезной и нижней бревенчатой обвязкой каркасного притвора.

Все объемы храма имели покрытия разного типа. Крыша алтаря была выполнена в виде бочки с полицами, при этом бочка алтаря, как и бочки основной храмовой части, шатер, главки и шеи глав, первоначально были покрыты городковым лемехом. Трапезная имела самцово-слеговую крышу с тесовой кровлей безгвоздевой конструкции. К сожалению, к настоящему времени утрачены верхние бревна северной и юж-

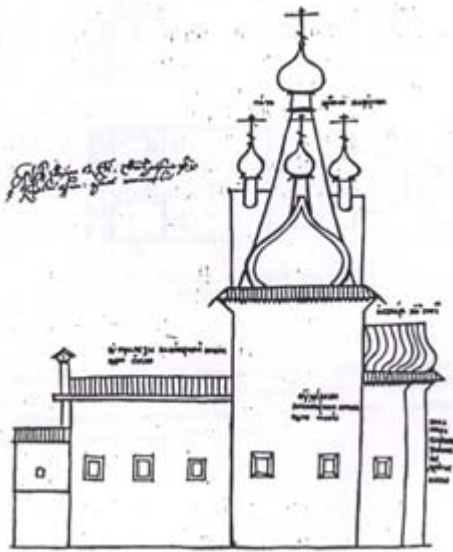


Рис. 2. Архивный чертеж церкви 1709 года [2; 139]

ной стен трапезной и первоначальные следи, поэтому точно указать количество «куриц», поддерживавших потоки кровли, невозможно. Двускатная тесовая крыша притвора была ниже крыши трапезной и ниже крыши сохранившегося до наших дней более позднего притвора. Ее уровень легко определяется по сохранившимся следам примыкания слег и теса этой крыши к западной стене трапезной.

Характер, выразительность фасадов во многом определяют расположенные на его поверхности оконные и дверные проемы. Расположение, тип оконных и дверных проемов времени постройки храма можно безошибочно определить по материалам детальных обмеров 2008 года. Уточненная нами реконструкция этих элементов памятника на 1709 год несколько отличается от реконструкций Л. М. Лисенко и В. А. Крохина, но достоверно подтверждается следами на памятнике и архивными сведениями.

Так, в алтаре первоначально было устроено два косячатых окна, на южной и восточной стенах. После их реконструкции в XIX веке сохранились подтеки и врубки для старых косяков, позволяющие точно восстановить параметры окон. Это были трехкосячатые окна с широкими боковыми косяками, сопрягающимися вверху и внизу «на ус». Вершник – с гребнем и заплечиками со стороны фасада.

Третье окошко на северо-восточной стене было устроено в месте возжигания паникадила и сохранилось без изменений. Это бескосячатое окно, закрывавшееся рамой. Рама, имевшая, судя по архивным записям, слюдяное заполнение [2; 140], утрачена, для ее установки в ограничивающих проем бревнах выбраны пазы. Интересным решением является вставка шпонок между бревнами по бокам оконного проема для создания равношироких по высоте боковых граней окна. Оконный проем детально обмерен, он представляет собой почти не сохранившийся на других постройках тип бескосячатого рамного окна начала XVIII века.

На северной стене алтаря окна первоначально не было. Существующее ныне окно прорублено в XIX веке, об этом свидетельствуют тип оконной коробки и отсутствие подтесок на бревнах у боковых брусьев коробки. В архивных документах XVIII века о нем также не упоминается [2; 140].

В кафоликоне было устроено два косячатых окна на южной стене, позднее реконструированных. На всех окнах сохранились следы подтесок на бревнах для гребня вершника с заплечиками первоначальных косяков и нижние остатки боковых косяков, зарубленные «на ус» в подоконное бревно (рис. 3). На северной стене было одно окно, сдвинутое к восточной стенке. Точное место его расположения и габариты выяснить невозможно, так как участок стены, где оно располагалось, был выпилен в XIX веке при реконструкции храма и устройстве новых двух окон на северном фасаде. Возможно, такое решение



Рис. 3. Окно на южной стене храма. Фото Т. И. Вахрамеевой

было принято вследствие желания расположить новые окна на северной стене симметрично, со сдвижкой относительно места первоначального окна. У всех существующих ныне окон северного фасада отсутствуют типичные для начала XVIII века подтеки у косяков.

Все окна трапезной, существующие в настоящее время, располагаются на первоначальных местах, но несколько увеличены в размерах. Характер косяков первоначальных окон хорошо прочитывается по сохранившимся следам их примыкания к бревнам стен. На южной стене располагаются три окна, а на северной – одно. Отличия в способе перетески окон позволяют определить, что восточное окно южной стены и окно северной стены растесывали одновременно с другими окнами храма, а увеличивали в размерах два остальных окна трапезной, меняли их косяки несколько позднее. Косвенное подтверждение этому можно найти и в архивных сведениях [2; 143].

Все эти особенности оконных проемов не были отмечены в предшествующих исследованиях, в которых все существующие ныне окна охарактеризованы как первоначальные.

Сведения о первоначальном типе и облике дверных проемов менее очевидны. Можно говорить о двух первоначальных дверях – из притвора в трапезную и из трапезной в храм. Пороговое бревно к моменту обследования оказалось утрачено, оно заменено на новое при реставрационных работах 2003 года, поэтому ни точной высоты проемов, ни характера сопряжения бокового косяка внизу с опорным бревном определить уже невозможно. В целом же тип дверных проемов, общие параметры, вид косяков можно воссоздать достоверно. Двери были трехкосячатые, невысокие, косяки сопрягались с вершником «на ус», вершник имел гребень и заплечики, косяки были без скосов. Внизу косяки, вероятно, сопрягались



Рис. 4. Остаток первоначального косяка двери в трапезную.
Фото Т. И. Вахрамеевой

с бревном также «на ус», по аналогии с оконными косяками. Сохранился на своем месте фрагмент первоначальных косяков дверного проема из притвора в трапезную (рис. 4). Это часть бокового косяка, на всю высоту которого был вытесан шип для примыкания нового косяка более узкой двери XIX века. В описаниях храма 1802 года говорится, что двери из притвора в трапезную были двойные, то же самое сказано о дверях из трапезной в храм, причем одни из дверей характеризуются как «решетчатые». Двери навешивались на крюки, то есть, вероятно, на «поставы» [2; 140]. Сохранившиеся в разобранном виде дверные полотна XIX века были нами обмерены и предложены к повторному использованию и как аналоги для воссоздания утраченных дверей.

Дополнительная визуальная и голосовая связь трапезной с храмом осуществлялась через окна «проймы», устроенные в разделяющей их внутренней стене. Первоначально это были узкие окна, прорубленные в двух смежных бревнах на высоту диаметра бревна. Окна закрывались ставнями. Сохранившиеся пазы для ставень позволяют определить с достаточной точностью размеры окон, а также то, что это не были волоковые окна в их обычном виде, так как пазы для передвижения задвижки окна отсутствуют. Можно предположить, что первоначально бревна, в которых прорублены окна, не были отесаны и в них были устроены пазы для задвигания ставень. В последующем бревна могли отесать с ликвидацией этих пазов. Но по поводу такого предположения существуют сомнения, поскольку в архивных до-

кументах XVIII века говорится, что стены трапезной отесаны [2; 140]. Возможно, что пазы для перемещения ставень образовывались набивными планками сверху и снизу проемов.

Окна-проймы с северной и южной сторон от дверей имели разную длину. Южное окно было намного больше северного. В XIX веке окна были значительно увеличены, но не обрамлялись косяками, и были сохранены пазы для ставень первоначальных окон. В новые большие окна-проймы вставлены кованые решетки.

Трапезная отапливалась одной печью, первоначально топившейся по-черному. Можно выявить ряд следов ее существования. Это характерная пропитанная копотью черная поверхность бревен в интерьере трапезной, подтеска бревен в месте постановки печи в северо-западном углу помещения, продухи для удаления дыма в западной стене трапезной. Два продуха на западной стене расположены на разных уровнях (рис. 5). От верхнего продуха, находящегося под самым потолком и выше уровня кровли первоначального притвора, вероятно, шел вверх дощатый дымник вдоль наружной стороны западной стены трапезной. Для обеспечения тяги он несколько возвышался над крышей трапезной. Именно такое расположение дымника подтверждается архивным рисунком церкви 1709 года [2; 139]. В графической реконструкции церкви, выполненной Л. М. Лисенко, дымник неравномерно смещен почти в центральную часть крыши трапезной [1; 72].

На западной стене трапезной между дверным проемом и местом расположения печи выявлены следы лестницы, которая вела, очевидно, к продуху дымника для его закрывания и открывания в период топки печи. На восточной стене трапезной с северной стороны от дверного проема под потолком имеется окно-продух, также, очевидно, закрывавшееся ставнем и обеспечивавшее нормальную циркуляцию теплого воздуха из трапезной в храмовую часть.



Рис. 5. Западная стена трапезной со следами реконструкций, проемом для дымника. Фото В. А. Титова

Представить конструкцию полов церкви теперь можно только по обмерам В. А. Крохина и частично по архивным сведениям. Это были преимущественно двойные полы с нижним слоем бревенчатого наката, утеплителем в виде засыпки из прожженной земли и верхним слоем теса или плах, в дальнейшем (в XIX веке) – из доски толщиной 65 мм.

Сохранность деталей потолочных перекрытий позволяет достаточно точно определить их характер. В алтаре потолок двойной, верхний настил – из бревенчатого наката, снизу – подшивка досками, в храмовой части – горизонтальный из плах по четырем балкам, в трапезной – из плах по системе балок. Главными в трапезной являлись продольные балки из спаренных брусьев, опирающихся на стены и резные столбы. Столбы, видимо, имели консоли, для опоры которых сохранились пазы.

Реконструкция храма XIX – начала XX века частично изменила облик здания, сохранив его архитектурно-художественную и историческую ценность. В работе мастеров этого времени прослеживается преемственность традиционных строительных навыков и определенное художественное чутье.

Надстроенная над притвором в XIX веке колокольня в своих формах воспроизводит в уменьшенном масштабе и измененных пропорциях ведущий архитектурный мотив главной части храма – шатер на крещатой бочке. И хотя во всех деталях колокольни прочитываются время ее создания, влияние образцов профессиональной храмовой архитектуры, она является тем поздним наслоением, которое дополнило архитектурный образ здания, усорило его значение как архитектурной доминанты.

При заменах в XIX веке кровель церкви укладка нового лемеха с полукруглым торцом вместо первоначального городкового продумана и выполнена с тщательно проработанным перекрытием переломов и сопряжений различных по форме частей крыши (бочек, шатра, шеек глав), с прокладкой берестяной гидроизоляции. При изготовлении лемеха учтен масштаб архитектурных форм: лемех крыш храмовой части несколько крупнее лемеха крыш колокольни, обладающей иными масштабными соотношениями. Внесено разнообразие в оформлении торцов шеломов на крышах разных частей храма. Фигурная обработка торцов шеломов алтаря (рис. 6), бочек храма и бочек колокольни, имея один принцип, отличается по детализации формы.

В ходе комплексных исследований получено достаточно материалов для выполнения проекта реставрации и проведения реставрационных работ с сохранением максимальной подлинности и достоверности памятника. При этом наиболее полно отвечать требованиям научной реставрации будет реставрация с сохранением и учетом изменений и дополнений, полученных памятником к началу XX века. В разработанном ЗАО «ЛАД» в 2008 году проекте намечено проведение на Одигитриевской церкви в с. Кимжа синтетической фрагментарной

реставрации. В ее ходе облик памятника восстанавливается в своем наиболее выразительном виде, сочетающем сохранившиеся элементы различных периодов. Воссоздание утраченных элементов, необходимых главным образом по конструктивным соображениям, выполняется по историческим описаниям, аналогам. В качестве одной из важнейших, центральных задач проекта реставрации ставится задача обеспечения достоверности и сохранности памятника, его долговечности.

Авторами проекта в качестве предпочтительного предлагается следующий вариант.

Внешний облик Одигитриевской церкви сохраняется в основном в том виде, который сложился к 1878–1900 годам, так как на данный период существования храма имеется максимальный объем информации об архитектуре и конструкциях здания как в документах, так и на самом объекте, что позволяет по завершении работ обеспечить необходимую подлинность и достоверность памятнику (рис. 7).



Рис. 6. Завершение бочки алтаря. Фото Т. И. Вахрамеевой

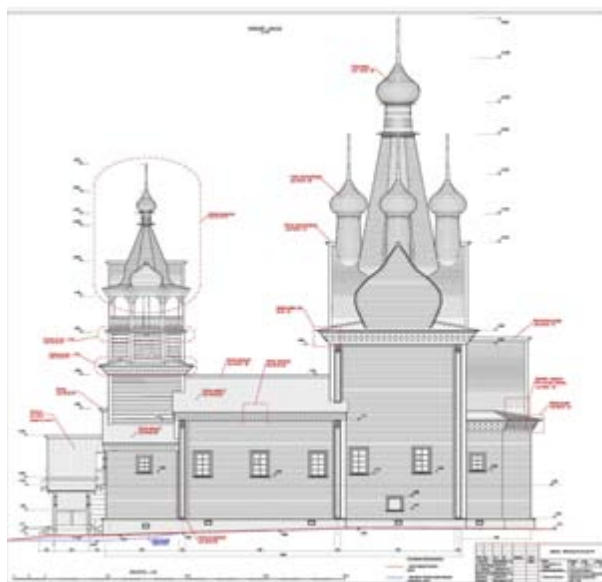


Рис. 7. Проектное решение. Южный фасад. Авторы проекта – Т. И. Вахрамеева, Ф. В. Ефремов, В. Г. Копнин

В ходе реставрации храм будет восстановлен с надстроенной над притвором колокольней, наружные стены – с тесовой обшивкой. Высота церкви определяется с учетом подведенных при реставрации 2003 года нижних венцов и устройства каменного цоколя и равняется в наивысшей точке (крест на главке центрального шатра храма) примерно 32 м от уровня земли. Окна сохраняются в дошедшем до наших дней облике, так как их реконструкция на первоначальный период приведет к утрате значительного количества подлинных элементов как XVIII, так и XIX века.

Более древние и архаичные элементы должны быть сохранены в виде экспозиционных зондажей и элементов, органично включаемых в «постреставрационный» облик храма, как исторические документы, прочтение которых еще до конца не завершено.

Восстановление обшивки снаружи сруба, производимое с высокой степенью достоверности, обеспечит защиту бревен от внешних атмо-

сферных воздействий и большую комфортность в помещениях, дополнительно уменьшив продуваемость стен.

Восстановление первоначального облика памятника вызовет много гипотетических решений, уничтожение привнесенных в ходе реконструкций XIX века частей здания, деталей, которые не подходят под определение дисгармоничных.

Ситуация, которая сложилась на данном объекте, еще раз подтверждает необходимость требования того, чтобы все ремонтно-реставрационные и консервационные работы на памятниках предварялись детальными обмерами и обследованием объекта. Иначе, как в данном случае, из-за отсутствия такой документации до начала первых консервационных работ оказалась утраченной важная информация о ряде конструктивных и архитектурных элементов храма, и в настоящее время приходится решать задачи реставрации памятника, по ряду элементов основываясь на аналогиях и не обладающих исчерпывающей точностью архивных материалах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисенко Л. М. Национальные особенности памятника деревянного зодчества в с. Кимжа // Архитектурное наследие. 1975. № 23. С. 70–78.
2. Лютикова Н. П. «Шатровая о пяти главах...» (новые материалы об Одигитриевской церкви в с. Кимжа Мезенского района Архангельской области) // Проблемы исследования, реставрации и использования архитектурного наследия Русского Севера. Петрозаводск: РИО Петрозаводского государственного университета им. О. В. Куусинена, 1989. С. 136–145.

УДК 624.072

НИКОЛАЙ ИВАНОВИЧ КАРПЕНКО

академик РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией проблем прочности и качества в строительстве НИИ строительной физики, г. Москва
niisf_lab9@mail.ru

АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ПЕТРОВ

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой архитектуры, строительных конструкций и геотехники строительного факультета ПетрГУ
petr@psu.karelia.ru

ЗАХАР АНДРЕЕВИЧ ВОРОНИН

старший преподаватель кафедры архитектуры, строительных конструкций и геотехники строительного факультета ПетрГУ
voronin@onego.ru

**ОПЫТ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ АППРОКСИМАЦИИ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК-СТЕНОК С ПРОЕМАМИ**

В статье рассматривается конечно-элементный подход к анализу напряженно-деформированного состояния железобетонных балок-стенок с проемами. В основу методики физически-нелинейного расчета положены зависимости деформационной теории пластичности железобетона с трещинами Н. И. Карпенко. Приводятся результаты численных исследований балок-стенок БС-1, БС-2 и БС-3 из опытов НИИ Мосстроя.

Ключевые слова: теория пластичности железобетона, балки-стенки с трещинами, метод конечных элементов

В настоящее время в практике проектирования строительных конструкций все шире применяются расчетные модели, учитывающие действительные свойства бетона и арматуры и особенности их работы под нагрузкой. До образования трещин бетон и арматура деформируются совместно, что позволяет определять матрицу жесткости железобетона путем суммирования матриц жесткости бетона и арматуры. При этом учитывается зависимость жесткостных параметров бетона от направления главных осей, так называемая приобретаемая ортотропия. После образования трещин совместность деформаций бетона и арматуры нарушается. В рамках деформационной модели [3] свойства железобетона с трещинами аппроксимируются свойствами некоторого эквивалентного сплошного анизотропного тела. При этом жесткостные параметры записываются в зависимости от схемы образования трещин и их ориентации относительно направления арматуры, а также учитываются сдвиг берегов трещин и неоднородность напряженного состояния бетона в полосах между трещинами. В предыдущих пуб-

ликациях [4], [5] приводятся выражения для коэффициентов матрицы жесткости железобетона до и после образования трещин, а также результаты нелинейного расчета простейших экспериментальных конструкций методом конечных элементов с помощью разработанного авторами программного комплекса.

Дальнейшее совершенствование расчетной модели, а также изучение особенностей конечно-элементной аппроксимации потребовало привлечения в качестве объекта исследования реальных железобетонных конструкций в составе зданий и сооружений с различными схемами загрузки и механизмами разрушения.

Для расчета по предложенной методике были выбраны три балки-стенки из опытов НИИ Мосстроя [2] высотой 2,8 м, толщиной 0,22 м и пролетом 5750 мм (рис. 1б), опирающиеся на колонны. Конструкции, использованные в виде опытных образцов, предназначались для восприятия вертикальных нагрузок от вышележащих этажей жилых зданий в том случае, когда на первых этажах зданий предусматривалось раз-

мещение объектов общественного назначения. По оси конструкции располагалось отверстие для пропуска инженерных коммуникаций.

Балки-стенки БС-1, БС-2, БС-3 имели одинаковые геометрические размеры, практически одинаковое армирование, но были изготовлены из тяжелого бетона существенно разной прочно-сти (табл. 1).

Таблица 1

Физико-механические свойства бетона

Марка образца	Класс бетона	R_b , МПа	R_{bt} , МПа	E_b , МПа
БС-1	В 15,5	20,4	1,9	25600
БС-2	В 10,8	14,2	1,4	16600
БС-3	В 29,1	38,2	2,65	29500

Таким образом, при испытании конструкций были реализованы различные схемы разрушения. Разрушение сжатой зоны балки-стенки БС-1 сопровождалось текучестью продольной арма-

туры в пролете конструкции. При разрушении сжатой зоны балки-стенки БС-2 продольная арматура работала упруго. Балка-стенка БС-3 разрушилась из-за раздавливания бетона на опоре в результате действия дополнительной сосредоточенной силы, приложенной по оси опоры, при постоянной пролетной нагрузке.

На рис. 1а представлена расчетная схема балки-стенки. Симметричная часть балки-стенки была разбита на 120 прямоугольных конечных элементов, соединенных 143 узлами. Опорные элементы 111 и 112 имеют характеристики металла. Для каждого КЭ был определен тип жесткости, который задан в соответствии с классом бетона и арматуры и коэффициентами армирования (рис. 2а, табл. 1, 2). Коэффициенты армирования определялись для каждого типа конечного элемента расчетной схемы в соответствии с шагом и диаметром арматурных стержней (рис. 2б).

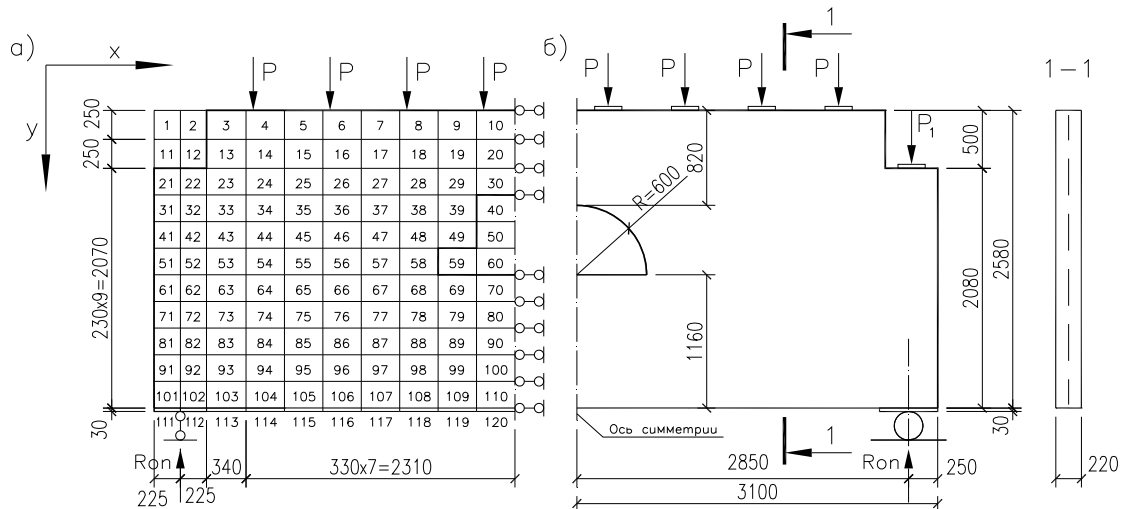


Рис. 1. а) расчетная схема балок-стенок; б) конструкция балок-стенок БС-1, БС-2, БС-3

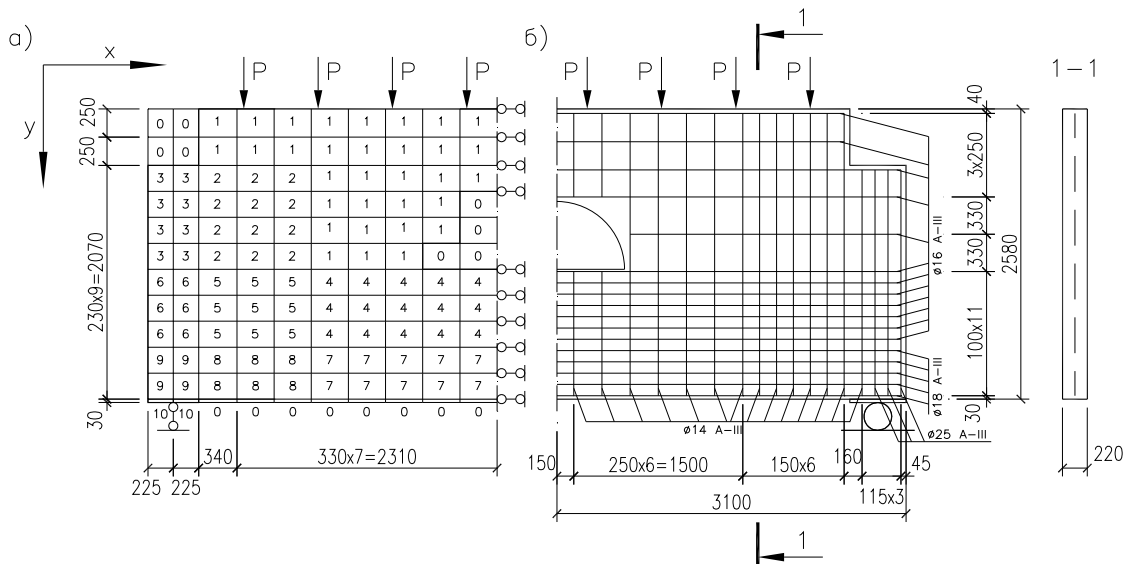


Рис. 2. а) нумерация типов жесткостей; б) армирование балок-стенок БС-1, БС-2, БС-3

Таблица 2

Физико-механические свойства арматуры БС-1, БС-2, БС-3							
№ жесткости (рис. 2а)	Начальные деформативные характеристики арматуры		Прочностные характеристики арматуры		Коэффициенты армиро- вания		Толщина бал- ки-стенки, м
	$E_{sx}, МПа$	$E_{sy}, МПа$	$R_s, МПа$	$R_{su}, МПа$	μ_x	μ_y	
0	–	–	–	–	–	–	0,22
1	207000	207000	429	590	0,0073	0,0047	0,22
2	207000	207000	429	590	0,0073	0,0093	0,22
3	207000	207000	429	590	0,0073	0,0397	0,22
4	207000	207000	429	590	0,0183	0,0047	0,22
5	207000	207000	429	590	0,0183	0,0093	0,22
6	207000	207000	429	590	0,0183	0,0397	0,22
7	207000	207000	429	590	0,0231	0,0047	0,22
8	207000	207000	429	590	0,0231	0,0093	0,22
9	207000	207000	429	590	0,0231	0,0397	0,22
10	207000	207000	429	590	1	1	0,22

В эксперименте нагружение образцов проводилось поэтапно с выдержкой на каждом этапе в течение 10–15 минут. При расчете шаг нагружения определялся с учетом постепенного увеличения нагрузки.

Шаг нагрузки был принят в размере 5 % от предполагаемого разрушающего усилия:

$$P = \left(R_{\text{разруш}} / 4 \right) \approx 50 \text{ kH},$$

где P – сила, приложенная к конструкции (рис. 1, 2), $R_{\text{разруш}}$ – реакция опоры при предполагаемом разрушении конструкции.

Результаты расчетов балок-стенок по предложенной методике сопоставлялись с экспериментальными данными, данными линейно-упругого расчета и нелинейного расчета, выполненного по программе «Ли́ра» версии 9.4 с учетом физической нелинейности железобетона по модели Г. А. Гениева [1].

Как показали расчеты, в результате нагружения балки-стенки БС-1 первые трещины появились в нижнем ряду конечных элементов (№ 108–110, рис. 1а) при суммарной нагрузке, равной 400 кН. Опытная нагрузка трещинообразования составила 385 кН. При этом угол направления главных осей n и t по отношению к осям x и y был равен 86° , что также соответствует опытным данным. На рис. 3 представлены расчетные и экспериментальные схемы развития трещин в балке-стенке БС-1. По мере увеличения нагрузки происходит развитие ранее образовавшихся трещин и появление новых, причем развитие трещин в опорной зоне сопровождается уменьшением угла их наклона к горизонтали. На рис. 4 показаны опытная кривая и теоретические графики прогиба конструкции, полученные по разным моделям. Как видно из графика, до образования трещин деформации конструкции носят преимущественно упругий характер. В дальнейшем деформирование конструкции приобретает выраженный нелинейный характер.

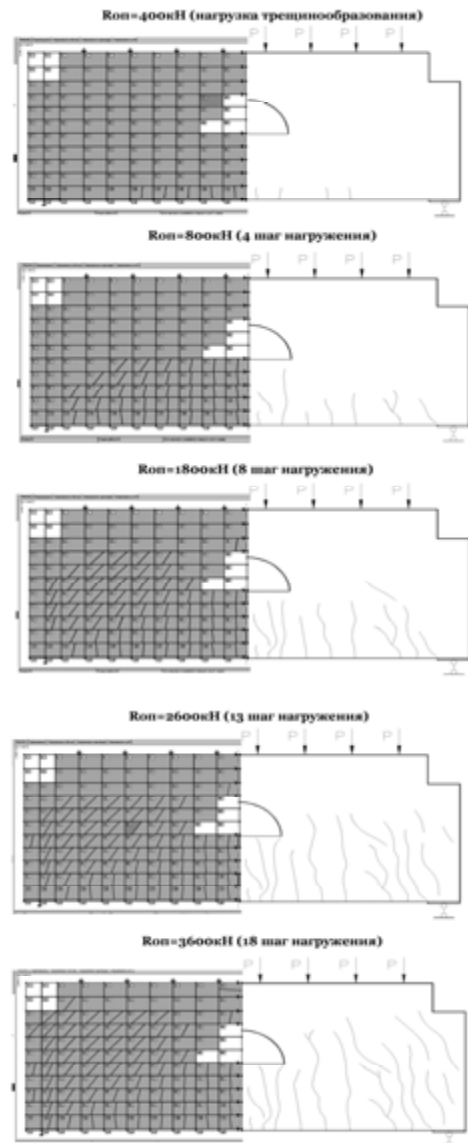


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные схемы развития трещин в балке-стенке БС-1

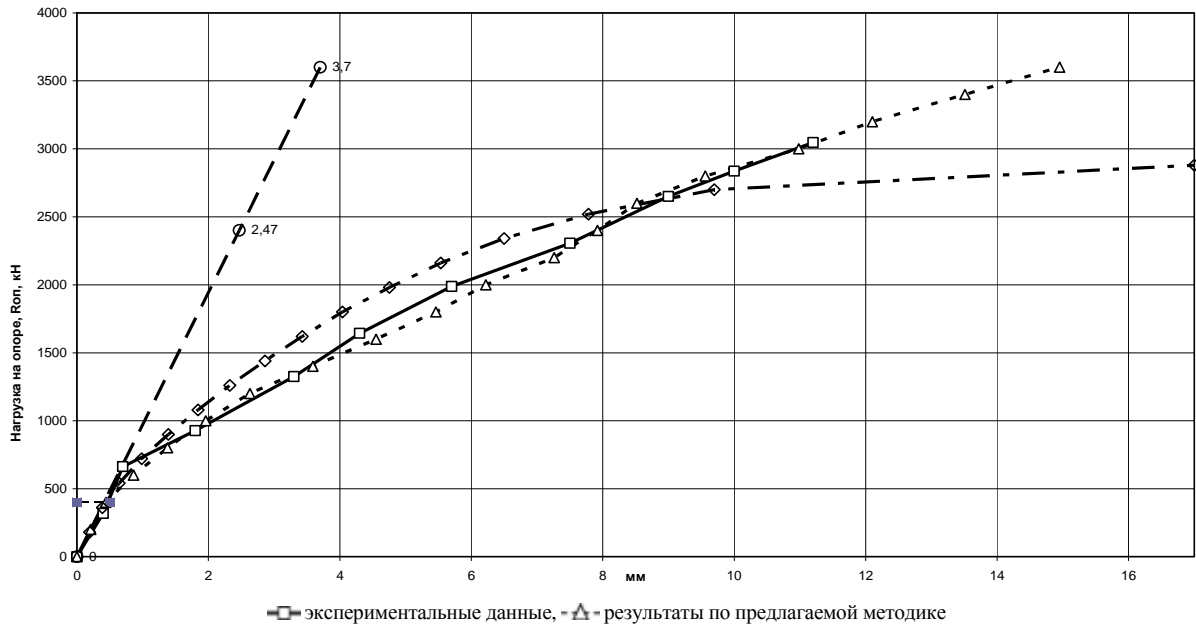


Рис. 4. График прогибов в середине пролета (перемещения узла 132 по оси Y) в балке-стенке БС-1

Теоретическая кривая прогиба по предлагаемой модели по характеру деформирования полностью соответствует опытной с расхождением в отдельных точках до 7 %. Разрушение балки-стенки БС-1 происходит в результате текучести арматуры растянутой зоны (18-й шаг нагружения, элементы № 108–110), что соответствует опытным данным.

Во второй экспериментальной балке-стенке БС-2 первые трещины появились в нижнем ряду конечных элементов (№ 108–110) при суммарной нагрузке, равной 400 кН. Опытная нагрузка трещинообразования составила 377 кН. На рис. 5 представлены расчетные и экспериментальные схемы развития трещин в балке-стенке БС-2. Как и в первом опыте, по мере увеличения нагрузки происходит развитие трещин и появление новых. На рис. 6 показаны опытная кривая и теоретические графики прогиба конструкции, полученные по разным моделям.

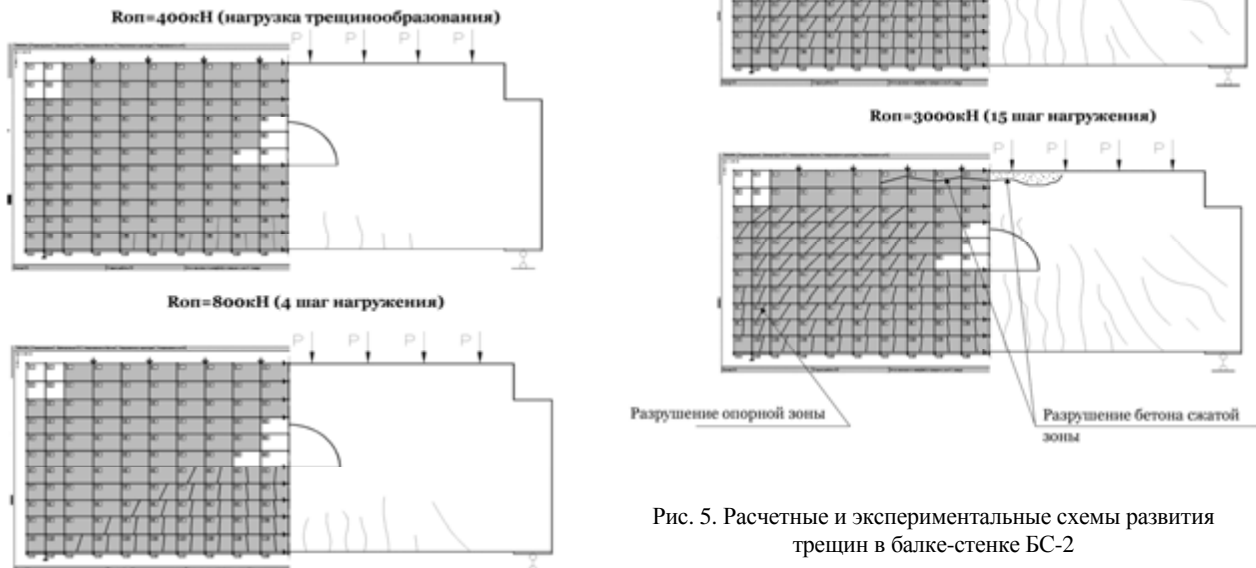


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные схемы развития трещин в балке-стенке БС-2

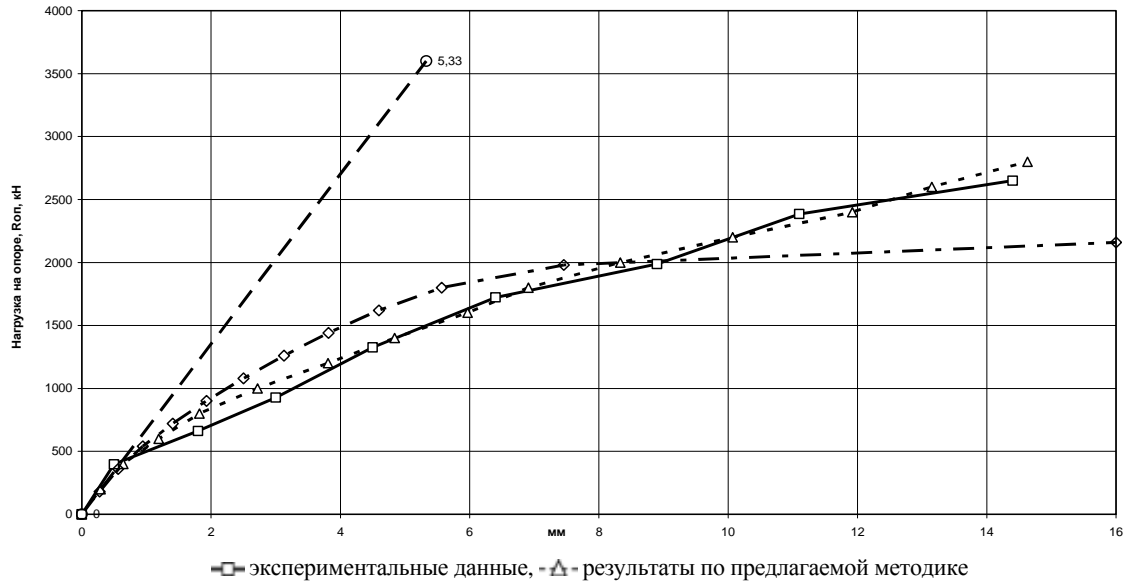


Рис. 6. График прогибов в середине пролета (перемещения узла 132 по оси Y) в балке-стенке БС-2

Теоретическая кривая прогиба по предлагаемой модели по характеру деформирования полностью соответствует опытной с расхождением в отдельных точках до 10 %. Разрушение балки-стенки БС-2 происходит в результате разрушения бетона сжатой зоны (шаг нагружения 15, элементы № 7–10), что соответствует опытным данным.

В балке-стенке БС-3 первые трещины появились в нижнем ряду конечных элементов (№ 106–110) при суммарной нагрузке, равной 600 кН. Опытная нагрузка трещинообразования составила 564 кН. На рис. 7 представлены расчетные и экспериментальные схемы развития трещин в балке-стенке БС-3. При увеличении нагрузки происходит развитие трещин и появление новых. На рис. 8 показаны опытная кривая и теоретические графики прогиба конструкции, полученные по разным моделям. Как видно из графика, до образования трещин деформации конструкции носят преимущественно упругий характер. В дальнейшем деформирование конструкции приобретает выраженный нелинейный характер.

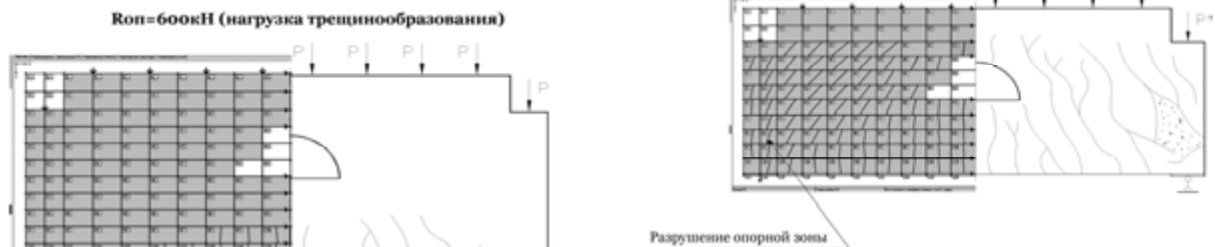


Рис. 7. Расчетные и экспериментальные схемы развития трещин в балке-стенке БС-3

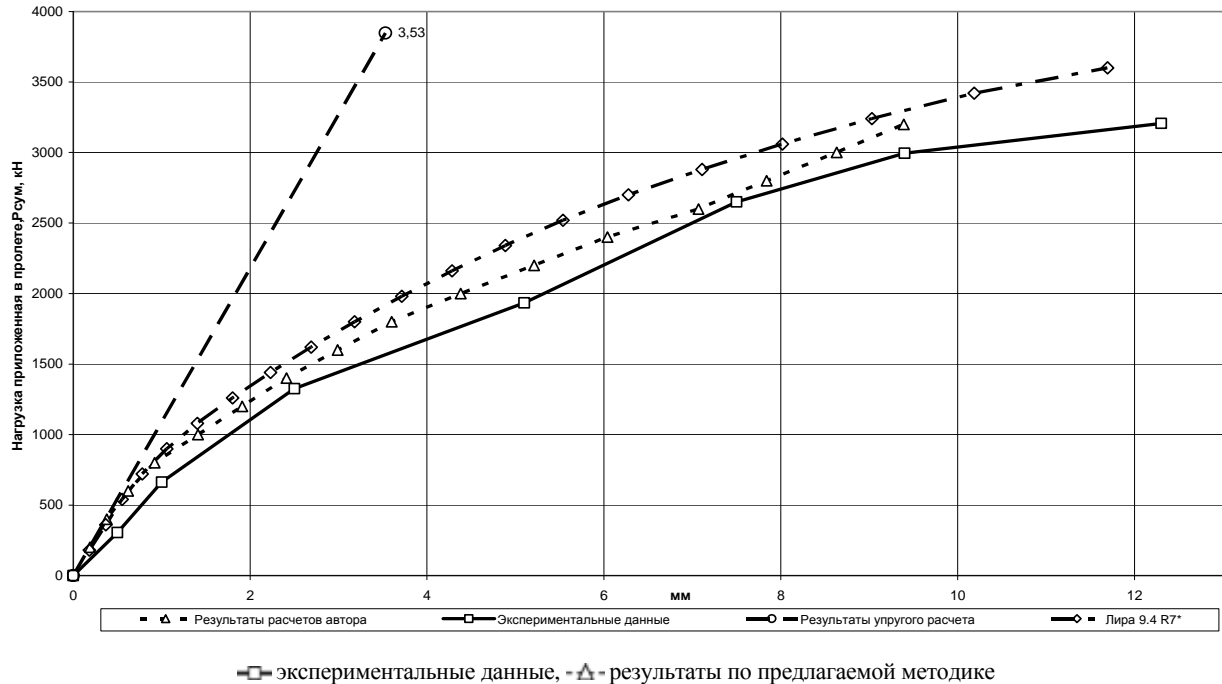


Рис. 8. График прогибов в середине пролета (перемещения узла 132 по оси Y) в балке-стенке БС-3

Теоретическая кривая прогиба по предлагаемой модели по характеру деформирования полностью соответствует опытной с расхождением в отдельных точках до 15%. Разрушение балки-стенки БС-3 происходит в результате исчерпания прочности опорной части конструкции (20-й шаг

нагружения, элементы № 31–32, 41–42, 51–52, 61–62, 71–72, 81–82, 91–92, 101–102), что соответствует опытному данным.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гениев Г. А., Киссюк В. Н., Тюпин Г. А. Теория пластичности бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1974. 316 с.
2. Исследования прочности, жесткости и трещиностойкости опытных образцов сборных железобетонных балок-стенок для первых этажей домов серии ПЗ/16 с разработкой рекомендаций по их совершенствованию: Отчет / НИИ Мосстрой Главмосстроя при Мосгорисполкоме; НИИЖБ Госстроя СССР; Ю. Ф. Бирулин, Ф. С. Белавин, Т. А. Балан, Г. В. Заварзаев, Н. И. Карпенко, Г. Т. Мошевитин и др. М., 1977. 86 с.
3. Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
4. Петров А. Н., Воронин З. А., Евсеева А. В. Физически-нелинейный расчет железобетонных балок-стенок с трещинами методом конечных элементов // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2008. № 1. С. 31–35
5. Петров А. Н., Воронин З. А., Евсеева А. В. Особенности физически-нелинейного расчета железобетонных балок-стенок с трещинами при знакопеременном нагружении // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2008. № 4. С. 31–33.

УДК 591.9 (470.22)

ЭРНЕСТ ВИКТОРОВИЧ ИВАНТЕР

доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой зоологии и экологии, декан эколого-биологического факультета ПетрГУ
ivanter@petrsu.ru

ФАУНИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ЗООГЕОГРАФИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИЙ (на примере Карелии)

В статье на основе анализа фауны Карелии и изучения распространения позвоночных животных предлагаются методы установления реальных зоогеографических границ и общие принципы зоогеографического районирования больших территорий. При этом значительная вытянутость региона с севера на юг, разнообразие и мозаичное размещение природных комплексов наряду с историческими особенностями формирования экосистем и их компонентов обуславливают сложное строение фауны, гетерогенный, смешанный характер ее составных элементов.

Ключевые слова: фауна, зоогеография, наземные позвоночные, экосистемы

В настоящей работе предпринята попытка обосновать целесообразность и практическую возможность установления зоогеографических границ на основе распространения позвоночных животных – млекопитающих, птиц, пресмыкающихся, земноводных и рыб. На этом принципе базируется разработанная нами схема зоогеографического районирования Карелии [2], [3], [4], [5], [6], [7]. Данный регион представляет для зоогеографа особый интерес, и прежде всего как весьма удобная модель для разработки общих приемов и методов фаунистического анализа и зоогеографической дифференциации больших территорий.

Одно из наиболее узких мест зоогеографического районирования – методология установления границ выделяемых регионов. Чаще всего такие границы вычерчивают произвольно или же приурочивают к заранее известным естественным рубежам – ландшафтными границам. Однако в этом случае зоогеографическое районирование фактически подменяется геоботани-

ческим. Что же касается приводимых в оправдание ссылок на обязательное совпадение ландшафтных границ с зоогеографическими, поскольку основным фактором, определяющим распространение животных, является среда обитания, то они не меняют сути дела. Во-первых, ареалы животных могут определяться также и историческими причинами. Во-вторых, сам принцип объективности обязывает проводить фаунистическое районирование именно по зоологическому компоненту ландшафта, то есть на основе распространения животных. Иначе теряется всякий смысл зоогеографического районирования как такового. Ему отводится лишь формальная, подчиненная роль – охарактеризовать животное население уже выделенных ботаниками и почвоведомы физико-географических районов.

Согласно схеме зоогеографического районирования, предложенной Б. А. Кузнецовым [10], территория Карелии входит в состав Западно-Европейского таежного района Западно-

таежного округа Таежной провинции Бореально-лесной подобласти Палеарктики. Северная часть республики лежит в Кольском подрайоне, а южная – в Карело-озерном. Расположение региона на границе между северотаежной и среднетаежной подзонами, то есть на стыке двух крупных фаунистических комплексов – таежного и европейских широколиственных лесов [14], значительная вытянутость его территории с севера на юг, разнообразие и мозаичное размещение природных комплексов наряду с историческими особенностями экосистем обуславливают сложное строение фауны, гетерогенный, смешанный характер ее составных элементов [2], [5].

Из общего числа зарегистрированных в Карелии млекопитающих (65 видов) наиболее обширную группу (17 видов, или 26 %) составляют широко распространенные по всей лесной полосе виды: обыкновенная бурозубка, рысь, бурый медведь, заяц-беляк, белка, рыжая полевка, лось и некоторые другие. Хорошо представлены также лесные западноевропейские виды (13, или 20 %), такие как лесная куница, норка, лесной хорек, лесная мышовка. Третье место принадлежит «таежному» (сибирскому) комплексу (7 видов, 10,8 %). Это, например, средняя и равнозубая бурозубки, лесной лемминг, красная и красно-серая полевки, россомаха, лесной северный олень. Далее следуют виды-убиквисты (транспалеаркты) – 6 видов (9,2 %). К ним относятся волк, лисица, горноста́й, ласка, выдра, барсук. Пять видов (7,5 %) образуют группу млекопитающих южного происхождения, обитателей лесостепных и степных пространств – полевая мышь, мышь-малютка, обыкновенная полевка, заяц-русак, еж (в табл. 1 они объединены с западноевропейскими формами). Песец, норвежский лемминг и тундровая бурозубка представляют арктический элемент (4,6 %).

Кроме того, фауна млекопитающих Карелии включает 3 синантропных вида – домовая мышь, серая и черная крысы; 6 видов, появившихся на территории республики в результате интродукции и реинтродукции, – ондатра, европейский и канадский бобры, американская норка, енотовидная собака, кабан и 6 видов ластиногих и ки-

тообразных Белого моря и Ладожского озера – морской заяц, гренландский тюлень, кольчатая нерпа, белуха, морская свинья и косатка.

В географическом облике орнитофауны наиболее выражено преобладание элементов, свойственных европейскому широколиственному лесу (см. табл. 1). Всего лесных западноевропейских видов птиц в Карелии насчитывается 69 (35 % от общего числа гнездящихся). Это коростель, дупель, вяхирь, клинтух, обыкновенная неясыть, козодой, стри́ж, седой дятел, иволга, юла, лазоревка, славка-черноголовка. Далее следует обширная группа транспалеарктов (убиквистов) – 57 видов (28,8 %): чеглок, пустельга, обыкновенный канюк, тетереви́тник, кукушка, вертишейка, длиннохвостая синица и другие. Почти так же многочисленна группа «сибирских» (таежных) форм восточно-азиатского происхождения (51 вид, 26 %). Среди них можно назвать глухаря, мохноногого сыча, ястребиную сову, желну, кукшу, свири́стеля, белобровика.

Арктический элемент выражен слабо (20 видов, 10,2 %). В числе его представителей – краснотазовая гагара, морская чернеть, гуменник, обыкновенная гага, зимняк, белая куропатка, галстучник, круглоносый плавунчик, малый веретенник, полярная крачка и другие.

Пресмыкающиеся и земноводные Карелии представлены 4 таежными видами (40 %), 3 видами с транспалеарктическим распространением (30 %) и 3 южными формами, характерными для европейских широколиственных лесов. К первой группе принадлежат живородящая ящерица, обыкновенная гадюка, травяная и остромордая лягушки, ко второй – серая жаба, обыкновенный тритон и веретеница, к третьей – прыткая ящерица, уж и гребенчатый тритон.

Несколько схематизируя, можно сказать, что фауна наземных позвоночных Карелии почти на 35 % состоит из западноевропейских и южных форм, свойственных полосе широколиственных лесов, на 33 % – из широко распространенных в Евразии видов (транспалеарктов), на 24 % – из типично таежных (сибирских) форм и на 9 % – из арктических (полярных) видов.

Таблица 1

Участие фаунистических элементов
в сложении фауны наземных позвоночных Карелии

Группы наземных позвоночных	Всего видов	В том числе, %			
		арктические	бореальные (сибирские)	западноевропейские (широколиственных лесов и степи)	транспалеаркты (лесные, широко распространенные)
Млекопитающие	53	5,5	13,0	33,3	48,2
Птицы	197	10,2	26,0	35,0	28,8
Пресмыкающиеся и земноводные	10	–	40,0	30,0	30,0
Всего	260	8,8	23,7	34,6	32,9

Таблица 2

Зоогеографическая структура ихтиофауны Карелии (по С. П. Китаеву, О. П. Стерлиговой [8], с изменениями)

Озера бассейнов	Число видов	Фаунистические комплексы, %						
		Арктический	Бореальный предгорный	Бореальный равнинный	Древний верхнетретичный	Понтийский	Морской	Неизвестный
Баренцева моря	22	40,9	22,7	18,2	–	–	13,6	4,6
Белого моря	25	32,0	20,0	28,0	–	8,0	8,0	4,0
Северного моря	20	20,0	20,0	35,0	–	10,0	10,0	5,0
Балтийского моря	48	20,8	18,8	25,0	6,3	16,7	6,3	5,1
По всей территории	52	26,9	20,0	26,1	2,6	10,4	13,0	1,0

Фауна пресноводных рыб региона не менее разнородна [9], [8]. Из 52 отмеченных здесь представителей ихтиофауны (табл. 2) около 27 % видов приходится на арктический элемент, 20 и 26 % принадлежат соответственно к бореальным предгорному и равнинному комплексам, 2,6 % – к древнему верхнетретичному, 10,4 % – к понтийскому и 13 % – к морскому. Фаунистическая принадлежность остальных 3 обнаруженных в Карелии видов рыб (1 % от общего числа отмеченных) так и осталась невыясненной. Как и у других позвоночных животных, у рыб достаточно четко проявляется закономерная смена доминирующих фаунистических комплексов по мере продвижения с севера на юг: в ихтиофауне озер бассейнов Баренцева и Белого морей отчетливо преобладают арктический и бореальный элементы, а в пресных водоемах Балтики – более южные понтийский и морской.

Процесс проникновения в Карелию и продвижения дальше на север южных и юго-западных форм продолжается и в настоящее время. Наиболее активно расселяются к северу черный хорь, крот, кабан, мышевидные грызуны (желтогорлая мышь, мышь-малютка, лесная мышовка) и ряд видов птиц: черный дрозд, иволга, обыкновенная чайка, чечевича, седой дятел, вертишейка, трещотка, щегол, зеленушка, козодой, чибис, кобчик, красноголовый нырок. Существенно продвинулась на север серая жаба. Основной причиной изменений ареалов этих и целого ряда других видов является преобразование естественных ландшафтов в связи с рубкой лесов и развитием сельского хозяйства. Это привело к коренному изменению таежных биоценозов, и прежде всего к смене коренных типов ельников и сосняков лиственными лесами и кустарниками.

Расчистка земель от леса для культурных угодий, осушка болот и другие мелиоративные мероприятия, а также массовые рубки лесов для промышленных целей преобразуют естественные ландшафты, сужают первоначальные области распространения типично лесных животных (например, глухаря, кукушки, трехпалого дятла, королька, клестов, рыси, россомахи, белки) и значительно улучшают условия обитания жителей лиственных лесов, перелесков, кустарниковых зарослей, полуоткрытых или открытых участков. Такие виды, как крот, мышь-малютка, темная по-

левка, белая и желтая трясогузки, каменка, чибис, жаворонок и другие, увеличивают численность и расширяют свой ареал. Правда, в последние десятилетия в связи с переориентацией сельского хозяйства республики с зернового на картофеле-овощное и травосеяние некоторые из них (обыкновенная полевка, полевая мышь, серая куропатка, перепел, заяц-русак) снова отступили к югу.

Смена хвойных монотонных по составу лесов лиственными и смешанными насаждениями сказывается на увеличении видового разнообразия и численности птиц. В связи с лесозаготовками число обитателей густых лесных массивов (пищуха, королек, московка, глухарь, филин) заметно сокращается или они переходят во вторичные лиственные и смешанные леса с обилием ели. Зато птицы светлых лесов и вырубков (лесной конек, весничка, славки, жулан), наоборот, получают широкое распространение и увеличивают численность.

Вблизи возделываемых земель светлые или разреженные леса имеют фауну, которая в значительной степени отклоняется от фауны первичных лесов. Характерные здесь виды – барсук, лисица, ворона, сорока, обыкновенная овсянка, большая синица, рябинник, вертишейка. Многие из них селятся в этих лесах, чтобы добывать себе корм на соседних возделываемых полях. В кустарниковых зарослях, занимающих бывшие пашни и луга, а также в черте поселков обитают чечевича, садовая камышевка, речной сверчок, каменка, жулан. Из этой группы по крайней мере зеленушка, коноплянка и щегол являются пришельцами, появившимися в Карелии с развитием полеводства и увеличением числа населенных пунктов.

В результате интенсивной трансформации коренных местообитаний и резкого изменения экологической обстановки не только расширяются ареалы редких в Карелии форм и обогащаются новыми видами местная фауна, но и увеличивается численность некоторых фоновых, широко распространенных в регионе животных. Прежде всего это относится к типичным обитателям лиственных лесов, вырубков, перелесков и кустарниковых зарослей – лисице, зайцу-беляку, лосю, темной полевке, белой и желтой трясогузкам, лесному коньку, полевому жаворонку, серой мухоловке, обыкновенной овсянке, большой си-

нице, рябиннику, луговому чекану, садовой славке. Таким образом, в населении наземных позвоночных Карелии южные фаунистические элементы по числу видов и особенно по общей численности особей занимают все более господствующее положение.

Если расселение представителей фаунистического комплекса широколиственных лесов идет в основном по ландшафтам, преобразованным деятельностью человека, то сибирские виды, распространяясь в западном направлении, двигались преимущественно по коренным таежным типам местообитаний. Часть из них прочно закрепилась на новой территории (например, малая мухоловка), но у многих форм экспансия на запад продолжается. Так, для синехвостки и двух видов пеночек (таловки и зеленой) Карелия пока представляет область нерегулярного гнездования, а для глухой кукушки, зарнички и белой лазоревки – зону периодических залетов.

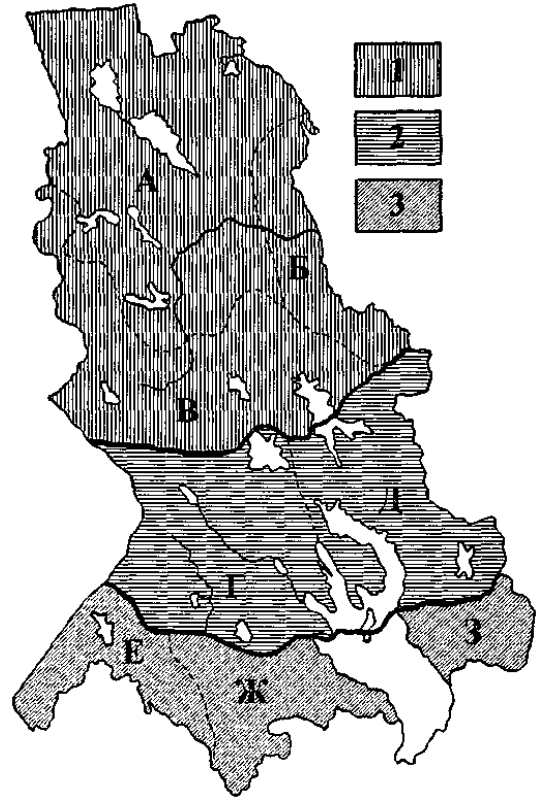
Тенденцию к расселению в южном направлении в последние 40 лет обнаруживает лесной северный олень, когда-то населявший всю территорию Карелии, но почти истребленный в середине тридцатых годов прошлого столетия. Однако подавляющее число северотаежных видов не проявляет стремления к расширению ареала, и южные границы их распространения пока остаются относительно постоянными.

Известно, что начиная со второй половины XIX столетия в Евразии наблюдалось некоторое потепление климата. Одновременно было замечено продвижение на север ряда видов животных. В Карелии это еж, лесной хорь, черный дрозд, красноголовый нырок, чемга, лысуха, камышевки и некоторые другие. Таким образом, помимо хозяйственного преобразования ландшафтов, причиной некоторого «обьюжнения» фауны Карелии и наступления многих видов на северные районы было соответствующее изменение климата.

Итак, фауна Карелии гетерогенна и состоит как из широтных, главным образом экологических, так и долготных, преимущественно исторических, элементов, налегающих друг на друга. К этому надо добавить, что ее в значительной степени (почти наполовину) слагают виды, обитающие здесь у границ ареалов. Так, из общего числа зарегистрированных на гнездовые птиц 68 видов (34,3 %) находят в Карелии северный предел распространения, а 24 вида (12,1 %) – южный. Территорию республики пересекают также северные границы распространения 15 видов млекопитающих (30 % от общего числа) и 5 видов земноводных и пресмыкающихся (50 %).

В связи со значительной вытянутостью территории в меридиональном направлении и зональными особенностями Карелия представляет для населяющих ее животных весьма неоднородную биологическую среду. Одни виды предпочитают северотаежные хвойные леса и концентрируются преимущественно в северных

районах, другие тяготеют к лиственным насаждениям и открытому ландшафту и живут главным образом в Южной Карелии. В соответствии с основными различиями в составе и численности фауны на территории Карелии можно выделить три основных широтных зоогеографических подрайона: *Северокарельский*, *Среднекарельский* (переходный) и *Южнокарельский* (см. рисунок). Эти подрайоны отличаются специфическими природными условиями, составом и численностью животного населения. Ниже дается их краткая характеристика.



Зоогеографическое районирование Карелии:

1 – Северокарельский подрайон, 2 – Среднекарельский подрайон, 3 – Южнокарельский подрайон. А – Северо-западный участок; Б – Прибеломорский участок; В – Центральный участок; Г – Западный участок; Д – Заонежский участок; Е – Приладожский участок; Ж – Олонецкий (южный) участок; З – Пудожский (юго-восточный) участок

СЕВЕРОКАРЕЛЬСКИЙ ЗООГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ПОДРАЙОН

Занимает всю северную часть Карелии и простирается к югу до линии Лендеры – Уросозеро – Нюхча (63° 30 с. ш.). Характеризуется неоднородным рельефом (чередованием высоких и длинных кряжей, вытянутых в северо-западном направлении, с узкими ложбинами, занятыми озерами и болотами), довольно суровым, с продолжительной и холодной зимой и коротким прохладным летом, климатом, супесчаными и песчаными почвами и монотонным

северотаежным ландшафтом с преобладанием хвойных, преимущественно сосновых, лесов и большими пространствами сфагновых болот. Ельники располагаются узкими лентами вдоль рек и заболоченных низин и представлены в основном бедными типами. Лиственные формации и сенокосные угодья встречаются редко и занимают небольшую площадь обычно в окрестностях населенных пунктов.

Фауна имеет типично северный облик. В ней господствуют северотаежные и арктические виды. Из птиц наиболее характерны белая куропатка, сероголовая гаичка, свиристель, трехпалый дятел, краснозобая гагара, луток, турпан, синьга, юрок, чечетка. Свообразно пернатое население Беломорского побережья: обыкновенная гага, длинноносый крохаль, атлантический чистик, камнешарка, кулик-сорока, галстучник, сизая и серебристая чайки, полярная крачка и ряд других.

Из млекопитающих типичными представителями Северокарельского подрайона являются средняя бурозубка, лесной лемминг, красная и красно-серая полевки, росомеха, северный олень. Темная полевка, экономка и малая бурозубка встречаются преимущественно по долинам рек и берегам озер в лиственных и смешанных насаждениях с хорошо развитым подлеском и травостоем. Южные фаунистические элементы – животные открытых пространств и лиственных лесов – отсутствуют или крайне малочисленны. В частности, совершенно не встречаются в этом подрайоне полевые и желтогорлые мыши, ушан, заяц-русак, лесная мышовка, коростель, козодой, седой дятел, жулан, славка-черноголовка, черный дрозд, соловей, чибис, иволга и другие.

Близкими особенностями характеризуется и местная ихтиофауна. В ее основе как типичные северные виды, такие как пресноводный лосось, озерная кумжа, обыкновенный сиг, европейский хариус и паляя, так и ряд широко распространенных по всей Карелии видов. В числе последних окунь, плотва, лещ, елец, язь, ерш, щука, налим и некоторые другие эврибионты. Представители более южных комплексов если и встречаются, то достаточно редко и далеко не во всех водоемах.

В целом в сравнении с остальной территорией фауна Северокарельского подрайона относительно бедна в видовом отношении и отличается низкой суммарной численностью.

ЮЖНОКАРЕЛЬСКИЙ ЗООГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ПОДРАЙОН

Располагается к югу от 62-й параллели и отличается холмисто-равнинным рельефом, более плодородными, чем на севере, почвами, сравнительно мягким климатом, большой пестротой и мозаичностью растительных группировок и значительной трофностью и разнообразием водоемов. Большие площади занимают ельники и сосняки различных типов, хорошо представлены

лиственные и смешанные леса (вторичные березняки и осинники с примесью ели и сосны), разновозрастные вырубki и опушечно-луговой комплекс. Заболоченность по сравнению с северными районами невелика.

Фауна наземных позвоночных характеризуется разнообразием, значительным участием элементов «европейской» фауны, общей высокой и стабильной численностью аспектирующих видов. Средняя плотность гнездования птиц – 300–600 пар на 1 км², тогда как на севере – 50–200. Характерно широкое представительство южных форм. Среди них иволга, чечевица, соловей, клинтух, галка, зеленушка, козодой, жулан, чибис, широконосок, коростель, лысуха, черный дрозд, седой дятел и многие другие.

Из земноводных и пресмыкающихся только здесь встречаются уж, прыткая ящерица, веретеница и гребенчатый тритон (севернее они отсутствуют). Из млекопитающих наиболее характерны представители южного фаунистического комплекса – ушан, водяная ночница, русак, еж, полевая и желтогорлая мыши, обыкновенная полевка, мышшь-малютка, лесная мышовка, малая бурозубка и другие, но основу териофауны составляют все те же широко распространенные лесные виды – рыжая, темная и водяная полевки, экономка, обыкновенная бурозубка, заяц-беляк, белка, рысь, куница, горностай, лисица, лось.

Более высокой, чем на севере, численности достигают здесь широко распространенные лесные виды птиц: яблик, весничка, лесной конек, теньковка, большой пестрый дятел, рябчик, терев, рябинник, белобровик, желна.

Совершенно отсутствуют или очень редки многие арктические и северотаежные животные – красно-серая полевка, северный олень, морская чернеть, турпан, зимняк, галстучник, полярная крачка, краснозобая гагара, атлантический чистик и другие.

Достаточно отчетливый южный колорит демонстрирует и население рыб. Почти исключительно в этом подрайоне водятся минога, стерлядь, жерех, линь, густера, щиповка, уклейка и сом. Многочисленны и виды-убиквисты, широко распространенные по всей таежной зоне, такие, например, как голец, язь, хариус, плотва, окунь, щука, лещ, налим и кумжа.

СРЕДНЕКАРЕЛЬСКИЙ ЗООГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ПОДРАЙОН

Лежит между Северо- и Южнокарельским подрайонами, располагаясь по обе стороны от ландшафтной границы между Северотаежной и Среднетаежной подзонами. В отношении природных условий занимает промежуточное положение, но все же несет в себе больше черт средней тайги. Благодаря взаимопроникновению северных и южных элементов фауна подрайона смешанная. Наряду с типичными северотаежными видами (красная полевка, лесной лемминг,

трехпалый дятел, луток, чечетка, дербник, мохноногий сыч, овсянка-ремез, белая куропатка, а из рыб – пресноводный лосось, палия, европейский хариус, обыкновенный хариус и т. д.) здесь встречаются, правда, у северных границ ареала и некоторые «южные» формы (лесная мышовка, мышь-малютка, обыкновенная полевка, коростель, осоед, иволга, трещотка, черный дрозд, веретеница, гребенчатый тритон, линь, жерех, карась, щиповка и другие), а также убиквисты (экономка, равнозубая и крошечная бурозубки, лисица, горностаи, ласка, волк, лось, зяблик, чеглок, пустельга, канюк, большая и длиннохвостая синица) и типичные среднетаежные виды (рыжая полевка, белка, заяц-беляк, медведь, рябчик, чирок-свистун, гоголь, белобровик, весничка, травяная лягушка, обыкновенный тритон).

В целом Среднекарельский зоогеографический подрайон является переходным и совмещает в себе черты двух предыдущих. От Северокарельского подрайона он отличается отсутствием многих арктических форм, в частности морской чернети, синьги, краснозобой гагары, галстучника, северного оленя, и наличием ряда южных, а также более высокой общей плотностью населения позвоночных. От Южнокарельского подрайона – более низкой численностью фауны, исчезновением многих южан (садовой сони, ежа, желтогорлой мыши, седого дятла, галки, щегла, ужа, прыткой ящерицы) и присутствием некоторых северотаежных видов.

Имеющийся в нашем распоряжении фаунистический материал позволяет провести дальнейшее более дробное подразделение названных выше трех подрайонов с выделением *Прибеломорского, Северо-западного, Центрального, Западного, Заонежского, Приладожского, Олонецкого и Пудожского* участков (см. рисунок). Фауна этих зоогеографических выделов, конечно, менее специфична, чем фауна подрайонов, но различия все же достаточно отчетливы, по крайней мере, в соотношении видов и их численности.

Как известно, основную трудность при зоогеографическом районировании представляет установление зоогеографических границ. Совершенно очевидно, что решать эту задачу следует на основе объективных критериев и, прежде всего, исходя из современного распространения животных. Места концентрации границ ареалов видов-индикаторов, как правило, бывают приурочены к естественным рубежам между отдельными историческими сложившимися фаунистическими комплексами, хорошо их обозначают и потому могут служить достаточно надежной основой для очерчивания зоогеографических выделов.

Таким образом, установление границ при зоогеографическом районировании можно свести к поиску определенных, достаточно узких пространств, где наблюдается основное скопление границ распространения многих видов животных.

Соответствующий анализ показал, что на территории Карелии имеются два участка сравни-

тельно небольшой ширины, где сосредоточены северные и южные границы ареалов млекопитающих, птиц, пресмыкающихся, земноводных и рыб. Первый участок – полоса, тянущаяся вдоль 63° 30' с. ш. Здесь располагаются северные границы ареалов более 30 видов наземных позвоночных. Это, в частности, обыкновенная полевка, мышь-малютка, лесная мышовка, черный хорь, русак, ушан, большая поганка, чирок-трескунок, широконосок, красноголовый нырок, болотный лунь, кобчик, перепел, серая куропатка, коростель, малый зуек, озерная чайка, козодой, белоспинный дятел, грач, иволга, коноплянка, поползень, лазоревка, жулан, веретеница и другие. Здесь же проходит южная граница распространения северного оленя, галстучника, синьги, полярной крачки, сероголовой гаички.

Второй участок, где сконцентрированы северные и южные границы ареалов более 20 видов, располагается по 62-й параллели. Именно в этом месте проходит северный предел распространения желтогорлой мыши, усатой, прудовой и водяной ночниц, выпи, осоеда, лысухи, малой чайки, обыкновенной неясыти, седого дятла, полевого луна, зеленой пеночки, славки-черноголовки, черного дрозда, щегла, бормотушки, садовой камышевки, ужа.

Таким образом, около 80 % видов наземных позвоночных, границы ареалов которых пересекают Карелию, имеют эти границы в районах, указанных выше. В этих местах проходят северные границы распространения и других видов животных, например паразитических червей, клещей и насекомых, водных беспозвоночных, а также ряда видов растений: липы, черной ольхи, кислицы, тростникового вейника, ландыша, горного вяза, сарматской манжетки и многих других [12], [23], [16], [11], [19], [22], [15], [18], [8], [20].

Отсюда некоторый параллелизм между зоогеографической и ботанико-географической областями, обусловленный как косвенной (через общие природно-климатические факторы, определяющие распространение животных и растений), так и прямой зависимостью географического распределения животных от ландшафтных условий. Симптоматично в этом отношении совпадение в общих чертах выделенных нами зоогеографических районов с агроклиматическими зонами [17], а также, правда, в меньшей степени, с лесотипологическими полосами [23], почвенными подзонами [13] и даже с орографическими районами [1]. Совпадение это не полное, но достаточно очевидное, чтобы подтвердить зависимость зоогеографических границ от линий изменений в характере окружающей среды. Оно обусловлено как тесной зависимостью распространения животных от современного распределения различных экологических условий, так и тем, что в историческом процессе фауна развивается всегда как составная часть определенного ландшафта [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов П. А., Бискэ Г. С. Рельеф. Карельская АССР. М., 1956. С. 23–26.
2. Ивантер Э. В. Фауна наземных позвоночных и зоогеографическое районирование Карельской АССР // Тез. докл. конф. молодых биологов Карелии. Петрозаводск, 1968. С. 105–106.
3. Ивантер Э. В. Орнитофауна Карелии и ее зоогеографический анализ // Материалы VII Прибалтийской орнитологической конференции, 2. Рига, 1970. С. 93–98.
4. Ивантер Э. В. Териофауна Карелии и ее зоогеографический анализ // Труды 2-го Всесоюзного совещания по млекопитающим. М.: Изд-во МГУ, 1975. С. 218–221.
5. Ивантер Э. В. К вопросу о методах установления границ при зоогеографическом районировании // Естественная среда и биологические ресурсы Крайнего Севера. Л., 1975. С. 3–12.
6. Ивантер Э. В. Фаунистический анализ и проблемы зоогеографического районирования // Тр. КарНЦ РАН. Биогеография Карелии. Сер. Б. Биология. Вып. 2. Петрозаводск, 2001. С. 76–81.
7. Ивантер Э. В. Зоогеография Карелии и принципы фаунистического районирования // Тр. ГосНИОРХ. СПб., 2007. С. 199–210.
8. Китаев С. П., Стерлигова О. П. О зоогеографии рыб пресных водоемов Фенноскандии // Тр. ГосНИОРХ. Вып. 337. СПб., 2001. С. 167–174.
9. Кудерский Л. А. Материалы по зоогеографии рыб внутренних водоемов Карелии // Материалы по зоогеографии Карелии. Вып. 1. Петрозаводск, 1961. С. 19–33.
10. Кузнецов Б. А. Очерк зоогеографического районирования СССР. М.: Изд-во МОИП, 1950. 175 с.
11. Лобкова М. П. Некоторые данные по распространению комаров в Карелии // К природной очаговости заболеваний в Карелии. М.; Л.: Наука, 1964. С. 108–119.
12. Лутта А. С., Хейсин Е. М., Шультман Р. Е. К распространению и экологии иксодовых клещей в КФССР // Уч. зап. КФГУ. Т. 5. Вып. 3. Петрозаводск, 1953. С. 31–45.
13. Марченко А. И. Почвенный покров // Карельская АССР. М., 1956. С. 66–72.
14. Нейфельдт И. А. Об орнитофауне южной Карелии // Тр. Зоол. ин-та АН СССР. 1958. Т. 25. С. 183–254.
15. Попченко В. И. Водные малощетинковые черви севера Европы. Л.: Наука, 1988. 287 с.
16. Раменская М. Л. Определитель высших растений Карелии. Петрозаводск: Госиздат КАССР, 1960. 485 с.
17. Романов А. А. О климате Карелии. Петрозаводск: Карелия, 1961. 140 с.
18. Румянцев Е. А. Эволюция фауны паразитов рыб в озерах. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1996. 187 с.
19. Старобогатов Я. И. Фауна моллюсков и зоогеографическое районирование континентальных водоемов. Л.: Наука, 1970. 372 с.
20. Яковлев Е. Б., Ивантер Э. В., Лобкова М. П. Насекомые. Мир животных. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2006. 286 с.
21. Яковлев Ф. С. Оляха черная в заповеднике «Кивач» и в смежных районах // Тр. заповедника «Кивач». Петрозаводск: Карелия, 1973. С. 23–31.
22. Яковлев Ф. С. Сообщества с широколиственно-лесными элементами на северной границе их ареала // Тр. заповедника «Кивач». Т. 2. Петрозаводск, 1973. С. 32–39.
23. Яковлев Ф. С., Воронова В. С. Типы лесов Карелии и их природное районирование. Петрозаводск: Карелия, 1959. 190 с.

УДК 594:1.3. 591.55

ГАЛИНА АНДРЕЕВНА ШКЛЯРЕВИЧ

доктор биологических наук, профессор кафедры зоологии
и экологии эколого-биологического факультета ПетрГУ
gash@psu.karelia.ru

СООБЩЕСТВА МИДИЙ НА ЛИТОРАЛИ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ

В статье приведены данные по численности и биомассе массового вида-эдификатора *Mytilus edulis*, играющего большую роль в экосистеме Белого моря. Исследования проводились на двух участках литорали в течение 2005–2008 годов. Выявлены довольно значительные межгодовые колебания численности и биомассы всех беспозвоночных изучаемых сообществ, отмечены годовые изменения среды их обитания.

Ключевые слова: двустворчатый моллюск мидия, сообщество, индекс разнообразия, литораль

Исследования *Mytilus edulis* L. и сообществ, образуемых этим моллюском, составляют в настоящее время одно из важных и приоритетных направлений в изучении естественных процессов, происходящих в экосистемах беломорских мелководий.

Мидия, являясь массовым двустворчатым моллюском-фильтратором, играет одну из самых значительных ролей в экологии Белого моря [3], [9], [1], поэтому существует огромное количество публикаций, посвященных биологии и экологии этого моллюска. Однако исследованиям литоральных поселений мидий посвящено относительно небольшое количество работ [5], [7], [8]. Межгодовые колебания количественных показателей *Mytilus edulis* также все еще остаются слабо исследованным разделом ее экологии. Понимание причин межгодовой динамики плотности и биомассы мидии в литоральных ее поселениях невозможно без исследования закономерностей феномена видового разнообразия сообществ, образующихся вокруг этого вида-эдификатора.

Цель нашей работы – выполнить описание сообществ литоральной мидии, проследить из-

менчивость количественных показателей эдификатора и членов образуемых им сообществ в пространстве и времени.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Работа выполнена в мелководной части акватории, осушаемой во время отливов, – на литорали Кандалакшского залива Белого моря, входящей в состав Кандалакшского государственного природного заповедника (рис. 1).

Исследования проводились по общепринятой в различных модификациях методике количественных гидробиологических работ [4], [12].

Жирной линией выделена материковая и островная территория, серым цветом – акватория Кандалакшского государственного природного заповедника.

Места для мониторинговых межгодовых исследований представляют собой плоские участки песчано-каменистого грунта разной степени заиленности с более или менее равномерными плотными локальными поселениями *Mytilus edulis*



Рис. 1. Картограмма района исследований

размером 100–400 м² в нижнем горизонте литорали. Пробы собирались ежегодно в первой половине июля. Размер пробной площади составлял 0,1 м². На каждом участке ежегодно бралось по 5 проб, место их сбора определялось случайным образом. Грунт с пробных площадей выбирался до глубины 15–20 см с целью наиболее полного учета всех, в том числе инфаунных организмов. С поверхности камней все животные осторожно и тщательно срезались скальпелем. В полевых условиях проводилась первичная обработка проб: грунтовая часть проб промывалась морской водой через сито с ячейей 1 мм², все животные разбирались по видам, подсчитывались и после обсушивания на фильтровальной бумаге взвешивались. Животные с массой до 500 мг взвешивались на торсионных весах с точностью до 0,001 г, остальные беспозвоночные – на аптекарских весах с точностью до 0,01 г. Моллюски и усоногие раки-балянусы взвешивались вместе с раковиной и домиком. Большинство беспозвоночных были определены до вида, трудно идентифицируемые животные – до более высоких таксономических рангов.

Местообитания в обеих точках исследования (рис. 1) довольно значительно отличаются друг от друга по степени прибойности, гидродинамике во время приливо-отливных процессов, а также некоторыми зависящими от этого гидрхимическими параметрами водных масс и состава грунта.

Участок 1 расположен на литорали юго-восточного мыса о. Ряшкова, который входит в состав Северного архипелага островов. Этот район относительно открытый и поэтому он подвержен довольно значительному гидродинамическому воздействию вод, так как расположен в отдалении от отдельных групп островов и с двух сторон от него находятся Восточная и Западная Ряшковские Салмы, ширина которых колеблется от 1 до более 2 км с глубинами до 25 м.

Участок 2 расположен на заповедной литорали материковой части Турьего мыса – самого глубоководного района, поблизости от побережья этого мыса находится максимальная глубина Бе-

лого моря – 340 м. Участок 2 обращен к открытому морю и совсем не прикрыт ни островами, ни мелями, поэтому здесь наблюдается самая высокая степень гидродинамической активности.

В осенне-зимне-весенний период во время становления и разрушения ледового покрова исследуемые биотопы подвергаются его механическому воздействию (частично разрушающему путем прореживания мидиевые поселения и их сообщества) по возрастающей в следующем порядке местообитаний мидий: Ряшков, Турий мыс и в обратном порядке по степени распреснения при весенних процессах ледотаяния и материкового стока.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования показали, что сообщества мидий, обитающих на о. Ряшкове, состоят из 14, а на Турьем мысу – из 12 видов и групп беспозвоночных (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Средние численность (N, экз./м²) и биомасса (B, г/м²) организмов макрозообентоса, составляющих сообщество *Mytilus edulis* на юго-восточном мысу о. Ряшкова

Вид	Год								
	2005		2006		2007		2008		
	N	B	N	B	N	B	N	B	
<i>Turbellaria g. sp.</i>	20	0,2	0	0	0	0	0	0	0
<i>Nemertini</i>	0	0	0	0	20	1	0	0	0
<i>Lineus sp.</i>	0	0	40	0,9	0	0	50	2,4	
<i>Nematodes g. sp.</i>	320	0,3	0	0	20	0,1	475	0,5	
<i>Oligochaeta g. sp.</i>	3580	19,1	1480	3,4	4000	15,2	1100	8,6	
<i>Semibalanus balanoides</i>	0	0	0	0	0	0	800	66,2	
<i>Yera albifrons</i>	120	0,3	0	0	0	0	175	2,7	
<i>Gammarus sp.</i>	1280	19,8	40	2,5	920	44,5	250	42,6	
<i>Littorina littorea</i>	0	0	0	0	0	0	25	5,2	
<i>Littorina obtusata</i>	20	2,7	300	50,6	400	44,9	1150	66,6	
<i>Littorina saxatilis</i>	760	86,3	20	2,4	700	61,8	525	66,4	
<i>Hydrobia ulvae</i>	140	1,3	1400	4,3	1440	12,1	0	0	
<i>Mytilus edulis</i>	13060	9108	12980	3528	18980	5530	16650	6163	
<i>Maccoma baltica</i>	860	101,4	100	37,6	220	31,3	100	7,7	

Таблица 2
Средние численность (N, экз./м²) и биомасса (B, г/м²) организмов макрозообентоса, составляющих сообщество *Mytilus edulis* на Турьем мысу

Вид	Год							
	2005		2006		2007		2008	
	N	B	N	B	N	B	N	B
<i>Turbellaria</i> g. sp.	0	0	0	0	0	0	120	0,4
<i>Lineus</i> sp.	0	0	0	0	40	0,5	20	0,1
<i>Nematodes</i> g. sp.	420	0,3	340	0,2	60	0,4	700	0,6
<i>Polydora quadrilobata</i>	0	0	200	0,8	0	0	820	2,5
<i>Fabricia sabella</i>	0	0	0	0	0	0	80	0,7
<i>Oligochaeta</i> g. sp.	5720	19,7	1460	6,7	1240	6,3	3280	12,5
<i>Gammarus</i> sp.	0	0	0	0	0	0	20	3,6
<i>Littorina obtusata</i>	0	0	140	8,3	180	3,6	760	51,5
<i>Littorina saxatilis</i>	900	18,5	1540	34,9	900	23,7	500	20,7
<i>Hydrobia ulvae</i>	0	0	0	0	0	0	60	0,2
<i>Mytilus edulis</i>	18320	3075	13580	2780	21480	3619	32400	4828
<i>Macoma baltica</i>	0	0	20	1,8	0	0	20	0,1

Как видно из табл. 1 и 2, виды и группы макрозообентоса, входящего в состав исследованных сообществ, очень сильно различаются по своей значимости. *Mytilus edulis* является руководящим или доминантным. Его количественные показатели на порядок и более превосходят плотность и биомассу всех других членов сообществ. Субдоминантными видами сообщества *Mytilus edulis* на о. Ряшкове являются: *Oligochaeta* g. sp.; *Gammarus* sp.; *Littorina obtusata*; *Littorina saxatilis*; *Hydrobia ulvae* и *Macoma baltica*, на Турьем мысу – *Nematodes* g. sp.; *Oligochaeta* g. sp.; *Littorina saxatilis*. К числу второстепенных видов сообществ мидий на о. Ряшкове относятся: *Lineus* sp.; *Nematodes* g. sp.; *Yera albifrons* и *Hydrobia ulvae*, на Турьем мысу – *Lineus* sp.; *Polydora quadrilobata*; *Littorina obtusata*, *Macoma baltica*. Остальные виды являются случайными. Приведенная иерархия видов и групп традиционна [11].

Значение отдельных видов в исследуемых сообществах кроме структурной иерархической значимости должно определяться их ролью в функционировании экосистемы или в ее главной продукционной составляющей. Но при исследовании морских мелководных сообществ установить конкретную функциональную роль видов и отдельных трудно определяемых групп беспозвоночных нелегко, если об их значении судить только по численности и биомассе. Для этого необходимо выполнить анализ биоразно-

образия, а также равномерности распределения биомассы и количества видов (J) в сообществе. Для этих целей подходит информационный индекс разнообразия (H) К. Шеннона [10].

Таблица 3
Информационный индекс разнообразия (H), индекс равномерности распределения биомассы (J) и количество видов (N) в исследованных сообществах *Mytilus edulis*

Местообитание	H	J	N
О. Ряшков, юго-восточный мыс	0,3	0,08	14
Турий мыс	0,53	0,15	12

Таким образом, индекс разнообразия сообществ, обитающих в различных географических точках, расположенных примерно в 120 км друг от друга, неодинаков, он колеблется от 0,3 до 0,53 бит.

Сравним наши данные с литературными (усредненными по Кандалакшскому и Онежскому заливам), полученными А. И. Бабковым и А. Н. Голиковым [2] для сообществ *Mytilus edulis*, обитающих на глубине от 1 до 40 м. Число видов в этих сублиторальных сообществах (зообентоса + мейобентоса) составляет в среднем 30 ± 10 при относительно невысоком индексе видового разнообразия (0,9–1,9 бит).

Теперь посмотрим, как изменяются основные биомиметические показатели вида-эдификатора и всех остальных членов сообщества во времени (рис. 2). Как показано на рис. 2, характеристики средней биомассы *Mytilus edulis* и суммарной биомассы всех остальных беспозвоночных – членов сообществ довольно значительно варьируют во все годы наших исследований.

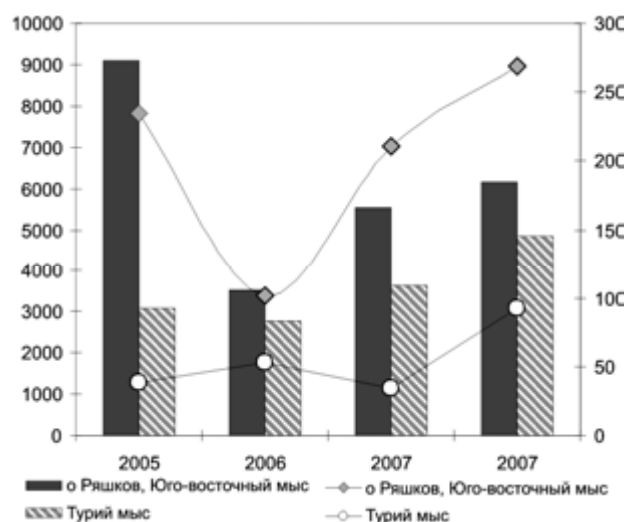


Рис. 2. Межгодовые колебания средней биомассы (г/м²) *Mytilus edulis* (гистограмма) и суммарной биомассы всех остальных беспозвоночных – членов сообществ на исследованных участках (кружки и квадраты)

Большую роль в формировании межгодовых и хорологических колебаний количественных показателей мидий играют физические факторы ледового покрова (имеющие разреживающее значение для мидиевых банок). В исследуемых нами поселениях ледовый покров вырывает вмержшие в нижнюю часть льда, лежащего на литораль во время отливов, отдельные фрагменты сообществ *Mytilus edulis* и при подвижках в осенне-весенний период уносит их за пределы сообществ. При этом образуются пятна – окна «чистого» грунта (самого разного размера и формы), освободившегося от обрастания мидиями. Через эти окна происходит вымывание накопившихся илов с токсичным H_2S , что является положительным процессом восстановления оптимальных условий биотопа мидиевого биоценоза [6]. По краям таких окон во второй половине июля мы ежегодно наблюдали агрегированные скопления спата в увеличивающемся количестве по возрастающей прореживающего действия фактора ледового покрова в следующем порядке местообитаний мидий: о. Ряшков, Турый мыс.

Таким образом, межгодовая изменчивость биомассы мидий в их плотных поселениях зависит от ряда абиотических факторов окружающей среды, а также от биотических внутри- и межвидовых отношений. Из абиотических факторов самое существенное влияние на биомассу *Mytilus edulis* оказывает различная ледовая ситуация в осенне-зимне-весенние периоды и колеблющаяся термо-галинная составляющая гидрологического режима в разные годы и в разных участках Кандалакшского залива Белого моря.

В обоих исследованных местообитаниях на биомассу *Mytilus edulis* практически в одинаковой степени действует фактор хищничества морских звезд *Asterias rubens*. В одном из них – на о. Ряшкове – мидий кроме звезд активно и в больших количествах поедают различные многочисленные морские птицы [3], [9] и рыбы [1]. На Турьем мысу пресс хищников-птиц и рыб значительно слабее и мидиевые поселения разреживаются в большей степени льдом. В обоих участках восстановление элиминированной части поселений мидий и их сообществ происходит за счет регулярно оседающей из планктона молоди различных беспозвоночных.

Все исследуемые участки мидиевых поселений находятся в охраняемой акватории заповедника, где множество самых различных видов (от беспозвоночных до рыб, птиц и крупных млекопитающих) многочисленных животных образуют гильдию использующих плотные мидиевые поселения в качестве трофического компонента экологической ниши.

Хищническая деятельность всех членов «мидиевой» гильдии и прореживающее воздействие ледового покрова в течение 4 лет оказывали положительное омолаживающее влияние на исследованные мидиевые поселения и их сообществ.

При отсутствии аналогичного влияния таких факторов естественные сукцессионные процессы приводят к старению мидий и, в конечном счете, к полной гибели этих сообществ.

Mytilus edulis – эдификатор, то есть вид с сильно выраженной средообразующей способностью. Можно сказать, что он кондиционирует условия непосредственно окружающей сообщество среды. Межгодовые колебания средней биомассы вида-эдификатора *Mytilus edulis*, естественно, сильно влияют на соответствующие временные флюктуации всех членов сообществ. Рис. 2 иллюстрирует довольно четко выраженную прямую зависимость суммарной биомассы всех беспозвоночных – членов сообществ от средней биомассы *Mytilus edulis*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Mytilus edulis, обитающая на литорали Кандалакшского залива Белого моря, часто образует сплошные плотные поселения. При этом вид является эдификатором с сильно выраженной средообразующей способностью к кондиционированию условий непосредственно окружающей своей биоценоз среды. Исследованные сообщества мидий состоят из 12–14 видов и групп беспозвоночных, индекс разнообразия сообществ, обитающих в различных географических точках, колеблется от 0,3 до 0,53 бит.

Основной выявленных нами межгодовых динамических процессов являлись закономерные изменяющиеся абиотические (климатические) факторы окружающей среды, а также внутри- и межвидовые взаимоотношения мидий и их сообществ на литорали Кандалакшского залива. Все закономерно изменяющиеся факторы среды в пространстве и во времени являются инициаторами развития явления биоразнообразия как в целом сообществе, его иерархической, структурной и функциональной характеристиках, так и в его составляющих – популяциях видов. Отдельные популяции видов (или их части – поселения) должны постоянно и непрерывно адаптироваться в двух направлениях. Во-первых, они должны, балансируя на грани толерантности и резистентности своих экологических возможностей, выживать в меняющейся среде, а также передавать информацию о все более и более успешных адаптациях очередному поколению. Во-вторых, они должны адаптироваться к более оптимальному взаимодействию с другими видами в сообществе. Обе группы адаптаций должны развиваться вместе, так как сообщества являются средой, в которой виды должны выживать и эволюционировать.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Развитие научного потенциала высшей школы 2009–2010 гг.» (грант 3832).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаров В. В. Питание рыб на литорали острова Ряшкова и Лодейного в Белом море // Труды Кандалакшского государственного заповедника. Воронеж: Книжное изд-во, 1963. Вып. 4. С. 35–53.
2. Бабков А. И., Голиков А. Н. Гидробиокомплексы Белого моря. Л.: Изд-во Зоологического ин-та АН СССР, 1984. 103 с.
3. Бианки В. В., Бойко Н. С., Нинбург Е. А., Шкляревич Г. А. Питание обыкновенной гаги Белого моря // Экология и морфология гаг в СССР. М.: Наука, 1979. С. 126–170.
4. Кусакин О. Г. Население литорали // Океанология. Биология океана. Биологическая структура океана. Т. 1. М.: Наука, 1977. С. 174–178.
5. Луканин В. В., Лангуев Н. К. Распределение и экология локального поселения мидий (*Mytilus edulis* L.) на беломорской литорали // Экологические исследования перспективных объектов марикультуры фауны Белого моря. Л.: Изд-во Зоологического ин-та АН СССР, 1982. С. 17–24.
6. Луканин В. В., Наумов А. Д., Федяков В. В. Поселения мидий: постоянное непостоянство // Природа. 1990. № 11. С. 56–62.
7. Максимович Н. В., Герасимова А. В. Долговременный мониторинг литоральных поселений двустворчатых моллюсков (*Molluska*, *Bivalvia*) в губе Чула (Белое море) // Морские и пресноводные биосистемы севера Карелии. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. С. 95–120.
8. Максимович Н. В., Максимович А. Н., Герасимова А. В. Об организации поселений мидий *Mytilus edulis* L. в условиях литорали Белого моря // Вестник СПбГУ. Сер. 3. 2003. Вып. 4 (№ 27). С. 44–53.
9. Перцов Н. А., Флинт В. Е. Питание гаги Кандалакшского заповедника и роль ее в динамике литоральной фауны // Труды Кандалакшского государственного заповедника. Воронеж: Книжное изд-во, 1963. Вып. 4. С. 7–28.
10. Шеннон К. Математическая теория связи // Работы по теории информации и кибернетике. М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1963. С. 243–332.
11. Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения. Кн. 1. М.: Наука, 2005. 281 с.
12. Шкляревич Г. А. Межгодовая динамика массовых видов бентоса на литорали островов Кандалакшского залива Белого моря // Биология моря. 1980. № 5. С. 26–32.

ЛЮДМИЛА АЛЕКСАНДРОВНА СЕРГИЕНКО

кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета ПетрГУ

saltmarsh@mail.ru

О МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ В РОДЕ БЕСКИЛЬНИЦА СЕМЕЙСТВА МЯТЛИКОВЫХ (*Puccinellia* Parl. Семейства Poaceae)

Виды рода бескильница находятся в стадии активного видообразования из-за нестабильных условий существования на приморской полосе. На основании изучения морфологических признаков растений и строения эпидермиса верхней стороны листовой пластинки приводится новая трактовка объема вида бескильница ползучая – *Puccinellia phryganodes* s. l.

Ключевые слова: приморская полоса, галофиты, эпидермис листовой пластинки, видообразование

Видообразование – это процесс глубокого и всестороннего приспособления одной или нескольких популяций предкового вида к новой среде или образу жизни, связанный с изменением положения вида в биогеоценозе [2]. Первым ответом вида на изменение внешней среды, точнее, на изменение соотношений между организмом и внешней средой является более или менее быстрое вскрытие его резервов изменчивости [5]. Основной путь видообразования на приморской полосе Арктики обусловлен разделением одного предкового вида на несколько независимо эволюционирующих видов. Стратегия существования растений в условиях высоких широт – избегание стрессовых воздействий в пространстве и во времени, появление новых морфофизиологических признаков, расширяющих экологические возможности видов [6]. Дивергентному видообразованию предшествует возникновение изолированных популяций внутри предкового вида. Приморские виды, сформировавшиеся и существующие в изменчивых условиях (соленость воды и почвы, при-

ливо-отливные явления, разный механический состав почвы), являются более эврибионтными, чем виды плакорных местообитаний. Поэтому они обладают более широкими параметрами действия регуляторных механизмов, что проявляется в их большей пластичности и большей вариабельности морфологических показателей видовых признаков. Первичные сукцессии приморских растительных сообществ возникают на лишенной растительности и не имеющей фитоценотической среды поверхности и являются собой основополагающую часть общего процесса динамики растительности приморской полосы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для установления более четкого объема арктического циркумполярного вида *Puccinellia phryganodes* s. l. кроме личной коллекции (240 гербарных листов) нами были изучены гербарные образцы (670 гербарных листов) из коллекции Ботанического института им. В. Л. Комарова РАН, а также немонтированные сборы со-

трудников лаборатории растительности Крайнего Севера (350 гербарных листов), сделаны препараты эпидермиса верхней стороны листовой пластинки (180 постоянных препаратов), 90 микрофотографий эпидермиса верхней стороны листовой пластинки. Помимо анализа морфометрических признаков (характеристика побегов, размеры листьев, метелки, колоска, цветковых чешуй, размеров и форм колосковых и цветковых чешуй, пыльников) были изучены наиболее устойчивые признаки – строение эпидермиса стороны листовой пластинки стеблевых листьев.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В нестабильных условиях существования возросшие адаптивные изменения такого вида-доминанта флористического галофитного комплекса Арктики, как бескильница – *Puccinellia* Parl. (сем. *Poaceae*), многими авторами обработок этого таксона для различных сводок принимались как устойчивые признаки, и в этих группах ими выделялись новые виды и подвиды [1], [5], [7] (табл. 1).

Таблица 1

Точки зрения монографов вида *Puccinellia phryganodes* s. l. на объем таксона

Н. Н. Цвелев [1]	Н. Н. Цвелев [5]	Панарктическая флора [7]
<i>Puccinellia phryganodes</i> subsp. <i>phryganodes</i>	<i>Puccinellia phryganodes</i> subsp. <i>phryganodes</i>	<i>Puccinellia phryganodes</i> (Trin.) Scribn. & Merr. subsp. <i>phryganodes</i>
		<i>Puccinellia phryganodes</i> (Trin.) Scribn. & Merr. subsp. <i>neoarctica</i> (Á. Löve & D. Löve) Elven comb. nov.
<i>Puccinellia geniculata</i> (Krecz.) Tzvel.	<i>Puccinellia phryganodes</i> subsp. <i>geniculata</i> (Krecz.) Tzvel.	<i>Puccinellia geniculata</i> (V. I. Krecz.) T. J. Sorensen
<i>Puccinellia phryganodes</i> subsp. <i>vilfoidea</i> (Anderss.) Tzvel. comb. nova	<i>P. phryganodes</i> subsp. <i>vilfoidea</i> (Anderss.) Tzvel.	<i>Puccinellia phryganodes</i> (Trin.) Scribn. & Merr. subsp. <i>vilfoidea</i> (Andersson) Tzvelev
<i>P. phryganodes</i> subsp. <i>asiatica</i> (Hadač. et A. Löve) Tzvel. comb. nova	<i>Puccinellia phryganodes</i> subsp. <i>sibirica</i> (Hadač. et A. Löve) Tzvel. (errore «asiatica»)	<i>Puccinellia phryganodes</i> (Trin.) Scribn. & Merr. subsp. <i>sibirica</i> (Hadač & Á. Löve) Elven comb. nov.

В работе Н. Н. Цвелева «Злаки СССР» *P. phryganodes* s. l. представлена 4 подвидами: subsp. *geniculata* (Krecz.) Tzvel. – южные районы Дальневосточной Арктики и Аляска, subsp. *phryganodes* – Камчатка, Сахалин, побережье

Охотского моря, северо-восток Америки, subsp. *sibirica* (Hadač. et Love) Tzvel. (errore «asiatica») – Европейская Арктика, Кольский п-ов, арктическое побережье Западной и Восточной Сибири, северные районы Дальневосточной Арктики, Скандинавия, и subsp. *vilfoidea* (Anderss.) Tzvel. – Новая Земля, Шпицберген [5].

После изучения морфологических признаков растений, относимых различными авторами к *Puccinellia phryganodes* s. l., мы считаем, что растения, относимые к *P. phryganodes* subsp. *geniculata* и *P. phryganodes* subsp. *sibirica*, как по общему облику, строению цветка, так и по структуре эпидермы находятся в пределах варьирования типового арктического подвида *P. phryganodes* subsp. *phryganodes*. Мы принимаем только 2 подвида одного вида *Puccinellia phryganodes*: *Puccinellia phryganodes* (Trin.) Scribn. et Merr. subsp. *phryganodes* и *Puccinellia phryganodes* subsp. *vilfoidea* (Anderss.) Tzvel. Морфологическая характеристика подвидов *P. phryganodes* subsp. *phryganodes* и *P. phryganodes* subsp. *vilfoidea* приводится в табл. 2. На наш взгляд, современные подвиды рода *Puccinellia* Parl. сформировались во время миграции предковой формы типа *P. phryganodes* subsp. *geniculata* на восток и на запад от Берингова пролива по северным побережьям Евразии и Америки [3].

Наши данные также показали, что *P. phryganodes* subsp. *phryganodes*, *P. phryganodes* subsp. *geniculata* и *P. phryganodes* subsp. *sibirica* имеют одинаковое строение эпидермальной ткани: она немного неправильно ячеистая, клетки с хорошо выраженными обильными сосочками. Характеристика эпидермиса верхней стороны листовой пластинки исследованных образцов приведена в табл. 3. Наличие экземпляров с немного вздутыми, булавовидными клетками с редкими сосочками на побережье Берингова пролива, на о. Айон и о. Врангеля указывает на то, что группа *P. phryganodes* s. l. находится в стадии активного видообразования. Морфологическая характеристика признаков строения эпидермиса приведена в табл. 3. На рис. 1 представлены образцы с побережья Чукотского моря, а на рис. 2 – со Шпицбергена. Изучение строения эпидермы типового материала *P. phryganodes* (Trin.) Scribn. et Merr. и *P. geniculata* Turcz. ex V. Krecz. не показало отличий между ними.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, мы пришли к выводу, что исследования только морфологических признаков растений, относимых к *Puccinellia phryganodes* s. l. (размеры колосковых чешуй, нижних цветковых чешуй и пыльников, общего габитуса растений), недостаточно для обоснованного выделения новых видов и подвидов [3]. Анализ внутривидового полиморфизма *Puccinellia phryganodes* s. l. выявил многочисленные случаи континуальной вариабельности признаков – географической и экологической изменчивости. На примере *Puccinellia phryganodes* s. l. полностью подтверждают

ся такие положения политипической концепции [2], [4], [6], как: 1) отличия между подвидами и популяциями слагаются из очень большого числа мелких изменений, 2) большая часть локальной и географической изменчивости тесно связана со средой, а на приморской полосе быстрые морфологические изменения возникают на основе различных вариаций эдафических условий существования сообществ, в частности, из-за особенностей водного и солевого режима почв.

Принятие политипической концепции вида и использование устойчивых морфологических признаков в роде *Puccinellia* (строение эпидермальной ткани верхней поверхности листовой пластинки) позволяют нам дать четкие обоснования для утверждения новых объемов видов в этих группах и объяснить, что внутри вида существует множество биотипов и экотипов, приспособленных к значительному разнообразию условий приморской полосы Арктики и Голарктики.

Работа выполнена по гранту «Развитие научного потенциала высшей школы» № 2.1.1/3832 «Морфологические и физиологические аспекты видообразования и формирования адаптационных стратегий видов в прибрежных экосистемах приливных морей Голарктики и Арктики».

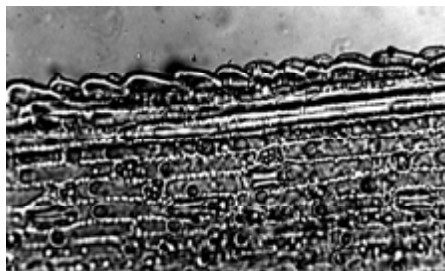


Рис. 1. Эпидермис верхней стороны листовой пластинки *Puccinellia phryganodes* subsp. *phryganodes*.

По образцу: побережье Чукотского моря, устье р. Энурмино, илистый берег, № 606, 23.VII.1976, Л. А. Сергиенко, x200.

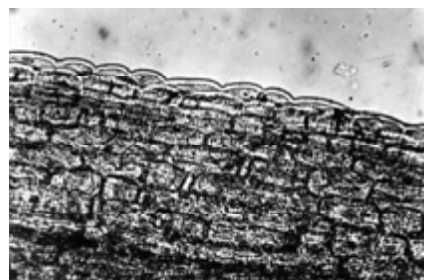


Рис. 2. Эпидермис верхней стороны листовой пластинки *Puccinellia phryganodes* subsp. *vilfoidea* (Anderss.) Tzvel

По образцу: Insulae Spetsbergenses: Walter Thymens Strait, VII.1864, A. I. Malmgren, x200.

Таблица 2

Морфологическая характеристика подвидов *Puccinellia phryganodes* s. l.

Признаки	<i>Puccinellia phryganodes</i> ssp. <i>phryganodes</i>	<i>Puccinellia phryganodes</i> ssp. <i>vilfoidea</i>
Характеристика побегов	Растение 8–30 см выс., с длинными ползучими побегами. Побеги стелющиеся и укореняющиеся в узлах	Растение 3–12 см выс., с длинными ползучими побегами. Растения часто имеют многочисленные вегетативные побеги при отсутствии генеративных побегов
Листья	Листья вдоль сложенные, до 2 мм шир.	Листья вдоль сложенные, до 2,3 мм шир.
Метелки	Метелки 3–8 см дл., с гладкими веточками, вначале прижатые, позже отклоненными	Метелки 2–4 см, с малоцветковыми гладкими веточками
Колоски	Колоски с 2–6 цветками; ножки колосков не очень толстые. Цветки 6–8 мм дл.	Колоски с 2–4 цветками; ножки колосков толстые. Цветки 4–6 мм дл.
Колосковые чешуи	Колосковые чешуи тонкие, уплощенные, с 3 ясными жилками, верхняя 2–3 мм дл.	Колосковые чешуи жесткие, плотные, с 3 неясно выраженными жилками, заметными только при основании, верхняя 1,5–2 мм дл.
Нижние цветковые чешуи	Голые, 3–4 мм дл., с пленчатой беловатой каймой по краю, с ясно выраженными жилками	Голые, 2,5–3 мм дл., без пленчатой беловатой каймы по краю, с неясно выраженными жилками
Верхние цветковые чешуи	Киль верхних цветковых чешуй с многочисленными мельчайшими сосочками	Киль верхних цветковых чешуй гладкий
Эпидермальная ткань верхней поверхности листовой пластинки	Правильно ячеистая, с хорошо выраженными обильными сосочками. Иногда у образцов с побережья Берингова пролива, о. Айон, о. Врангеля эпидерма неправильно ячеистая, немного вздутые клетки с редкими сосочками	Правильно ячеистая, без бугорков и сосочков, редко с немногочисленными сосочками; иногда эпидермальные клетки вздутые (булавовидные или имеют несколько неправильную форму, приближающуюся к ромбовидной)
Пыльнички	2–2,2 мм дл., от ярко-розовых до темно-фиолетовых, продолговатые	1,5–1,8 мм дл., фиолетовые, продолговатые
2n	14	28
Распространение	Арктическое побережье России, Камчатка, Сахалин, побережье Охотского моря, Аляска	Шпицберген, п-ов Канин (северная часть), о. Колгуев, о. Новая Земля

Таблица 3

Характеристика эпидермиса верхней стороны листовой пластинки растений, относящихся к *Puccinellia phryganodes* s. l

п/п	Характеристика	Где встречаются растения с таким строением эпидермиса
1	Эпидермис верхней стороны листовой пластинки правильно ячеистый с многочисленными сосочками	Западное побережье Гренландии, побережья Берингова пролива, Охотского моря, Аляска
2	Эпидермис верхней стороны листовой пластинки неправильно ячеистый с немногими, но ясно выраженными сосочками	Побережье Чукотского моря, Берингов пролив
3	Эпидермис верхней стороны листовой пластинки неправильно ячеистый с несколько вздутыми клетками и немногочисленными сосочками и бугорками	Таймыр, Новосибирские о-ва, о. Врангеля, Берингов пролив
4	Эпидермис верхней стороны листовой пластинки правильно ячеистый с более мелкими, чем у первого варианта, клетками, с многочисленными, хорошо выраженными сосочками	Камчатка, побережье Охотского моря
5	Эпидермис верхней стороны листовой пластинки правильно ячеистый с довольно ровными клетками и очень редкими сосочками	Новая Земля, п-ов Канин
6	Эпидермис верхней стороны листовой пластинки неправильно ячеистый с немного ромбовидными клетками, большей частью без сосочков	Западное побережье Гренландии, Шпицберген, низовья Лены

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арктическая флора СССР: В 10 т. Л.: Наука, 1967. Т. 2.
2. Камелин Р. В. Лекции по систематике растений. Главы теоретической систематики растений. Барнаул: Азбука, 2004. 228 с.
3. Сергиенко Л. А. Флора и растительность побережий Арктики и сопредельных территорий. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. 225 с.
4. Скворцов А. К. Становление современного понимания вида // Совещание по объему вида и внутривидовой систематике. Л.: Наука, 1967. С. 16–18.
5. Цвелев Н. Н. Злаки СССР. Л.: Наука, 1976. 788 с.
6. Цвелев Н. Н. Проблемы теоретической морфологии и эволюции высших растений. М.; СПб.: Товарищество научных изданий КМК, 2005. 407 с.
7. <http://www.binran.ru/projects/paf/index.htm> // Проект «Панарктическая флора».

УДК 630*385.1:630*228.7(470.22)

ВИКТОР НИКОЛАЕВИЧ ГАВРИЛОВ

кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории лесоведения и лесоводства Института леса КарНЦ РАН
gavrilov@krc.karelia.ru

ЗОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСТИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ОСУШЕННЫХ БОЛОТ КАРЕЛИИ ПРИ ИХ ИСКУССТВЕННОМ ОБЛЕСЕНИИ

В статье представлены результаты изучения потенциала ресурсов растительности, произрастающей на искусственно облесенных осушенных болотах различных лесорастительных зон Республики Карелия. Выявлено, что создание лесных культур сосны на бедных переходных болотах в среднетаежной подзоне весьма эффективно. Рост соответствует II–III классам бонитета. В северотаежной подзоне осушение и искусственное облесение болот себя не оправдало.

Ключевые слова: средне- и северотаежная подзоны, осушенные болота, культуры сосны обыкновенной, рост и формирование молодняков, живой напочвенный покров

Искусственное облесение болот в Карелии началось в конце 60-х годов прошлого столетия. В целом было закультивировано около 70 тыс. га осушенных в основном переходных и верховых болот, почти 90 % площадей которых было сосредоточено в пределах среднетаежной подзоны. Главным образом создавались культуры сосны обыкновенной и ели европейской. Практически одновременно с началом лесокультурного освоения осушенных болот в республике организуются научные исследования в области выявления успешности искусственного облесения осушенных болот в различных условиях произрастания, оптимизации способов и технологии лесокультурного производства. Они касались самых ранних этапов роста культур в возрасте от 5 до 15 лет [6], [7], [16]. В результате для Карелии были разработаны рекомендации по агротехнике создания лесных культур хвойных пород на осушенных болотах разных типов, выявлена различная эффективность ис-

кусственного облесения болот в зональном аспекте. Было отмечено, что лесокультурное освоение осушенных болот в северотаежной подзоне лимитируется преимущественно недостатком тепла, что оказывает значительное влияние на лесорастительные свойства почвы [18]. Кроме того, осушенные торфяные почвы относятся к категории «холодных» почв, что также оказывает воздействие на успешность лесообразовательного процесса, увеличивает вероятность поздневесенних и раннелетних заморозков независимо от географической широты [1], [3]. В пределах близких климатических условий основными причинами низкого качества лесных культур становятся соответствие биологических особенностей культивируемой породы условиям произрастания и соблюдение требований создания культур. Так, по результатам исследований, в Коми АССР из-за нарушения агротехники к 1977 году погибло 30–40 % лесных культур, созданных ранее [10].

Таблица 1

Общая характеристика опытных участков сосновых молодняков, формирующихся в результате искусственного облесения осушенных болот

Номер участка	Год наблюдения	Расстояние между осушителями, м	Расстояние между бороздами, м	Возраст культур, лет	Глубина борозд на момент измерения, см	Первоначальная густота культур, тыс. экз./га	Сохранность культур, %	Глубина торфа, м
Среднетаежная подзона								
Киндасовское лесничество, кв. 29, расстояние до осушителя – 5–30 м								
3-1	2003	160	8	30	5–10	3,4	52	1,0
Киндасовское лесничество, кв. 29, расстояние до осушителя – 50–80 м								
3-2	2003	160	8	30	5–10	3,6	62	1,2
Киндасовское лесничество, кв. 4, расстояние до осушителя – 5–60 м								
6	2006	200	3,5	34	30–50	5,5	56	0,7–1,0
Северотаежная подзона								
Летнереченское лесничество, кв. 45								
1	2006	70	5,7	25	25–35	5,0	14	1,0
Летнереченское лесничество, кв. 34								
2	2006	26	7,0	24	20–40	3,2	20	2,0
4	2006	26	7,0	24	20–40	3,5	32	0,4

Наличие постоянных объектов, где наблюдения ведутся в течение длительного времени, дает возможность проследить происходящие в растительности осушенных болот изменения с увеличением давности осушения, выявить особенности формирования молодняков в различных условиях роста культур с целью определить лесохозяйственную ценность образовавшихся насаждений и их растительных ресурсов. Для этого были проведены повторные измерения в древостоях на постоянных пробных площадях в Южной Карелии и заложены временные учетные площади в средней части республики. Площадь пробных участков колеблется от 0,05 до 0,2 га. При перечетах учитывалась вся растительность живого напочвенного покрова, но основное внимание уделялось древесному ярусу, согласно упрощенной системе геоботанических исследований, как принято в лесоустройстве [15]. Для характеристики торфяной залежи отбирались образцы почвы по горизонтам до глубины 0,7–1,0 м.

По три пробных площади (участка) расположены в Киндасовском лесничестве (61°50' с. ш., среднетаежная подзона) и Летнереченском лесничестве (64°30' с. ш., северотаежная подзона). Общая характеристика участков приведена в табл. 1. Следует добавить, что на исследуемых объектах в южной части республики осушение проведено в 1970–1971 годах, культуры созданы в 1972 году. В Летнереченском лесничестве давность осушения на момент проведения измерений (2006 год) составляла 30 лет, а возраст культур – 24–25 лет. Обработка почвы под лесные культуры производилась в Киндасовском лесничестве прокладкой борозд глубиной 0,4–0,6 м с помощью плуга и образованием микроповышений, пластов с последующей посадкой двухлетних сеянцев. В северотаежной подзоне проведена фрезерная обработка почвы с разбрасыванием

торфяной крошки в пространство между бороздами и посадкой сеянцев вдоль них по целине.

В северотаежной подзоне лесные культуры создавались в основном на верховых болотах, так как в осушенном гидроресурсоформирующем фонде они преобладают (70–80 % площади всех осушенных болот [7]). Поэтому и в среднетаежной подзоне для сравнения при проведении работ были подобраны участки болотных массивов, также характеризующиеся невысоким плодородием. Это бедные переходные осоково-кустарничково-сфагновые болота со сложной верхово-переходной торфяной залежью. Через 20 лет после осушения верхний слой верхового сфагнового торфа равен 6–8 см. С увеличением глубины торфяную залежь составляют осоковые и древесно-осоковые торфа с зольностью 3,2–4,0 %, степенью разложения 20–30 %. Участки 6 и 3 (табл. 1) отличаются расположением лесокультурных борозд относительно осушителей, первоначальной густотой посадки и различными лесоводственными характеристиками болот до осушения. Если культуры на участке 6 были созданы в пределах практически безлесного болота, то на болотном массиве, где расположен участок 3, до осушения имелась древесная растительность, представленная в основном подростом сосны и березы приблизительно в равном соотношении в количестве около 1 тыс. экз. на га. Это сказалось в дальнейшем на составе формирующихся молодняков.

В Средней Карелии объектами изучения были кустарничково-пушицево-сфагновые болота. Торфяная залежь до глубины 30–40 см сложена бедными сфагновыми торфами со степенью разложения 5–20 %. Как уже говорилось, культуры сосны были созданы здесь вручную по целине вдоль фрезерных борозд, глубина которых составляет 20–35 см, и они хорошо сохранились.

Таблица 2

Лесоводственная характеристика сосновых молодняков, формирующихся на осоково-кустарничково-сфагновых осушенных болотах в условиях среднетаежной подзоны

Номер участка	Состав по запасу	Количество стволов, экз./га	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Запас, м ³ /га	Среднепериодическое текущее накопление запаса, м ³ /га в год*	Относительная полнота	Класс бонитета
Борозды параллельно осушителям, расстояние до осушителя – 5–30 м								
3-1	5,2С _{лк} (32)	1807	8,9	9,7	63,0	3,6	0,9	II,7
	1,6С(40)	389	11,3	9,9	19,3			
	3,2Б(35)	2556	6,5	7,7	38,8			
	Итого	4752			121,1	5,9		
Борозды параллельно осушителям, расстояние до осушителя – 50–80 м								
3-2	6,0С _{лк} (32)	2243	7,8	8,8	55,3	3,6	0,7	III,3
	2,6С(40)	479	11,0	9,4	23,7			
	1,4Б(35)	1798	5,2	5,6	12,7			
	Итого	4520			91,7	4,6		
Борозды перпендикулярно осушителям, расстояние до осушителя – 5–60 м								
6	8,7С _{лк} (35)	3056	9,8	11,7	150,1	6,2	0,8	II,3
	1,3С(30-50)	322	11,2	12,0	21,6	6,8		
	Итого	3378			171,7			

* На участке 3 величина годового среднепериодического накопления запаса рассчитана за 9 лет, на участке 6 – за 6 лет.

В характеристике участков (табл. 1) также есть различия, заключающиеся в глубине торфяной залежи, первоначальной густоте посадки. На первом участке до осушения имелся сосновый подрост в количестве около 1,5 тыс. экз. на га. В целом можно отметить, что требования к созданию культур в условиях осушенных болот были соблюдены по основным параметрам на всех объектах. Это позволяет исключить фактор нарушения агротехники в состоянии и росте культур.

Первоначальная густота посадок сходная в обеих лесорастительных зонах и колеблется от 3 до 5 тыс. экз. на га. Однако сохранность культур сосны в 25–30-летнем возрасте существенно отличается. В среднетаежной подзоне этот показатель составляет 50–60 %. Близкие результаты по сохранности сосновых культур для данной лесорастительной зоны получены и в других регионах Северо-Запада России как на минеральных, так и на торфяных почвах [8], [12]. При этом снижение густоты культур быстрее происходит на более дренированных участках, то есть вблизи каналов, где создаются более благоприятные условия для роста и активнее процесс естественного изреживания, что также отмечалось в ранее проведенных исследованиях [2], [13].

Несмотря на снижение количества деревьев, в среднетаежной подзоне в условиях бедных переходных болот при создании культур сосны к концу первого класса возраста формируются высокополнотные чистые сосновые или с примесью березы молодняки. Доля главной породы в составе по запасу достигает 50–90 %, а березы пушистой – 15–30 % в зависимости от удаления от осушителей (табл. 2). Запас стволовой древесины в чистых сосновых древостоях (с учетом 10–15 % сосны естественного происхождения) к 35-летнему возрасту достигает 170 м³/га, а продуктивность соот-

ветствует росту по II классу бонитета как для естественных сосняков Северо-Запада, так и плантационных культур Ленинградской области [9], [14]. В смешанных сосново-березовых молодняках общий запас древесины ниже на 30–45 %, а сосны – в два раза, что объясняется меньшими возрастом и густотой сосны (первоначальная густота здесь ниже в 1,5 раза). Рост культур соответствует в среднем III классу бонитета, но отличается на разном удалении от осушителей (при расстоянии между ними 160 м) на 0,6 класса. Однако следует отметить, что в 20-летнем возрасте различия в показателях роста сосны на всем межканальном пространстве практически отсутствовали. Причина заключается в том, что с увеличением давности осушения лесокультурные борозды при параллельном к осушителю расположении и отсутствии ухода практически полностью зарастают травяно-моховой растительностью, главным образом сфагновыми мхами, и, видимо, перестают выполнять дополнительную дренажную функцию.

Имеются различия между участками и в темпах наращивания объема стволовой древесины. Ежегодное увеличение запаса по главной породе за последние 6–9 лет, как показано в табл. 2, выше в чистом сосновом древостое (участок 6), чем в сосново-березовом, на 40 %. Однако это также объясняется разным количеством сохранившихся в посадках деревьев. В расчете на одно дерево ежегодное увеличение запаса (объема дерева) одинаково на участках 6 и 3-1, составляя 2 дм³ в год. На участке 3-2 эта величина ниже на 40 %.

Совсем по-иному складывается ситуация в северотаежной подзоне. Лишь на одном из обследованных участков (участок 4), где мощность торфяной залежи составляет 40 см, культуры можно считать сохранившимися (сохранность – 32 %), но относящимися к категории «неудовле-

Таблица 3

Лесоводственная характеристика сосновых молодняков, формирующихся на кустарничково-пушицево-сфагновых осушенных болотах средней Карелии (северотаежная подзона)

Номер участка	Состав по количеству стволов	Количество стволов, экз./га	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Запас, м ³ /га	Относительная полнота	Бонитет
Глубина торфа более 1 м							
1	5,8С(50)	1700	6,1	5,1	16,0	0,36	Va
	1,4С(20)	420	2,6	3,8	0,5		
	2,4С _{лк} (25)	700		2,0			
	0,4Б(20)	120		3,0			
	Итого	2940			16,5		
Подрост: 8,4С(10–20)1,6Б(20); 3340 экз./га, высота – 0,5–1,0 м							
2	5,3 С _{лк} (25)	600	3,0	3,1	–	–	Va
	1,6С(20)	180	4,0	3,6			
	3,1Б(25)	360	2,4	2,7			
	Итого	1140					
Подрост: 2С(10-20)1,8Б(5-15); 1800 экз./га, высота – 0,5–1,0 м							
Глубина торфа – 0,4 м							
4	4,8 С _{лк} (25)	1114	7,8	6,5	20,8	0,45	IV
	0,7С(30)	157	4,9	4,5	1,0		
	4,5Б(20)	1043	4,4	5,8	5,5		
	Итого	2314			27,3		
Подрост: 0,9С(10–20)9,1Б(5–15); 1400 экз./га, высота – 0,5–1,0 м							

творительные». Здесь сформировался низкополотный сосново-березовый древостой (табл. 3). Имеющийся в количестве 1,4 тыс. экз. на 1 га подрост на 90 % представлен березой пушистой. В то же время рост сосновых культур здесь соответствует III.2 классу бонитета. Среднепериодический текущий прирост в высоту, измеренный по модельным деревьям, постоянно увеличивался в течение последних 20 лет и достиг к 25-летнему возрасту 46 см, что сопоставимо с приростами в посадках сосны в среднетаежной подзоне.

На участке 1 (табл. 3) в результате осушения и искусственного облесения образовался практически чистый сосновый древостой в основном благодаря наличию соснового подроста до осушения и располагающегося вблизи (50–150 м) минерального острова, заросшего сосной. Это способствовало появлению деревьев после проведения гидролесомелиорации. Однако постмелиоративное поколение сосны представлено главным образом подростом высотой до 1 м. Собственно лесные культуры составляют лишь 25 % от состава древостоя по густоте вследствие их низкой сохранности. Согласно лесоустроительной инструкции, такой древостой таксируется как молодняк естественного происхождения [5]. Ввиду бедности условий произрастания производительность древостоя не выше 5-го класса бонитета. Участок 2 из-за низкой сохранности лесных культур (20 %) и недостаточного для формирования насаждения количества естественного возобновления, которое представлено в основном березой пушистой, остается через 30 лет после осушения в категории редины [11].

Таким образом, успешность искусственного облесения осушенных болот в северотаежной подзоне оказалась низкой. Недостаток тепла сказывается на агрохимических свойствах и производительности торфяных почв, жизнедеятельности почвенных микроорганизмов, что отражается на росте растений. Сокращается длительность вегетационного периода. Кроме того, в осушенном фонде северотаежной подзоны на территории Карелии преобладают бедные верховые болота, освоение которых без внесения минеральных удобрений нецелесообразно и в южной части республики. Исключение составляют посадки сосны на мелкозалежных торфах (до 50 см), где, вероятно, через 30 лет после осушения, уплотнения и осадки торфа корневые системы достигают минеральных горизонтов почвы.

Как уже говорилось, при изучении растительных ресурсов осушенных болот при их искусственном облесении давалась оценка и других ярусов растительности. Видовой состав живого напочвенного покрова, включая древесную растительность, относительно беден. В то же время явно выявляется ярусность растительности и наличие различных жизненных форм. Верхний полог занимают деревья (сосна обыкновенная и береза пушистая), редко представлен кустарниковый ярус (ивы), далее прямостоячие (кассандра, береза карликовая) и шпалерные (клюква) кустарнички. Редко или единично встречаются травянистые многолетники, за исключением пушицы (в среднетаежной подзоне – влажлицной, севернее – многоколосковой). В целом в травяно-кустарничковом ярусе на изучаемых объектах, как показано в табл. 4, преобладают 3–4 вида при общем количестве около 10.

Таблица 4

Видовой состав травяно-кустарничкового яруса молодняков сосны искусственного происхождения на осушенных болотах Карелии

Виды растений *	Среднетаежная подзона				Северотаежная подзона	
	20 лет после осушения		35 лет после осушения		30 лет после осушения	
	Обилие по шкале Друде	Доля состава, %	Обилие по шкале Друде	Доля состава, %	Обилие по шкале Друде	Доля состава, %
Пушица влагалищная	Cop2	20-30	Cop2	20-30	–	–
Пушица многоколосковая	–	–	–	–	Cop1	10
Хамедафне (кассандра)	Cop1	10-15	Cop2	20-30	Cop1-Sp	5-10
Подбел многолистный	Sp-Sol	+	Sol	–	Sp	+
Береза карликовая	Sp	+	–	–	Sp	+
Клюква (четырёхлепестная, мелкоплодная)	Cop3	30-40	Cop3	40-50	–	–
Вереск обыкновенный	–	–	–	–	Cop3	40-60
Голубика	–	–	–	–	Cop1-Cop2	10-20
Водяника	–	–	–	–	Cop3-Sp	5-20
Багульник болотный	–	–	–	–	Sp	5
Вахта трехлистная	Sp	+	Sol	–	–	–
Сабельник болотный	Sol	–	–	–	–	–
Брусника	–	–	Sol	–	Sp	+
Морошка	–	–	–	–	Cop1-Sp	+
Черника	–	–	Sol	–	Sp	+
Щитовник мужской	–	–	Sol	–	–	–

* Видовое название растений дано по определителю М. Л. Раменской [17].

Из табл. 4 видно, что видовой состав травяно-кустарничкового яруса с увеличением возраста молодняков на юге республики изменяется незначительно. Доминантные виды остаются прежними: это пушица влагалищная, кассандра, клюква четырехлепестная и мелкоплодная. Видовое разнообразие меняется за счет редко встречающихся видов. К началу 2-го класса возраста древостоев из состава практически выходят болотные растения-гигрофиты, такие как сабельник болотный и вахта трехлистная, и вблизи от осушителей на освещенных местах появляются типично лесные виды – черника и брусника. Однако их участие в составе травяно-кустарничкового покрова еще очень невелико. Следует отметить, что до фазы смыкания на участках лесных культур на бедных переходных болотах имелись заросли карликовой березы, но с повышением сомкнутости молодняков и снижением освещенности она теряет свои позиции и выходит из состава.

С точки зрения биологических ресурсов на бедных переходных осушенных болотах среднетаежной подзоны из травяно-кустарничкового яруса можно отметить лишь два вида клюквы. Однако на участке лесных культур этот ягодный кустарничек практически не формирует плодов, видимо, вследствие большой сомкнутости древостоя. Общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса – 80–90 %.

Число видов данного яруса верховых осушенных болот северотаежной подзоны также невелико. В табл. 4 представлены обобщенные данные по трем участкам, так как по составу

травяно-кустарничкового яруса они отличаются незначительно. Почвенные условия здесь более бедные, что сказалось и на видах-эдификаторах. В составе явно преобладают вереск, голубика. Мозаично встречается водяника (вороника черная), местами покрывая до 20 % поверхности. Повсеместно произрастает морошка, но проективное покрытие этого вида менее 5 %. Все указанные виды могут быть использованы в качестве растительных ресурсов как лекарственные растения, а голубика, обильно плодоносящая вдоль кавальеров, для сбора ягод. Общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса – 80–90 %.

Близкая картина наблюдается и в мохово-лишайниковом ярусе. В составе доминируют 2–3 вида. На юге это главным образом сфагновые мхи. Зеленые мхи и лишайники растут в основном на микроповышениях – кочках вокруг стволов деревьев. При этом жизненное состояние некоторых из них ослабленное, что затрудняет выявление видовой принадлежности в полевых условиях. Грибные пищевые ресурсы в 30-летних молодняках на осушенных переходных болотах практически отсутствуют. На участках лесных культур единично встречаются плодовые тела гриба горькушки (*Lactarius rufus*), который используется для засолки. Однако надо отметить, что в возрасте культур до 10–15 лет этот гриб на лесокультурных площадях плодоносил очень обильно, особенно при размещении борозд перпендикулярно каналам.

Общее проективное покрытие мохово-лишайникового яруса на осушенных верховых

болотах северотаежной подзоны – 40–60 %, что обусловлено хорошим дренажом поверхностных горизонтов почвы. Покрытие сфагновых мхов не превышает 20 %. С другой стороны, обращает на себя внимание значительное участие в покрове лишайников рода кладония (3–5 видов), при проективном покрытии – 15–25 %. По мнению вологодских исследователей (Н. А. Дружинина и соавторов), обилие в составе напочвенного покрова лишайников указывает на вероятность отвода почвенно-грунтовых вод больше необходимой нормы осушения [4].

Подводя итоги, можно сказать, что искусственное облесение осушенных болот является действенным средством изменения растительного покрова. В среднетаежной подзоне при посадках сосны происходит трансформация болотных фитоценозов в лесоболотные в течение 1-го класса возраста. При этом основным компонентом растительных ресурсов является ценная хвойная древесина. В сформировавшихся высокополнотных чистых сосновых и смешанных сосново-березовых молодняках запас сосновой древесины к 30–35-летнему возрасту достигает 80–150 м³/га в зависимости от состава древостоя и первоначальной густоты посадки. Ежегодное

текущее накопление запаса в этот период – 4–6 м³/га, рост соответствует II–III классам бонитета. Учитывая усиливающийся отпад за счет естественного изреживания, в возрасте сосновых культур 25–30 лет необходимо проведение лесоводственного ухода с совмещением осветления и прореживания в сосново-лиственных молодняках; в чистых сосняках при большой густоте (2,5–3,0 тыс. экз. на гектар) – прореживание главным образом по низовому методу.

В северотаежной подзоне эффективность искусственного облесения осушенных болот низкая. Перевод участков в лесопокрытую площадь после осушения возможен лишь при наличии предварительного (появившегося до осушения) естественного возобновления хвойных пород (в первую очередь сосны), что обусловлено крайне низкой приживаемостью и сохранностью посадок в условиях сурового северного климата. Неплохие результаты, полученные в культурах на мелкозалежных торфах, не могут серьезно изменить положение, так как таких площадей немного, а в осушенном фонде преобладают верховые болота. Можно сказать, что осушение открытых болот в северотаежной подзоне не оправдало себя с лесохозяйственной точки зрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев В. В., Дровнина С. И., Левачев А. В. Влияние конвективного теплового потока земли на условия роста лесных и сельскохозяйственных растений Архангельской области. Архангельск: Солти, 2007. 176 с.
2. Вомперский С. Э. Исследование роста молодняков сосны, возникших после мелиорации на осушенных торфяных почвах // Труды Института леса АН СССР. М., 1957. Т. XXXVI. С. 86–108.
3. Гольцберг И. А. Микроклиматические особенности осушенных болот // Метеорология и гидрология. 1955. № 2. С. 13–17.
4. Дружинин Н. А., Пестовский А. С., Романова Е. В., Шушарин А. П. Трансформация лесорастительных условий в хвойных насаждениях после осушения и рубок // Лесопользование и гидрлесомелиорация. Ч. 2. СПб.; Вологда, 2007. С. 118–125.
5. Инструкция по проведению лесоустройства в Едином государственном лесном фонде СССР. Ч. I. М., 1986. 165 с.
6. Ионин И. В. Состояние и рост производственных лесных культур на осушенных болотах Южной Карелии // Изменение лесоболотных биогеоценозов под влиянием осушения. Петрозаводск, 1986. С. 28–49.
7. Ионин И. В., Ермаков И. В., Саковец В. И. К вопросу об эффективности искусственного облесения осушенных болот в средней Карелии // Исследования осушенных лесоболотных биогеоценозов Карелии. Петрозаводск, 1989. С. 23–32.
8. Ипатов Л. Ф. Строение и рост культур сосны на Европейском севере. Архангельск, 1974. 108 с.
9. Кузнецов А. Н. Производительность культур сосны и ели плантационного типа // Технология создания и экологические аспекты выращивания высокопродуктивных культур. СПб., 1992. С. 153–163.
10. Ларин В. Б. Естественное и искусственное лесовозобновление на концентрированных вырубках Северо-востока Европейской части СССР // Экология роста и развития сосны и ели на северо-востоке Европейской части СССР // Тр. Коми филиала АН СССР. № 44. Сыктывкар, 1979. С. 5–23.
11. Лесохозяйственные мероприятия на осушенных землях: Методические указания. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1983. 26 с.
12. Маслаков Е. Л., Кузнецов А. Н., Старостин В. А. Динамика роста и строения культур сосны разной густоты после разреживаний // Создание высокопродуктивных лесных культур. Л., 1988. С. 39–54.
13. Миронов В. В. О двух закономерностях процесса естественного изреживания в культурах сосны // Сборник работ по лесному хозяйству. Вып. 50. М.: Лесн. пром-сть, 1965. С. 5–20.
14. Моисеев В. С. Таксация молодняков. Л.: Изд-во ЛОЛЛТА, 1971. 344 с.
15. Поздняков Л. К. Лесное ресурсоведение. Новосибирск: Наука, 1973. 120 с.
16. Пятецкий Г. Е., Ионин И. В., Жарова Л. П. Лесохозяйственное освоение осушенных болот. Петрозаводск: Карелия, 1976. 128 с.
17. Раменская М. Л. Определитель высших растений Карелии. Петрозаводск: Госиздат КАССР, 1960. 486 с.
18. Хейкурайнен Л. Болота: Пер. с фин. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 40 с.

УДК 633.2.033: 631.53.04

ГАЛИНА ВЛАДИМИРОВНА ЕВСЕЕВА

старший научный сотрудник отдела кормопроизводства
ГНУ КГСХОС Россельхозакадемии
kgshos@onego.ru

КСЕНИЯ ЕВГЕНЬЕВНА ЯКОВЛЕВА

кандидат биологических наук, ученый секретарь ГНУ
КГСХОС Россельхозакадемии
kgshos@onego.ru

ОЛЬГА АЛЕКСЕЕВНА ГОЛУБЕВА

кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий отделом
кормопроизводства ГНУ КГСХОС Россельхозакадемии
kgshos@onego.ru

ФОРМИРОВАНИЕ ЗЛАКОВЫХ ПАСТБИЩНЫХ АГРОФИТОЦЕНОЗОВ В УСЛОВИЯХ КАРЕЛИИ

Изучены особенности развития и формирования злаковых пастбищных агрофитоценозов с включением новых сортов мятлика лугового и райграса пастбищного, а также межродового гибрида фестулолиума. Исследованы ботанический состав, продуктивность, питательная и энергетическая ценность пастбищных травостоев в течение двух лет использования.

Ключевые слова: многолетние злаковые травы, пастбищные агрофитоценозы, продуктивность, ботанический состав, энергетическая и питательная ценность

Повышение роли пастбищных кормов – неперенное условие преобразования кормопроизводства в конкурентоспособную отрасль. Культурные пастбища используются в республике с 1968 года, к 1990 году их площадь составляла 9 тыс. га, а в последующие годы сократилась до 4 тыс. га. Урожайность пастбищ составляет не более 10 т/га зеленой массы ввиду отсутствия системы рационального использования травостоев, представленных в основном тимофеевкой луговой, овсяницей луговой с низкой способностью к отращиванию после стравливания. Доля пастбищных кормов в Карелии составляет всего около 10 %, что ничтожно мало по сравнению с отечественными и зарубежными хозяйствами с развитым животноводством.

Как правило, в России сорта многолетних злаковых трав западного происхождения неустойчивы в составе травосмесей из-за более континентального климата страны, поэтому попытки их использования при создании пастбищ оказались неудачными [1]. К настоящему време-

ни отечественными селекционерами создан ряд новых сортов райграса пастбищного, мятлика лугового и фестулолиума (гибрид овсяницы луговой и многоукосного райграса), перспективных для использования в северных условиях. Однако особенности формирования злаковых травостоев, созданных с включением этих видов, прежде не изучались.

Целью наших исследований являлось сравнение продуктивности традиционных и усовершенствованных злаковых агрофитоценозов пастбищного типа.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Полевой опыт заложен в 2006 году на опытном поле Карельской ГСХОС на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве с $pH_{\text{сол}}$ 5,1...5,35; содержанием гумуса 4,4...5,35; P_2O_5 38,0...56,0 мг/100 г; K_2O 17,4...26,7 мг/100 г. В качестве контроля использована базовая травосмесь тимофеевки луговой (сорт Олонецкая

местная) с овсяницей луговой (Суйдинская), в состав опытных трехкомпонентных травосмесей дополнительно включены фестулолиум (ВИК 90), мятлик луговой (Дар), райграсс пастбищный (Дуэт).

Площадь учетной делянки – 20 м², повторность 4-кратная, размещение вариантов рендомизированное. Посев 2006 года, беспокровный. На всех вариантах ежегодно вносили фосфорно-калийные удобрения однократно в дозе Р₆₀К₉₀, азотные – дробно, по 45 кг д. в. под каждый цикл использования.

В год посева проводили уход за посевами, учет всхожести, фенологические наблюдения. В последующие два года также определяли высоту компонентов и плотность травостоя, ботанический состав, урожайность сухого вещества, энергетическую и протеиновую продуктивность. Использование травостоя проводили в фазу пастбищной пригодности, 3 раза за сезон (имитация трех циклов стравливания). В работе использовали методики ВНИИ кормов им. В. Р. Вильямса [2], [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В первый год использования травостоя его плотность в 1-м цикле составила по вариантам 1480...2244 шт./м² (табл. 1). Количество побегов тимopheевки луговой в опытных вариантах было в 1,8...2,0 раза меньше, чем в контроле. Снижение нормы высева овсяницы луговой на 50 % в опытных вариантах привело к уменьшению количества ее побегов только в травостое с участием райграсса пастбищного. Среди третьих компонентов наибольшее число побегов отмечено у фестулолиума и наименьшее – у мятлика лугового, который характеризуется медленным развитием в первые годы жизни [3]. Во 2-м цикле общая плотность травостоев не изменилась, но возросла интенсивность побегообразования овсяницы луговой и третьих компонентов. В 3-м цикле общая плотность травостоев увеличилась в 1,3...1,9 раза, при этом число побегов тимopheевки луговой снизилось, а овсяницы луговой, наоборот, увеличилось по сравнению с предыдущими циклами, кроме варианта с фестулолиумом. Число побегов последнего возросло в 2,4...2,9 раза по сравнению с более ранними сроками стравливания. Доля участия в травостое новых видов и сортов постоянно повышалась на протяжении 1-го года использования, достигая у фестулолиума и райграсса пастбищного 62,9 и 42,5 % соответственно в сравнении с 23,1 % у мятлика лугового (табл. 2). В 1-м и 3-м циклах урожайность сухого вещества, выход обменной энергии и сырого протеина не различались по вариантам опыта, а во 2-м цикле и в целом за период использования были существенно выше в варианте с включением райграсса пастбищного (табл. 3).

Таблица 1
Интенсивность побегообразования злаковых травостоев по циклам и годам использования (2007–2008 годы)

Состав травосмеси	Число побегов, шт./м ²					
	1-й цикл		2-й цикл		3-й цикл	
	Год					
	2007	2008	2007	2008	2007	2008
Тимopheевка луговая	944	1164	1083	436	709	388
овсяница луговая	796	1582	1264	1320	2405	2780
несеяные виды	12	60	27	32	11	32
Всего	1752	2806	2058	1788	3125	3200
Тимopheевка луговая	524	652	725	548	1173	664
овсяница луговая	828	1556	1045	1508	1072	1444
мятлик луговой	128	360	251	632	501	1060
несеяные виды	16	24	37	24	21	28
Всего	1480	2592	2058	2712	2767	3196
Тимopheевка луговая	516	500	395	472	459	452
овсяница луговая	528	1292	677	1800	1472	1396
райграсс пастбищный	596	840	1441	504	1392	576
несеяные виды	20	32	27	28	11	56
Всего	1760	2664	1510	2806	3334	2480
Тимopheевка луговая	460	628	469	676	261	420
овсяница луговая	904	908	667	1020	411	1140
фестулолиум	868	516	1035	544	2501	924
несеяные виды	12	40	37	16	0	56
Всего	2244	2092	2208	2256	3173	2540

Таблица 2
Урожайность злаковых пастбищных травостоев по циклам и годам использования (т/га сухого вещества)

Состав травосмеси	Год					
	2007			2008		
	1-й цикл	2-й цикл	3-й цикл	1-й цикл	2-й цикл	3-й цикл
Тимopheевка луговая + овсяница луговая (контроль)	3,60	4,02	2,75	4,00	3,10	2,15
Тимopheевка луговая + овсяница луговая + мятлик луговой	3,10	3,80	2,65	3,45	2,97	2,95
Массовая доля мятлика лугового в урожае, %	12,9	23,1	17,3	9,0	12,8	26,8
т/га	0,39	0,88	0,46	0,31	0,38	0,79
Тимopheевка луговая + овсяница луговая + райграсс пастбищный	3,02	5,97	3,07	2,37	3,37	2,40
Массовая доля райграсса пастбищного в урожае, %	23,5	41,4	42,5	3,4	14,0	19,1
т/га	0,70	2,47	1,30	0,08	0,47	0,46
Тимopheевка луговая + овсяница луговая + фестулолиум	2,97	4,87	2,97	2,00	3,65	2,77
Массовая доля фестулолиума в урожае, %	39,5	47,6	62,9	2,1	10,9	31,6
т/га	1,17	2,32	1,87	0,04	0,40	0,88

Таблица 3

Продуктивность пастбищных травостоев по годам использования

Состав травосмеси	Урожайность сухого вещества, т/га			Выход обменной энергии, ГДж/га			Сбор сырого протеина, т/га		
	Год								
	2007	2008	среднее	2007	2008	среднее	2007	2008	среднее
Тимофеевка луговая + овсяница луговая (контроль)	10,37	9,25	9,81	106,8	93,3	100,0	1,34	1,14	1,24
Тимофеевка луговая + овсяница луговая + мятлик луговой	9,55	9,37	9,46	99,2	94,8	97,0	1,25	1,25	1,25
Тимофеевка луговая + овсяница луговая + райграс пастбищный	12,07	8,15	10,11	126,5	82,1	104,3	1,46	1,09	1,28
Тимофеевка луговая + овсяница луговая + фестулолиум	10,82	8,42	9,62	113,5	86,0	99,8	1,31	1,19	1,25

Во 2-й год использования плотность травостоев и интенсивность побегообразования мятлика лугового и райграса пастбищного в 1-м цикле были выше, чем в предыдущем году, а число побегов фестулолиума снизилось. Во 2-м цикле плотность травостоя контрольного варианта уменьшилась, а опытных – несколько увеличилась за счет усиления побегообразования овсяницы и мятлика. В сравнении с 2007 годом в 2008-м количество побегов мятлика возросло, а райграса и фестулолиума снизилось, что связано с более низкой зимостойкостью последних в условиях Карелии. В 3-м цикле плотность контрольного варианта увеличилась вдвое за счет усиленного побегообразования овсяницы луговой. Плотность травостоя на уровне контроля отмечена в варианте с включением мятлика, где количество побегов этого вида и овсяницы увеличилось вдвое. Во 2-й год использования на протяжении пастбищного периода доля участия в формировании урожая третьих компонентов также повышалась (с 2,1...9,0 до 19,1...31,6 %), оставаясь ниже уровня

1-го года. Отмечено, что массовая доля мятлика и фестулолиума превышала таковую райграса. Урожайность сухого вещества, выход обменной энергии и сырого протеина были существенно ниже в вариантах с райграсом и фестулолиумом только в 1-м цикле. Средняя урожайность за 2 года использования в 1-м цикле была существенно выше в контроле, во 2-м – в варианте с райграсом. В 3-м цикле и в целом за три цикла использования существенных различий по изучаемым показателям не выявлено.

ВЫВОДЫ

Применение злаковых травосмесей с дополнительным включением отечественных сортов райграса пастбищного, мятлика лугового и фестулолиума при 3-кратном режиме использования позволяет формировать фитоценозы с высокой продуктивностью, не уступающей традиционным травостоям с участием тимофеевки луговой и овсяницы луговой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутузова А. А., Проворная Е. Е., Седова Е. Г. Клеверо-райграсовые травосмеси для пастбищ Нечерноземной зоны // Кормопроизводство. 2007. № 4. С. 6–10.
2. Методические указания по проведению полевых опытов с кормовыми культурами. М.: Россельхозакадемия, 1997. 156 с.
3. Привалова К. Н., Каримов Р. Р. Формирование раннеспелых травостоев на основе райграса пастбищного и фестулолиума // Кормопроизводство. 2007. № 6. С. 7–10.
4. Программа и методика проведения научных исследований по луговодству. М.: Россельхозакадемия, ВНИИ кормов им. В. Р. Вильямса, 2000. 86 с.

УДК 612.743

АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ МЕЙГАЛдоктор медицинских наук, профессор кафедры физиологии человека и животных ПетрГУ
*meigal@psu.karelia.ru***АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ ВОРОШИЛОВ**врач-педиатр, аспирант кафедры физиологии человека и животных ПетрГУ
alexir2005@inbox.ru

ДИНАМИКА НЕЛИНЕЙНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМИОГРАММЫ РЕБЕНКА В ТЕЧЕНИЕ ПЕРВЫХ СУТОК ЖИЗНИ

В статье проанализирована временная структура интерференционной электромиограммы здоровых новорожденных детей ($n = 37$) первых суток жизни по нелинейным параметрам. Установлен рост фрактальной размерности интерференционной электромиограммы с увеличением времени постнатальной жизни для всех мышц в течение первых суток жизни. Обнаружено, что для мышц-флексоров характерны более низкая фрактальная и корреляционная размерность и корреляционная энтропия, что свидетельствует о врожденной программированности активности мышц-сгибателей по сравнению с мышцами-разгибателями. Сделан вывод о потенциальной полезности модели раннего онтогенеза для исследования антигравитационной активности.

Ключевые слова: электромиограмма, новорожденные, скелетные мышцы, нелинейные параметры, гравитация

Этап раннего неонатального развития является одним из самых драматичных и важных периодов в жизни человека, поскольку в это время определяется функционирование физиологических систем на дальнейшие годы. Новорожденный в течение первых дней жизни проходит целый ряд транзиторных состояний разных органов и систем. В течение первых часов жизни он испытывает родовой катарсис, который сопровождается выбросом в кровь многочисленных гормонов [8]. После рождения одними из самых заметных изменений среды для ребенка являются появление гравитации и снижение температуры среды, что должно отразиться на функциональном состоянии двигательной системы. Новорожденный ребенок проходит стремительную адаптацию к новым условиям обитания, переживает своего рода «сенсорную атаку». В определенном смысле, плод является моделью организма в состоянии гипогравитации (иммерсия в плодных водах). Соответственно, ребенок после 270–280 дней

нахождения в утробе матери может служить аналогом человека, вернувшегося из длительного полета в условия земной гравитации. В этой связи нам представлялось интересным и важным исследовать электромиограмму (ЭМГ) новорожденного ребенка первых суток жизни. Известно, что ЭМГ отражает функциональное состояние двигательной системы и представляет собой нелинейный процесс [10]. Учитывая потенциальную диагностическую ценность некоторых новых нелинейных методов анализа интерференционной электромиограммы (иЭМГ), таких как рекуррентный и фрактальный анализ [11], [12], мы оценили временную структуру иЭМГ новорожденного в возрасте от 30 мин до 24 ч.

МЕТОДИКА

Исследовано 37 здоровых новорожденных детей (17 девочек, 20 мальчиков) со сроком гестации 38–40 недель, обладающих всеми признака-

ми доношенности и зрелости. Все дети имели оценку по 10-балльной шкале Апгар 8/9 баллов. Группы детей по возрасту: I. 30 мин – 6 ч ($n = 14$), II. 6–12 ч ($n = 6$), III. 12–18 ч ($n = 5$), IV. 18–24 ч ($n = 12$). Согласно международным требованиям, у матерей было получено информированное согласие на участие в исследовании. Исследование проводилось на базе роддома им. Гуткина г. Петрозаводска в апреле – июне 2009 года на основании разрешения республиканского этического комитета. Спонтанная мышечная активность ребенка записывалась при спокойном бодрствовании в дневное время, до кормления грудью.

Поверхностную иЭМГ регистрировали с двух пар мышц-антагонистов (*m. biceps br.* и *m. triceps br.* справа, *m. tibialis ant.* и *m. gastrocnemius* слева). Использовали электромиограф Нейро-МВП-8 с программной средой Нейрософт (ООО «Нейрософт», г. Иваново, Россия). Исследование выполняли 2 человека (один из них – врач-педиатр). К коже ребенка прикасались электродом, обработанным антисептиком. Кожу ребенка не обрабатывали, на электрод наносили гель. Руки обрабатывались антисептиком, исследование проводили в одноразовых халатах. Ребенок находился в своей кроватке, укрытый пеленкой. Исследование длилось 5–7 мин и не вызывало видимых признаков дискомфорта. Полоса пропускания ЭМГ составила 50–500 Гц. Регистрировали отрезки ЭМГ длительностью 1 с. Учитывая возможность влияния амплитуды ЭМГ на нелинейные параметры, разделяли полученные образцы ЭМГ на несколько групп: 1–25 мкВ, 25–50 мкВ, 50–75 мкВ, 75–100 мкВ.

В математическом аспекте иЭМГ является временным числовым рядом, отражающим суммарную биоэлектрическую активность мышцы, и характеризуется аттрактором [12]. Аттрактор – это множество точек в фазовом пространстве динамической системы, к которым стремятся траектории системы [6].

Для динамических систем принятым представлением развития процесса во времени является построение «портрета» в фазовом пространстве (фазовый портрет). Наименьшее число независимых переменных, однозначно определяющее установившееся движение динамической системы, называют *размерностью вложения* m . Аттрактор характеризуется несколькими параметрами: корреляционная размерность (D_c), корреляционная энтропия (K_2) и фрактальная размерность (D).

Корреляционную размерность D_c и корреляционную энтропию K_2 , которые являются производными корреляционного интеграла, рассчитывали по методу Такенса [6], [9]. Корреляционная размерность D_c определяет степень сложности поведения динамической системы. Корреляционный интеграл рассчитывали по программе *Fractan 4.4* (РАН) [6]. Размерность m в пространстве, начиная с которой D_c перестает изменяться, есть *минимальная размерность вложения*, то есть

наименьшая целая размерность пространства, содержащего весь аттрактор. Она соответствует числу независимых переменных, описывающих систему, то есть отражает сложность управления системой. В случае с иЭМГ – сложность управления двигательной системой. Из этого следует возможность разграничить динамическую систему со сложным поведением (но характеризующуюся конечным m) и случайный шум, который теоретически описывается бесконечно большим числом независимых переменных. Так как количество уровней управления мышечным тонусом должно быть конечным, мы относим иЭМГ к сложным динамическим процессам.

Следующей характеристикой фрактальных свойств объекта является корреляционная энтропия K_2 , или информационная размерность. K_2 является мерой потери информации о системе во времени. Фактически K_2 является количественной характеристикой степени хаотичности системы, а также того, как быстро система становится непредсказуемой.

Фрактальная размерность D позволяет оценить внутренние взаимосвязи нелинейного процесса, в нашем случае – иЭМГ. D позволяет судить о сложности взаимосвязей и предсказуемости иЭМГ. Существуют различные способы определения фрактальных размерностей, к числу которых относится так называемый *R/S-способ*, на основании которого определяется показатель Херста [7]. Этот показатель очень устойчив и содержит минимальные предположения об изучаемой системе, поэтому он может классифицировать временные ряды. Для сравнения различных типов временных рядов Херст ввел следующее соотношение:

$$R/S = (aN)^H,$$

где R/S – нормированный размах от накопленного среднего, N – число наблюдений, a – некоторая константа, H – показатель Херста.

Фрактальная размерность рассчитывается по формуле:

$$D = 2 - H,$$

где H – показатель Херста.

Фрактальная размерность временного ряда, или накопленных изменений при случайном блуждании, равна 1,5. Размерность линии – 1, а размерность геометрической плоскости – 2. Соответственно, фрактальная размерность случайного блуждания лежит между линией и плоскостью. Если $H = 0,5$, то $D = 1,5$. Обе величины характеризуют независимую случайную систему. Величина $0,5 < H \leq 1$ будет соответствовать фрактальной размерности, более близкой к кривой линии. Это персистентный временной ряд, дающий более гладкую, менее зазубренную линию, нежели случайное блуждание. Антиперсистентная величина H ($0 < H < 0,5$) дает соответственно более высокую фрактальную размерность и более прерывистую линию, чем случайное блуждание, и, следовательно, характеризует систему, более подверженную переменам.

Можно выделить 3 основных группы временных рядов, а также типов иЭМГ по фрактальной размерности [2]:

1. *Персистентная* иЭМГ ($D = 1-1,5$). События на такой иЭМГ будут носить устойчивый характер: будут повторяться и/или нарастать. Чем ближе значения к 1, тем более выражены тенденции, тем меньше у ЭМГ свободы и тем больше выражен тренд. Чем ближе к 1,5, тем более зашумлен ряд, тем менее выражен его тренд, тем более лЭМГ случайна и склонна к неожиданным всплескам или угасанию активности.
2. *Антиперсистентная (эргодическая)* иЭМГ ($D = 1,5-2$). Если такая иЭМГ демонстрирует «рост» в предыдущий период, то, скорее всего, в следующем периоде начнется спад. И наоборот, если шло снижение, то вероятен близкий подъем. Устойчивость такого антиперсистентного поведения зависит от того, насколько фрактальность близка к 2.
3. *Случайная* иЭМГ ($D \approx 1,5$) указывает на случайный ряд. События случайны и некоррелированы. События в настоящем не влияют на будущий сигнал.

Сложные биологические процессы относятся к мультифракталам, то есть фрактальность временного ряда меняется в некоторых пределах. Поэтому при исследовании мультифракталов говорят об обобщенной фрактальной размерности [1], [7].

Статистический анализ производился в программной среде SPSS 14,0™. Корреляционный анализ производили с помощью непараметрического критерия Спирмена, сравнение средних значений – с помощью t теста Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Минимальный возраст, при котором получены записи иЭМГ, составил 32 мин после рождения. Пример записи этого ребенка представлен на рис. 1.

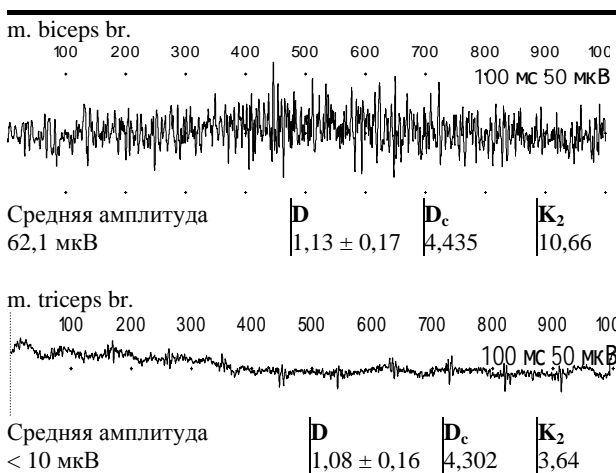


Рис. 1. Пример записи иЭМГ у ребенка в возрасте 32 мин после рождения

Корреляционная размерность в мышцах верхних и нижних конечностей ребенка в разных диапазонах амплитуды интерференционной ЭМГ

Мышца	Диапазоны амплитуды иЭМГ			
	1–25 мкВ	25–50 мкВ	50–75 мкВ	75–100 мкВ
Корреляционная размерность (D_c)				
<i>m. biceps br.</i>	3,98 ± 0,61*	4,08 ± 0,61	4,19 ± 0,62	4,21 ± 0,96*
<i>m. triceps br.</i>	4,04 ± 0,53	4,00 ± 0,68	4,08 ± 0,65	4,07 ± 0,70
<i>m. tibialis ant.</i>	3,86 ± 0,60*	4,26 ± 0,57	4,28 ± 0,66	4,17 ± 0,51*
<i>m. gastrocnemius</i>	4,27 ± 0,58	4,41 ± 0,61	4,40 ± 0,70	4,96 ± 0,63
Корреляционная энтропия (K_2)				
<i>m. biceps br.</i>	3,09 ± 0,71	3,24 ± 0,78	3,39 ± 0,68	3,56 ± 0,71
<i>m. triceps br.</i>	3,29 ± 0,91	3,36 ± 0,85	3,47 ± 1,03	3,312 ± 0,52
<i>m. tibialis ant.</i>	2,91 ± 0,50	3,10 ± 0,65	3,41 ± 0,82	3,39 ± 0,54
<i>m. gastrocnemius</i>	3,25 ± 0,59	3,25 ± 0,55	3,63 ± 0,77	3,60 ± 0,43
Фрактальная размерность (D)				
<i>m. biceps br.</i>	1,35 ± 0,10	1,4084 ± 0,11	1,4134 ± 0,12	1,4866 ± 0,10
<i>m. triceps br.</i>	1,37 ± 0,11	1,4145 ± 0,11	1,4260 ± 0,12	1,5065 ± 0,09
<i>m. tibialis ant.</i>	1,3302 ± 0,12	1,4132 ± 0,11	1,4849 ± 0,13	1,4434 ± 0,14
<i>m. gastrocnemius</i>	1,3837 ± 0,13	1,4114 ± 0,15	1,4273 ± 0,12	1,4881 ± 0,12

* $p < 0,001$ при сравнении мышцы-флексора и мышцы-экстензора в паре антагонистов.

Установлено, что для всех исследованных мышц новорожденного корреляционная размерность D_c составила $\approx 4,0$, хотя выявлена недостоверная тенденция к росту для значений D_c при увеличении амплитуды иЭМГ от 1–25 до 75–100 мкВ (см. таблицу). С точки зрения нелинейной динамики корреляционная размерность D_c иЭМГ отражает количество уровней управления миоэлектрическим сигналом и представляет собой количество уравнений, с помощью которых можно описать установившееся движение динамической системы, то есть иЭМГ и, соответственно, мышечного тонуса. Обращает внимание, что D_c при амплитуде 25–75 мкВ почти одинакова, что, возможно, говорит об оптимальности генерации мышечного тонуса именно при данной амплитуде. Значения D_c в мышцах-флексорах были на 0,2–0,4 меньше по сравнению с мышцами-экстензорами, что свидетельствует о большей сложности сигнала иЭМГ в экстензорах.

Корреляционная энтропия иЭМГ K_2 ребенка первых суток после рождения составляет $\approx 3,0$ (см. таблицу). Согласно теории нелинейной динамики, бесконечное увеличение корреляционной энтропии говорило бы о полной непредсказуемости системы или ее неуправляемости и дезадаптации к данным условиям среды. В нашем же случае довольно низкая корреляционная энтропия иЭМГ новорожденного ребенка предполагает уже достаточно сформировавшийся к рождению контроль над мышечной активностью. Обращает на себя внимание различие значений корреляционной эн-

тропии пар мышц-антагонистов. Например, значения K_2 и ЭМГ для мышц-флексоров примерно на 0,2–0,3 меньше по сравнению с экстензорами в каждом диапазоне амплитуды иЭМГ. Это указывает на большую управляемость мышц-флексоров и больший, хотя и детерминированный, хаос в управлении экстензорами.

Также представляется интересным то, что при увеличении амплитуды иЭМГ происходит заметное, хотя и недостоверное, увеличение корреляционной энтропии. Это, в свою очередь, может говорить об увеличении пропорции хаоса (неуправляемости) при приближении к максимальным амплитудам иЭМГ. Подобное явление роста непредсказуемости иЭМГ было замечено ранее при исследовании больных паркинсонизмом [11], [13].

Фрактальная размерность иЭМГ ребенка D колебалась между 1,34 и 1,5, то есть соответствовала персистентным и/или случайным временным рядам (см. таблицу). Обращает на себя внимание рост фрактальной размерности в зависимости от амплитуды фрагмента, характерный и для других нелинейных параметров, что говорит об увеличении количества независимых аттракторов, определяющих иЭМГ. Также установлено, что фрактальная размерность не зависит от функции мышцы (флексор или экстензор), что отражает примерно одинаковую предсказуемость их иЭМГ. Возможно, это свидетельствует о едином центральном механизме управления этих разных по функции групп мышц.

Чем меньше фрактальная размерность процесса, тем больше выражен тренд и, соответственно, тем больше проявлено «целеполагание», то есть некое программирование этого процесса. В случае с иЭМГ, которую мы относим к персистентным временным рядам, низкие значения D означают высокую вероятность целеполагания. Особенно это характерно для иЭМГ с низкими амплитудами, которые можно отождествить с мышечным тонусом. Естественно, у новорожденного ребенка нет истинного осознанного целеполагания в движении, но имеются двигательные «программы», которые имеют свои определенные цели. Например, это программа формирования «эмбриональной» флексорной позы у ребенка, которая направлена на консервацию тепла. Подобная программа хорошо документирована для животных [4] и в меньшей степени проявляется у взрослого человека [5].

Следует отметить, что в первые часы после рождения ребенок находится в состоянии родового катарсиса, и флексорный мышечный тонус может быть выражен слабо (полуфлексорная поза) [8].

С другой стороны, установлено, что чем выше амплитуда иЭМГ, тем больше фрактальная размерность аттрактора, что говорит об увеличении количества нервных элементов (нейронов, центров, уровней), вовлеченных в управление, и тем больше при этом выражена случайность на иЭМГ. Действительно, иЭМГ с высокой амплитудой визуально выглядела как «вспышкообраз-

ная», менее стабильная. Возможно, что спонтанная активность в виде вспышек на иЭМГ свидетельствует о вовлечении нескольких аттракторов (нервных центров), которые «конкурируют» между собой за «конечный общий путь». В совокупности с ростом D_c и K_2 увеличение значения D свидетельствует о повышении сложности, хаотичности и непредсказуемости иЭМГ при увеличении амплитуды от 1 до 100 мкВ.

Нами исследована динамика нелинейных параметров в течение первых суток жизни по часам. Обнаружена достоверная положительная корреляция фрактальной размерности с часами жизни в течение первых суток после рождения для *трех мышц*, кроме икроножной, во всех амплитудных диапазонах (рис. 2). Из этого следует, что в течение первых суток жизни иЭМГ стремится от персистентных временных рядов к случайным. Вероятно, это отражает начальный этап «освобождения» двигательной системы от «эмбриональной» позы, характерной для внутриутробной иммерсии, и постепенный переход к антигравитационной активности. Достоверной корреляции других нелинейных параметров (D_c , K_2) с часами постнатальной жизни не выявлено, что говорит об их стабильности в течение первых суток жизни. Поскольку эти параметры отражают количество уровней управления и «долю» хаоса в управлении, можно предположить, что доношенный новорожденный ребенок уже оптимально готов к антигравитационной активности, хотя и не проявляет ее.

Большой интерес представляет динамика нелинейных параметров иЭМГ разных по функции мышц (верхние/нижние конечности, флексоры/экстензоры). Установлено, что наиболее тесная и достоверная корреляция, например, фрактальной размерности со временем жизни была характерна для мышц верхних конечностей. Это, вероятно, отражает наличие кранио-каудального градиента в развитии двигательной системы. Обнаружено некоторое сходство в динамике нелинейных параметров между мышцами-флексорами верхних и нижних конечностей (двуглавая мышца плеча и передняя большеберцовая мышца).

Совершенно особое поведение демонстрируют нелинейные параметры икроножной мышцы. В частности, обнаружено полное отсутствие корреляции нелинейных параметров и даже фрактальной размерности со временем жизни. В определенном смысле, икроножная мышца «не реагирует» на изменившиеся условия существования (гравитация, снижение температуры) в течение первых суток. На наш взгляд, икроножная мышца, которая является классическим примером антигравитационной мышцы, сразу после рождения пока не вовлечена в антигравитационную активность. В то же время известно, что существует врожденный рефлекс опоры при прикосновении к стопам [8]. Таким образом, икроножная мышца будет проявлять свою врожденную рефлекторную антигравитационную ак-

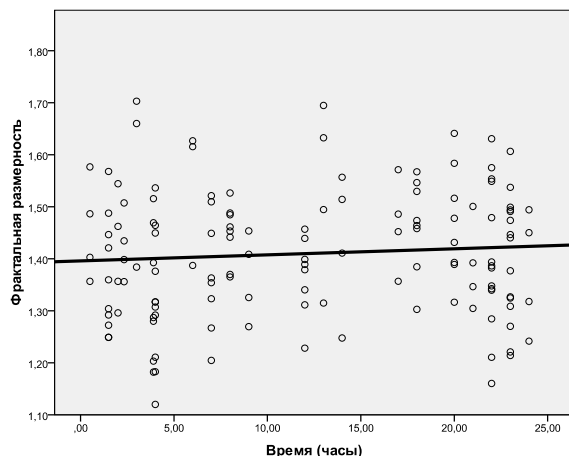
тивность только после гравитационной «сенсорной атаки». Первая собственная антигравитационная реакция возникает у ребенка только к окончанию первого месяца (удержание головки). Икроножная же мышца будет вовлечена в истинную антигравитационную активность только к окончанию первого года жизни в акте стояния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

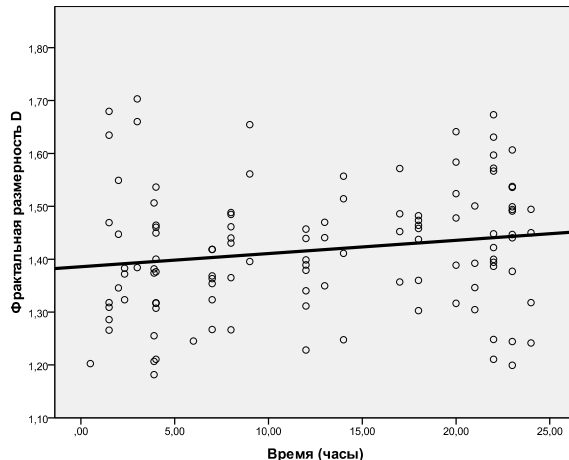
Нелинейные параметры представляют определенный интерес для оценки внутренней

структуры иЭМГ, поскольку они чувствительны к уровню активности (амплитуде иЭМГ), ко времени жизни даже в течение первых суток жизни, а также к функции мышцы. Мы считаем, что нелинейные параметры могут быть полезным инструментом для исследования динамики антигравитационной активности у ребенка. Это может послужить полезной моделью для гравитационной физиологии. Для этого необходимо исследовать более поздние этапы неонатального периода и грудного возраста ребенка.

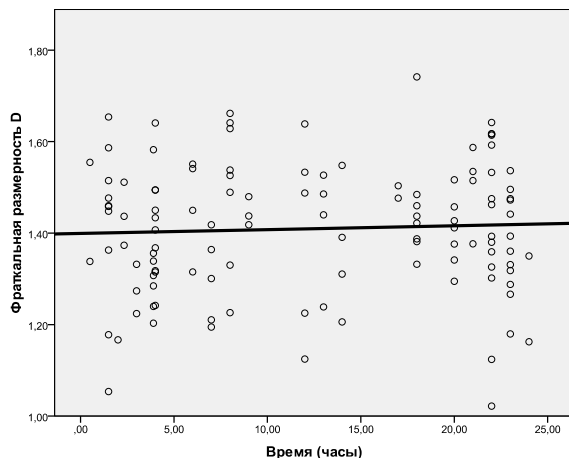
m. biceps br. ($R = 0,07$, $p = 0,410$)



m. triceps br. ($R = 0,195$, $p = 0,037$)



m. tibialis ant. ($R = 0,036$, $p = 0,695$)



m. gastrocnemius ($R = -0,108$, $p = 0,257$)

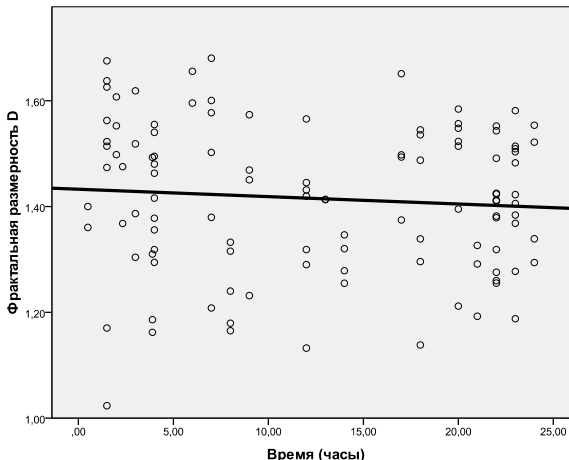


Рис. 2. Динамика фрактальной размерности иЭМГ в течение первых 24 часов жизни для мышц-антагонистов верхних и нижних конечностей

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Божокин С. В., Паршин Д. А. Фракталы и мультифракталы. М.; Ижевск: РХД, 2001. 128 с.
2. Кликушин Ю. Н. Фрактальная шкала для измерения формы распределений вероятности // Журнал радиоэлектроники. 2000. № 3. С. 15–18.
3. Лукк А. А., Дещеревский А. В., Сидорин А. Я. и др. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 210 с.

4. Лупандин Ю. В. Взаимодействие термической и нетермической рецептивной сигнализации в механизме формирования терморегуляционной активности мотонейронного пула // Сенсорные системы. Сенсорное взаимодействие. Протезирование. Л.: Наука, 1983. С. 95–110.
5. Мейгал А. Ю., Письменный К. Н. Влияние общего согревания и охлаждения на постактивационный эффект в мышцах верхних конечностей человека // Физиология человека. 2009. Т. 35. № 1. С. 51–57.
6. Мусалимов В. М., Резников С. С., Чан Нгок Чау. Специальные разделы высшей математики. СПб.: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2006. 80 с.
7. Федер Е. Фракталы: Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 254 с.
8. Шабалов Н. П. Неонатология: В 2 т. М.: Медпресс, 2006. 608 с.
9. Шустер Г. Детерминированный хаос. М.: Мир, 1988. 240 с.
10. Liu Y., Kankaanpää M., Zbilut J. P., Webber C. L. Jr. EMG recurrence quantifications in dynamic exercise // Biol. Cybern. 2004. Vol. 90. P. 337–348.
11. Meigal A., Rissanen S., Kankaanpää M., Tarvainen M., Nuutinen J., Tarkka I., Airaksinen O., Kajalainen P. A. Novel parameters of surface EMG in patients with Parkinson's disease and healthy young and old controls // J. Electromyogr. Kinesiol. 2009. Vol. 19. № 3. P. e206–213.
12. Nieminen H., Takala E. P. Evidence of deterministic chaos in the myoelectric signal // Electromyogr. Clin. Neurophysiol. 1996. Vol. 36. P. 49–58.
13. Rissanen S., Kankaanpää M., Meigal A., Tarvainen M., Nuutinen J., Tarkka I., Airaksinen O., Kajalainen P. A. Surface EMG and acceleration signals in Parkinson's disease: feature extraction and cluster analysis // Med. Biol. Eng. Comp. 2008. Vol. 46. P. 849–858.

УДК 616.127

ОЛЬГА ЮРЬЕВНА БАРЫШЕВА

кандидат медицинских наук, доцент кафедры госпитальной терапии медицинского факультета ПетрГУ
olvar@sampo.ru

ЛЮДМИЛА МИХАЙЛОВНА ХЕЙФЕЦ

кандидат медицинских наук, доцент кафедры госпитальной терапии медицинского факультета ПетрГУ
hospttherapy@mail.ru

ЮЛИЯ СЕРГЕЕВНА МИХЕЕВА

кандидат медицинских наук, ассистент кафедры нефрологии и диализа факультета последипломного образования Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. ак. И. П. Павлова, ординатор отделения гемодиализа
YSMikheeva@rambler.ru

АЛЕКСАНДР ШАЛИКОВИЧ РУМЯНЦЕВ

доктор медицинских наук, профессор кафедры пропедевтики внутренних болезней Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. ак. И. П. Павлова
YSMikheeva@rambler.ru

**ГИПЕРТРОФИЯ МИОКАРДА ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА
И ХРОНИЧЕСКАЯ БОЛЕЗНЬ ПОЧЕК**

Статья посвящена результатам изучения особенностей формирования гипертрофии левого желудочка у больных в додиализном периоде и на хроническом гемодиализе. Получены данные о влиянии уремии и диализного лечения на структурно-функциональные особенности формирования гипертрофии левого желудочка.

Ключевые слова: хроническая болезнь почек, хроническая почечная недостаточность, додиализный период, гемодиализ, гипертрофия левого желудочка, индекс массы миокарда левого желудочка

Гипертрофия миокарда левого желудочка (ГЛЖ) представляет собой одну из серьезнейших кардиологических проблем в нефрологии у пациентов с хронической почечной недостаточностью (ХПН), что во многом обусловлено ее важной ролью в развитии внезапной смерти, нарушении коронарного кровообращения, систолической и диастолической дисфункции миокарда, аритмий и сердечной недостаточности [1], [2], [4], [8], [9].

Частота выявления гипертрофии миокарда левого желудочка при эхоКГ-исследовании, являющимся «золотым стандартом» диагностики ГЛЖ, отчетливо коррелирует с выраженностью ХПН. При выраженной и терминальной стадии ХПН частота ГЛЖ составляет 76–92 % [1]. У пациентов же, получающих лечение хроническим гемодиализом (ГД), встречается в 60–80 % случаев [10], [13].

Для оценки частоты и выявления факторов риска развития гипертрофии миокарда левого желудочка у больных с хронической почечной недостаточностью как в додиализном периоде,

так и находящихся на хроническом ГД, предпринято настоящее исследование.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследование включены 65 больных с различной степенью выраженности ХПН в додиализном периоде (стадии III, IV, V хронической болезни почек по классификации, рекомендованной K/DOQI) и 138 пациентов, получающих заместительную терапию методом хронического бикарбонатного ГД. Распределение больных в додиализном периоде ХПН в зависимости от ее выраженности представлено в табл. 1. В I группе средний возраст составил 45 ± 10 лет. Соотношение мужчин и женщин 32:33. Длительность заболевания колебалась от 0 до 30 лет, в среднем 11 лет, длительность ХПН – от 0 до 12 лет, в среднем 4 года. Средняя продолжительность артериальной гипертензии 8 лет. Во II группе средний возраст составил 47 ± 12 лет. Соотношение мужчин и женщин 68:70. Средняя продолжительность диализного лечения 63 месяца

(от 1 до 300 месяцев). Средняя продолжительность артериальной гипертензии 9 лет. Больные обеих групп регулярно получали антигипертензивную терапию. У больных II группы с учетом артериальной гипертензии проводилась коррекция программы ГД.

Ведущей причиной ХПН был хронический гломерулонефрит (80 %).

Всем пациентам выполнялось исследование общепринятых биохимических параметров. У больных на хроническом ГД исследование биохимических показателей проводилось до и после процедуры ГД.

Таблица 1

Распределение больных по выраженности ХПН в додиализном периоде

Стадия хронической болезни почек	III КФ* 30–59 мл/мин/ 1,73 м ²	IV КФ 15–29 мл/мин/ 1,73 м ²	V КФ < 15 мл/мин/ 1,73 м ²
Кол-во пациентов, абс.	n = 30	n = 26	n = 10
Кол-во пациентов, %	45	40	15

* КФ – клубочковая фильтрация, определенная по формуле Cockcroft-Gault.

Таблица 2

Распределение больных по возрасту при концентрической и эксцентрической ГЛЖ

Возраст	Концентрическая ГЛЖ		Эксцентрическая ГЛЖ	
	I группа n = 44	II группа n = 88	I группа n = 12	II группа n = 42
20–39 лет	4 (9 %)	18 (20 %)	2 (17 %)	14 (33 %)
40–59 лет	35 (80 %)	55 (63 %)	7 (58 %)	19 (46 %)
60 лет и старше	5 (11 %)	15 (17 %)	3 (25 %)	9 (21 %)

Таблица 3

Влияние длительности заболевания, длительности ХПН на выраженность ГЛЖ

Длительность	Концентрическая ГЛЖ n = 44	Эксцентрическая ГЛЖ n = 12
заболевания до 1 года	2 (5 %)	1 (8 %)
1–5 лет	5 (11 %)	2 (16 %)
5–10 лет	11 (25 %)	3 (25 %)
10–15 лет	18 (41 %)	5 (43 %)
> 15 лет	8 (18 %)	1 (8 %)
ХПН до 1 года	4 (9 %)	1 (8 %)
1–5 лет	15 (34 %)	4 (33 %)
5–10 лет	19 (43 %)	5 (43 %)
> 10 лет	6 (14 %)	2 (16 %)

Всем больным выполнялось эхоКГ-исследование. ГЛЖ определялась на основании расчета массы миокарда левого желудочка (ММЛЖ) по формуле R. Devereux [14], [15] и ее индексирования к площади поверхности тела – индекса ММЛЖ (ИММЛЖ). За уровень ГЛЖ в нашем исследовании был принят критерий ИММЛЖ, превышающий 130 г/м² у мужчин и 110 г/м² у женщин. ММЛЖ считалась нормальной при значениях менее 215 г. Относительная толщина стенки левого желудочка (ОТС) определялась следующим образом: ОТС = (ТМЖП + ТЗСЛЖ) / КДРЛЖ, где ТМЖП – толщина межжелудочковой перегородки, ТЗСЛЖ – толщина задней стенки левого желудочка, КДРЛЖ – конечный диастолический размер левого желудочка.

За повышение ОТС принимались значения 0,450 и более. Если ОТС превышала 0,450, то у данного пациента констатировали концентрический тип ГЛЖ, если меньше 0,450 – эксцентрический тип ГЛЖ.

Статистическую обработку проводили с использованием общепринятых методов параметрической и непараметрической статистики с помощью стандартного пакета программ прикладного статистического анализа (Statistica for Windows v. 5.0).

РЕЗУЛЬТАТЫ

ГЛЖ выявлена у 86 % обследованных пациентов I группы и 94 % пациентов II группы. В I группе концентрическая ГЛЖ констатирована у 44 (68 %) и эксцентрическая – у 12 (18 %) больных. Средний ИММЛЖ составил 157,46 ± 43,35 г/м². Во II группе концентрическая ГЛЖ констатирована у 88 (67 %) и эксцентрическая – у 42 (32 %) больных. Средний ИММЛЖ составил 185,37 ± 48,46 г/м².

У больных как в додиализной стадии ХПН, так и на хроническом ГД не выявлено зависимости между выраженностью ГЛЖ и возрастом. Так, среди больных I группы в возрасте от 40 до 60 лет ГЛЖ имела место при концентрической модели в 80 % случаев, при эксцентрической – в 58 %; среди больных II группы в возрасте от 40 до 60 лет ГЛЖ имело место при концентрической модели в 63 % случаев, при эксцентрической – в 46 % (табл. 2).

В I группе выявлена зависимость между длительностью заболевания, длительностью ХПН и выраженностью ГЛЖ (табл. 3).

В нашем исследовании подтверждена взаимосвязь между продолжительностью диализного лечения и прогрессированием ГЛЖ (табл. 4). Причем в течение первых 5 лет диализной терапии выраженность ГЛЖ увеличивается ($\tau = 0,23$, $P = 0,044$), а после 5 лет лечения ГД – уменьшается ($\tau = -0,24$, $P = 0,005$).

У больных II группы обнаружена обратная зависимость между ИММЛЖ и показателем КТ/V ($\tau = -0,33$, $P < 0,000$). Следовательно, адекватность диализной терапии может служить дополнительным фактором ГЛЖ у наших больных.

Интересен тот факт, что в течение первых 5 лет диализного лечения адекватность диализа и недельная доза достоверно ниже, чем у пациентов, получающих ГД более 5 лет ($P < 0,001$).

В обеих группах установлена статистически достоверная взаимосвязь между ИММЛЖ и систолическим артериальным давлением ($\tau = 0,5$, $Z = 5,15$, $P < 0,0001$), ИММЛЖ и диастолическим артериальным давлением ($\tau = 0,46$, $Z = 4,68$, $P < 0,0001$), что подтверждает роль артериальной гипертензии в формировании ГЛЖ.

Установлена статистически значимая зависимость между ММЛЖ и уровнем гемоглобина и количеством эритроцитов ($\tau = -0,21$, $Z = -2,08$, $P = 0,037$). Анемия, таким образом, также является важным фактором, способствующим развитию ГЛЖ. Тяжелая анемия с уровнем гемоглобина менее 85 г/л при эксцентрической ГЛЖ встречалась в 62 % случаев, а при концентрической ГЛЖ – в 45 % (табл. 5).

Величина ИММЛЖ соответствовала степени увеличения размеров полостей сердца ($\tau = 0,52$, $Z = 5,37$, $P < 0,0001$), а также толщине межжелудочковой перегородки ($\tau = 0,5$, $Z = 5,08$, $P < 0,0001$) и толщине задней стенки левого желудочка ($\tau = 0,54$, $Z = 5,53$, $P < 0,0001$). Увеличение ИММЛЖ сопровождалось увеличением ОТС ($r = 0,28$, $P = 0,046$), то есть у больных с концентрической ГЛЖ ИММЛЖ был выше, чем у пациентов с эксцентрической ГЛЖ.

При концентрической ГЛЖ достоверно больше толщина межжелудочковой перегородки ($1,4 \pm 0,027$ и $1,09 \pm 0,02$ см, $P = 0,0001$) и задней стенки левого желудочка ($1,35 \pm 0,022$ и $1,09 \pm 0,03$ см, $P = 0,0001$). При эксцентрической ГЛЖ достоверно больше диастолический размер левого желудочка ($5,52 \pm 0,09$ и $5,02 \pm 0,06$ см, $P = 0,0001$).

Факторами риска концентрической ГЛЖ являются систолическое и пульсовое артериальное давление, а у больных на хроническом гемодиализе также междиализные прибавки в весе ($P < 0,01$).

Достоверные различия между концентрической и эксцентрической ГЛЖ представлены в табл. 6.

Не установлено зависимости между ИММЛЖ и показателями фосфорно-кальциевого обмена и уровнем паратиреоидного гормона. Однако получена отчетливая положительная корреляционная зависимость между толщиной межжелудочковой перегородки и толщиной задней стенки и уровнем фосфора и произведения «кальций х фосфор» ($\tau = 0,28$, $Z = 2,84$, $P = 0,003$).

Установлено, что при увеличении ИММЛЖ происходит достоверное снижение фракции выброса ($\tau = -0,37$, $P = 0,002$) и фракции укорочения ($\tau = -0,28$, $Z = -2,84$, $P < 0,005$). Таким образом, при ГЛЖ снижена сократительная способность миокарда. Причем при эксцентрической модели ГЛЖ фракция выброса достоверно ниже, чем при концентрической модели ($60,9 \pm 1,77$ и $67,7 \pm 1,25$ % соответственно, $P = 0,002$).

Таблица 4
Влияние длительности диализной терапии на выраженность ГЛЖ

Длительность ГД	Концентрическая ГЛЖ	Эксцентрическая ГЛЖ
	n = 88	n = 42
До 1 года	16 (18 %)	8 (19 %)
1–5 лет	41 (47 %)	18 (43 %)
5–10 лет	15 (17 %)	9 (21 %)
10–15 лет	10 (11 %)	6 (15 %)
Более 15 лет	6 (7 %)	1 (2 %)

Таблица 5
Анемия при концентрической и эксцентрической ГЛЖ

Уровень гемоглобина, г/л	Концентрическая ГЛЖ		Эксцентрическая ГЛЖ	
	n = 44	n = 88	n = 12	n = 42
Менее 85	18 (41 %)	40 (45 %)	7 (58 %)	26 (62 %)
86–100	15 (34 %)	37 (42 %)	3 (25 %)	8 (19 %)
Более 100	11 (25 %)	11 (13 %)	2 (17 %)	8 (19 %)

Таблица 6
Достоверные различия между концентрической и эксцентрической ГЛЖ

Показатели	Концентрическая ГЛЖ	Эксцентрическая ГЛЖ	P
Систолическое артериальное давление, мм рт. ст.	148,64 ± 2,11	139,52 ± 3,52	0,02
Пульсовое давление, мм рт. ст.	61,82 ± 1,33	55 ± 2,27	0,006
Междиализные прибавки в весе, кг	3,02 ± 0,11	2,58 ± 0,09	0,01
Междиализные прибавки в весе, % массы тела	4,73 ± 0,19	4,09 ± 0,22	0,04
ТМЖП*, см	1,395 ± 0,03	1,09 ± 0,025	0,0001
ТЗСЛЖ**, см	1,351 ± 0,02	1,088 ± 0,025	0,0001
Левый желудочек, см	5,02 ± 0,06	5,52 ± 0,09	0,0001
Левое предсердие, см	4,35 ± 0,06	4,12 ± 0,09	0,02
Фракция выброса, %	67,71 ± 1,25	60,99 ± 1,77	0,002
Фракция укорочения, %	38,7 ± 0,98	33,57 ± 1,3	0,002
ММЛЖ***, г	394,62 ± 13,91	334,11 ± 16,09	0,009
ИММЛЖ****, г/м ²	225,84 ± 7,71	188,79 ± 8,24	0,003

*ТМЖП – толщина межжелудочковой перегородки.

**ТЗСЛЖ – толщина задней стенки левого желудочка.

***ММЛЖ – масса миокарда левого желудочка.

****ИММЛЖ – индекс массы миокарда левого желудочка.

ОБСУЖДЕНИЕ

Частота выявления ГЛЖ на основании ИМ-МЛЖ методом эхоКГ (86–94 %) соответствует данным литературы [6], [12].

Наиболее распространенными видами ремоделирования миокарда были концентрическая ГЛЖ и эксцентрическая ГЛЖ с дилатацией левого желудочка.

В развитии ГЛЖ при ХПН играют роль различные факторы. Наряду с водно-электролитными, гормональными и метаболическими нарушениями, свойственными ХПН, сам по себе ГД с быстрым извлечением из сосудистого русла значительного объема жидкости вызывает ряд неблагоприятных функциональных и структурных сдвигов со стороны сердечно-сосудистой системы. Эти сдвиги возникают как в результате непосредственных перепадов гидродинамической нагрузки на сердце и стенку сосудов, так и в связи с опосредованными регуляторными воздействиями, к числу которых относятся активация симпатoadренальной системы и неадекватно высокая в междиализный период активность ренин-ангиотензиновой системы. Для пациентов, длительно леченных хроническим ГД, характерна системная артериальная гипертензия вследствие перегрузки объемом, повышенной активности ренина, а также потери эластичности стенок крупных артерий. Последний фактор лежит преимущественно в основе эксцентрической модели ГЛЖ [1]. Обсуждается также влияние генетической предрасположенности [19]. Однако ключевую роль играют гемодинамические факторы, такие как перегрузка давлением и объемом, приводящие к формированию различных моделей гипертрофии [1], [20]. Перегрузка давлением приводит к развитию концентрической гипертрофии, которая характеризуется утолщением стенок левого желудочка без увеличения размеров его полости. Такая модель гипертрофии встречается у 67 % больных с ХПН, получающих лечение хроническим ГД, и сопровождается повышением общего периферического сопротивления и малоизмененным сердечным выбросом. Концентрическая модель гипертрофии вследствие перегрузки давлением возникает из-за артериальной гипертензии, присутствующей у большинства диализных пациентов [10], [12], [16] (см. рисунок).

Перегрузка объемом сопровождается эксцентрической моделью гипертрофии, для которой характерно увеличение размера полости левого желудочка без выраженного утолщения его стенок. Такая модель ГЛЖ встречается у 32 % больных с ХПН и ассоциируется с увеличением сердечного выброса при нормальном или умеренно повышенном общем периферическом сопротивлении [23].

Встречаются варианты комбинированного воздействия на миокард перегрузки давлением и объемом, или смешанной формы ГЛЖ [19].

В отличие от физиологической ГЛЖ (например, «атлетическое сердце»), патологические

формы ГЛЖ сопровождаются интерстициальным фиброзом (см. рисунок).

Установлена достоверная взаимосвязь между ИММЛЖ и уровнем артериального давления, что позволяет отнести артериальную гипертензию к одному из существенных факторов, ускоряющих формирование ГЛЖ. Другим не менее значимым фактором развития ГЛЖ была анемия, что подтверждено результатами корреляционного анализа.

Анемия приводит к снижению вязкости крови и общего периферического сопротивления вследствие гипоксической вазодилатации. Данные эффекты вызывают увеличение ударного объема и повышение частоты сердечных сокращений, что сопровождается нарастанием минутного объема, возникновением перегрузки левого желудочка объемом и развитием его дилатации и/или гипертрофии [1], [4], [7], [24].

Полученные данные согласуются с представлением о том, что гипертензия и анемия, столь характерные для пациентов на хроническом ГД, являются ведущими механизмами развития гипертрофии сердечной мышцы.

Следует отметить увеличение левого предсердия, размер которого зависел от уровня артериального давления ($r_s = 0,41$, $P < 0,004$). По данным корреляционного анализа, на размер левого предсердия также достоверно влияла выраженность ГЛЖ ($\tau = 0,21$, $Z = 2,16$, $P < 0,03$). Размер правого желудочка достоверно коррелировал с массой левого желудочка ($\tau = 0,21$, $Z = 2,2$, $P < 0,03$). Следовательно, процесс ремоделирования охватывает не только левый желудочек, но и левое предсердие и правый желудочек. Возможно, увеличенный ИММЛЖ может служить фактором, определяющим развитие перегрузки левого предсердия, что мы и наблюдали при вариантах ГЛЖ, при которых величина левого предсердия значительно превышала норму.

ГЛЖ приводила также к снижению сократительной способности миокарда, поскольку при данном патологическом состоянии происходит увеличение межклеточного вещества и фиброзных изменений.



Схема возникновения вариантов ГЛЖ при ХПН

Основываясь на многочисленных исследованиях, можно рассматривать ГЛЖ как изначально компенсаторный структурный ответ на гемодинамическую перегрузку давлением и/или объемом [3]. Дальнейшее прогрессирование процесса сопровождается «перехлестом» компенсации. При этом развиваются нарушения систолической и диастолической функций сердца, а также коронарной гемодинамики и электрической активности сердца, что клинически проявляется признаками ишемической болезни сердца, сердечной недостаточности и тяжелыми нарушениями ритма [22].

Частота нарушений систолической функции левого желудочка при ХПН, по данным различных авторов, колеблется от 32 до 62 % [11]. Эти нарушения характеризуются снижением фракции изгнания и скорости циркулярного укорочения левого желудочка, а также изменениями отношения систолического давления в левом желудочке к его объему.

В развитии нарушений систолической функции левого желудочка у части больных с ХПН важная роль отводится ГЛЖ [1], [12], [17]. По мере развития гипертрофии нарушается систолическая функция левого желудочка, что сначала проявляется при физических нагрузках, а в последующем и в покое. При систолической дисфункции левого желудочка происходит снижение электрической активности и механические нарушения сокращения миокарда [13]. Наряду со снижением сократительной способности миокарда, в развитии систолических нарушений левого желудочка важную роль играют развивающиеся при его гипертрофии нарушения наполнения левого желудочка и изменения коронарного кровообращения [3], [5].

Особенностью нашего исследования было установление обратной взаимосвязи между ИММЛЖ и степенью адекватности ГД. Таким образом, качественный ГД позволил бы затормозить прогрессирование ГЛЖ. Однако эти предположения несут лишь гипотетический характер и требуют более детального изучения.

В нашем исследовании обнаружена взаимосвязь между продолжительностью диализного лечения и ГЛЖ. Причем в течение первых 5 лет диализной терапии выраженность ГЛЖ увеличивается, что обусловлено менее адекватным ГД, более значимой артериальной гипертензией и анемией. После 5 лет терапии ГД выраженность ГЛЖ уменьшается, что объясняется, во-первых, более адекватным ГД, во-вторых, относительно удовлетворительной коррекцией гипертензии

и анемии. Данные литературы по этому вопросу противоречивы. Большинство авторов полагают, что частота ГЛЖ возрастает с увеличением продолжительности лечения ГД [1], [6], что связано с процессом увеличения межклеточного вещества миокарда, не связанным с артериальной гипертензией, но зависящим от длительности лечения ГД. Однако некоторые авторы считают, что в период гемодиализной терапии при удовлетворительной коррекции гипертензии, анемии и гипергидратации – основных факторов развития ГЛЖ – можно добиться снижения частоты и выраженности гипертрофии миокарда [5].

Важное место в генезе ГЛЖ отводится вторичному гиперпаратиреозу и нарушению фосфорно-кальциевого обмена [7], [18], [21]. Показано, что избыток паратиреоидного гормона приводит к увеличению поступления кальция внутрь кардиомиоцитов, что обуславливает сокращение сроков их жизни и способствует кальцинозу и фибротическим изменениям миокардиального матрикса [5], [19]. При успешной коррекции уровня паратиреоидного гормона у пациентов с вторичным гиперпаратиреозом при ХПН с помощью кальцитриола наблюдалось достоверное уменьшение индекса массы миокарда левого желудочка [21]. В нашем исследовании не обнаружена зависимость между ИММЛЖ и паратиреоидным гормоном. Тем не менее выявлена взаимосвязь толщины межжелудочковой перегородки и задней стенки левого желудочка с уровнем фосфора и произведения «кальций х фосфор», что косвенно свидетельствует о роли кальций-фосфорного обмена в генезе ГЛЖ у диализных пациентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, ГЛЖ является наиболее распространенным осложнением хронической почечной недостаточности со стороны сердечно-сосудистой системы как у больных в додиализном периоде, так и у больных, получающих лечение методом хронического ГД. Наиболее распространенными вариантами ремоделирования миокарда являются концентрическая ГЛЖ и эксцентрическая ГЛЖ и дилатация левого желудочка. Нами выявлены факторы риска развития гипертрофии миокарда и ее прогрессирования, что требует более тщательного контроля за артериальной гипертензией, анемией и фосфорно-кальциевым обменом уже на додиализном этапе, а также более тщательного контроля за адекватностью проводимого ГД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волгина Г. В. Клиническая эпидемиология кардиоваскулярных нарушений при хронической почечной недостаточности (Обзор литературы) // Нефрология и диализ. 2000. Т. 2. № 1–2. С. 25–32.
2. Дядык А. И., Багрий А. Э., Лебедь И. А. и др. Гипертрофия левого желудочка сердца у больных с хронической почечной недостаточностью // Кардиология. 1997. № 2. С. 76–82.
3. Филатова Н. П., Савина Л. В., Малышева Н. В. и др. Гипертрофия миокарда левого желудочка у больных с артериальной гипертензией: клинические особенности и прогностическое значение // Кардиология. 1993. № 6. С. 34–38.

4. Шутов А. М., Кондратьева Н. И., Куликова Е. С. и др. Реомоделирование сердца у больных с хронической почечной недостаточностью в стадии, не требующей диализа // Тер. арх. 2000. № 6. С. 46–49.
5. Amann K., Mall G., Ritz E. Myocardial interstitial fibrosis in uremia: is it relevant? // *Nephrol. Dial. Transplant.* 1994. Vol. 9. P. 127–128.
6. Amann K., Rychlik I., Miltenberger-Milteny G., Ritz E. Left ventricular hypertrophy in renal failure // *Kidney Int.* 1998. Vol. 54. Suppl. 68. P. S78–S85.
7. Berweek S., Hennig L., Sternberg C. et al. Cardiac mortality prevention in uremic patients. Therapeutic strategies with particular attention to complete correction of renal anemia // *Clin. Nephrol.* 2000. Vol. 53. Suppl. 1. P. S80–S85.
8. Buoncristiani U., Fagugli R., Cio G. et al. Left ventricular hypertrophy in daily dialysis // *Miner. Electrolyte Metab.* 1999. Vol. 25. P. 90–94.
9. Cannella G. Left ventricular hypertrophy in the dialysed patient. What can be done about it? // *Nephrol. Dial. Transplant.* 1996. Vol. 11. № 3. P. 418–420.
10. Cannella G., Paoletti E., Ravera G. et al. Inadequate diagnosis and therapy of arterial hypertension as causes of left ventricular hypertrophy in uremic dialysis patients // *Kidney Int.* 2000. Vol. 58. № 1. P. 260–268.
11. Covic A., Goldsmith D. J. A., Clayton P. et al. Long-term hemodialysis vs. renal transplantation: comparative influence on cardiac structure and function // *Nephrol. Dial. Transplant.* 1994. Vol. 9. P. 980–981.
12. Covic A., Goldsmith D. J. A., Covic M. Reduced blood pressure diurnal variability as a risk factor for progressive left ventricular dilatation in hemodialysis patients // *Am. J. Kidney Dis.* 2000. Vol. 35. № 4. P. 617–623.
13. Dahan M., Siohan P., Viron B. et al. Relationship between left ventricular hypertrophy, myocardial contractility, and load conditions in hemodialysis patients: an echocardiographic study // *Am. J. Kidney Dis.* 1997. Vol. 30. № 6. P. 780–785.
14. Devereux R. B., Alonso D. R. Echocardiographic assessment of left ventricular hypertrophy: comparison to necropsy findings // *Am. J. Cardiol.* 1986. Vol. 57. P. 450–458.
15. Devereux R. B., Reichek N. Echocardiographic left ventricular mass in man // *Am. J. Cardiol.* 1977. Vol. 55. P. 613–618.
16. Ertuk S., Estug A. E. Hypertension and left ventricular hypertrophy in hemodialysis patients // *J. Hypertens.* 1998. Vol. 15. № 3. P. 327.
17. Foley R. N., Parfrey P. S., Kent G. M. et al. Serial change failure in end-stage renal disease // *J. Am. Soc. Nephrol.* 2000. Vol. 11. № 5. P. 912–916.
18. Locatelli F., Manzoni C., Del Vecchio L., Di Filippo S. Changes in the clinical condition of hemodialysis patients // *J. Nephrol.* 1999. Vol. 12. Suppl. 2. P. S82–S91.
19. London J. M., Fabiani F. Left ventricular dysfunction in end-stage renal disease: Echocardiographic insights // *Cardiac dysfunction in chronic uremia* / Ed. P. S. Parfrey, J. D. Harnett. Boston, 1992. P. 117–137.
20. Lopez-Gomez J. M., Verde E., Perez-Garcia R. Blood pressure, left ventricular hypertrophy and long-term prognosis in hemodialysis patients // *Kidney Int.* 1998. Vol. 68. Suppl. 1. P. S92–S98.
21. Massimetti C., Botti M., Capezzuto A. et al. Effects of pharmacological correction of secondary hyperparathyroidism on cardiac function in hemodialysis patients // *Nephrol. Dial. Transplant.* 1994. Vol. 9. P. 911–912.
22. Parfrey P. S., Foley R. N., Harnett J. D. et al. Outcome and risk factors for left ventricular disorders in chronic uremia // *Nephrol. Dial. Transplant.* 1996. Vol. 11. № 7. P. 1277–1278.
23. Rossi M. A., Carillo S. V. Cardiac hypertrophy due to pressure and volume overload: distinctly different biological phenomena? // *Int. J. Cardiol.* 1991. Vol. 31. P. 133–149.
24. Savage T., Giles M., Tomson C. V., Raine A. E. Gender differences in mediators of left ventricular hypertrophy in dialysis patients // *Clin. Nephrol.* 1998. Vol. 49. № 2. P. 107–112.

ЮРИЙ БОРИСОВИЧ ГОЛЬДШТЕЙН

кандидат технических наук, профессор кафедры механики
строительного факультета ПетрГУ
mech2007@psu.karelia.ru

ПОЛНАЯ ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ КОНСТРУКЦИИ С ОДНОСТОРОННИМИ СВЯЗЯМИ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ УСТОЙЧИВОСТИ

В статье с привлечением теории квадратичных форм анализируется полная потенциальная энергия упругой системы с односторонними связями. Обсуждается проблема определения числа степеней свободы такой системы в случае, если это число конечно. Показано, что задача отыскания минимума полной потенциальной энергии является многоэкстремальной и глобальный минимум можно найти только перебором.

Ключевые слова: устойчивость, полная потенциальная энергия, квадратичная форма, односторонние связи, число степеней свободы, спектр эйлеровых сил

При классическом анализе устойчивости линейно-деформируемых конструкций, имеющих сжатые элементы, внешнее силовое воздействие делится на две части. Прежде всего, это воздействие P , зависящее от параметра λ , которое вызывает большие осевые усилия и приводит к потере устойчивости при критическом значении величины λ . Такую нагрузку принято называть *параметрической* [8]. В отличие от нее, *активная* нагрузка Q вызывает только изгиб (кручение) элементов конструкции, тогда как осевые деформации или отсутствуют вообще, или пренебрежимо малы. Эти термины, введенные при обращении к задачам устойчивости систем с двухсторонними связями, утрачивают свою определенность, как только речь заходит о конструкциях с односторонними связями. Дело в том, что воздействие Q оказывает существенное влияние как на величину критической силы, так и на форму потери устойчивости таких конструкций, поэтому приходится следить за перемещениями и усилиями системы по мере изме-

нения нагрузки Q , характеризуемого неким параметром μ . Сказанное означает, что нагрузка Q становится столь же параметрической, сколь и нагрузка P . С другой стороны, при наличии воздействия Q нагрузка P ведет себя не менее активно, чем нагрузка Q , вызывая деформации изгиба еще до достижения своего критического значения и способствуя переходу от одной рабочей системы к другой. Поэтому при решении задач устойчивости систем с односторонними связями лучше отказаться от использования терминов *параметрическая нагрузка* и *активная нагрузка* и перейти к представлению внешнего воздействия в виде двух составляющих по признаку их вхождения в выражение для полной потенциальной энергии Π конструкции. Ту его часть, которая определяет квадратичные слагаемые в выражении для энергии Π (но может частично определять и линейные члены), естественно называть λ -компонентой или λ -составляющей заданной нагрузки, а долю воздействия, входящую только в линейную часть энергетиче-

ской квадратичной формы, – ее μ -компонентой (μ -составляющей).

Задача состоит в отыскании критической нагрузки на конструкцию, то есть в определении критического значения параметра λ в предположении, что перемещения малы. При консервативной нагрузке эта задача может быть решена энергетическим способом, поэтому интересно выяснить, как меняется полная потенциальная энергия Π системы по мере изменения параметров λ и μ . Эта энергия представляет собой неоднородную квадратичную форму обобщенных перемещений, что позволяет анализировать зависимость $\Pi(\lambda, \mu)$, опираясь на теорию квадратичных форм. В настоящей работе рассматривается система с конечным числом n степеней свободы. Ее состояние характеризуется кинематическими параметрами q_1, q_2, \dots, q_n . Числа q_n образуют вектор-столбец q . Поскольку квадратичная форма определяется в линейном пространстве без обращения к метрике этого пространства, все положения, устанавливаемые для квадратичных форм в конечномерных пространствах, справедливы и в пространствах бесконечной размерности. О тех свойствах квадратичных форм, которые потребуются в дальнейшем, кратко напоминает в п. 1. При этом используется запись потенциала $\Pi(\lambda, \mu)$ для конструкции с двухсторонними связями.

АНАЛИЗ ПОЛНОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ УПРУГОЙ СИСТЕМЫ

Полная потенциальная энергия рассматриваемой системы

$$\Pi = \Phi_0 - \Phi_1 q + \frac{1}{2} q^T \Phi_2 q \quad (1.1)$$

является неоднородной квадратичной формой обобщенных перемещений q_i , которые представлены в формуле (1.1) вектором-столбцом q из n элементов. Через Φ_0 обозначена потенциальная энергия предварительного напряжения. Линейная часть формы (1.1) задается вектором-столбцом $\Phi_1 = \Phi_1(\lambda, \mu)$, а ее квадратичная часть – матрицей $\Phi_2 = \Phi_2(\lambda)$. Решение задачи устойчивости сводится к минимизации квадратичной формы (1.1) по вектору q в открытой области.

В зависимости от значений параметров λ и μ квадратичная форма (1.1) может быть определенной по знаку или знакопеременной. В первом случае квадратичная форма относится к эллиптическому типу, во втором – к гиперболическому либо параболическому типу. Характер стационарных точек у форм разных типов различен, поэтому приходится следить за тем, как изменение параметров λ и μ влияет на изменение типа квадратичной формы (1.1). Наиболее наглядна каноническая форма представления функционала $\Pi(\lambda, \mu)$. Такое представление достигается преобразованием координат q_i .

Параллельный перенос начала координат

$$q = \bar{q} + q_0 \quad (1.2)$$

позволяет избавиться в равенстве (1.1) от слагаемых первого порядка:

$$\Pi = \bar{\Phi}_0 + \frac{1}{2} \bar{q}^T \Phi_2 \bar{q}. \quad (1.3)$$

Здесь

$$\bar{\Phi}_0 = \Phi_0 - \frac{1}{2} \Phi_1 \Phi_2^{-1} \Phi_1^T. \quad (1.4)$$

Вектор q_0 сдвига начала координат определяется равенством

$$q_0 = \Phi_2^{-1} \Phi_1^T. \quad (1.5)$$

Вычисления по формулам (1.3)–(1.5) возможны лишь при невырожденной матрице Φ_2 , то есть при условии, что ее определитель

$$\det \Phi_2 = \gamma \sum_{i=1}^n (\varphi_i - \lambda) \equiv \gamma \sum_{i=1}^n \nu_i \quad (1.6)$$

отличен от нуля. Через φ_i обозначены собственные числа матрицы Φ_2 , а через γ – некоторая константа. Кроме того, введено обозначение $\nu_i = \varphi_i - \lambda$. О выполненном преобразовании говорят как о приведении квадратичной формы к центру. Квадратичная форма (1.1) не имеет центра тогда и только тогда, когда параметр λ совпадает с каким-либо из собственных чисел матрицы Φ_2 старших членов. Последующий поворот осей базиса \bar{q}_i :

$$\bar{q} = L \tilde{q} \quad (1.7)$$

приводит квадратичную форму к сумме квадратов.

Символом L обозначается ортогональная квадратная матрица порядка n . Ее столбцами являются собственные векторы e_i матрицы Φ_2 :

$$L = [e_1 e_2 \dots e_n]. \quad (1.8)$$

Так как $L^T = L^{-1}$, $LL^T = L^T L = E$, то

$$\bar{q}^T \Phi_2 \bar{q} = \bar{q}^T L^T L \Phi_2 L \tilde{q} = \tilde{q}^T \nu \tilde{q} = \nu \tilde{q}^T \tilde{q} = \sum_{i=1}^n \nu_i \tilde{q}_i^2,$$

где ν – диагональная матрица с ненулевыми элементами ν_i , и

$$\Pi = \bar{\Phi}_0 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \nu_i \tilde{q}_i^2. \quad (1.9)$$

Из формул (1.2) и (1.7) следует, что

$$q = L^T \tilde{q} + q_0. \quad (1.10)$$

Связь между исходной и конечной системами координат определена.

Если $0 < \varphi_1 < \varphi_2 < \dots < \varphi_n$ и $\lambda < \varphi_1$, то все v_i положительны. Квадратичная форма (1.9) является эллиптической и положительно определенной. У нее единственный минимум, достигаемый при $\tilde{q} = 0$. Согласно формуле (1.10), в этом случае $q = q_0$, то есть точкой минимума является центр квадратичной формы (1.1). Его положение зависит от параметров нагружения λ и μ . Однако положение такого центра не влияет на характер стационарной точки. Состояние системы устойчиво.

Если $\lambda > \varphi_n$, то все $v_i < 0$, и эллиптическая квадратичная форма (1.9) определена отрицательно. Теперь при $\tilde{q} = 0$ ($q = q_0$) энергия Π максимальна, тогда как ее минимум неограничен. Отвечающее стационарной точке равновесное состояние системы неустойчиво. Возрастая, параметр λ раньше или позже достигнет значения φ_1 , став равным первому характеристическому числу матрицы Φ_2 , что отвечает потере устойчивости системы. Определитель этой матрицы обращается в нуль (см. формулу (1.6)), поэтому центр у соответствующей квадратичной формы отсутствует. Преобразование энергии (1.1) придется сразу начинать с поворота репера q (строение (1.8) у матрицы L сохраняется):

$$q = L^T \tilde{q}. \quad (1.11)$$

Подстановка вектора (1.11) в выражение (1.1) дает:

$$\Pi = \Phi_0 - \Phi_1 L^T \tilde{q} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n v_i \tilde{q}_i^2. \quad (1.12)$$

Пусть $\Phi_1 L^T = [\tau_1 \tau_2 \dots \tau_n]$ и $\bar{q}_1 = \tilde{q}_1$, $\bar{q}_i = \tilde{q}_i - \tau_i / v_i$, $i = 2, 3, \dots, n$. Тогда

$$\Pi = \bar{\Phi}_0 - \tau_1 \bar{q}_1 + \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n v_i \bar{q}_i^2 \quad (1.13)$$

при

$$\bar{\Phi}_0 = \Phi_0 + \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n \frac{\tau_i^2}{v_i}$$

и всех строго положительных числах v_i . Запись (1.13) является канонической для потенциальной энергии системы, если $v_1 = 0$.

Квадратичная форма (1.13) относится к параболическому типу. При любых конечных значениях координат $\bar{q}_2, \bar{q}_3, \dots, \bar{q}_n$ и $|\bar{q}_1| \rightarrow \infty$ энергия (1.13) неограниченно убывает или возрастает

в зависимости от соотношения знаков величин τ_1 и \bar{q}_1 . Стремление величины $|\bar{q}_1|$ к бесконечности свидетельствует о потере устойчивости системы. Если положить в формуле (1.3) $\Phi_0 = \Phi_1 = 0$, то преобразование (1.11) при $\varphi_1 - \lambda = v_1 = 0$ сразу же приводит эту форму к виду:

$$\Pi = \frac{1}{2} (v_2 \tilde{q}_2^2 + v_3 \tilde{q}_3^2 + \dots + v_n \tilde{q}_n^2).$$

Ее минимум достигается при произвольном значении координаты \tilde{q}_1 и нулевых значениях всех остальных координат \tilde{q} вектора \tilde{q} . Если же принять $\tilde{q}_1 = 1$ и $\tilde{q}_2 = \tilde{q}_3 = \dots = \tilde{q}_n = 0$, то, согласно равенству (1.14),

$$q = L \tilde{q} = L \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = e_1.$$

Значит, возможно равновесное состояние системы и при ненулевых перемещениях, характеризуемых вектором q , ортом которого является первый собственный вектор матрицы Φ_2 . Подстановка вектора \tilde{q} в формулу (1.12) дает:

$$\Pi = \Phi_0 - \Phi_1 e_1. \quad (1.12a)$$

Подобная картина наблюдается и тогда, когда параметр λ принимает значения $\varphi_2, \dots, \varphi_n$. Но при $\varphi_i < \lambda < \varphi_{i+1}$ рассматриваемая квадратичная форма становится гиперболической. Преобразования (1.2) и (1.7) приводят ее к виду:

$$\Pi = \bar{\Phi}_0 + \frac{1}{2} (-v_1 \tilde{q}_1^2 - \dots - v_i \tilde{q}_i^2 + v_{i+1} \tilde{q}_{i+1}^2 + \dots + v_n \tilde{q}_n^2).$$

Теперь функция $\Pi(\tilde{q})$ имеет единственную стационарную точку – седловую. Ей отвечает исходное состояние равновесия системы. Более подробные сведения о приведении квадратичных форм к каноническому виду можно найти в монографии [9].

СИСТЕМЫ С ОДНОСТОРОННИМИ СВЯЗЯМИ

Модель конструкции с односторонними связями можно назначить так, чтобы все они были интерпретированы как абсолютно жесткие. Именно такая модель здесь и рассматривается. Первый вопрос, возникающий при ее изучении, это вопрос о числе степеней свободы системы. Определение данного числа – операция довольно громоздкая и при отсутствии односторонних связей, ибо жесткие тела могут сопрягаться друг с другом и с землей произвольно ориентированными абсолютно жесткими, абсолютно податливыми и упруго податливыми связями. Одно только описание этих связей требует определенной аккуратности и по-

следовательности [6]. Но здесь вычислительные операции обычны: число C^* степеней свободы конструкции, у которой нет односторонних связей, может быть найдено по формуле:

$$C^* = 6D - r, \quad (2.1)$$

где D – число тел, а r – ранг матрицы кинематических уравнений конструкции, состоящей из абсолютно жестких тел при разнообразных связях между ними. Громоздкость вычислений по формуле (2.1) связана с формированием матрицы кинематических уравнений.

Степень свободы n конструкции, имеющей m односторонних связей, приходится находить как разность

$$n = C^* - \bar{C}^* \quad (2.2)$$

где C^* – число степеней свободы подконструкции K_0 , получаемой из заданной конструкции при удалении всех односторонних связей. Это число дается формулой (2.1). Через \bar{C}^* обозначено число степеней свободы, которое утрачивает подконструкция K_0 после возвращения ей ранее устраненных односторонних связей. Пусть u_j – параметры стояния подконструкции K_0 . Односторонние связи накладывают на эти параметры ограничения

$$\sum_{j=1}^{c^*} a_{ij} u_j \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.3)$$

Неоднородные ограничения на перемещения u_j пока не рассматриваются. Такие ограничения бывают тогда, когда связи поставлены с зазорами. Однако зазоры конечной величины при сколь угодно малых перемещениях системы не перекрываются, а потому они не учитываются.

Среди ограничений (2.3) могут встретиться противоречивые неравенства. Их необходимо исключить, опираясь, например, на положения, сформулированные в п. 4 главы I монографии [10]. Пусть несовместимые неравенства содержат в совокупности \bar{m} различных параметров u_j . Если эти параметры положить равными нулю, что равносильно погашению \bar{m} степеней свободы в подконструкции K_0 , то противоречия будут сняты. Следовательно, $\bar{C}^* = \bar{m}$ и $n = C^* - \bar{m}$. (2.2a) Так как перемещения по направлению указанных \bar{m} связей невозможны, допустим переход от заданной конструкции к системе, у которой противоречивых ограничений на перемещения уже не будет.

Среди условий, оставшихся в системе (2.3) после удаления несовместных неравенств, могут быть зависимые соотношения. Таковые также должны быть устранены. Это делается при помощи алгоритма, предложенного в п. 3 главы III уже упоминавшейся работы [10]. В результате

реальных ограничений в системе (2.3) не будет больше числа (2.2a).

На рис. 1а изображена схема конструкции с шестью односторонними связями, воспринимающими только сжатие. Ее подконструкция K_0 имеет 4 степени свободы (рис. 1б). Такой же результат может быть получен и по формулам (2.1)–(2.2). Горизонтальными перемещениями дисков (абсолютно жестких стержней) можно пренебречь, поэтому названные формулы сводятся к соотношениям:

$$C^* = 2D - r = 8 - r, \quad n = 8 - r - \bar{C}^*. \quad (2.4)$$

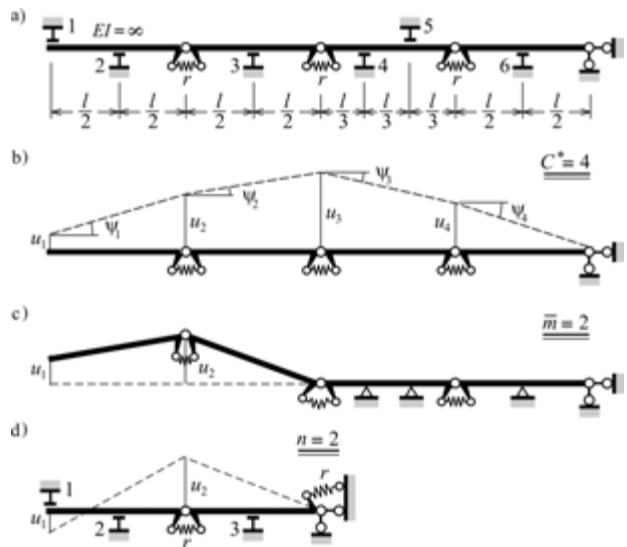


Рис. 1. Определение числа степеней свободы

Кинематические уравнения подконструкции K_0 связывают между собой линейные u_j и поворотные ψ_i перемещения дисков:

$$u_1 - u_2 + \psi_1 l = 0, \quad u_3 - u_4 + \psi_3 l = 0,$$

$$u_2 - u_3 + \psi_2 l = 0, \quad u_4 + \psi_4 l = 0.$$

Ранг этой системы равен четырём: $r = 4$, поэтому

$$C^* = 4, \quad n = 4 - \bar{C}^*. \quad (2.4a)$$

Остается учесть влияние односторонних связей. По рис. 1 видно, что односторонние связи 1–6 накладывают на перемещения u_i следующие ограничения:

1. $-u_1 \geq 0$;
2. $u_1 + u_2 \geq 0$;
3. $u_2 + u_3 \geq 0$;
4. $2u_3 + u_4 \geq 0$;
5. $-u_3 - 2u_4 \geq 0$;
6. $u_4 \geq 0$.

Так как $u_4 \geq 0$, ограничение 5 может выполняться лишь при условиях, что $u_3 < 0$ и $|u_3| > 2u_4$. Но тогда (см. условие 4) $4u_3 + 2u_4 = 3u_3 + (u_3 + 2u_4) \leq 0$, ибо слагаемые $3u_3$ и $(u_3 + 2u_4)$ отрицательны. Следовательно, неравенства 4–6 противоречивы. Входящие в них перемещения приравниваются к нулю. Тогда $\bar{m} = \bar{C}^* = 2$, и, согласно формуле (2.4a), $n = 2$. Полученной конструкции (рис. 1с) надо вернуть связи 1–3, одновременно с этим превратив остальные односторонние связи в двухсторонние. Результатом таких действий является система, изображенная на рис. 1d.

После решения вопроса о степенях свободы конструкции можно составить выражение (1.1) для ее полной потенциальной энергии. Ясно, что это будет энергия подконструкции K_0 . Множество ортонормированных собственных векторов данной подконструкции является базисом пространства решений задачи об устойчивости рассматриваемой конструкции с односторонними связями. Такие решения должны удовлетворять ограничениям

$$\alpha q + \beta \geq 0, \quad (2.5)$$

накладываемым на вектор q односторонними связями. В скалярной записи эти ограничения таковы (величины α_{ij} и β_i известны):

$$\sum_{j=1}^n \alpha_{ij} q_j + \beta_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, \bar{n} \leq n. \quad (2.5a)$$

Если $\beta_i \neq 0$, то связь с номером i поставлена с зазором.

Неравенство $\bar{n} \leq n$ имеет место лишь тогда, когда система (2.5) не содержит противоречивых и линейно зависимых неравенств (см. выше комментарии к формулам (2.2a) и (2.3)). Это следует из результатов работы [11], в которой было показано, что лишить подвижности конструкцию с n степенями свободы можно не только при помощи правильно поставленных n двухсторонних связей, но и с помощью правильно поставленных односторонних связей числом $n+1$. В последнем случае правильность расстановки связей как раз и заключается в отсутствии у системы (2.5) зависимых и несовместных неравенств. Стало быть, если связи поставлены правильно и $\bar{n} = n+1$, то конструкция неподвижна и вопрос о ее устойчивости отпадает сам собой.

При $\lambda < \varphi_1$ квадратичная форма имеет центр и ее преобразование к каноническому виду осуществляется при помощи подстановки (1.10):

$$q = L^T \tilde{q} + q_0.$$

Эта же подстановка используется при записи ограничений (2.5):

$$\tilde{\alpha} \tilde{q} + \tilde{\beta} \geq 0, \quad (2.6)$$

где $\tilde{\alpha} = \alpha L^T$, $\tilde{\beta} = \alpha q_0 + \beta$. Абсолютный минимум энергии (1.1) достигается при $\tilde{q} = 0$, то есть в центре q_0 квадратичной формы. Значит, если условие

$$\tilde{\beta} \geq 0 \quad (2.6a)$$

соблюдается, то и здесь система находится в состоянии устойчивого равновесия при $q = q_0$. При нарушении неравенства (2.6a) решению задачи отвечает точка, находящаяся на границе допустимой области (2.5). Эта точка может либо принадлежать одной из прямых

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} q_j + b_i = 0, \quad (2.5b)$$

либо находиться на пересечении двух и большего числа прямых такого типа. Обращение неравенств (2.5a) в равенства (2.5b) означает, что одна или несколько односторонних связей оказались включенными, то есть равновесное состояние реализуется уже не в подконструкции K_0 , для которой записывалась энергия (1.3), а в некоторой другой системе. Как бы то ни было, при $\lambda < \varphi_1$ решение задачи доводится до конца обычными средствами математического программирования [2], [4].

Сложнее обстоит дело, когда $\lambda = \varphi_i$, $i = 1, 2, \dots, n$. В этом случае (см. формулу (1.12a)) стационарная точка определяется собственным вектором e_i матрицы Φ_2 . Однако равновесное состояние системы, диктуемое этим вектором, возможно лишь при условии, что орт e_i принадлежит допустимой области (2.5). Сказанное означает, что в зависимости от ограничений (2.5) реализоваться могут как все собственные векторы подконструкции K_0 , так и ни один из них.

Выход вектора q на границу допустимой области означает переход от конструкции, в которой односторонние связи находились в нерабочем состоянии, к конструкции, обладающей одной или большим числом работоспособных односторонних связей. Полная потенциальная энергия новой конструкции по-прежнему описывается равенством (1.1), но только при других векторах q' , Φ'_1 и матрице Φ'_2 . У подконструкции K'_0 новой конструкции в нерабочем состоянии находятся $\bar{n}' < \bar{n}$ связей, но опять же реализоваться могут как все собственные векторы матрицы Φ'_2 , так и ни один из них.

Пусть M – множество всех подконструкций, которые получаются из заданной конструкции при удалении различных сочетаний односторонних связей и в которых могут поддерживаться равновесные состояния при различных значениях параметра λ . Пусть, далее, n^* – общее число таких состояний. Несмотря на то что степень свободы заданной конструкции равна числу n , величина n^* с этим числом, как правило, не совпадает. Возможны случаи $n^* < n$ и $n^* \geq n$, причем весьма часто имеет место именно неравенство $n^* > n$.

С другой стороны, размерность пространства состояний конструкции равна числу ее степеней свободы, то есть числу n . Значит, при $n^* > n$ из n^* векторов q , описывающих состояния равновесия системы, $n^* - n$ векторов являются линейно зависимыми. Найти их, обращаясь только к полной потенциальной энергии Π подконструкции K_0 , нельзя.

Нетрудно заметить, что при анализе квадратичных форм параметр μ фактически оставался фиксированным. Объяснить это можно тем, что старшие члены квадратичной формы не зависят от названного параметра, а потому изменение величины μ не сказывается ни на собственных числах, ни на собственных векторах матрицы Φ_2 . Однако на положение центра квадратичной формы параметр μ влияет, и от него зависит, достигается ли минимум функции $\Pi(q)$ внутри допустимой области или на ее границе, а если на границе, то на какой именно.

Критическая сила каждой рабочей системы может быть найдена в результате минимизации полной потенциальной энергии данной рабочей системы, причем получаемый минимум единственен. У каждой рабочей системы этот минимум свой, так что задача сводится к отысканию глобального минимума. В общем случае это можно сделать только перебором всех локальных минимумов, чем и объясняется громоздкость расчета на устойчивость систем с односторонними связями. Естественен вопрос о числе односторонних связей, при котором объем вычислений становится чрезмерным. Ответ на этот вопрос сегодня существенно отличается от ответа, данного, скажем, 10 лет назад, и наверняка сегодняшний ответ столь же существенно будет отличаться от ответа, который прозвучит через 10 лет. Потому заниматься следует поиском алгоритмов разумного перебора рабочих систем, созданием алгоритмов решения частных, но важных в практическом отношении задач и не рассчитывать на то, что удастся, как и при прямом статическом расчете конструкций с односторонними связями, обойтись методами, предназначенными для решения одноэкстремальных задач.

Осталось привести несколько примеров, иллюстрирующих высказанные выше положения. На рис. 2а изображена система, которая не имеет односторонних связей. Но такая система может выполнять роль подконструкции K_0 конструкции с односторонними связями, для чего она и предназначается. Степень свободы этой системы равна 2, параметрами ее состояния выбраны углы поворота ψ_1 и ψ_2 крайних дисков. Через эти параметры выражается полная потенциальная энергия конструкции:

$$\Pi = \frac{r}{2} \{ \psi_1^2 + (2\psi_1 - \psi_2)^2 + (\psi_1 - 2\psi_2)^2 + \psi_2^2 - \lambda [\psi_1^2 + (\psi_1 - \psi_2)^2 + \psi_2^2] \} \quad (2.7)$$

Необходимые условия стационарности функции $\Pi(\psi_1, \psi_2)$ таковы:

$$\begin{aligned} (6 - 2\lambda)\psi_1 - (4 - \lambda)\psi_2 &= 0, \\ (4 - \lambda)\psi_1 - (6 - 2\lambda)\psi_2 &= 0. \end{aligned} \quad (2.8)$$

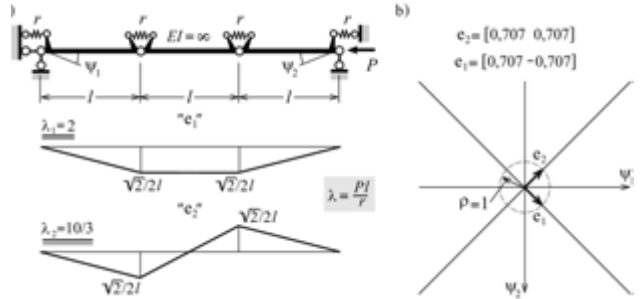


Рис. 2. Подконструкция K_0 для ряда систем с односторонними связями

Значит, могут существовать два нетривиальных равновесных состояния, характеризуемых векторами с ортами e_1 и e_2 . Это собственные векторы квадратичной формы (2.7). На плоскости $O\psi_1\psi_2$ им отвечают лучи, вдоль которых направлены названные выше орты (рис. 2б).

Рассмотренная конструкция является подконструкцией K_0 для системы, приведенной на рис. 3а. На нее наложено ограничение $\psi_1 \leq 0$, что сводит пространство перемещений к полуплоскости, которая на рис. 3б затемнена. Векторы e_1 и e_2 нетривиальных равновесных состояний сохраняются, лишившись, правда, своих «двойников» с противоположными знаками, и появляется еще один допустимый вектор с ортом $e'_3 = [0 \ 1]$. Координаты $\psi_1 = 1$ и $\psi_2 = 1$ этого вектора при $\lambda_3 = 3$ системе (2.8) не удовлетворяют, хотя и обращают потенциальную энергию (2.7) в нуль, как и координаты ортов e_1 и e_2 при $\lambda_1 = 2$ и $\lambda_2 = 3,333$ соответственно. Видно, что вектор e'_3 является линейной комбинацией векторов e_1 и e_2 :

$$e'_3 = -\frac{\sqrt{2}}{2}(e_1 - e_2).$$

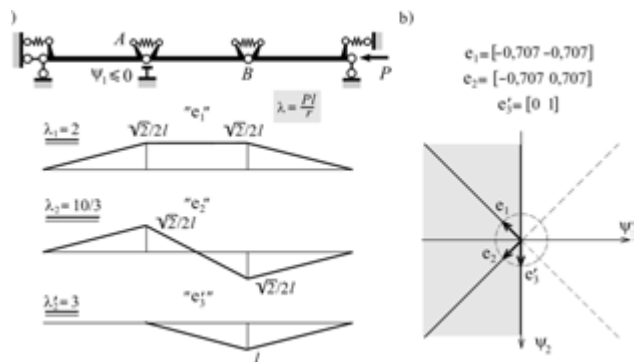


Рис. 3. Конструкция с одной односторонней связью

Добавление к шарниру B приведенной на рис. 3а конструкции односторонней связи, препятствующей перемещению этого шарнира вверх, приводит к ограничениям $\psi_1 \leq 0$ и $\psi_2 \geq 0$ на перемещения конструкции. Равновесное состояние, отвечающее вектору e_1 , станет невозможным. Останутся состояния, характеризуемые векторами e_2 и e_3 , к которым добавится состояние с вектором

$$e'_4 = \frac{\sqrt{2}}{2}(e_1 + e_2).$$

В этом случае именно параметры $\lambda'_3 = \lambda'_4 = 3$ являются критическими. Ни они, ни отвечающие им векторы e'_3 и e'_4 к собственным числам и собственным векторам квадратичной формы (2.7) не относятся, но векторы e'_3 и e'_4 являются линейными комбинациями векторов e_1 и e_2 .

У конструкции, изображенной на рис. 4а, две односторонние связи, из которых одна включает упруго податливый элемент жесткостью r/l^2 . Такая конструкция имеет четыре нетривиальные равновесные формы. Три из них не отвечают собственным векторам e_1 и e_2 базовой подконструкции K_0 (см. рис. 3). Все они суть линейные комбинации последних:

$$e'_2 = 0,1529e_1 + 0,9882e_2,$$

$$e'_3 = \frac{\sqrt{2}}{2}(e_1 - e_2),$$

$$e'_4 = -\frac{\sqrt{2}}{2}(e_1 - e_2).$$

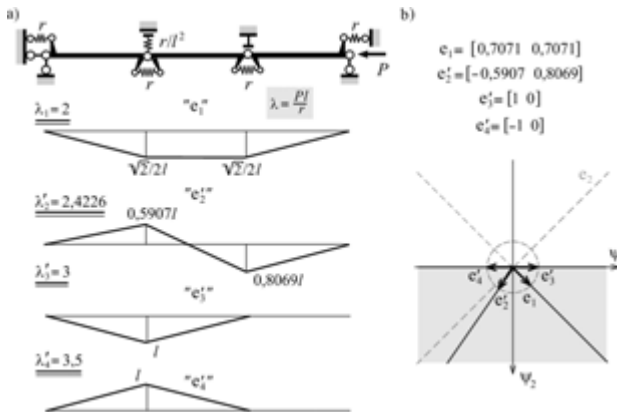


Рис. 4. Конструкция с упруго податливой и абсолютно жесткой односторонними связями

Здесь любопытно то, что двум различным собственным значениям $\lambda'_3 = 3$ и $\lambda'_4 = 3,5$ отвечают по существу одинаковые собственные векторы e'_3 и e'_4 . Это зеркально случаю кратности характеристических чисел, когда одинаковым (кратным) собственным значениям отвечают разные собственные векторы.

И в заключение приведем пример конструкции, нетривиальные равновесные состояния которой характеризуют векторы e'_3 и e'_4 , не совпада-

ющие ни с одним из собственных векторов e_1 и e_2 подконструкции K_0 (рис. 5а). Это объясняется тем, что ограничения $\psi_1 \geq 0$ и $-(\psi_1 + \psi_2) \geq 0$ сузили допустимую область до конуса, в который ни вектор e_1 , ни вектор e_2 не попадают (рис. 5б).

Линейная зависимость ортов e'_i от единичных векторов e_i напоминает ситуацию, наблюдаемую при кратных характеристических числах симметрических матриц. Если кратность таких чисел равна p , то отвечающие им p собственных векторов линейно зависимы, что не является поводом к исключению из дальнейших рассмотрений как линейно зависимых векторов, так и сопряженных с ними собственных значений. Размерность пространства состояний в любом случае совпадает с числом различных собственных векторов, а не с числом различных собственных значений.

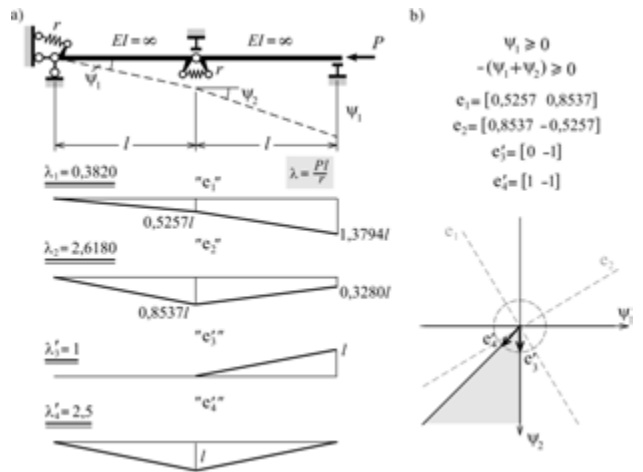


Рис. 5. Конструкция с двумя односторонними связями

Сказанное в предыдущем абзаце относится к конструкциям без односторонних связей. Однако нечто подобное можно сказать и о конструкции, у которой односторонние связи имеются. Только теперь под спектром эйлеровых сил следует понимать набор $n^* \geq n$ сил, при которых возможны нетривиальные равновесные состояния системы, а собственные векторы – это все n^* векторов, которые отвечают силам спектра. Недоразумений, связанных с использованием привычных терминов и понятий в непривычных ситуациях, можно избежать, если помнить о различиях между системами с двухсторонними и односторонними связями. Последние обладают рядом свойств, отсутствующих у систем с односторонними связями, а именно:

1. Число нетривиальных равновесных состояний системы без односторонних связей совпадает с числом ее степеней свободы. Эта размерность может быть указана еще до решения задачи устойчивости.

2. Для определения критической силы все остальные эйлеровы силы системы знать необязательно.

В задачах устойчивости конструкций с односторонними связями дело обстоит иначе:

1. Число нетривиальных равновесных состояний системы с односторонними связями не совпадает с числом степеней ее свободы. Установить степень свободы такой системы можно лишь после анализа ограничений на ее параметры состояния, а число равновесных форм – только после того, как все такие формы будут обнаружены.

2. Критическую силу можно указать лишь после того, как будут найдены критические силы всех рабочих систем.

Скажем несколько слов о приведении квадратичной формы к каноническому виду. При решении конкретных задач устойчивости необходимость в таком приведении отсутствует. Но если оно желательно, то выполнить вычисли-

тельные операции с использованием матрицы (1.8) не удастся, так как столбцами этой матрицы являются компоненты собственных векторов квадратичной формы, а они до решения полной задачи устойчивости неизвестны. Однако имеются способы приведения квадратичной формы к каноническому виду, которые не требуют знания собственных векторов и собственных чисел матрицы старших членов этой формы. В монографии [1] такие способы описаны детально.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает свою признательность А. В. Перельмутеру, с которым предмет настоящей статьи неоднократно обсуждался и который существенно повлиял на отбор публикуемого материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гельфанд И. М. Лекции по линейной алгебре. М.: Наука, 1966. 280 с.
2. Гольдштейн Ю. Б. К расчету конструкций с односторонними связями методами математического программирования // Вестник гражданских инженеров. 2006. № 3(8). С. 30–37.
3. Гольдштейн Ю. Б., Назарьев П. П. Конструкции с абсолютно жесткими элементами // ПетрГУ. Петрозаводск, 1999. 67 с. Деп. в ВИНТИ 17.06.99, № 1949 – В99.
4. Гордеев В. Н., Перельмутер А. В. Расчет упругих систем с односторонними связями как задача квадратичного программирования // Исследования по теории сооружений. Вып. 15. М.: Стройиздат, 1967. С. 208–212.
5. Ефимов Н. В. Квадратичные формы и матрицы. М.: Физматгиз, 1963. 160 с.
6. Ефимов Н. В., Розендорн Э. Р. Линейная алгебра и многомерная геометрия. М.: Наука, 1970. 528 с.
7. Мусхелишвили Н. И. Курс аналитической геометрии. М.; Л.: ОГИЗ, 1947. 644 с.
8. Ржаницын А. Р. Устойчивость равновесия упругих систем. М.: Гостехиздат, 1955. 248 с.
9. Стренг Г. Линейная алгебра и ее применения. М.: Мир, 1980. 456 с.
10. Черников С. Н. Линейные неравенства. М.: Наука, 1968. 488 с.
11. Шулъкин Ю. Б. Влияние односторонних связей на величину критической нагрузки // Исследования по механике строительных конструкций и материалов: Межвуз. тематич. сб. тр. Л.: ЛИСИ, 1985. С. 56–63.

УДК 658.512:514.1

БОРИС ГЕОРГИЕВИЧ МАРКОВ

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой начертательной геометрии и инженерной графики строительного факультета ПетрГУ
bmarkov@psu.karelia.ru

ОЛЕГ БОРИСОВИЧ МАРКОВ

кандидат технических наук, доцент кафедры начертательной геометрии и инженерной графики строительного факультета ПетрГУ
markov@psu.karelia.ru

НАТАЛЬЯ АНАТОЛЬЕВНА ДОСПЕХОВА

старший преподаватель кафедры начертательной геометрии и инженерной графики строительного факультета ПетрГУ
dospheh@psu.karelia.ru

**ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БАЛАНСОВ
В КOROОБДИРОЧНОМ БАРАБАНЕ**

В статье предложена методика геометрического моделирования контактного взаимодействия балансов в корообдирочном барабане в процессе их очистки от коры. Задача решается в трехмерной постановке. Каждый баланс рассматривается как прямой круговой цилиндр. В результате моделирования определяется трехмерная область контакта. Результаты моделирования по предложенной методике могут быть использованы при построении алгоритма определения сил контактного взаимодействия методом дискретных элементов.

Ключевые слова: математическое моделирование, контактное взаимодействие, трехмерная модель, корообдирочный барабан

Подготовка древесины к использованию в целлюлозно-бумажном производстве требует ее очистки от коры. Эта технологическая операция выполняется в настоящее время с применением корообдирочных барабанов. В целях совершенствования технологии очистки выполняются теоретические и экспериментальные исследования [1], [8], [9], [10], [11], [17]. Экспериментальные исследования функционирования корообдирочных барабанов в реальных производственных условиях возможны в весьма ограниченном диапазоне технологических характеристик. Поэтому все более важную роль по мере развития информационных технологий играют методы математического моделирования [15]. В данной области исследований конкретные примеры использования численных методов при моделировании технологического процесса очистки древесины в корообдирочном барабане приведены в статьях [4], [5], [6], [13], [14], [16].

Удаление коры происходит в процессе соударений балансов друг с другом и с корпусом ба-

рабана при условии, что появляются силы, достаточные для преодоления ее сцепления с древесиной. В современных условиях для определения этих сил все большее распространение получает метод дискретных элементов [16], [17]. По причине относительной новизны этого метода не все аспекты его практического применения при моделировании технологического процесса очистки древесины в корообдирочном барабане исследованы достаточно подробно. Так, к числу наименее изученных относятся геометрические аспекты контактного взаимодействия древесины в корообдирочном барабане.

В данной статье рассматриваются вопросы определения величины и формы пятна контакта для различных положений соударяющихся балансов, поскольку именно они в первую очередь влияют на производительность и качество окорки древесины.

Корпус корообдирочного барабана (рис. 1) представляет собой цилиндр (1), внутренний диаметр которого равен $D_{КБ}$, а длина – $L_{КБ}$.

По внутренней поверхности цилиндра вдоль его оси расположены ножи (2) с шагом σ_n и окнами для удаления коры (3).

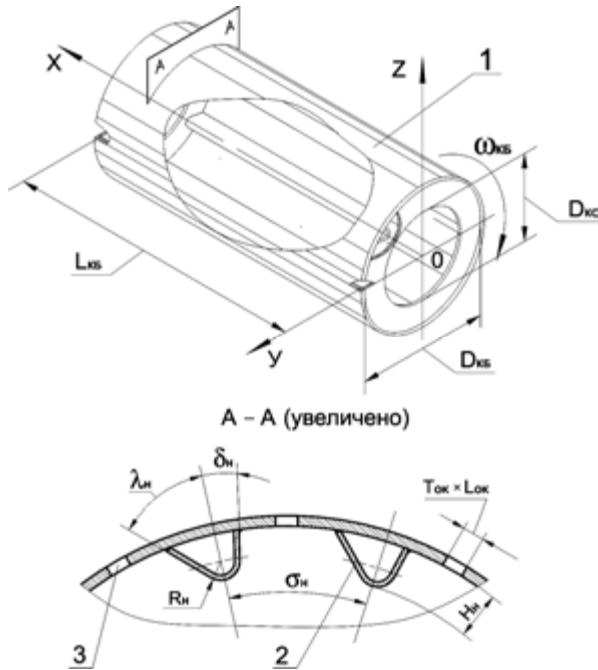


Рис. 1. Корпус коробдирочного барабана

Поверхность баланса в реальности представляет собой цилиндроид. Однако учитывая малую величину некруглости сечений баланса и небольшое расхождение между максимальным и минимальным диаметрами при математическом моделировании, каждый баланс можно рассматривать как прямой круговой цилиндр диаметром D_B и длиной L_B . При этом предполагаем, что масса древесины равномерно распределена по объему и баланс покрыт корой равномерной толщины t_k (рис. 2).

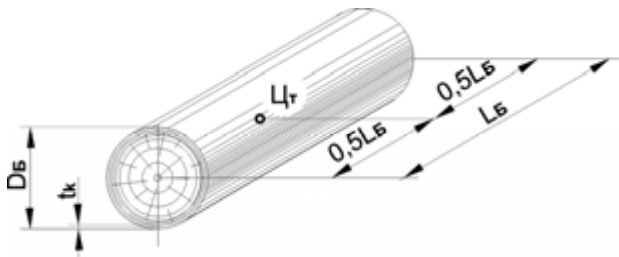


Рис. 2. Модель баланса

В объеме, ограниченном корпусом барабана, вращающегося со скоростью ω_{KB} , каждый баланс перемещается как тело, имеющее шесть степеней свободы. В каждый момент времени балансы занимают определенное положение относительно друг друга, а также относительно ножей и стенок барабана. Для определения положения балансов в данный момент времени введем систему координат, связанную с осью барабана (рис. 3).

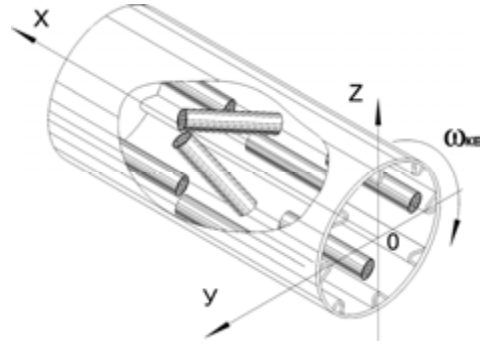


Рис. 3. Привязка системы координат к коробдирочному барабану

Положение i -го баланса в системе координат XYZ задаем центром тяжести $C_{Ti}(x_{Ci}, y_{Ci}, z_{Ci})$ и направлением, которое определяется единичным вектором \vec{e}_{Bi} или его координатами – косинусами углов, образованных заданным направлением с положительными направлениями осей координат (направляющие косинусы) (рис. 4).

$$l_B = \cos \alpha_B, m_B = \cos \beta_B, n_B = \cos \gamma_B, \quad (1)$$

где l_B – косинус угла наклона прямой к оси абсцисс (Ox), m_B – косинус угла наклона прямой к оси ординат (Oy), n_B – косинус угла наклона прямой к оси аппликат (Oz), α_B – угол наклона прямой к оси абсцисс (Ox), β_B – угол наклона прямой к оси ординат (Oy), γ_B – угол наклона прямой к оси аппликат (Oz).

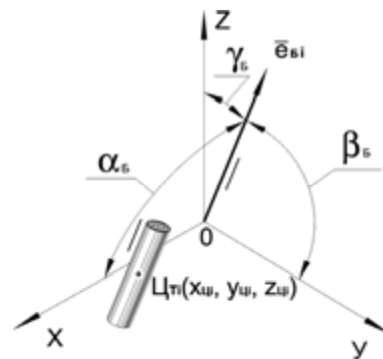


Рис. 4. Схема привязки баланса к принятой системе координат

Для определения пары соприкасающихся бревен надо перебрать все множество лесоматериалов, находящихся в барабане, на предмет определения кратчайшего расстояния между ними. Балансы будут соударяться, если это расстояние окажется меньше нуля. На первом этапе отбросим перспективные на предмет соударения объекты. Соударения не будет, если расстояние между центрами тяжести бревен удовлетворяет условию:

$$x_{Ci} - x_{Cj} > \frac{L_{Bi} + L_{Bj} + D_{Bi} + D_{Bj}}{2}, \quad (2)$$

где $x_{Цi}, x_{Цj}$ – абсциссы центра тяжести i-го и j-го бревен; L_{Bi}, L_{Bj} – длины i-го и j-го бревен; D_{Bi}, D_{Bj} – диаметры i-го и j-го бревен.

На втором этапе определим кратчайшее расстояние между осями балансов (δ) из выражения:

$$\delta = \frac{\begin{vmatrix} x_{Цi} - x_{Цj} & y_{Цi} - y_{Цj} & z_{Цi} - z_{Цj} \\ \ell_{Bi} & m_{Bi} & n_{Bi} \\ \ell_{Bj} & m_{Bj} & n_{Bj} \end{vmatrix}}{\sqrt{\begin{vmatrix} \ell_{Bi} & m_{Bi} \\ \ell_{Bj} & m_{Bj} \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} m_{Bi} & n_{Bi} \\ m_{Bj} & n_{Bj} \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} n_{Bi} & \ell_{Bi} \\ n_{Bj} & \ell_{Bj} \end{vmatrix}^2}}, \quad (3)$$

где $x_{Цi}, x_{Цj}, y_{Цi}, y_{Цj}, z_{Цi}, z_{Цj}$ – координаты центров тяжести i-го и j-го бревен; $\ell_{Bi}, \ell_{Bj}, m_{Bi}, m_{Bj}, n_{Bi}, n_{Bj}$ – направляющие косинусы осей i-го и j-го бревен.

На третьем этапе отбросим все пары бревен, у которых величины δ удовлетворяют условию:

$$\delta > \frac{D_{Bi} + D_{Bj}}{2}. \quad (4)$$

И наконец, на четвертом этапе определим точки на осях балансов, соответствующие кратчайшему расстоянию. Эти точки будем называть точками скрещивания осей балансов. На рис. 5 показана геометрическая модель (чертеж) положения i-го и j-го бревен в пространстве. Отрезки АВ и MN моделируют оси лесоматериалов. На рис. 6 приведена схема решения задачи по определению кратчайшего расстояния между отрезками методами геометрического моделирования [2], [3]. Отрезок прямой PG перпендикулярен осям АВ и MN и поэтому является наименьшим расстоянием между ними.

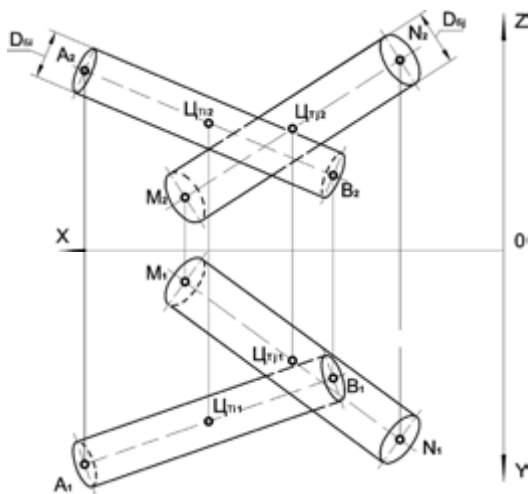


Рис. 5. Исходная геометрическая модель положения i-го и j-го бревен в пространстве

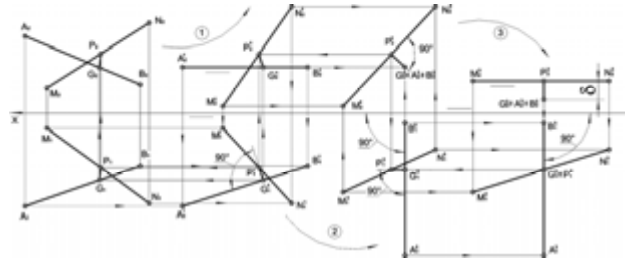


Рис. 6. Схема решения задачи методами геометрического моделирования

Для решения задачи плоскопараллельным переносом преобразуем модель так, чтобы баланс АВ занял положение, перпендикулярное фронтальной плоскости проекций, а MN – параллельное горизонтальной плоскости проекций (в принятой системе координат ось бревна АВ вырождается в точку $A_2^3 \equiv B_2^3$). За счет этого сложная задача построения перпендикуляра между двумя прямыми преобразуется в задачу простого измерения расстояния δ . Недостаток этой методики заключается в том, что преобразование производится в три этапа. С целью оптимизации процесса преобразования воспользуемся методами аналитической геометрии [7], [12].

Сначала произведем параллельный перенос начала координат в центр тяжести i-го баланса (рис. 7).

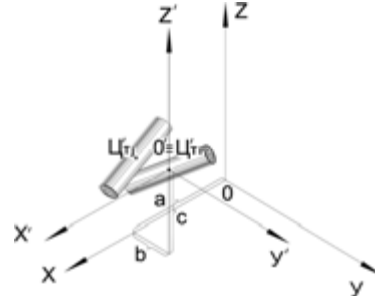


Рис. 7. Схема параллельного переноса начала координат в центр тяжести i-го баланса

$$x'_{Цi} = 0, \quad y'_{Цi} = 0, \quad z'_{Цi} = 0. \quad (5)$$

Новые координаты центра тяжести j-го баланса найдем из выражений:

$$\begin{aligned} x'_{Цj} &= x_{Цj} - a, \\ y'_{Цj} &= y_{Цj} - b, \\ z'_{Цj} &= z_{Цj} - c, \end{aligned} \quad (6)$$

где $x_{Цj}, y_{Цj}, z_{Цj}$ – старые координаты центра тяжести j-го баланса; $x'_{Цj}, y'_{Цj}, z'_{Цj}$ – новые координаты центра тяжести j-го баланса; $a = x_{Цi}$ – величина переноса начала координат по оси Ox; $b = y_{Цi}$ – величина переноса начала координат по оси Oy; $c = z_{Цi}$ – величина переноса начала коор-

динат по оси Oz ; $x_{Цi}$, $y_{Цi}$, $z_{Цi}$ – старые координаты центра тяжести i -го баланса.

Направляющие косинусы i -го и j -го балансов после параллельного переноса останутся неизменными.

$$\begin{aligned} \ell'_{Bi} &= \ell_{Bi}, \ell'_{Bj} = \ell_{Bj}, m'_{Bi} = m_{Bi}, \\ m'_{Bj} &= m_{Bj}, n'_{Bi} = n_{Bi}, n'_{Bj} = n_{Bj}. \end{aligned} \quad (7)$$

Затем произведем поворот осей координат так, чтобы ось ординат (Oy) совместилась с осью i -го бревна, а ось аппликат (Oz) стала перпендикулярна плоскости σ , параллельной осям i -го и j -го балансов (рис. 8).

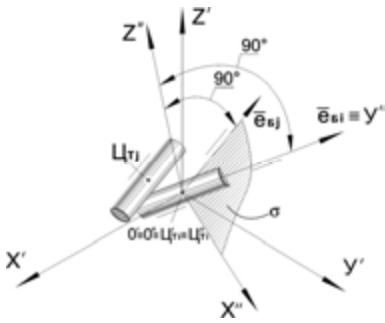


Рис. 8. Схема поворота осей координат

Новые координаты центра тяжести j -го баланса получим из выражений:

$$\begin{aligned} x''_{Цj} &= \ell_1 x'_{Цj} + m_1 y'_{Цj} + n_1 z'_{Цj}, \\ y''_{Цj} &= \ell_2 x'_{Цj} + m_2 y'_{Цj} + n_2 z'_{Цj}, \\ z''_{Цj} &= \ell_3 x'_{Цj} + m_3 y'_{Цj} + n_3 z'_{Цj}, \end{aligned} \quad (8)$$

где ℓ_1 – косинус новой оси x'' относительно старой оси x' , ℓ_2 – косинус новой оси y'' относительно старой оси x' , ℓ_3 – косинус новой оси z'' относительно старой оси x' , m_1 – косинус новой оси x'' относительно старой оси y' , m_2 – косинус новой оси y'' относительно старой оси y' , m_3 – косинус новой оси z'' относительно старой оси y' , n_1 – косинус новой оси x'' относительно старой оси z' , n_2 – косинус новой оси y'' относительно старой оси z' , n_3 – косинус новой оси z'' относительно старой оси z' .

Определим величины направляющих косинусов новых осей координат относительно старых. Ось Oy'' совпадает с осью i -го баланса, соответственно, направляющие косинусы этой оси с учетом (7) будут равны:

$$\ell_2 = \ell'_{Bi}, m_2 = m'_{Bi}, n_2 = n'_{Bi}. \quad (9)$$

Ось Oz'' перпендикулярна плоскости σ , параллельной осям i -го и j -го бревен. Выражение, задающее подобную плоскость σ , проходящую через начало координат, имеет вид:

$$\begin{vmatrix} x' & y' & z' \\ \ell'_{Bi} & m'_{Bi} & n'_{Bi} \\ \ell'_{Bj} & m'_{Bj} & n'_{Bj} \end{vmatrix} = 0. \quad (10)$$

Приведем выражение (10) к общему виду уравнения плоскости:

$$Ax + By + Cz = 0, \quad (11)$$

где

$$A = (m'_{Bi}n'_{Bj} - m'_{Bj}n'_{Bi}),$$

$$B = (n'_{Bi}\ell'_{Bj} - n'_{Bj}\ell'_{Bi}),$$

$$C = (\ell'_{Bi}m'_{Bj} - \ell'_{Bj}m'_{Bi}).$$

Уравнение прямой, проходящей через начало координат перпендикулярно плоскости σ , имеет вид:

$$\frac{x'}{A} = \frac{y'}{B} = \frac{z'}{C}. \quad (12)$$

С другой стороны, уравнение этой же прямой в канонической форме имеет вид:

$$\frac{x'}{\ell_3} = \frac{y'}{m_3} = \frac{z'}{n_3}. \quad (13)$$

Соответственно, направляющие косинусы оси Oz'' , совпадающей с этой прямой, с учетом (11) будут равны:

$$\begin{aligned} \ell_3 &= (m'_{Bi}n'_{Bj} - m'_{Bj}n'_{Bi}), \\ m_3 &= (n'_{Bi}\ell'_{Bj} - n'_{Bj}\ell'_{Bi}), \\ n_3 &= (\ell'_{Bi}m'_{Bj} - \ell'_{Bj}m'_{Bi}). \end{aligned} \quad (14)$$

Для нахождения направляющих косинусов оси Ox'' используем определитель преобразования поворота Δ .

$$\Delta = \begin{vmatrix} \ell_1 & \ell_2 & \ell_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{vmatrix}. \quad (15)$$

Так как сумма квадратов элементов одной строки определителя Δ равна 1,

$$\begin{aligned} \ell_1^2 + \ell_2^2 + \ell_3^2 &= 1, \\ m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 &= 1, \\ n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 &= 1. \end{aligned} \quad (16)$$

Преобразовав выражения (16), найдем направляющие косинусы оси Ox'' .

$$\begin{aligned} l_1 &= \sqrt{1 - l_2^2 - l_3^2}, \\ m_1 &= \sqrt{1 - m_2^2 - m_3^2}, \\ n_1 &= \sqrt{1 - n_2^2 - n_3^2}. \end{aligned} \quad (17)$$

Новые направляющие косинусы j -го баланса получим из выражений:

$$\begin{aligned} l''_{Bj} &= l_1 l'_{Bj} + m_1 m'_{Bj} + n_1 n'_{Bj}, \\ m''_j &= l_2 l'_j + m_2 m'_j + n_2 n'_j, \\ n''_{Bj} &= l_3 l'_{Bj} + m_3 m'_{Bj} + n_3 n'_{Bj}. \end{aligned} \quad (18)$$

Геометрическая модель (рис. 5) после вышеперечисленных преобразований примет вид, приведенный на рис. 9. Точками скрещивания осей балансов являются точки P и G . Расстояния от центра тяжести баланса до точки скрещивания осей балансов (L_{Ci} и L_{Cj}) определим из выражений:

$$\begin{aligned} L_{Ci} &= |x''_G - x''_{Ci}|, \\ L_{Cj} &= \sqrt{(x''_P - x''_{Cj})^2 + (y''_P - y''_{Cj})^2}, \end{aligned} \quad (19)$$

где L_{Ci} – расстояние от центра тяжести i -го баланса до точки скрещивания осей балансов; L_{Cj} – расстояние от центра тяжести j -го баланса до точки скрещивания осей балансов; $x''_G, x''_{Ci}, x''_P, x''_{Cj}$ – координата x соответствующих точек: $G'', C''_{Ti}, P'', C''_{Tj}$; $y''_G, y''_{Ci}, y''_P, y''_{Cj}$ – координата y соответствующих точек: $G'', C''_{Ti}, P'', C''_{Tj}$.

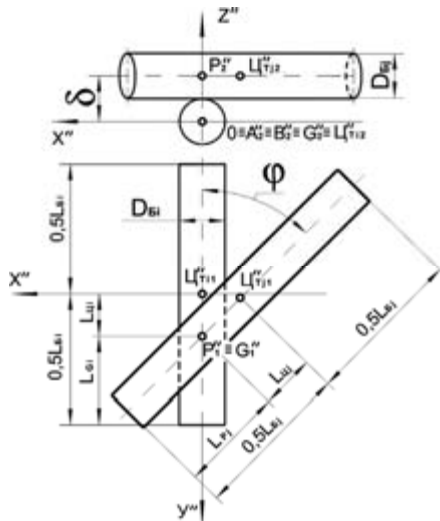


Рис. 9. Преобразованная геометрическая модель

Угол $\phi < 90^\circ$ будем называть межосевым углом i -го и j -го балансов, он равен:

$$\phi = \arccos l''_{Bj}, \quad (21)$$

где l''_{Bj} – косинус угла наклона прямой к оси абсцисс (Ox) j -го баланса на преобразованной модели (рис. 9).

Угол соударения (ϕ) равен углу (рис. 10), вершиной которого является точка скрещивания осей балансов (G''_1, P''_1), а сторонами – направления на центры тяжести i -го и j -го балансов ($P''_1 C''_{Ti}$ и $G''_1 C''_{Tj}$). В зависимости от взаимного положения точек контакта и центров тяжести балансов угол ϕ может быть острым ($\phi \leq 90^\circ$) (рис. 10а) или тупым ($\phi \geq 90^\circ$) (рис. 10б). Если один отрезок (рис. 10в) или оба (рис. 10г) вырождены ($P''_1 \equiv C''_{Ti}, G''_1 \equiv C''_{Tj}$), то указанный угол будет острым.

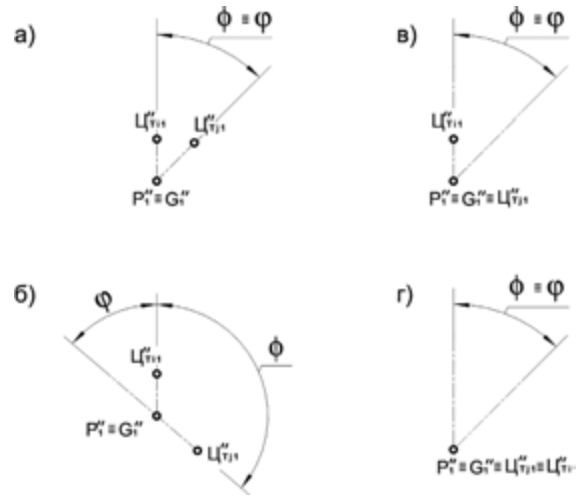


Рис. 10. Схема определения угла соударения

Если $((L_{Ci} - L_{Cj}) \times (L_{Cj} - L_{Cij})) < 0$, то:

$$\phi = (180^\circ - \phi), \text{ иначе } \phi = \phi, \quad (22)$$

где L_{Cij} – расстояние между точками C''_{Ti} и C''_{Tj} .

$$L_{Cij} = \sqrt{(x''_{Ci} - x''_{Cj})^2 + (y''_{Ci} - y''_{Cj})^2}. \quad (23)$$

Расстояния от точки скрещивания осей балансов до ближних торцов i -го и j -го бревен определим по формулам:

$$L_{Gi} = L_{Ci} - 0,5L_{Bi}, \quad L_{Pj} = L_{Cj} - 0,5L_{Bj}, \quad (24)$$

где L_{Gi} – расстояния от точки скрещивания осей балансов до ближнего торца i -го баланса, L_{Pj} – расстояния от точки скрещивания осей балансов до ближнего торца j -го баланса, L_{Bi} – длина i -го баланса, L_{Bj} – длина j -го баланса.

Эти величины (L_{Gi} и L_{Pj}) положительны, если точки скрещивания осей балансов находятся между торцами балансов, и отрицательны, если снаружи.

$$\begin{aligned} L_{Gi} > 0, \text{ если } 0,5L_{Bi} < L_{Цi}, \\ L_{Pj} > 0, \text{ если } 0,5L_{Bj} < L_{Цj}. \end{aligned} \quad (25)$$

На рис. 11а, 11в, 11г изображены крайние положения пар соударяющихся балансов. Балансы не соприкоснутся, если

$$L_{Gi} > L_{Ki} \text{ или } L_{Pj} > L_{Kj}, \quad (26)$$

где L_{Ki} , L_{Kj} – максимальные расстояния от торцов i -го и j -го балансов до точки их скрещивания ($P'' \equiv G''$), при которых возможно соударение.

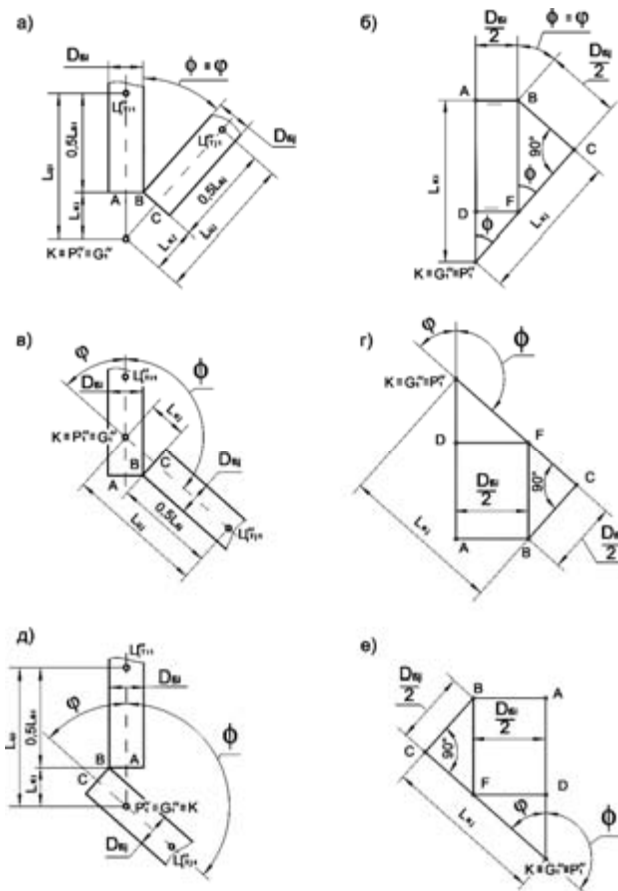


Рис. 11. Схемы крайних положений пар соударяющихся балансов

Для определения величин L_{Ki} и L_{Kj} воспользуемся схемами, приведенными на рис. 11б, 11г, 11д. Учитывая равенство отрезков AD и FB, а также то, что $L_{Ki} = KD + AD$ и $L_{Kj} = KF + CF$ (величины отрезков FC и FB найдем из треугольника FBC, отрезков KD и KF – из треугольника KDF), получим:

$$L_{Ki} = \frac{D_{Bi}}{2 \sin \phi} + \frac{D_{Bj}}{2 \tan \phi}, \quad L_{Kj} = \frac{D_{Bi}}{2 \tan \phi} + \frac{D_{Bj}}{2 \sin \phi}. \quad (27)$$

Далее отбросим пары балансов, у которых L_{Gi} или L_{Pj} отрицательны и больше вышеупомянутой величины:

$$\begin{aligned} (L_{Gi} < 0 \text{ и } L_{Gi} > |L_{Ki}|) \text{ или} \\ (L_{Pj} < 0 \text{ и } L_{Pj} > |L_{Kj}|). \end{aligned} \quad (28)$$

После того как пары балансов прошли через предварительный отбор, который заключается в отсеивании вариантов, удовлетворяющих условиям (4) и (28), рассмотрим возможные соударения балансов и условия их возникновения.

С геометрической точки зрения в процессе очистки древесины в корообдирочном барабане могут иметь место следующие случаи взаимодействия пары балансов.

1. Боковая поверхность баланса – боковая поверхность баланса.
 - 1.1. Пятно контакта в форме эллипса или его части (рис. 12).
 - 1.2. Пятно контакта в форме прямоугольника (рис. 13).
2. Боковая поверхность баланса – ребро торцевой поверхности баланса (рис. 14).
3. Торцевая поверхность баланса – ребро торцевой поверхности баланса (рис. 15).
4. Ребро торцевой поверхности баланса – ребро торцевой поверхности баланса (рис. 16).
5. Торцевая поверхность баланса – торцевая поверхность баланса (рис. 17).

Очевидно, что перечисленные виды технологических ситуаций не в полной мере описывают поведение балансов в барабане. Необходимо учесть и соударение балансов с элементами корпуса корообдирочного барабана, так как особенности формы этих элементов могут существенно затруднить моделирование. Однако и в этих случаях возможно использование предложенной методики для геометрического моделирования при соответствующей ее доработке. Поскольку рассмотрение появляющихся в этой связи вопросов выходит за рамки данной работы, мы предполагаем посвятить им отдельную статью.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 08-08-00979.

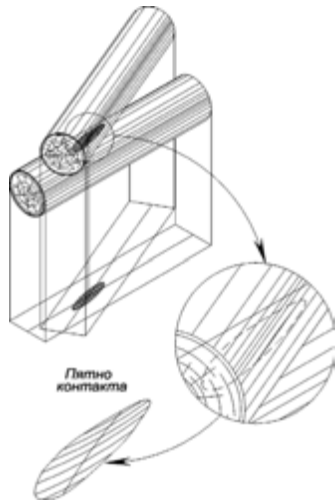


Рис. 12. Соударение пары балансов боковыми поверхностями с образованием пятна контакта эллиптической формы

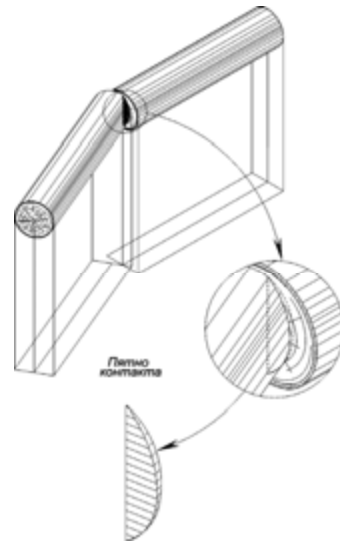


Рис. 15. Соударение пары балансов торцевой поверхностью и ребром торцевой поверхности

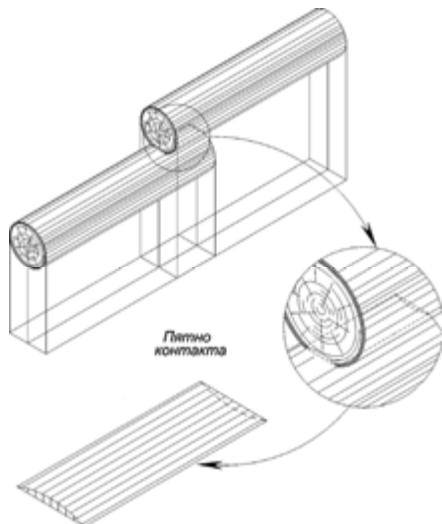


Рис. 13. Соударение пары балансов боковыми поверхностями с образованием пятна контакта прямоугольной формы

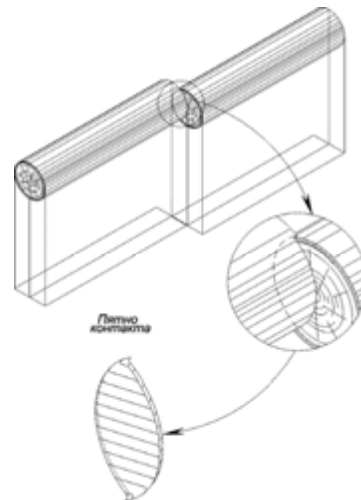


Рис. 16. Соударение пары балансов ребрами торцевых поверхностей

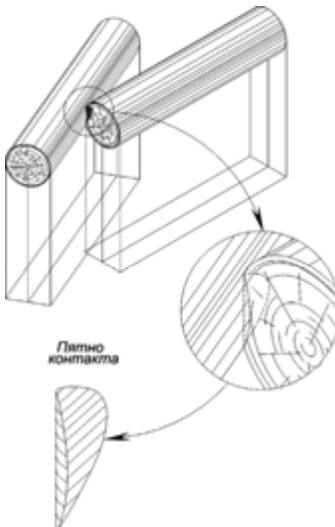


Рис. 14. Соударение пары балансов боковой поверхностью и ребром торцевой поверхности

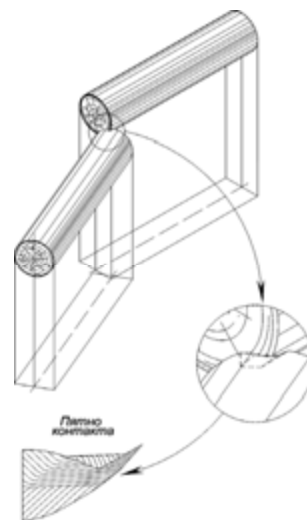


Рис. 17. Соударение пары балансов торцевыми поверхностями

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойков С. П. Теория процессов очистки древесины от коры. Л.: ЛГУ, 1980. 152 с.
2. Вальков К. И. Введение в теорию моделирования. Л.: ЛИСИ, 1974. 178 с.
3. Вальков К. И. Начертательная геометрия, инженерная графика. М.: Высшая школа, 1997. 486 с.
4. Васильев А. С., Никонова Ю. В., Раковская М. И. Математическое моделирование технологического процесса очистки древесины в корообдирочном барабане // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2008. № 1. С. 117–119.
5. Васильев С. Б., Колесников Г. Н., Никонова Ю. В., Раковская М. И. Влияние локальной жесткости корпуса корообдирочного барабана на изменение силы соударений и величину потерь древесины // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2008. № 4. С. 84–91.
6. Васильев С. Б., Колесников Г. Н., Никонова Ю. В., Раковская М. И. Исследование закономерностей изменения силы соударений с целью снижения потерь при окорке древесины в барабане // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2008. Вып. 185. С. 258–264.
7. Крутицкая Н. И., Тихонравов А. В., Шишкин А. А. Аналитическая геометрия и линейная алгебра с приложениями. М.: Изд-во МГУ, 1991. 192 с.
8. Локштанов Б. М. Исследование процесса окорки березовой древесины в барабанах: Дис. ... канд. техн. наук. Л., 1972. 188 с.
9. Матюнин В. Я., Коперин Ф. И. Некоторые вопросы теории окорки древесины в корообдирочных барабанах // Известия вузов. Лесной журнал. 1972. № 2. С. 64–69.
10. Оскерко В. Е. Новый принцип окорки лесоматериалов // Строительные и дорожные машины. 2007. № 3. С. 13–16.
11. Пигильдин Н. Ф. Окорка лесоматериалов (теория, технология, оборудование). М.: Лесн. пром-сть, 1982. 192 с.
12. Привалов И. И. Аналитическая геометрия: Учебник. СПб.: Лань, 2008. 304 с.
13. Раковская М. И., Никонова Ю. В. Численное моделирование и определение сил контактного взаимодействия длинномерных сортиментов в корообдирочном барабане // Системы управления и информационные технологии. № 1.3 (31). Воронеж: Научная книга, 2008. С. 397–401.
14. Раковская М. И., Никонова Ю. В., Васильев А. С. Об алгоритме метода дискретных элементов применительно к исследованию технологического процесса очистки древесины в окорочном барабане // Информационные технологии моделирования и управления. № 1 (44). Воронеж: Научная книга, 2008. С. 119–124.
15. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование. Идеи, методы, примеры. 2-е изд., испр. М.: Физматлит, 2005. 320 с.
16. Шегельман И. Р., Васильев А. С., Колесников Г. Н., Никонова Ю. В. Моделирование технологического процесса очистки древесины в корообдирочном барабане с применением метода дискретных элементов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2008. Вып. 184. С. 258–264.
17. Cundall P. A., Strack O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies // Geotechnique. 1979. Vol. 29(1). P. 47–65.

АНТОН ПАВЛОВИЧ СОКОЛОВ

кандидат технических наук, доцент кафедры тяговых машин лесоинженерного факультета ПетрГУ
a_sokolov@psu.karelia.ru

ЮРИЙ ЮРЬЕВИЧ ГЕРАСИМОВ

доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник НИИ леса Финляндии, г. Йоэнсуу
yuri.gerasimov@metla.fi

АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ СЕЛИВЕРСТОВ

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры тяговых машин лесоинженерного факультета ПетрГУ
saa.pk@onego.ru

**МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ПАРКА АВТОМОБИЛЕЙ НА ВЫВОЗКЕ СОРТИМЕНТОВ
НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ ГИС**

В статье описывается методика обоснования парка лесовозных автомобилей на вывозке сортиментов, базирующаяся на использовании компьютерного имитационного моделирования, математического программирования и геоинформационных систем.

Ключевые слова: лесозаготовительные предприятия, вывозка древесины, лесовозный автомобиль, сортиментная заготовка древесины, транспортный план

В условиях действующих производственно-экономических и природно-климатических реалий, которые в числе прочего характеризуются проблемами со сбытом лиственных лесоматериалов, неадекватным ростом издержек по отношению к цене, неразвитостью транспортной инфраструктуры, теплыми зимами, мягкими почвогрунтами, высокой долей лиственных насаждений, практика планирования лесозаготовительной деятельности все более настойчиво ставит вопрос о необходимости оптимизации производственных программ лесных предприятий. Следовательно, необходимо иметь научно обоснованные методы как формирования производственных мощностей по заготовке и вывозке, так и их оптимизации и синхронизации. Решение данной проблемы будет способствовать повышению эффективности производственно-хозяйственной деятельности лесозаготовительных предприятий, так как принятие оптимальной производственной программы, сбалансированной по производственным мощностям с расчетной лесосекой, является важнейшим показателем обеспечения ее реализуемости.

Одной из важных задач организации эффективного функционирования лесозаготовительного производства по сортиментной технологии, требующих научной поддержки в принятии решений, является синхронизация соотношения производственных мощностей на заготовке и на вывозке древесины в течение всего календарного года с учетом фактора сезонности. Данная задача сводится к отысканию оптимальных параметров парка лесовозных автомобилей (автомобилей-сортиментовозов) как по числу, так и по номенклатуре, что обеспечило бы выполнение производственной программы предприятия на определенный срок наиболее эффективным способом при заданных производственных мощностях на заготовке, плане освоения лесосек и характеристиках лесосырьевой базы.

Искомое число и модели применяемых автомобилей-сортиментовозов в этом случае зависят от большого числа различных факторов, основными из которых следует считать: применяемые системы лесосечных машин, количество и достигнутая производительность лесозаготовитель-

ных бригад, характеристики и пространственное распределение планируемых к освоению лесосек, последовательность освоения лесосек, распределение лесозаготовительных бригад по лесосекам, плотность и состояние дорожной сети, характеристики и пространственное распределение потребителей продукции лесозаготовок.

Ключевой особенностью решаемой задачи является тот факт, что большинство величин, в конечном итоге определяющих принимаемые решения, не являются постоянными, а изменяются во времени. Различные природно-производственные условия на разных лесосеках определяют изменения в производительности систем лесосечных машин, изменяется соотношение объемов различных видов производимой на лесосеках продукции (сортиментов). Переходы бригад с одних лесосек на другие изменяют расстояния транспортировки и, соответственно, затрачиваемое на это время. Таким образом, становится необходимой корректировка сменных заданий на вывозке, что, в свою очередь, влияет на соответствующие производственные мощности. Это приводит к тому, что, используя простые аналитические расчеты, приходится делать целый ряд допущений, и в результате определяемые параметры парка автомобилей на вывозке не всегда точно соответствуют оптимальному решению.

С нашей точки зрения, можно снизить вероятность ошибки и повысить эффективность принимаемых решений, если попытаться учесть динамику изменения входных параметров, используя для этого инструменты имитационного моделирования. В целях решения поставленной задачи была разработана методика, базирующаяся на применении географической информационной системы (ГИС) и методов имитационного моделирования и оптимизации.

Моделирование было решено выполнять в среде ГИС MapInfo. Основу модели составляют слой ГИС, описывающие лесосырьевую базу предприятия (кварталы и лесосеки) и дорожную сеть с подразделением дорог по типам (рис. 1). При этом в модель были включены лесосеки, представляющие собой производственную программу рассматриваемого предприятия на срок планирования. В соответствующую базу данных вносятся все необходимые характеристики лесосек: породный состав, запас по породам и т. п.

Дальнейшее моделирование выполняется с помощью инструментов программы Forest Transport Logistics (рис. 2). Специализированное программное обеспечение для оптимизации транспортных планов на вывозке лесоматериалов Wood Transport Logistics было разработано ранее для решения задачи оперативного управления парком автомобилей-сортиментовозов [1], [2], [3], [4], [5]. В программе должно быть задано местоположение погрузочных площадок для всех лесосек, зафиксированы объемы и номенклатура всех видов сортиментов на каждой из них. В систему вводятся параметры всех заготовительных подразделений

(комплексов лесозаготовительных машин) и годовая последовательность переходов каждого комплекса с лесосеки на лесосеку. Задаются местоположение потребителей продукции, номенклатура потребляемых сортиментов для каждого из них и ежемесячные потребности. Вводятся местоположение гаража и исходные технико-производственные характеристики парка автомобилей. Наконец, в системе фиксируются параметры всех участков дорог, включая среднюю скорость движения по каждому из них.

Система Forest Transport Logistic позволяет оптимизировать транспортные планы на вывозке сортиментов путем отыскания таких вариантов сменных заданий для каждого привлеченного автомобиля, при реализации которых перевезенный объем продукции был бы наибольшим. Система определяет оптимальные маршруты и последовательность движения каждого автомобиля между лесосеками, потребителями и гаражом для каждой рабочей смены рассматриваемого периода [2], [4].



Рис. 1. Лесосырьевая база

По завершении работы система выдает транспортный план в виде сменных заданий для каждого автомобиля [2]. Кроме того, системой определяются сравнительные показатели, благодаря которым можно оценить степень влияния различных изменений в начальных условиях на эффективность работы. Другими словами, можно сгенерировать несколько альтернативных транспортных планов, варьируя входные величины (например, число и грузоподъемность автомобилей, число и производительность лесозаготовительных комплексов, порядок разработки лесосек и др.). Далее полученные альтернативы подлежат сравнению по значениям вычисляемых показателей эффективности, и по результатам этого сравнения выбирается наилучший вариант.

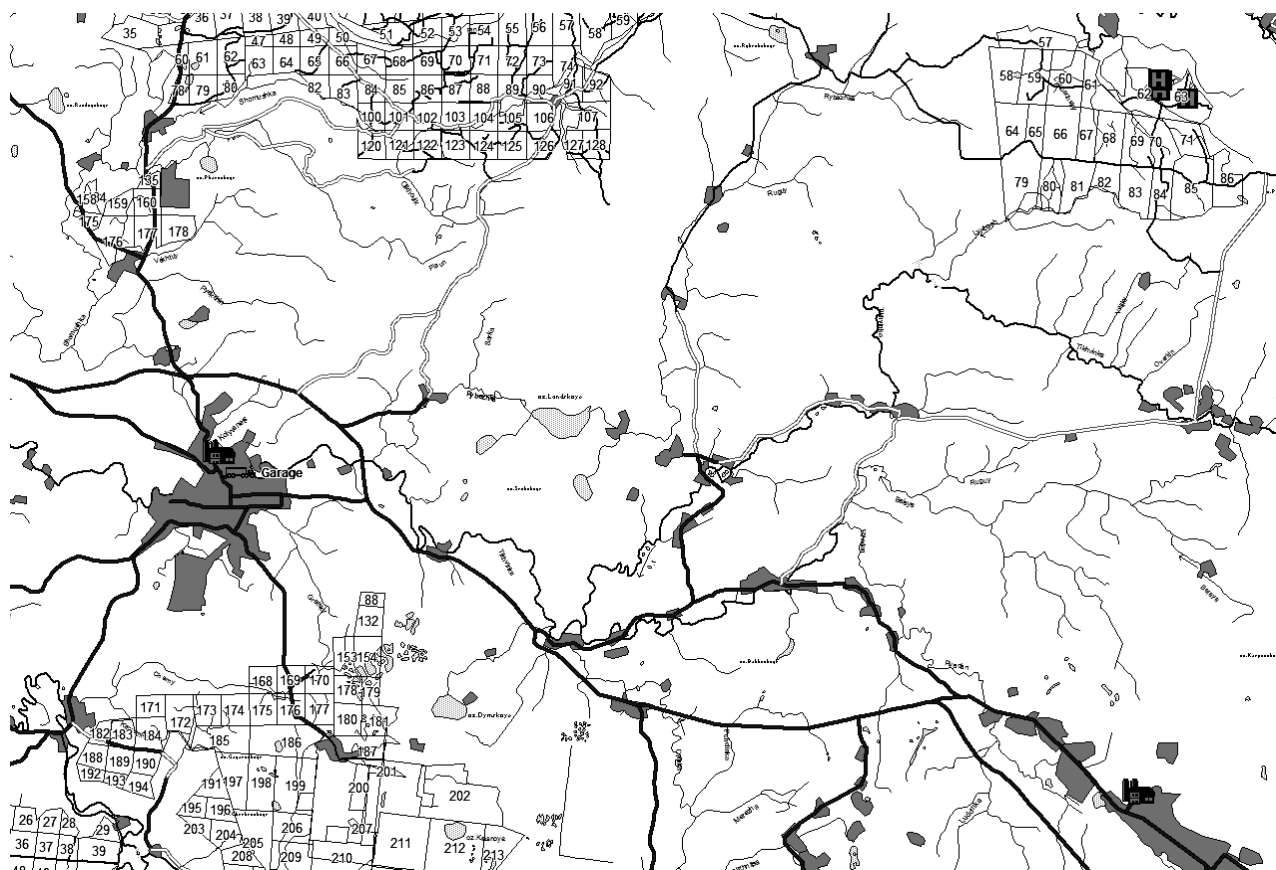





Рис. 2. Фрагмент объектной модели в среде системы Forest Transport Logistic

 — лесосека;  — потребитель;  — гараж

Для более полного обоснования предлагаемых решений было решено существенно расширить число рассчитываемых системой сравнительных показателей. В конечном итоге их число стало равняться 14. Соответственно, в программное обеспечение были внесены необходимые изменения и дополнения, реализующие расчет указанных 14 сравнительных показателей. Состав показателей следующий:

1. Общее число часов, отработанных автомобилями.
2. Общий простой автомобилей, привлеченных к работе в данный период, ч.
3. Общий простой всех автомобилей, включая незанятые в данном периоде, ч.
4. Общий пробег всех автомобилей, км.
5. Общее число выполненных рейсов.
6. Суммарный перевезенный объем лесоматериалов, м³.
7. Суммарный пробег с грузом, км.
8. Число занятых автомобилей.
9. Коэффициент использования занятых автомобилей:

$$k_u = \frac{t_p}{t_{\text{сум}} \cdot n},$$

где t_p – суммарное время работы автомобилей в периоде планирования, ч; $t_{\text{сум}}$ – суммарная про-

должительность рабочего времени в периоде планирования, ч; n – число автомобилей, занятых в периоде планирования.

10. Коэффициент использования пробега:

$$k_n = \frac{l_{\text{груз}}}{L},$$

где $l_{\text{груз}}$ – суммарный пробег с грузом, км; L – общий суммарный пробег, км.

11. Объем перевезенных лесоматериалов на единицу пробега, м³/км:

$$q_{\text{омн}} = \frac{Q}{L},$$

где Q – суммарный перевезенный объем лесоматериалов, м³.

12. Суммарный остаток на погрузочных площадках, м³.
13. Суммарный заготовленный объем, м³.
14. Степень завершения вывозки:

$$q_e = \frac{Q_{\text{заг}}}{Q},$$

где $Q_{\text{заг}}$ – суммарный заготовленный объем лесоматериалов, м³.

Для практической проверки предлагаемой методики была предпринята попытка ее применения в целях определения оптимального числа и характеристик автомобилей-сортиментовозов на одном из

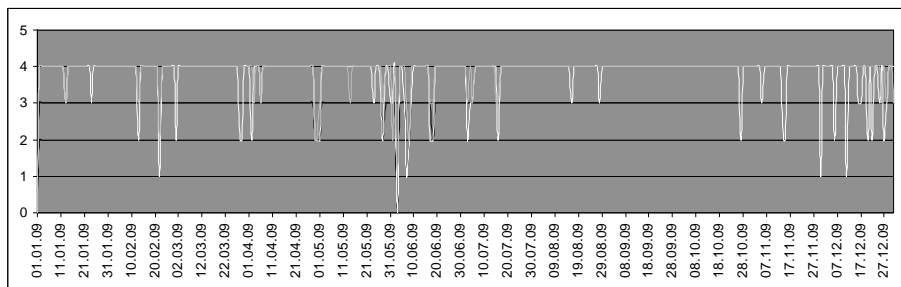
лесозаготовительных предприятий Северо-Запада РФ с расчетной лесосекой около 150 тыс. м³. При этом в качестве периода планирования был принят один календарный год. Для освоения расчетной лесосеки предприятие располагает тремя комплексами лесосечных машин для сортиментной заготовки (харвестер + форвардер). Автомобили-сортиментовозы привлекаются от сторонних подрядчиков, поэтому здесь довольно остро стоит вопрос о требуемом числе и параметрах привлекаемых автомобилей и контроле за тарифами по перевозке. С одной стороны, автомобилей должно быть достаточно для бесперебойной и полной вывозки всех заготовленных лесоматериалов. С другой стороны, нельзя допустить простоя автомобилей, если их окажется больше, чем необходимо.

Таким образом, было выполнено имитационное моделирование функционирования системы заготовка – вывозка в условиях рассмотренного предприятия в течение одного календарного года для четырех вариантов формирования парка автомобилей-сортиментовозов. Первые три варианта отличались только числом автомобилей, привлекаемых к вывозке, а четвертый

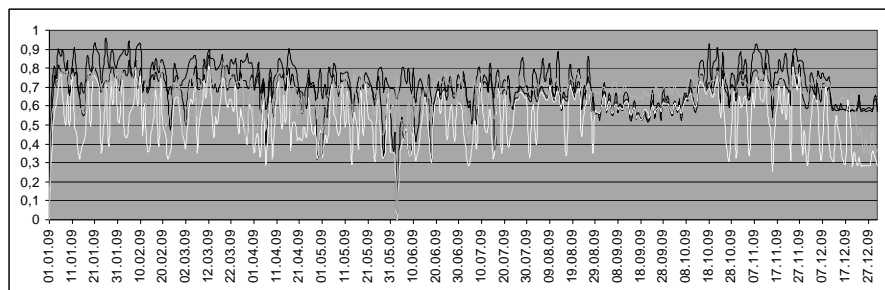
отличался от третьего составом привлекаемых автомобилей. Все остальные параметры оставались неизменными. В качестве основной модели автомобиля-сортиментовоза рассматривался автомобиль импортного производства большой грузоподъемности SISU-E14. Объем перевозимый автомобилем за один рейс, с учетом прицепа был принят равным 52 м³.

В первую очередь были проанализированы варианты с использованием двух, трех и четырех автомобилей с указанными выше характеристиками. По результатам этого анализа было предложено проверить еще один вариант, при котором один из четырех автомобилей большой грузоподъемности заменялся на отечественный автомобиль КамАЗ средней грузоподъемности. Результаты моделирования в форме графиков, показывающих изменение некоторых сравнительных показателей по дням года, представлены на рис. 3.

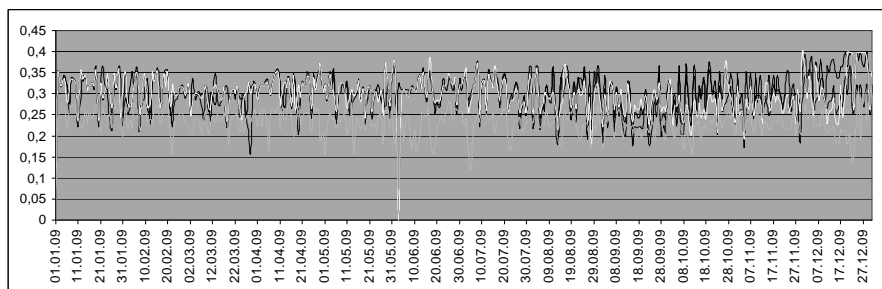
Все показатели фиксировались в базе данных посуточно, а в конце моделирования были определены обобщенные показатели для каждого квартала и для года в целом. Основные годовые и поквартальные результаты приведены на рис. 4–9.



а) число занятых автомобилей



б) коэффициент использования занятых автомобилей



в) объем перевезенных лесоматериалов на единицу пробега

Рис. 3. Изменение сравнительных показателей альтернативных планов по дням года для разного числа автомобилей

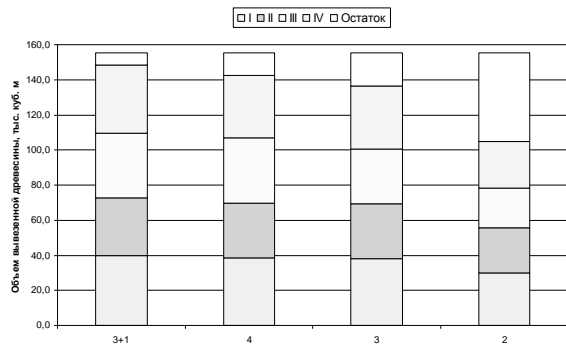


Рис. 4. Перевезенный всеми автомобилями суммарный объем лесоматериалов и остатки на лесопогрузочных площадках в планируемом году

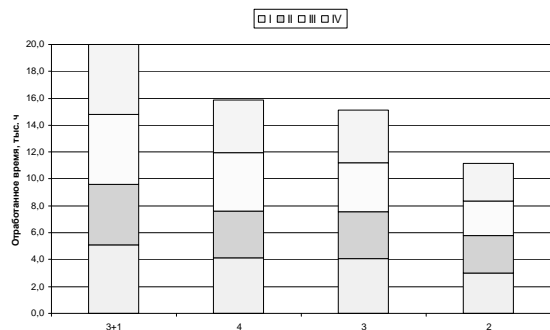


Рис. 5. Суммарное отработанное всеми автомобилями время в планируемом году

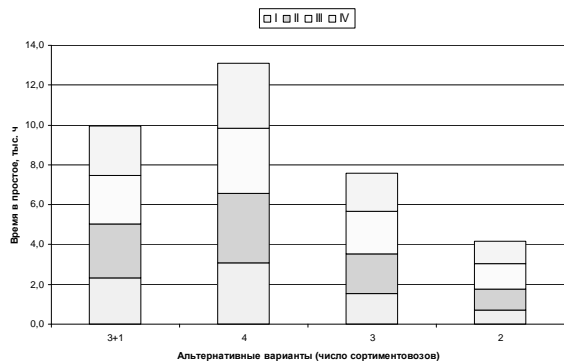


Рис. 6. Суммарное время в простое привлеченных автомобилей в планируемом году

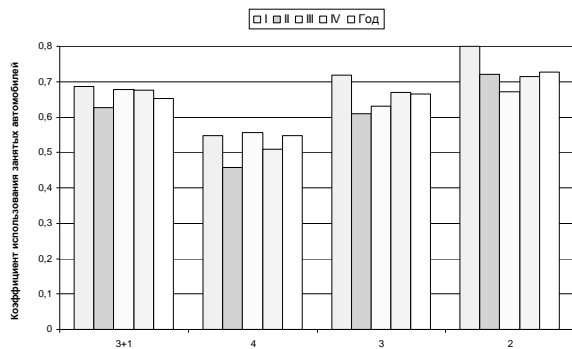


Рис. 7. Коэффициент использования занятых автомобилей в планируемом году

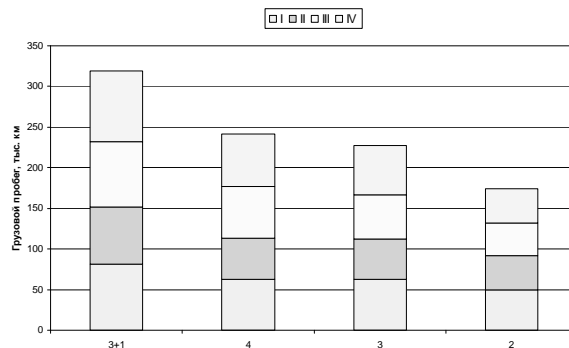


Рис. 8. Суммарный грузовой пробег всех автомобилей в планируемом году

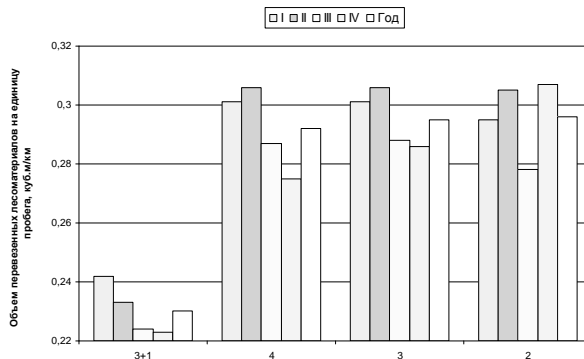


Рис. 9. Объем перевезенных лесоматериалов на единицу пробега в планируемом году

Вариант с двумя автомобилями был исключен ввиду того, что такое количество сортиментовозов явно не справляется с годовой программой вывозки. Это хорошо видно на рис. 4 – имеет место большой остаток лесоматериалов (33 % от годового объема заготовки) на лесопогрузочных площадках в конце планируемого года. Здесь следует отметить, что остаток в рассматриваемых условиях будет всегда по ряду технологических причин, но в случае с двумя автомобилями остаток гораздо больше. По той же причине должен быть исключен и вариант с тремя автомобилями (12 %), так как при использовании четырех автомобилей остаток на лесопогрузочных площадках оказывается еще меньше (8 %).

При использовании четырех большегрузных автомобилей, несомненно, вывезится весь доступный объем продукции, однако возникают сомнения в эффективности такого решения, так как прирост отработанных часов при переходе от трех автомобилей к четырем значительно меньше, чем при переходе от двух к трем (рис. 5). Это говорит о неэффективном использовании четвертого автомобиля, что подтверждают рис. 6 и 7. В этом случае имеет место наибольший простой автомобилей (рис. 6) и, соответственно, наименьший коэффициент использования (рис. 7), который принимает значение чуть больше 50 %. Кроме того, по рис. 3 видно, что показатели в данном случае весьма нестабильны в течение года. Например, нередки дни, когда работают только два или один автомобиль из

четырёх (рис. 3а). Был даже один день в июне, когда все четыре автомобиля простаивали.

Именно эти соображения приводят к мысли о замене одного из большегрузных автомобилей на более дешёвый отечественный автомобиль средней грузоподъёмности КамАЗ, что позволит получить эффект от сокращения времени простоев дорогостоящего импортного автомобиля. Кроме того, такая схема сократит остатки сортиментов на лесопогрузочных площадках.

В результате анализа полученных данных было признано целесообразным использование трёх автомобилей большой грузоподъёмности и одного средней грузоподъёмности. Данный вариант действительно позволил существенно снизить простой (рис. 6) и повысить коэффициент использования почти до уровня, соответствующего варианту с тремя автомобилями (рис. 7). Однако использование автомобиля меньшей грузоподъёмности привело к увеличению общего пробега (рис. 8) и, соответственно, к снижению такого показателя, как объём на единицу

пробега (рис. 9). Тем не менее, принимая во внимание все полученные результаты, считаем этот вариант более предпочтительным для применения на рассматриваемом предприятии в сложившихся условиях.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о практической применимости и эффективности предлагаемой методики и созданной информационно-вычислительной системы для обоснования принимаемых решений при планировании вывозки древесины.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», тема НИР: «Создание инфраструктуры лесных дорог и управление системами транспортировки древесины для лесопромышленного комплекса и биоэнергетики», в рамках проекта «Лесозаготовки и логистика в России», финансируемого Европейским союзом через финское агентство по развитию технологий и инноваций (TEKES)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов А. П., Герасимов Ю. Ю. Геоинформационная система для решения оптимизационной задачи транспортной логистики круглых лесоматериалов // Известия высших учебн. заведений. Лесной журнал. 2009. № 3. С. 78–85.
2. Герасимов Ю. Ю., Соколов А. П., Сютнев В. С. Логистика лесозаготовок: программа поиска оптимального лесотранспортного плана // Лесная Россия. 2008. № 5–6. С. 54–61.
3. Герасимов Ю. Ю., Соколов А. П. Информационная система для решения задачи логистики лесоматериалов // Актуальные проблемы лесного комплекса: Сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-техн. конф. Вып. 21. Брянск: Изд-во Брянской гос. инженерно-технолог. акад., 2008. С. 180–183.
4. Gerasimov Y., Sokolov A., Karjalainen T. GIS-based Decision-Support Program for Planning and Analyzing Short-Wood Transport in Russia // Croatian Journal of Forest Engineering. Vol. 29. Issue 2. Zagreb: University of Zagreb, 2008. P. 163–175.
5. Gerasimov Y., Sokolov A., Karjalainen T. GIS-based decision-support program for short-wood transport in Russia // The Nordic-Baltic Conference on Forest Operations. Copenhagen, September 23–25, 2008. Forest & Landscape Working Papers № 30. 2008. P. 85–86.

УДК 666.951:622.362.5

БОРИС ЗАЛМАНОВИЧ БЕЛАШЕВдоктор технических наук, старший научный сотрудник
Института геологии КарНЦ РАН*belashev@krc.karelia.ru***ВЕРА ПЕТРОВНА ИЛЬИНА**кандидат технических наук, старший научный сотрудник
лаборатории геологии, технологии и экономики мине-
рального сырья Института геологии КарНЦ РАН*ivp@krc.karelia.ru***АНАТОЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ ТЕРНОВОЙ**ведущий физик аналитической лаборатории Института
геологии КарНЦ РАН*ternovoy@krc.karelia.ru***ТЕХНОЛОГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИАТОМИТОВ КАРЕЛИИ**

Изучены генезис, состав, свойства, способы обогащения, возможные применения диатомитов Карелии. Определен гранулометрический состав проб диатомитов, оценено распределение пор по площади и размерам. Опробованы применения диатомитов в качестве фильтров, пигментов, керамики. Как природные наноматериалы диатомиты могут использоваться в нанотехнологиях.

Ключевые слова: диатомит, состав, свойства, обогащение, применение, фильтр, наполнитель, керамика, пигмент

Состоящая из створок диатомовых водорослей, осадочная порода диатомит представляет собой студенистую массу коричневого, белого, кремового, оранжевого цветов [3]. Многочисленные отверстия в створках размерами порядка 100 нм дают основание считать эти породы природными биогенными наноматериалами. Начавшие формирование в постледниковых озерах около 9 тыс. лет назад, месторождения диатомитов в Карелии имеют среднюю мощность толщи 2–3 м, максимальную мощность 6–8 м [2]. Благодаря строению и физико-химическим свойствам диатомиты могли бы быть перспективным сырьем сразу для нескольких областей хозяйственной деятельности. Однако, несмотря на высокое качество, из-за трудностей добычи и необходимости проводить сушку диатомиты Карелии практически не используются.

Изучение свойств и лабораторные испытания способов обогащения и технологий с участием диатомитов, предпринятые в работе, имеют целью привлечение интереса к этим материалам, в частности в сфере нанотехнологий.

Исследуемые образцы представлены пробами диатомитов озера Тедрилампи Муезерского района (Д-00-50) и безымянной ламбы у озера Тунгозеро Лоухского района (Д-01-23). В этих водоемах, находящихся в пределах мощных песчано-гравийных толщ кварц-полевошпатового состава, сложились благоприятные условия для формирования месторождений диатомитов. С грунтовыми водами в непроточные озера поступает значительное количество растворенной кремниевой кислоты, а приток тормозящих развитие диатомей органических кислот мал из-за бедных органикой поверхностно-подзолистых почв.

Для исследования свойств диатомитов применяли оптическую, электронно-рентгеновскую микроскопию, хроматографию, ИК-спектроскопию, химический, рентгенофазовый, дифференциально-термический анализы.

Разнообразие составляющих диатомиты форм представлено электронными изображениями частиц (рис. 1). Пороодообразующими видами пробы Д-01-23 являются донные пеннаты *Anomoeoneis serians*, *A. serians* var. *brachysira*, *A.*

follis, *Frustulia rhomboides*, *Pinnularia gibba* и планктонные центрические виды *Aulacoseira distans*, *A. italica* var. *valida* цилиндрической формы. Для пробы Д-00-50 характерны мелкие пеннатные формы *Fragilaria construens* et var. var., *F. brevistriata*, *Navicula* sp., *Pinnularia* sp. (II тип).

Кроме створок диатомиты содержат органические и минеральные примеси. Минеральные примеси представлены зернами кварца и полевого шпата размерами 0,015–0,2 мм. Часть их окрашена оксидами железа в бурый цвет. Присутствие органических примесей установлено по экзотермическим пикам дериватограмм диатомита вблизи 285 °С, приписываемым разложению примесей и окислению Fe⁺². Аморфное строение кремнезема створок подтверждают электронограмма, размытые ИК-спектры и рентгеновские дифрактограммы проб диатомитов, не имеющие упорядоченных угловых особенностей. Сдвиг максимума рентгенограмм и изменение формы ИК-спектра свидетельствуют о чувствительности кремнезема диатомитов к условиям обработки материала.

Примеси удаляли, обжигая пробы диатомита в муфельной печи при 700 °С в течение 1,5 часа, применяя магнитную сепарацию, выщелачивание

кипячением в 5 % соляной кислоте в течение часа. В результате такой обработки содержание двуоксида кремния повышено на 25–30 %, а содержание оксидов железа снижено до 0,07–0,09 %.

Гранулометрический состав диатомитов определен с помощью лазерного дифрактометра частиц LS-1322. Максимумы дифрактограмм соответствовали размерам 15, 45, 150, 450, 550 мкм (рис. 2).

Пик с максимумом 15 мкм относили к среднему размеру частиц пробы. Обработкой пробы интенсивность этого пика увеличена почти в два раза. Размеры 100–1000 мкм свидетельствуют об агломерации частиц, а размеры вблизи 100 нм соответствуют размерам пор створок диатомитов. Подсчет числа отверстий створок соответствующих размеров проведен по электронным изображениям отдельных частиц диатомитов. Отверстие аппроксимировали эллипсом, оси которого а и b соответствовали наибольшему и наименьшему размерам. Площадь отверстия оценивали как $S = \pi ab$, а средний размер как $r = \sqrt{ab}$. Вычисленные по 287 горизонтальным отверстиям плотности распределения числа пор по площади и размеру приведены на рис. 3.

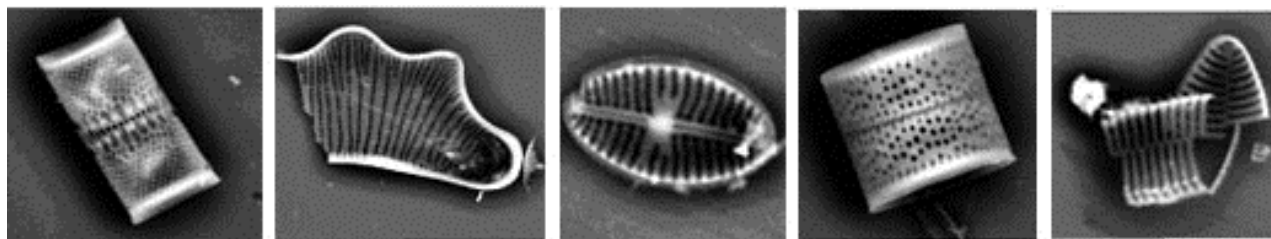


Рис. 1. Формы створок диатомовых водорослей. Изображения получены на электронно-зондовом микроанализаторе INCA-350 на базе электронного микроскопа Vega-LSH

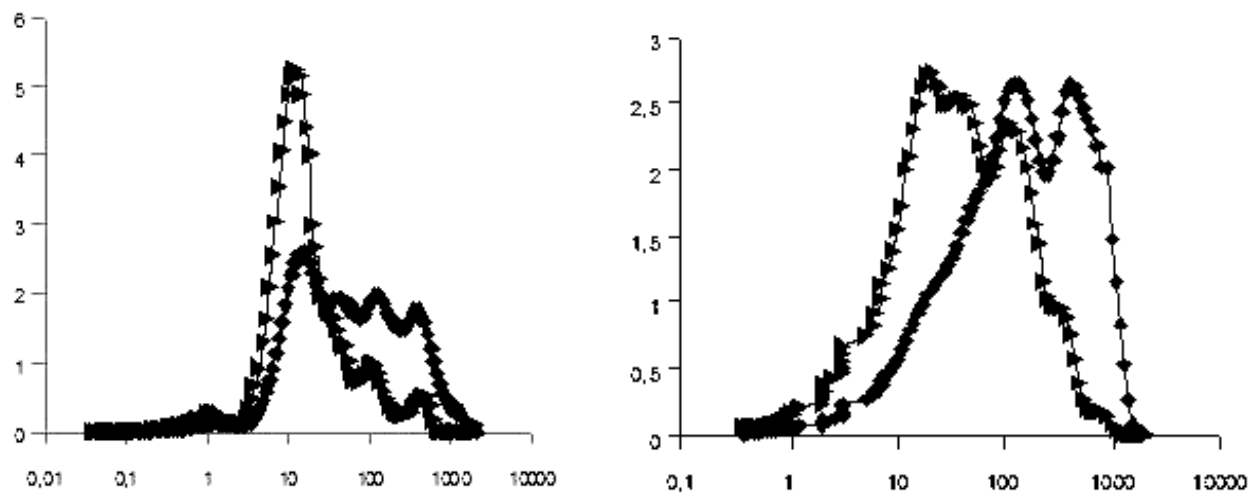


Рис. 2. Распределение частиц диатомита по размерам для проб Д-01-23 и Д-00-50 в исходном состоянии (◆) и после обработки (▶)

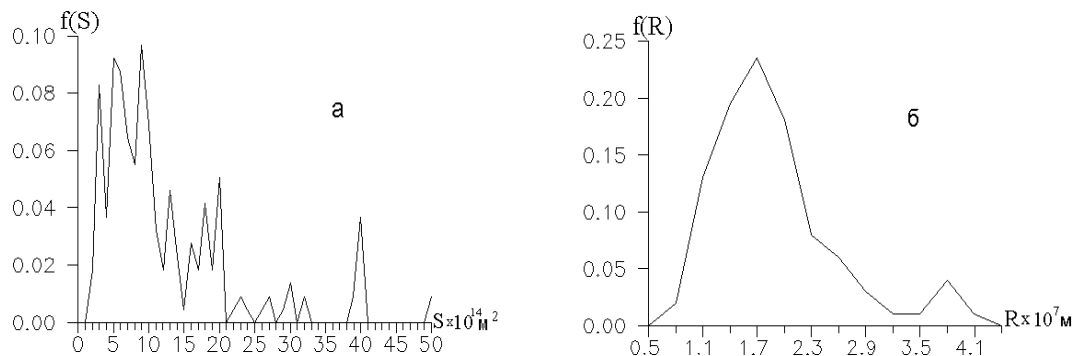


Рис. 3. Плотность распределения отверстий диатомита по площади (а) и радиусу (б)

Таблица 1

Химический состав диатомитов

Проба диатомита	Условия обработки	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	П. п. п., %
Д-01-23	исходный	76,20	0,1	3,82	0,22	0,25	0,28	0,33	0,27	18,53
	700 °С	88,86	0,08	4,32	0,13	0,41	0,37	0,29	0,19	5,35
	HCl	91,20	0,05	4,43	0,07	0,92	0,43	0,08	0,03	2,79
Д-00-50	исходный	70,46	0,05	1,96	2,27	0,62	0,43	0,19	0,14	23,88
	700 °С	86,02	0,06	2,29	2,05	1,38	0,51	0,24	0,18	7,27
	HCl	88,28	0,05	2,38	0,09	1,62	0,58	0,76	0,33	5,0

Таблица 2

Физико-химические свойства диатомитов после выщелачивания

Проба диатомита	Объемный вес, кг/м ³	Удельная поверхность, м ² /г	Теплопроводность, Вт/(м · К)	Fe (общее), %	П. п. п., %	Цвет
Д-01-23	190	123	0,07	0,07	3,22	белый
Д-00-50	450	14,8	0,10	0,09	8,5	желтый



Рис. 4. Применения диатомитов в качестве фильтров (а), керамики (б), пигмента (в)

Химический состав проб диатомита до и после обработки дан в табл. 1, а физико-химические свойства – в табл. 2.

Различие в породообразующих видах диатомитов влияет на дисперсность и плотность проб. У пробы Д-01-23 плотность оказалась почти в два раза меньше, чем у пробы Д-00-50. Рентгеновская плотность кремнезема створок близка к плотности аморфного кварца (2300 кг/м³). От размеров, формы и пористости частиц диатомита зависит удельная поверхность – характеристика, определяющая поведение порошков в технологических процессах. Удельная поверх-

ность пробы Д-01-23 примерно на порядок больше удельной поверхности пробы Д-00-50.

Известные применения диатомитов основаны на высоком содержании активной, растворимой, аморфной кремнекислоты: тонкодисперсном пористом строении, большой удельной поверхности, малом объемном весе, низкой теплопроводности.

Одно из первых применений диатомита связано с изобретением динамита А. Нобелем. Наладив производство нитроглицерина, Нобель искал способ сделать его безопасным, недетонирующим при хранении. Однажды сосуд с нитроглицерином лопнул, но взрыва не последовало,

потому что нитроглицерин образовал с разделяющей сосуда прокладкой из диатомита (кизелькура) вязкую массу. Взрывчатая сила нового соединения упала примерно в шесть раз, но оно оказалось безопасным в использовании и было широко востребовано.

Исследованные пробы диатомитов с предварительной сушкой, дроблением и термообработкой были опробованы в качестве адсорбента многоцелевого назначения. Фильтрующая способность материала продемонстрирована на примере чернил (рис. 4а).

Как заменитель кварцевого песка диатомит пробы Д-01-23 применялся в производстве листового и хрустального стекла. За счет высокой реакционной способности аморфного кремнезема интенсифицировалось стеклообразование, а температура варки стекла была снижена на 200–250 °С [4].

Диатомиты без обогащения использовали для получения керамики. На основе пробы Д-00-50 и кембрийской глины Чкаловского месторождения получены облицовочные теплоизоляционные плитки (рис. 4б). Оптимизация состава смеси с содержанием диатомита от 10 до 40 масс. % позволила получить материалы с низким коэффициентом теплопроводности (0,3–0,6 Вт/м · К) [1]. Перспективно использование диатомитов для производства глазурей, эмалей, стекол высокой прочности.

Часто диатомит используют в качестве наполнителя для снижения веса, улучшения теплоизоляционных и звукоизоляционных свойств материалов. Если изделиям на его основе необходимо придать окраску, его применяют вместе с пигментами.

Диатомиты Карелии могут выступать в роли пигментов для создания строительных красок (рис. 4в). В отличие от красок на основе органических пигментов, такие краски, реализованные на латексной основе, являются долговечными, устойчивыми к атмосферным воздействиям. Процесс их производства упрощается из-за отсутствия операций дробления минерального компонента, а совместное использование с другими пигментами расширяет цветовую палитру красок.

Широкие перспективы связаны с использованием частиц диатомитов в области нанотехнологий. Малые размеры, разнообразие форм, многочисленные поры диатомитов могут оказаться свойствами, которые будут востребованы для производства контейнеров лекарств, средств их доставки, микрокатализаторов, масок для роста углеродных нанотрубок. Предварительно необходимо решить задачи разделения частиц породы по форме, размерам, научиться оперировать отдельными частицами диатомитов.

Таким образом, тонкодисперсное строение и широкий диапазон свойств делают диатомиты привлекательным материалом для различных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидов И. Н., Ильина В. П., Шелехова Т. С., Белашев Б. З., Инина И. С. Перспективы использования диатомитов Карелии // Материалы Второй междунар. науч. конф. «Проблемы рационального использования природного и техногенного сырья Баренцева региона в технологии строительных и технических материалов». Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 55–57.
2. Демидов И. Н., Шелехова Т. С. Диатомиты Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 87 с.
3. Иванов С. Э., Беляков А. В. Диатомит и области его применения // Стекло и керамика. 2008. № 2. С. 18–21.
4. Мелконян Р. Г. Аморфные горные породы и стекловарение. М.: НИИ-ПРИРОДА, 2002. 262 с.

УДК 539.23

АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ВЕЛИЧКО

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники и электроэнергетики физико-технического факультета ПетрГУ

velichko@psu.karelia.ru

ДМИТРИЙ АНДРЕЕВИЧ ДУТИКОВ

студент 6-го курса физико-технического факультета ПетрГУ

dutty@yandex.ru

НИКОЛАЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ КУЛДИН

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники и электроэнергетики физико-технического факультета ПетрГУ

kulsdin@psu.karelia.ru

ТАТЬЯНА ВАЛЕРЬЕВНА КУНДОЗЕРОВА

студентка 6-го курса физико-технического факультета ПетрГУ

tacan@mail.ru

ДАНИИЛ КОНСТАНТИНОВИЧ ПАРАНИЧЕВ

студент 6-го курса физико-технического факультета ПетрГУ

dani-ok@mail.ru

АЛЕКСАНДР ЛИОНОВИЧ ПЕРГАМЕНТ

доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета ПетрГУ

aperg@psu.karelia.ru

ВАДИМ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ ПУТРОЛАЙНЕН

старший преподаватель кафедры электроники и электроэнергетики физико-технического факультета ПетрГУ

vputr@psu.karelia.ru

ГЕНРИХ БОЛЕСЛАВОВИЧ СТЕФАНОВИЧ

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии и геофизики горно-геологического факультета ПетрГУ

iraku@psu.karelia.ru

АЛЕКСАНДР БОРИСОВИЧ ЧЕРЕМИСИН

кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры электроники и электроэнергетики физико-технического факультета ПетрГУ

alexiii1982@mail.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МИКРО- И НАНОЛИТОГРАФИИ ПО ОКСИДНЫМ ПЛЕНКАМ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

В статье приведен обзор неорганических резистов, применяющихся для микро- и нанолитографии. Обсуждаются результаты исследований модификации пленок оксидов переходных металлов под действием электронного, фотонного и ионного излучений. Показано, что оксиды ванадия могут являться перспективным материалом для микро- и нанолитографии, а также использоваться для изготовления электронных компонентов микро- и наномасштаба.

Ключевые слова: оксиды переходных металлов, нанолитография, резист, модификации пленок оксидов

Основным технологическим процессом в микроэлектронике в течение более чем 40 лет продолжает оставаться литография. Литографические процессы классифицируются по способу энергетического воздействия (экспонирования) на чувствительный слой (резист), наносимый на полупроводниковую подложку: оптическая, электронно-лучевая (ЭЛ), рентгеновская и ионная литографии. Литографический процесс дол-

жен обеспечить создание определенного топологического рельефа на полупроводниковой пластине. Базовый литографический процесс представлен на рис. 1 и включает в себя по крайней мере 10 ступеней.

Анализируя ключевые аспекты литографического процесса с разрешением < 100 нм, нужно выделить две основные проблемы: источник экспонирования и адекватный резист. Любые из раз-

рабатываемых систем экспонирования, в частности оптические ДУФ (длинноволновый ультрафиолет), ЭУФ (экстремальный вакуумный ультрафиолет) и ЭЛ (электронно-лучевые), в принципе обеспечивают необходимое разрешение, тогда как проблема резиста остается открытой. До настоящего момента в литографическом процессе использовались и используются органические резисты на основе полимерных соединений. Классический органический резист состоит из трех компонентов: полимера (резины), фотоактивного соединения и растворителя. Рассмотрим процессы, протекающие в органических резистах при облучении, на примере классического органического ультрафиолетового фоторезиста DNQ / Novolac (диазоафтоквинон / новолачная смола). В представленной композиции Novolac – это смола, а DNQ – фотоактивное соединение. При облучении резиста DNQ превращается в нестабильное промежуточное соединение – кетон, которое сразу вступает во взаимодействие с молекулами воды в матрице резиста и образует инденкарбоновую кислоту (ICA). ICA хорошо растворяется в щелочных растворителях.

Новолачная смола также растворима в щелочах, но добавление DNQ значительно снижает растворимость смолы и таким образом обеспечивает необходимую химическую стойкость резины к щелочному проявителю. В результате существенное отличие растворимости облученной и исходной областей резиста позволяет при проявлении в щелочах получать необходимый топологический рельеф на поверхности подложки.

В табл. 1 представлены наилучшие, по данным международного симпозиума 2006 года, достигнутые метрические характеристики в ЭУФ-литографии с применением сложных органических резистов [52].

Однако для органических резистов характерен ряд существенных недостатков. Во-первых, спектральная ограниченность органических резистов, то есть то, что один тип резиста может работать только в определенной области длин волн модифицирующего источника. Развитие источников экспонирования и смещение рабочих длин волн в коротковолновую область спектра ведут к необходимости разрабатывать новые серии органических резистов, а это всегда дорогостоящий и трудоемкий процесс. Второй недостаток заключается в низкой стойкости существующих органических резистов к плазменным процессам. Резистивные материалы, представляющие собой органические полимерные композиции (например, ПММА – полиметилметакрилат), легко разрушаются в ходе плазменного травления. Кроме того, плазменная обработка сопровождается нагревом обрабатываемой поверхности, что приводит к дополнительной деградации резистивного слоя. При создании структур с высоким отношением высоты линии к ширине толщина резиста не может превышать ширины линии. Это приводит к необходимости использования сложных много-

слойных резистов, в которых обычные полимерные композиции обеспечивают высокую экспозиционную чувствительность, тогда как другие слои добавляют необходимую плазмо- и термостойкость. В-третьих, органические резисты являются источником дополнительных загрязнений поверхности подложки; отсюда возникает необходимость проведения ее тщательной очистки от продуктов загрязнения перед каждым новым технологическим этапом. Наконец, применение органических резистов исключает возможность проведения полностью «сухого» литографического процесса.

Альтернативный подход к решению трудностей, связанных с применением органических резистов, заключается в разработке и применении в микроэлектронной промышленности *неорганических соединений*, обладающих эффектом резиста.

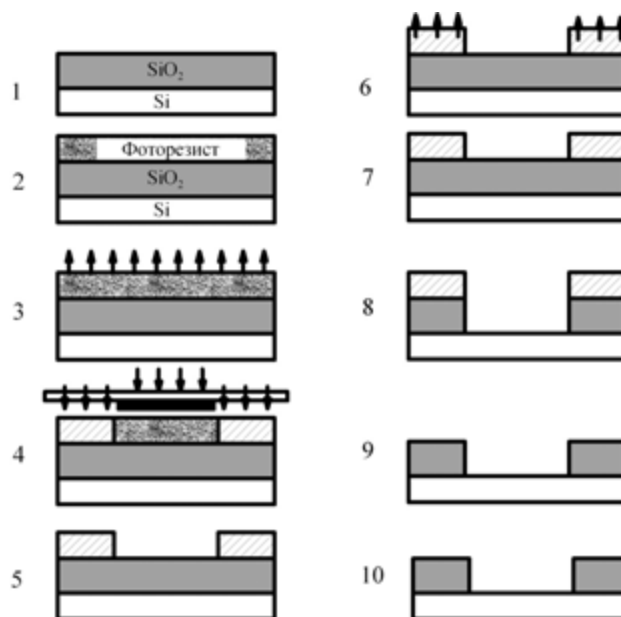


Рис. 1. Базовый литографический процесс:

1) подготовка поверхности (промывка и сушка); 2) нанесение резиста; 3) сушка, удаление растворителя и перевод резиста в твердую растворимую фазу; 4) совмещение фотошаблона и экспонирование (положительный резист под действием света переходит в нерастворимую фазу); 5) проявление резиста (промывка в растворителе, удаляющем неэкспонированный резист); 6) стабилизирующий отжиг, удаление остатков растворителя; 7) контроль и исправление дефектов; 8) травление (непосредственный перенос рисунка маски на поверхность полупроводниковой структуры); 9) удаление фоторезиста; 10) финишный контроль.

Таблица 1
Метрические характеристики в ЭУФ-литографии с применением сложных органических резистов [52]

	Состояние на 2006 год		
Разрешение, нм	28	29	45
Размытие края изображения, нм	6,3	4,9	> 10
Чувствительность, мДж/см ²	12	27	6

Таблица 2
Сравнение неорганических
и органических резистов

	Неорганические резисты	Органические резисты
Процедура нанесения	Сухой, (вакуумные методы нанесения)	Жидкий (центрифугирование)
Отжиг	Не требуется	Необходим на этапах стабилизации и сушки
Огнеопасность / токсичность	Отсутствует	Огнеопасен, применяются растворители
Толщина резиста	Тонкий слой (< 0,15 мкм)	Толстый слой (0,2–1,5 мкм)
Сохраняемость резистных свойств облученных / необлученных областей материала	Месяцы	Дни
Источник загрязнения	Зависит от типа резиста	Растворители, атмосфера

Главные преимущества, связанные с применением неорганических резистов по сравнению с органическими полимерными соединениями, представлены в табл. 2.

В соответствии с активационным механизмом неорганические резисты могут быть разделены на две группы: неорганические фото- (электронно) резисты (халькогенидные полупроводники) и неорганические термические резисты (металл-оксидные соединения).

Термин «неорганические резисты» впервые использовал Синклер с соавторами [48] при изучении оксида железа Fe_2O_3 . Облученный потоком электронов или лазером исходно аморфный материал кристаллизуется и в этом случае растворяется в растворе 5 % хлорной кислоты намного медленнее, чем необлученный, при этом он ведет себя как негативный резист. Однако его чувствительность гораздо ниже, чем у органических резистов (требуется ~ 100 Дж/см²).

Бозлер и другие в работах [14], [39] сообщают о другом металл-оксидном термическом резисте – AlO. AlO-терморезист наносился методом термического вакуумного испарения алюминия в кислородной среде. Таким образом, нанесенная пленка представляет собой смесь металлического Al и Al_2O_3 около 30 нм толщиной. При облучении ультрафиолетовым лазерным импульсом длительностью 20 нс и энергией 40–100 мДж/см² изначально электропроводящий материал переходит в диэлектрическое «темное» состояние. Преобразованные области растворяются в водных растворах фосфорной кислоты значительно медленнее, чем исходная пленка. Таким образом, AlO-резист может быть проявлен в растворах кислот и затем использован в качестве защитного покрытия в процессах реактивного ионно-лучевого плазменного травления с применением CHF_3 -химии. Хотя AlO-

терморезист является более чувствительным по сравнению с Fe_2O_3 , доза в 100 мДж/см² в несколько раз превышает дозы, используемые для традиционных органических резистов (10–50 мДж/см²).

В работе [49] авторы предложили двухслойный неорганический терморезист на основе легкоплавких металлов $BiIn$ (толщина слоев – 15/15 нм). При облучении ультрафиолетовым лазерным импульсом длительностью 20 нс и энергией 10 мДж/см² исходная двухслойная металлическая пленка преобразуется в $BiIn$ -сплав. Экспонированная область проявляется в водном растворе азотной и уксусной кислот ($HNO_3:CH_3COOH:H_2O$), и резист ведет себя как негативный.

Очень высокое разрешение (~ 1 нм) демонстрируют такие материалы, как MgF_2 , CaF_2 , AlF_3 , TiO_2 и MgO , при электронно-лучевом экспонировании, однако они требуют очень высоких экспозиционных доз ($\sim 10^7$ мкКл/см² при 100 кВ). Высокое разрешение этих неорганических тонких пленок объясняется малым размером молекул и тем, что пороговая энергия экспозиции выше энергии вторичных электронов.

Интерес к неорганическим резистам возрос после публикации ряда работ [9], показавших, что аморфные халькогенидные стекла при облучении ультрафиолетовым светом или электронным излучением ведут себя как резисты. Пленки $GeSe_x$ наносят на подложку вакуумным испарением или из раствора и покрывают тонким слоем серебра (около 0,1 мкм) погружением пленки в водный раствор $AgNO_3$. Аморфные халькогенидные пленки легко растворяются в водных растворах как неорганических, так и органических оснований. Сразу же после облучения резиста УФ-светом или электронным излучением серебро диффундирует в матрицу халькогенида, которая при этом становится нерастворимой в основаниях. Следовательно, материалы ведут себя как негативные резисты. Чувствительность резистов относительно низка (80 мкКл/см² при 10 кВ), однако контрастность исключительно высокая ($\gamma = 8$). Система при экспонировании электронным пучком дает линии шириной 300 нм.

Подобные результаты получил Тай с соавторами [51] для системы халькогенидного стекла $GeSe_2$ с Ag_2Se в качестве радиационно-модифицируемого слоя. Чувствительность таких резистов лежит в интервале 10–100 мкКл/см², $\gamma > 6$. Резисты совершенно не набухают, термически стабильны, обладают отличной стойкостью при плазменном травлении.

Изучены возможности применения в литографии As_2S_3 , As_2Se_3 , $GeSe_2$ совместно с различными содержащими серебро веществами: Ag , Ag_2S , Ag_2Se , Ag_2Te и другими [31].

Недостаток халькогенидных резистов заключается в необходимости получать высокостехиометричные пленочные структуры, что представляет определенную сложность. Кроме того, наличие атомов серебра в составе радиационно-модифицируемого слоя губительно влияет на характеристики будущего полупроводникового устройства.

Таблица 3

Преимущества и недостатки разрабатываемых и применяемых в микроэлектронике резистов

Тип материала	Преимущества	Недостатки
Традиционные органические резисты	Хорошо отработанный литографический процесс	Слишком толстые; взаимосвязь между чувствительностью и разрешением
Традиционные неорганические резисты	Высокое разрешение; плазмостойкие; тонкопленочные	Низкая чувствительность; диэлектрики; точная стехиометрия
Оксиды переходных металлов	Высокая чувствительность; высокое разрешение; тонкопленочные; плазмо- и термостойкие; совместимы с полностью вакуумным процессом; совместимы с существующими технологиями	Нарушение обратимости (условия экспонирования требуют дальнейшего изучения); через 10 дней после получения чувствительность ухудшается; до экспонирования пленки должны быть защищены от влаги и тепла ($> 50^{\circ}\text{C}$); двухслойный

Таблица 4

Сравнительные характеристики неорганических резистов

	Чувствительность, мкКл/см ² или мДж/см ²	Разрешение, нм	Контраст	Применение
Ag/GeSe _x	80	300	8	ЭЛ-литография
Ag/GeSe ₂	10–100	~300	> 6	ЭЛ-литография
AlF ₃	10 ⁷	~1	–	ЭЛ-литография
VO ₂	200–300	< 100	–	ЭЛ-литография
FeO _x	100	~1000	–	Фотолитография
AlO _x	40–100	–	–	ЭЛ-литография
Bi/In	10	~300	–	ЭЛ-литография
AsSe	8	~200	–	ЭЛ-литография
WO ₃	1000	< 100	–	Электронно-, фото-, ионная литография
MoO ₃	1000	< 100	–	Электронно-, фото-, ионная литография
V ₂ O ₅	100	< 100	–	Фотолитография

Таблица 5

Параметры изготовления образцов

Номер образца	Метод получения	Подложка	Давление	Т подложки, °С	Толщина пленки, нм
1	V ₂ O ₅ , терм.	стекло	$0,2 \cdot 10^{-5}$ Торр	20	300
2	V ₂ O ₅ , терм.	Si/SiO ₂	$0,2 \cdot 10^{-5}$ Торр	20	200
3	V ₂ O ₅ , терм.	Si/SiO ₂	$0,2 \cdot 10^{-5}$ Торр	20	250
4	V ₂ O ₅ , терм.	Si/SiO ₂	$0,2 \cdot 10^{-5}$ Торр	20	200
5	V ₂ O ₅ , терм.	Si	$5 \cdot 10^{-5}$ Торр	20	250
6	Имп. лазерное испарение	Si, металлизированный платиной (60 нм)	70 мТорр	20	120
7	Имп. лазерное испарение	стекло	70 мТорр	20	100

В наших работах [50] было показано, что перспективными для разработки неорганических резистов являются метастабильные аморфные пленки диоксида ванадия, получаемые методом анодного окисления и имеющие высокую чувствительность к фотонному и электронному облучению.

В ряде работ показана возможность использования в качестве электронного резиста аморфных пленок оксидов переходных металлов WO₃ [12] и MoO₃ [38], а также аморфных оксидов WO₃, MoO₃ и V₂O₅ для ионно-лучевой литогра-

фии [30]. Следует упомянуть в том числе и работу по фотолитографии по аморфному V₂O₅ [42].

В табл. 3 приведены основные преимущества и недостатки резистов, а в табл. 4 – сравнительные характеристики неорганических резистов.

В настоящее время не существует неорганических резистов, способных полностью удовлетворить требованиям современной микро- и нанолитографии. Обладая необходимой стойкостью к плазмо- и термообработке и высокой разрешающей способностью, неорганические со-

единения существенно проигрывают в чувствительности к экспонирующему излучению традиционным органическим резистам, что препятствует широкому использованию неорганических резистов в микро- и нанолитографии. Таким образом, поиск новых материалов, способных сочетать в себе преимущества органических и неорганических резистов и при этом обладать совместимостью с существующими микро- и нанотехнологиями, является актуальной задачей.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве методов синтеза применялись следующие методы: термического испарения в вакууме, импульсного лазерного испарения и магнетронного реактивного распыления металла в вакууме.

Параметры изготовления образцов

В ходе экспериментальных исследований было изготовлено 9 типов образцов (табл. 5).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование фотоиндуцированной модификации физико-химических свойств пентаоксида ванадия, полученного методом термического испарения в вакууме

В ходе экспериментальных исследований применялись образцы 1–5 (табл. 5).

Анализ работ [1]–[56] по модификации V_2O_5 показал, что проблеме производства функциональных V_2O_5 - и VO_2 -микроструктур уделяется небольшое внимание. В данном разделе представлены результаты селективного химического травления пленок пентаоксида ванадия после модификации УФ-облучением при нормальных условиях с последующим восстановлением до фазы VO_2 .

УФ-модификация (длина волны – 402 нм) производилась при нормальных условиях через маску стандартного степпера Karl Suss mA6/BA6. Вольт-амперные характеристики и температурные зависимости проводимости измерялись с использованием источника-измерителя KEITHLEY Model 2410. Оптический спектр пропускания измерялся при помощи спектрометра Nicolet 5700.

Рентгеноструктурный анализ (образец 2) показал, что пленка аморфна: рентгеновский спектр не имеет отдельных дифракционных пиков [43].

Было установлено, что пленки, полученные термическим осаждением, имеют более высокую чувствительность к УФ-облучению, чем те, которые получены методом лазерной абляции. Это может быть связано с тем фактом, что в случае лазерной абляции осаждаемые молекулы обладают более высокой энергией, что уменьшает количество дефектов и, следовательно, уменьшает степень метастабильности пленки. Поэтому основные результаты, представленные ниже, были получены на пленках, приготовленных термическим осаждением.

Спектры пропускания пленок до и после УФ-модификации представлены на рис. 2. Наблюдаемое смещение спектра в коротковолновую область может быть связано с процессами, которые имеют место в случае фотохромного эффекта.

Проявление модифицированных пленок проводилось в водном растворе метанола (10:1), при этом процесс проявления происходит как в случае негативного резиста (образцы 2–4). Также проявление проводилось в растворе муравьиная кислота – ацетон – формалин (15:10:1), процесс происходит как для позитивного резиста (образец 2). Время проявления составляло 5–10 мин с последующим промыванием в ацетоне и сушкой.

На рис. 3 представлена фотография поверхности, сделанная при помощи сканирующего электронного микроскопа. Линия V_2O_5 шириной 8 мкм селективно вытравлена в водном растворе метанола после экспонирования дозой ~10 Дж/см².

Размытие края линии (~500 нм) происходит из-за засветки этой области УФ-облучением. Разрешение V_2O_5 -резиста определяется гранулированной (зерновой) структурой пленки. В наших экспериментах размеры зерен после травления

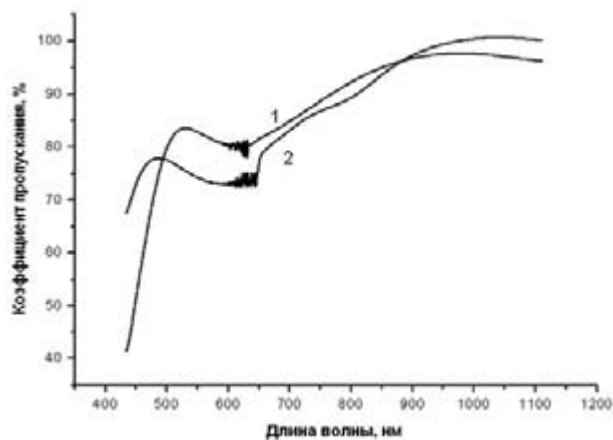


Рис. 2. Спектры пропускания исходной (1) и модифицированной (2) аморфной V_2O_5 -пленки с дозой ~20 Дж/см². Применялся образец 1.

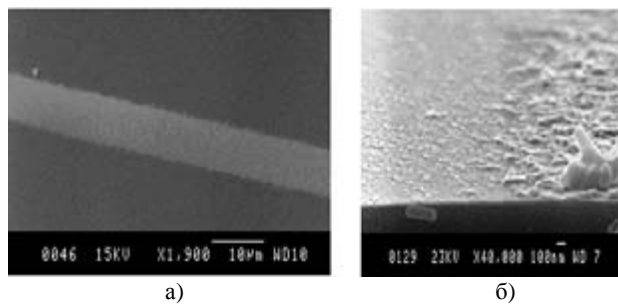


Рис. 3. Изображение 8 мкм линии пентаоксида ванадия после проявления в водном растворе метанола а) вид сверху, б) край. Применялся образец 2.

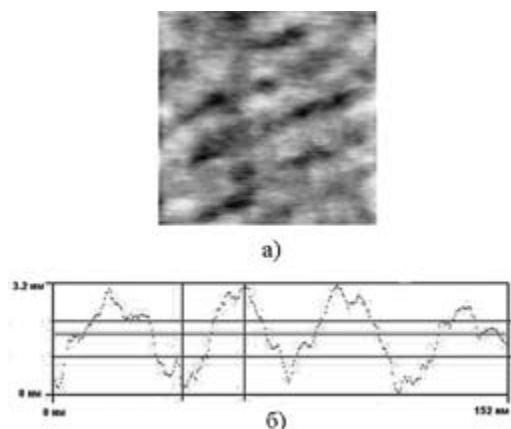


Рис. 4. Снимок с атомно-силового микроскопа V_2O_5 -пленки на Si/SiO_2 -подложке (а), профиль поверхности (б). Образец 2

составляли около 30–50 нм, и, как показано в работе [26], зерновая структура (морфология) аморфной пленки зависит от типа подложки и ее температуры. Зерновая структура проявляется уже после напыления пленки, хотя пленка является аморфной. Как видно на рис. 4, высота неоднородностей составляет порядка 3 нм, а продольный размер – порядка 30–40 нм.

После проявления (образцы 2, 3, 4) полученные структуры были восстановлены до стехиометрии VO_2 . Процесс восстановления производился методом отжига в кислородной атмосфере (10 мТорр) при $T = 450$ °С в течение 30 мин.

Различное поведение пленок, осажденных из различных испарителей, представлено на рис. 5.

В случае Al_2O_3 -испарителя стехиометрия может быть восстановлена до VO_2 с фазовым переходом металл – изолятор (ФПМИ) и скачком проводимости на 2–3 порядка (кривая 1, образец 2). Подавление ФПМИ (кривые 2 и 3, образцы 3 и 4 соответственно) связано с легированием (загрязнением) диоксида ванадия атомами Mo и Ta.

Таким образом, было показано, что после процесса УФ-модификации и жидкофазного химического травления получена V_2O_5 -структура, которая может быть восстановлена до стехиометрии VO_2 , обладающего ФПМИ.

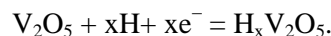
После восстановления 8 мкм V_2O_5 -линий в фазу VO_2 сверху были напылены золотые контакты на расстоянии ~80 мкм друг от друга. На рис. 6 представлены вольт-амперные характеристики данных структур (образец 2) при температуре $T = 55$ °С.

Эффект переключения связан с джоулевым разогревом образцов выше температуры фазового перехода. Характер переключения ВАХ зависит от ограничительного тока, проходящего через структуру I_c . Наибольшая величина I_c соответствовала максимальной проводимости во включенном состоянии. Это связано с тем, что при наибольшем токе формируется более широкий канал металлической фазы.

Отметим, что для модификации свойств аморфного V_2O_5 могут быть использованы источ-

ники с более короткой длиной волны (< 402 нм), и, следовательно, доза облучения, необходимая для иницирования фотохимических превращений в пленке, будет меньше.

Механизм модификации физико-химических свойств оксида ванадия может быть объяснен в терминах модели двойной инжекции (внедрение ионов водорода):



Источником ионов водорода в данном случае выступают адсорбированные на поверхности пленки молекулы воды [43].

Исследование лазерной и электронно-лучевой модификации физико-химических свойств пентаоксида ванадия, полученного методом лазерной абляции

В ходе экспериментальных исследований, представленных в данном разделе, применялись образцы 6 и 7.

Для лазерной модификации аморфных пленок использовался Krf – эксимерный лазер (COMPEX-102), имеющий следующие характеристики: $\lambda = 248$ нм, длительность импульса – 20 нс, площадь пятна – 8×24 мм. Экспонирование аморфной пленки пентаоксида ванадия производилось одиночным импульсом с энергией 100–200 мДж. Результатом воздействия лазерного излучения было изменение различных свойств пленки V_2O_5 .

Сразу после экспозиции поверхность пленки темнела (образец 6), цвет изменялся с желтого на темно-коричневый, причем наименьшее изменение контраста соответствует импульсу с наименьшей энергией (100 мДж), а наибольшее изменение – импульсу с максимальной энергией (200 мДж).

Результат измерения спектра поглощения пленки (образец 7) до и после облучения импульсом с энергией 150 мДж показан на рис. 7а. В ультрафиолетовой и видимой области с длиной волны меньше, чем 600 нм, поглощение выше для модифицированной пленки, в то время как для области длинных волн (> 700 нм) она становится более прозрачной.

Оптическая ширина запрещенной зоны может быть определена из соотношения Тауца:

$\alpha \cdot hv = B \cdot (hv - E_g)^n$ [44]. Здесь основной параметр n определяет тип электронных переходов и принимает следующие значения: $1/2$ – прямой разрешенный, $3/2$ – прямой запрещенный, 2 – непрямой разрешенный, 3 – непрямой запрещенный. В нашем случае экспериментальные данные описывались при $n = 1/2$ [22].

Как показано на рис. 7б, величина собственного края поглощения материала остается постоянной в процессе модификации и составляет ~2,6 эВ (образец 7). Таким образом, можно заключить, что в ходе лазерной обработки в материале нет изменений стехиометрии, но происходит увеличение оптической плотности вблизи

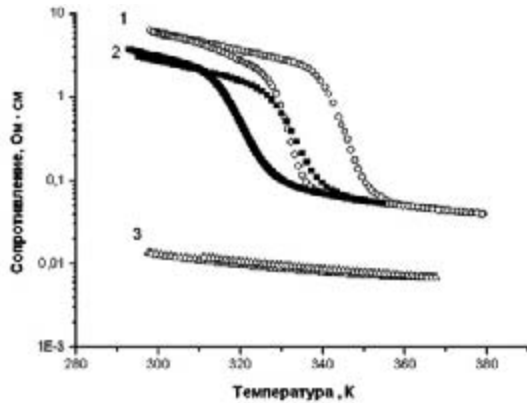


Рис. 5. Температурные зависимости сопротивления 8 мкм линии пентаоксида ванадия, полученные с использованием напыления из Al_2O_3 - (1), Ta- (2), Mo-лодочек (3). Применялись образцы 2, 3, 4 соответственно.

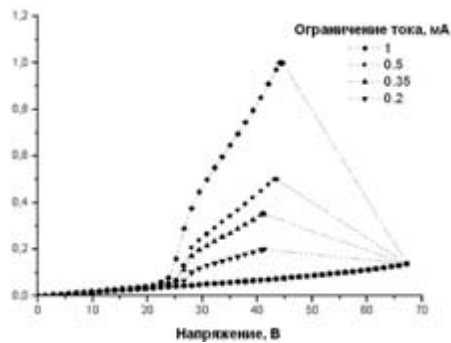


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики VO_2 -планарной структуры с различными значениями ограничительного тока I_c . Температура – 55 °С. Применялся образец 2.

области фундаментального поглощения. Стехиометрия исследуемого оксида близка к V_2O_5 , величина оптического края собственного поглощения которого лежит в области энергий 2,2–2,5 эВ [8], [5].

Исследования поверхности пленки методами электронной и атомно-силовой спектроскопии показали, что после модификации (один импульс с энергией 150 мДж) морфология поверхности пленки изменяется.

На рис. 8 представлено изображение поверхности оксида, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа Zeiss DSM-942 (образец 6). Среднеквадратичная шероховатость поверхности R_q составляет ~30 нм, что более чем в 8 раз превосходит значение параметра для немодифицированного оксида (~3,5 нм).

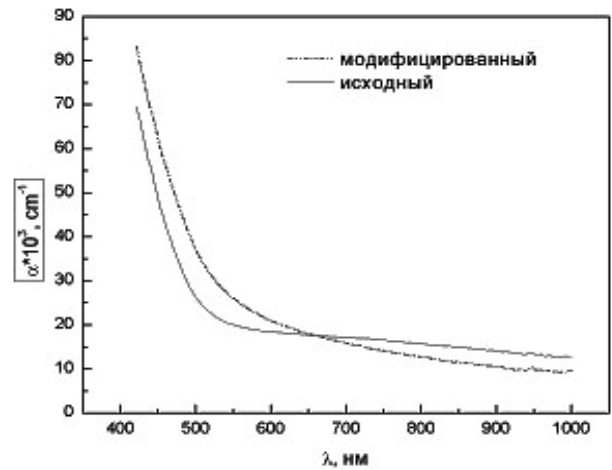
По-видимому, модификация свойств V_2O_5 определяется тепловым действием лазерного импульса.

В работе [15] анализ структуры тонких пленок оксида ванадия, полученных методом лазерной абляции, показал, что до и после ультрафиолетовой лазерной обработки исследуемые V_2O_5 -пленки аморфны, восстановление оксида не происходит. Облучение исходной пленки пентаоксида ванадия ведет к уменьшению размеров

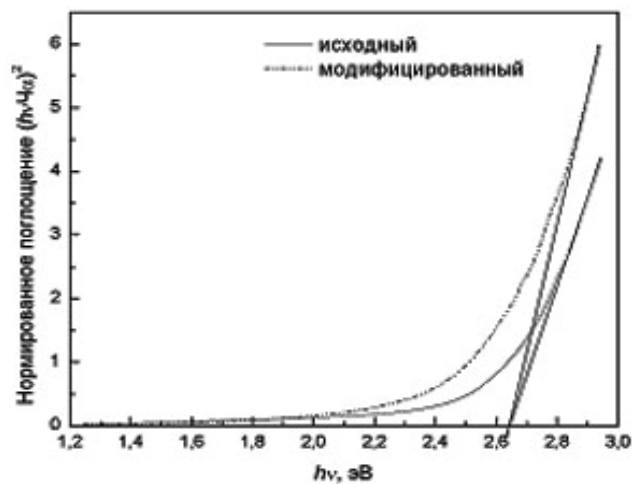
областей упорядоченного расположения атомов с 2,4 до 1,2 нм. Минимальной структурной единицей аморфных оксидных пленок является сильно искаженный кислородный октаэдр. Характер искажения тетрагональных пирамид в исходной и модифицированной пленке различен и отличается от такового для кристаллической фазы. Кроме того, наблюдается дефицит по кислороду в первом координационном многограннике (тетрагональной пирамиде), то есть небольшая часть пирамид в исследуемых пленках пентаоксида ванадия не достроена (отсутствует одна из вершин).

Химическое, физическое плазменное и ионно-лучевое травление оксидов ванадия

В ходе экспериментальных исследований, представленных в данном разделе, применялся образец 6.



а)



б)

Рис. 7. Спектр поглощения (а) и оптический край собственного поглощения (б) аморфной пленки пентаоксида ванадия до и после лазерной модификации. Применялся образец 7

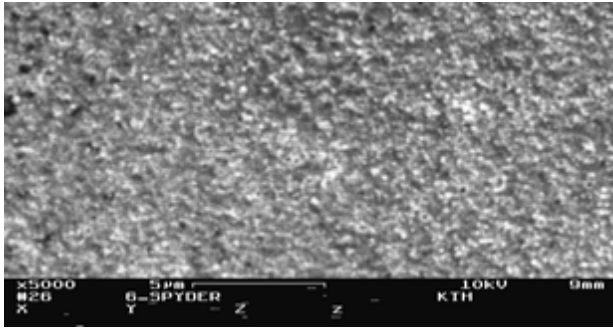


Рис. 8. Морфология поверхности пленки оксида после воздействия лазерным импульсом с энергией 150 мДж. Применялся образец 6

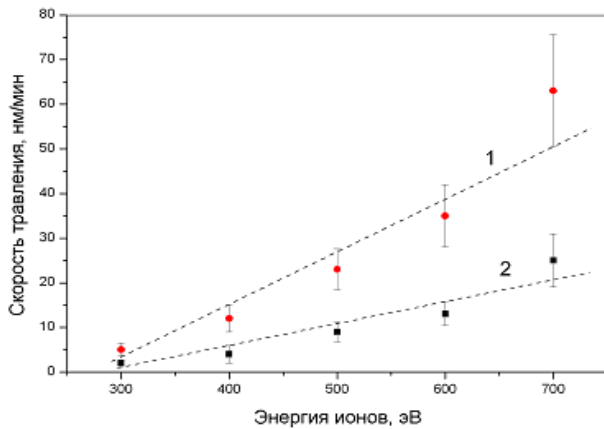


Рис. 9. Зависимость скоростей ИЛТ-модифицированного (2) и немодифицированного (1) оксидов ванадия от энергии бомбардирующих ионов Ag.

Средняя величина селективности ИЛТ – $2,8 \pm 0,2$.

Таблица 6

Скорости ИЛТ различных материалов в аргоне, пересчитанные к плотности мощности ионного тока $w = 0,5 \text{ Вт/см}^2$

Материал	$V_{\text{тр}}$, нм/мин	Селективность материала относительно экспонированного V_2O_5	
Облученный V_2O_5	6–7	2,6–3	Результаты настоящей работы
Исходный V_2O_5	17–20		
GaAs	132–150	20–23	Согласно данным из [5]
Ag	102–150	15–23	
LiNbO ₃	30	4,6	
Si	18–30	2,8–4,6	
Ti	18	2,8	
SiO ₂ *	24–36	3,7–5,5	
Пермаллой	18–30	2,8–4,6	
Al ₂ O ₃	4,8–6	отсутствует	
V	9–18	1,4–2,8	
ПММА	42–48	6,5–7,4	

* Термически осажденный диоксид кремния.

После фотонного воздействия (доза облучения $\sim 150 \text{ мДж/см}^2$) наблюдался эффект селективного ионно-лучевого травления (ИЛТ) аргонном. Эксперименты по ИЛТ аргонном были выполнены с помощью стандартного ионного источника типа Кауфмана (Veeco Microetch) с давлением газа в разрядной камере 10^{-4} Торр. Давление остаточных газов в рабочей камере составляло $2 \cdot 10^{-6}$ Торр. Для эффективного охлаждения образцы с помощью теплопроводящей пасты соединялись с водоохлаждаемым медным держателем, который вращался с постоянной скоростью в течение всего процесса, обеспечивая однородность травления. Глубина травления измерялась с помощью профилометра (Tencog P10).

На рис. 9 представлена скорость травления для модифицированного (доза $\sim 150 \text{ мДж/см}^2$) и исходного оксидов как функция энергии ионного луча (300–700 эВ). Как видно, с ростом энергии ионов Ag скорость травления оксида возрастает, причем экспонированные области оксида травятся медленнее. Среднее значение селективности ИЛТ составляет $2,8 \pm 0,2$. В табл. 7 приведены значения скоростей ИЛТ различных материалов в аргоне [5], пересчитанные к плотности мощности ионного тока $w = 0,5 \text{ Вт/см}^2$ при вертикальном падении ионов и давлении остаточных паров воды и кислорода в камере менее 10^{-4} Торр.

Из табл. 6 видно, что скорость травления для экспонированного оксида в 3–4 раза меньше скорости травления большинства материалов, применяемых в микроэлектронной промышленности. Особенно высокая селективность проявляется по отношению к A_3V_3 -полупроводникам типа GaAs, InAs, InSb, имеющим много потенциальных приложений в оптоэлектронных устройствах [18].

Рассмотрим более подробно процессы тепловыделения и теплоотвода при воздействии лазерного импульса с энергией 150 мДж на оксидную пленку.

Фотонная энергия лазерного излучения (5 эВ) больше, чем энергия запрещенной зоны ($E_g \sim 2,65 \text{ эВ}$) исследуемого оксида, следовательно, основным механизмом поглощения можно считать процесс генерации электронно-дырочных пар. Поскольку плотность потока мощности излучения ($3,9 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$) значительно превышает 10^4 Вт/см^2 , потери энергии на отражение и теплоотвод в подложку в процессе модификации можно не учитывать. Вся энергия лазерного излучения в основном расходуется на нагрев материала. Глубина проникновения тепловой энергии определяется выражением $(\alpha \cdot \tau)^{1/2}$ и составляет $\sim 350 \text{ нм}$, где α – температурный коэффициент диффузии $\sim 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, τ – длительность импульса $\sim 20 \text{ нс}$. Изменение температуры поверхности можно считать, используя формулу:

$$(\alpha \cdot \tau)^{1/2} \cdot \rho \cdot C_v \cdot \Delta T \equiv I_0 \cdot \tau,$$

где ρ – плотность $\sim 3,36 \text{ г/см}^3$, C_v – теплоемкость $\sim 0,70 \text{ Дж/г} \cdot \text{К}$, I_0 – интенсивность лазерного из-

лучения $\sim 3,9 \cdot 10^6$ Вт/см². Из выражения следует, что $\Delta T \sim 960$ К.

Как видно, при воздействии лазерного импульса температура поверхности достигает ~ 1250 К, что превышает температуру плавления аморфного оксида (~ 923 К). Однако рентгеноструктурные исследования обработанной пленки показали отсутствие начала процессов кристаллизации, то есть исследуемый материал до и после лазерного воздействия остается аморфным.

Теоретические исследования процессов теплопередачи и теплоотвода, представленные выше, показывают, что при импульсах с энергией более 50 мДж/см² температура поверхности оксида превышает температуру плавления. В таких условиях существенное изменение морфологии поверхности пленки можно объяснить с точки зрения процесса вытеснения расплава вследствие влияния мелкомасштабных неоднородностей давления паров испарившегося материала на поверхность [2].

Таким образом, максимально допустимая плотность энергии для используемого в работе модифицирующего излучения с применением исследуемого рабочего материала (пентаоксида ванадия) составляет 50 мДж/см². На рис. 10 показаны проявленные линии оксидно-ванадиевого резиста на кремниевой подложке.

Отметим, что чувствительность анодных оксидов ванадия к ультрафиолетовому излучению составляет ~ 1 мДж/см² [50]. Оценим чувствительность для исследуемых нами V₂O₅-пленок.

Согласно определению, чувствительность резистов характеризует минимальную энергию (дозу), необходимую для инициирования модификации физико-химических свойств (например, растворимости) чувствительного слоя. Как известно, интенсивность излучения при прохождении через вещество убывает по экспоненциальному закону:

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha d}$$

Здесь I_0 – интенсивность света на входе в поглощающий слой, d – толщина слоя, α – коэффициент поглощения. Профиль интенсивности света в толще резиста показан на рис. 11. Пороговая толщина $d_{пор}$, соответствующая пороговой интенсивности $I_{пор}$, отмечает границу между засвеченным и незасвеченным участками. Когда толщина резиста превышает $d_{пор}$, после экспонирования в структуре остается незасвеченный слой. Если теперь структуру подвергнуть жидкофазному травлению, будет наблюдаться эффект подтравливания под засвеченную область резиста и отслаивание его от подложки. В наших экспериментах при жидкофазном травлении V₂O₅-резиста в растворе ацетон : вода (2:1) подобного эффекта не наблюдалось. Резист травился равномерно до подложки, причем растворимость засвеченных участков была в 5 раз меньше исходных. Следовательно, при выбранных условиях облучения резист засвечивается

на всю толщину пленки. Зная I_0 , d и α , можно рассчитать интенсивность I на выходе из слоя. Если $I_0 = 2,5 \cdot 10^6$ Вт/см², $d = 120$ нм, $\alpha = 1,1 \cdot 10^7$ м⁻¹, то I составляет $6,4 \cdot 10^5$ Вт/см². Следовательно, энергия в импульсе длительностью 20 нс, соответствующая интенсивности I , составляет 13 мДж/см². Таким образом, можно заключить, что чувствительность исследуемого V₂O₅-резиста не хуже 13 мДж/см².

На основе полученных выше результатов проведем качественное сравнение оксидно-ванадиевого резиста с традиционными органическими резистами (на примере ПММА).

Селективность травления большинства материалов относительно ПММА составляет 1/4 (см. табл. 7).

Показан профиль интенсивности света I в толще резиста. Пороговая толщина $d_{пор}$, соответствующая пороговой интенсивности $I_{пор}$, отмечает границу между засвеченным и незасвеченным участками.

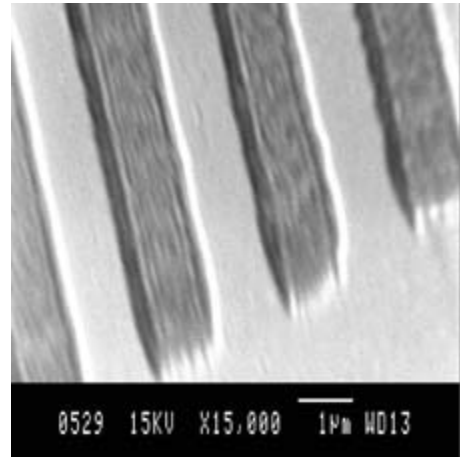


Рис. 10. Линии оксидно-ванадиевого (V₂O₅) резиста на кремниевой подложке.

Плотность модифицирующего излучения – 50 мДж/см²,
1 импульс.

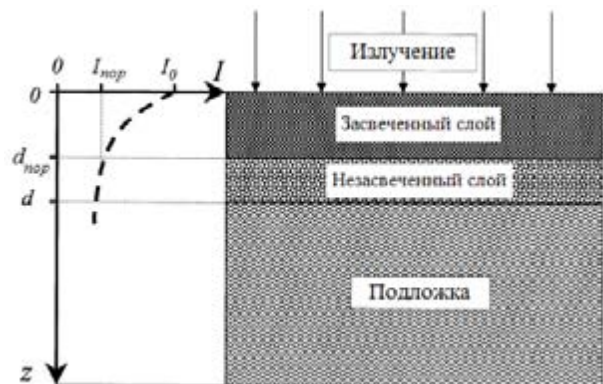


Рис. 11. Схематическое изображение исследуемой структуры: слой оксидно-ванадиевого резиста, нанесенный на подложку

Таблица 7
Сравнительные характеристики
 V_2O_5 -резиста, Al_2O_3 -резиста и ПММА
для ИЛТ

	V_2O_5 -резист	Al_2O_3 -резист	ПММА [56]
Чувствительность, мДж/см ²	50 (13) ($\lambda = 248$ нм)	40–100 (УФ)	> 500 ($\lambda = 248$ нм)
Скорость ИЛТ, нм/с	6–7	4,8–6	42–48
Минимальная толщина, мкм	< 0,05	0,03	> 0,15

Следовательно, с помощью ИЛТ через органическую резистивную маску (ОРМ) на основе ПММА толщиной 0,4–0,6 мкм нельзя вытравить материал на глубину более 0,1 мкм, а этого явно недостаточно в подавляющем большинстве случаев. Увеличение толщины ПММА приводит к возникновению нежелательного процесса переосаждения распыленных атомов рабочего материала при ИЛТ и в целом снижает селективность травления относительно ОРМ. Кроме того, толстые пленки ПММА усложняют процесс формирования ОРМ с необходимым профилем, что связано с эффектами недоэкспонирования со стороны поверхности пленки и рассеянием излучения в прямом и обратном направлениях [10]. Поэтому при ИЛТ бесполезно использовать толстые ОРМ. В случае же малой толщины резиста увеличивается вероятность образования точечных проклов. Зависимость скорости травления материала от угла падения ионного пучка приводит к изменению профиля ОРМ, что вызывает уход размеров создаваемого рисунка. Из сказанного выше следует вывод, что с помощью ИЛТ непосредственно через ОРМ нельзя получить рисунки с субмикронными размерами в слоях рабочих материалов необходимой толщины.

Резисты на основе оксидов ванадия обладают хорошей плазмостойкостью по сравнению с другими материалами. Стехиометрия резиста определяется только технологическим процессом осаждения, а толщина может варьировать от десятков нанометров до микрометров. Чувствительность представленного резиста к УФ-облучению сравнима с аналогами среди традиционных органических резистов или лучше их (табл. 7).

МЕХАНИЗМ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ МОДИФИКАЦИИ СВОЙСТВ ОКСИДОВ ВАНАДИЯ

На основе результатов, представленных в предыдущих разделах, рассмотрим возможный механизм трансформации свойств пленок аморфного пентаоксида ванадия под действием лазерного ультрафиолетового излучения высокой интенсивности.

Лазерная модификация инициирует рост плазмохимической стойкости материала в процессах ионно-лучевого и плазменного травле-

ния. Процесс физического распыления материалов характеризуется коэффициентом распыления (КР), который определяется как число атомов, выбиваемых из материала мишени одним падающим ионом.

Согласно теории физического распыления аморфных и поликристаллических материалов, разработанной Зигмундом [47], если энергия падающих под прямым углом к поверхности ионов E_u меньше некоторой величины E^* , КР выражается формулой:

$$S = \frac{3\beta m_u m_a E_u}{\pi^2 (m_u + m_a)^2 2E_{суб}},$$

где β – безразмерный параметр, зависящий от m_a/m_u , $E_{суб}$ – энергия сублимации материала мишени. В области энергий $E_u > E^*$

$$S = 4,2 \cdot 10^{18} \frac{\sum_y (E_u)}{2E_{суб}},$$

где величина $\sum_y (E_u)$ представляет собой ядерное тормозное сечение ионов.

Как видно из представленных выше выражений, КР обратно пропорционален энергии сублимации $E_{суб}$ материала мишени. При сублимации происходит удаление атомов с поверхности, где действует только половина связей [6]. Следовательно, чтобы удалить атом из объема материала, необходима энергия $2E_{суб}$. При столкновении с ионом атом не только выбивается из занимаемого им положения, но и внедряется в решетку, смещая другие атомы. Для осуществления такого процесса необходима энергия не менее $4E_{суб}$.

Из сказанного следует, что энергия сублимации в теории физического распыления Зигмунда характеризует энергию связи атомов вещества мишени.

Таким образом, уменьшение скорости травления, а следовательно, и коэффициента распыления пентаоксида ванадия вследствие лазерной обработки можно объяснить увеличением энергии сублимации распыляемого материала.

С другой стороны, рентгеноструктурный анализ пленок выявил лазерно-индуцированную модификацию атомной структуры V_2O_5 , то есть наблюдаются изменения топологической разупорядоченности (разупорядоченности ближнего порядка) и нарушения координации атомов металла и кислорода. Подобные трансформации структуры ближнего порядка допускают локальные флуктуации углов и, возможно, длин связи V–O–V, двугранных углов кислородных полиэдров и взаимных расположений последних в сетке оксида. Энергия связи V–O зависит от величины угла V–O–V в кислородном полиэдре. Следовательно, лазерное воздействие может инициировать такое структурное состояние вещества, в котором энергия связи атомов материала увеличится (увеличится энергия сублимации), что подтверждается в экспериментах по физическому травлению V_2O_5 .

Отметим, что в спектральной области фундаментального поглощения модифицированного пентаоксида ванадия наблюдается рост коэффициента поглощения материала, что может быть объяснено увеличением 2p-3d-гибридизации и вероятности 2p-3d – электронных переходов вследствие уменьшения средних V–O межатомных расстояний в оксиде.

Таким образом, механизм лазерно-иницированного роста стабильности V_2O_5 , полученного методом импульсного лазерного испарения, к ионно-лучевым воздействиям заключается в изменении топологической разупорядоченности и нарушении координации атомов металла и кислорода с образованием нового (по сравнению с исходным) структурного состояния вещества, в котором материал обладает большей энергией сублимации.

Электронно-лучевая модификация V_2O_5 -пленок

В ходе экспериментальных исследований, представленных в данном разделе, применялся образец 6.

Для экспонирования использовался электронный сканирующий микроскоп Zeiss DSM-942 с техническими характеристиками, позволяющими варьировать ускоряющие напряжения от 1 до 50 кВ, электронные токи – от 10 до 5000 пА. Сразу после экспонирования на поверхности оксида наблюдался хорошо различимый в оптический микроскоп рисунок. Чувствительность пленок составила 55–60 мкКл/см².

Электронно-микроскопическое исследование экспонированных образцов показало, что на их поверхности нет топологического рельефа (даже для больших экспозиционных доз, формирующих высококонтрастные рисунки), а наблюдаемый рисунок определяется изменением оптических свойств исходного материала под действием электронной бомбардировки.

Удовлетворительные результаты были получены при травлении оксида в растворе изопропанол : вода (3:1). На рис. 12 представлены проявленный прямоугольник $50 \cdot 40$ мкм² и линии (2 мкм), доза ~150 мкКл/см². Оксид ведет себя как положительный резист.

Размер вытравленного участка ~50 × 40 мкм², ширина линий ~4 мкм.

Наблюдаемый эффект селективного травления можно объяснить в рамках полупроводниковой теории окисления и восстановления оксидных фаз [40]. Согласно этой теории, растворение полупроводникового материала при контакте с электролитом сопровождается переносом электронов между ионами полупроводника и раствора, а скорость растворения зависит от концентрации электронов вблизи поверхности полупроводника. Таким образом, увеличение скорости травления экспонированных областей V_2O_5 -пленки может быть вызвано увеличением концентрации электронов в этих областях.

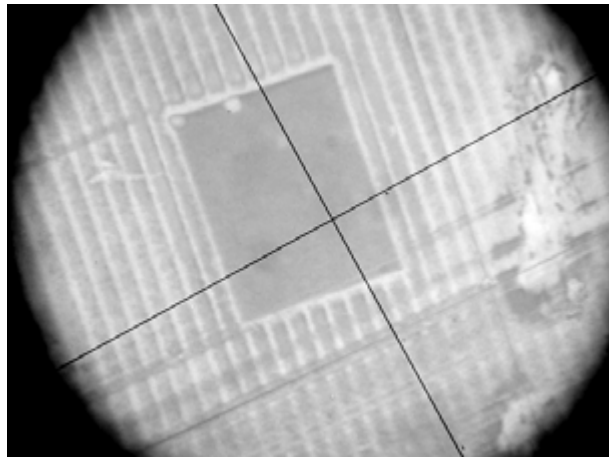


Рис. 12. Изображение модифицированной электронами (доза 150 мкКл/см²) поверхности V_2O_5 -пленки после проявления в водном растворе изопропанола

Эксперименты по ИЛТ модифицированных пленок ионами аргона не выявили селективности процесса. Происходит равномерное травление оксида. По-видимому, внедрение электронов в пленку не приводит к значительной трансформации структуры и стехиометрии оксида, и, следовательно, энергия сублимации материала не изменяется.

Отметим, что при разработке сухих методов проявления пентаоксида ванадия как неорганического электронорезиста может эффективно использоваться плазмохимическое травление в реактивных газах, таких как, например, CH_4 или SF_6 [50].

ВЫВОДЫ

Из проведенных экспериментов и теоретического анализа вытекают следующие основные выводы и результаты работы.

1. Разработан методика нанесения тонких пленок метастабильного аморфного пентаоксида ванадия с применением метода термического испарения в вакууме и метода импульсного лазерного испарения. Физико-химические свойства синтезированных таким образом пленок оксида ванадия модифицируются стационарным и лазерным ультрафиолетовым излучением, электронной бомбардировкой.
2. Воздействие стационарным и лазерным ультрафиолетовым излучением, электронной бомбардировкой на аморфные пленки оксида ванадия инициирует изменение физико-химических свойств, заключающееся, в частности, в росте плазменной и химической стабильности оксида, что делает его перспективным материалом для применения в микроэлектронике в качестве неорганического резиста.
3. Разработан селективный ионно-лучевой процесс проявления V_2O_5 -резиста. Среднее значение селективности ИЛТ составляет $2,8 \pm 0,2$. Материал ведет себя как негативный фоторезист.

4. Механизм модификации в результате стационарного ультрафиолетового облучения определяется процессами инжекции водорода и снижением валентности ванадия до V^{4+} с образованием водородной ванадиевой бронзы $H_xV_2O_5$.
5. Механизм лазерно-иницированного роста стабильности V_2O_5 к ионно-лучевым воздействиям заключается в изменении топологической разупорядоченности и нарушении координации атомов металла и кислорода с образованием нового (по сравнению с исходным) структурного состояния вещества, в котором материал обладает большей энергией сублимации.
6. После модификации и травления полученные структуры могут быть восстановлены методом отжига в вакууме до стехиометрии кристаллического VO_2 , обладающего фазовым переходом металл – полупроводник и эффектом переключения.
7. Разработанный процесс фотолитографии по оксидам ванадия является перспективным для создания микро- и наноприборов на ос-

нове двуокиси ванадия с ФПМП, совместимых с кремниевой электроникой, управляемых процессами в кремниевых структурах и входящих в состав кремниевых микрочипов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаем благодарность И. М. Некрыловой за ценные замечания.

Работа выполнена при поддержке Федерального Агентства РФ по науке и инновациям ГК № 02.513.11.3351 и ГК № 02.740.11.0395, аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (Министерство образования РФ, проекты № 4978 и 8051), Федерального агентства по образованию, федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 год» (контракты П1156, П1220), а также при поддержке Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF) № Y5-P-13-01.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешина Л. А., Малиненко В. П., Фофанов А. Д. Методика рентгенографического исследования тонкопленочных объектов на монокристаллических и поликристаллических подложках // Заводская лаборатория. 1991. Т. 57. Вып. 2. С. 39.
2. Арутюнян Р. В., Баранов В. Ю., Большов Л. А и др. Воздействие лазерного излучения на материалы. М.: Наука, 1989. 367 с.
3. Величко А. А., Стефанович Г. Б., Пергамент А. Л., Борисков П. П. Детерминированный шум в структурах на основе диоксида ванадия // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 10. С. 82–87.
4. Гаврилюк А. И., Рейнов Н. М., Чудновский Ф. А. Фото- и термохромизм в аморфных пленках V_2O_5 // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. Вып. 20. С. 227–230.
5. Данилин Б. С., Киреев В. Ю. Ионное травление микроструктур. М.: Сов. радио, 1979. 104 с.
6. Данилин Б. С., Киреев В. Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 264 с.
7. Дорожко Е. В., Савицкий В. Г. Оптическое поглощение пятиокиси ванадия в области энергий 1.0–5.5 эВ // ФТТ. 1977. Т. 10. Вып. 4. С. 953.
8. Кикалов Д. О., Малиненко В. П., Пергамент А. Л., Стефанович Г. Б. Оптические свойства тонких пленок аморфных оксидов ванадия // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 8. С. 81.
9. Костышин М. Т., Михайловская Е. В., Романенко П. Р. Об эффекте фотографической чувствительности тонких полупроводниковых слоев, находящихся на металлических подложках // Физика твердого тела. 1966. Вып. 8. С. 571.
10. Моро У. Микролитография: В 2 ч. Ч. 1: Пер. с англ. М.: МИР, 1990. 605 с.
11. Озеров Р. П. Молибдена, ванадия и вольфрама кислородные соединения, их кристаллохимия // Успехи химии. 1955. Т. 24. Вып. 8. С. 951.
12. Baba M., Ikeda T. A new inorganic electron resist using amorphous WO_3 films // Japanese Journal of Applied Physics. 1981. Vol. 20(2). P. 149–152.
13. Benmoussa M., Outzourhit A., Bennouna A., Ameziane E. L. Electrochromism in sputtered V_2O_5 thin films: structural and optical studies // Thin Solid Films. 2002. Vol. 405. P. 11–16.
14. Bozler C. et al. Solid-transformation thermal resist: US Patent. 1986. 4619894.
15. Cheremisin A. B., Loginova S. V., Velichko A. A., Putrolaynen V. V., Pergament A. L., Grishin A. M. Modification of Atomic Structure of Thin Amorphous V_2O_5 Films under UV Laser Irradiation // Journal of Physics: Conference Series. 2008. Vol. 100. P. 052096.
16. Chudnovskii F. A., Pergament A. L., Schaefer D. A., Stefanovich G. B. Effect of laser irradiation on the properties of transition metal oxides // J. Sol. St. Chem. 1995. Vol. 118. P. 417–418.
17. Duchene J., Terrailon M., Pailly M. R. F. and D. C reactive sputtering for crystalline and amorphous VO_2 thin film deposition // Thin Solid Films. 1972. Vol. 12. P. 231–234.
18. Frost F., Schindler A., Bigl F. Reactive ion beam etching of InSb and InAs with ultrasoft surfaces // Semicond. Sci. Technol. 1998. Vol. 13. P. 523.
19. Gavrilyuk A. Nature of photochromism in amorphous V_2O_5 thin films // Proc. of the SPIE. The Int. Society for Optical Engineering. 1997. Vol. 2968. P. 195–200.
20. Gavrilyuk A. I., Mansurov A. A., Chudnovskii F. A. Photoinjection of hydrogen in amorphous MoO_3 and V_2O_5 films // Sov. Tech. Phys. Lett. 1984. Vol. 10. P. 292–293.
21. Glen A. N., Buhman R. A. Summary Abstract: Preparation and optical properties of reactively evaporated VO_2 thin films // Vac. Sci. Technol. 1984. Vol. A2 (2). P. 301–302.

22. Han S. Y., Lee D. H., Chang Y. J., Ryu S. O., Lee T. J., Chang C. H. The Growth Mechanism of Nickel Oxide Thin Films by Room-Temperature Chemical Bath Deposition // *J. Electrochem. Society*. 2006. Vol. 153. № 6. P. C382.
23. Han Young Yu, Byung Hyun Kang, Ung Hwan Pi, Chan Woo Park, and Sung-Yool Choi, Gyu Tae Kim. V_2O_5 nanowire-based nanoelectronic devices for helium detection // *Appl. Phys. Lett.* 2005. Vol. 86. P. 253102.
24. Imada M., Fujimori A., Tokura Y. Metal-insulator transitions // *Rev. Mod. Phys.* 1998. Vol. 70. P. 1059–1063.
25. Iwanaga S., Darling R. B., Cobden D. H. Preparation of coiled carbon fibers by pyrolysis of acetylene using a Ni catalyst and sulfur or phosphorus compound impurity // *Appl. Phys. Lett.* 2005. Vol. 86. P. 133113.
26. Julien C., Guesdon J. P., Gorenstein A., Khelifa A., Ivanov I. The influence of the substrate material on the growth of V_2O_5 flash-evaporated films // *Appl. Surface Science*. 1995. Vol. 90. P. 389–391.
27. Julien C., Haro-Poniatowski E., Camacho-Lopez M. A., Escobar-Alarcon L., Jimenez-Jarquín J. Growth of V_2O_5 thin films by pulsed laser deposition and their applications in lithium microbatteries // *Materials Science and Engineering*. 1999. Vol. B65. P. 170–176.
28. Kim B.-J., Lee Y.-W., Chae B.-G., Yun S.-J., Oh S.-Y., Kim H.-T., Lim Y.-S. Optical properties of synthesized organic nanowires // *Appl. Phys. Lett.* 2007. Vol. 90. P. 023515.
29. Kim H.-T., Chae B.-G., Youn D.-H., Aeng S.-L., Kim G., Kang K.-Y., Lim Y.-S. Mechanism and observation of Mott transition in VO_2 -based two- and three-terminal devices // *New J. Phys.* 2004. Vol. 6. P. 52.
30. Koshida N., Ohtaka K., Ando M., Komuro M., Anoda N. Focused Ion Beam Lithography with Transition Metal Oxide Resists // *Japanese Journal of Applied Physics*. 1989. Vol. 28 (10). P. 2090–2094.
31. Lis S. A., Lavine J. M., Goldberg G. M. Options and opportunities with inorganic photoresist systems // *Mat. Proc. of SPIE*. 1984. P. 393–394.
32. Liu Z., Fang G., Wang Y., Bai Y., Yao K.-L. Laser-induced coloration of V_2O_5 // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2000. Vol. 33. P. 2327–2332.
33. Min M.-R., Kim J.-H., Kim E.-K., Kim Y.-K., Ha J.-S., Kim K.-T. Electrical properties of V_2O_5 (vanadium pentoxide) nanowires // *J. Korean Phys. Soc.* 2006. Vol. 49. 1097–1100.
34. Moshfegh A. Z., Ignatiev A. Formation and characterization of thin film vanadium oxides: Auger electron spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, X-ray diffraction, scanning electron microscopy, and optical reflectance studies // *Thin Solid Films*. 1991. Vol. 198. P. 251–268.
35. Nagase K., Shimizu Y., Miura N, Yamazoe N. Oriented lead germanate thin films by excimer laser ablation // *Appl. Phys. Lett.* 1992. Vol. 60. P. 802–804.
36. Nishio S., Kakihana M. Evidence for Visible Light Photochromism of V_2O_5 // *Chem. Mater.* 2002. Vol. 14. P. 3730–3733.
37. Nobuyoshi K., Koichi O., Masanobu A, Masanori K, Nobufumi A. Formation of Nickel Oxide Thin Films by Electrodeposition and Their Electrochromic Characteristics. // *J. Appl. Phys. Japan*. 1988. Vol. 27. P. 314–318.
38. Okamoto M., Baba M., Ikeda T. Application of MoO_3 Electron Resist to Lift-Off Process // *Japanese Journal of Applied Physics*. 1990. Vol. 29 (3). P. 518–520.
39. Pang S. W., Kunz R. R., Rothschild M., Goodman R. B., Horn M. W. Aluminum oxides as imaging materials for 193-nm excimer laser lithography // *J. Vac. Sci. Technol.* 1989. Vol. 7 (6). P. 1624.
40. Peter Van Zant. *Microchip Fabrication*. 3rd ed. McGraw-Hill Companies, 1997. 623 p.
41. PMMA resists // http://www.microchem.com/products/pdf/PMMA_Data_Sheet.pdf.
42. Putrolaynen V. V., Velichko A. A., Pergament A. L., Cheremisin A. B., Grishin A. M. UV patterning of vanadium pentoxide films for device applications // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2007. Vol. 40. P. 5283–5286.
43. Rajendra Kumar R. T., Karunagaran B., Senthil Kumar V., Jeyachandran Y. L., Mangalaraj D., Narayandass Sa. K. Structural properties of V_2O_5 thin films prepared by vacuum evaporation // *Materials Science in Semiconductor Proc.* 2003. Vol. 6. P. 543–546.
44. Ramana C. V., Naidu B. S., Hussain O. M., Pinto R. Low-temperature growth of Vanadium pentoxide thin films produced by pulsed laser ablation // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2001. Vol. 34. P. L35.
45. Rozen J., Lopez R., Haglund Jr. R. F., Feldman L. C. Effects of polymer gate dielectrics roughness on pentacene field-effect transistors // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 88. P. 081902.
46. Sarunic M. V., Chapman G. H., Tu Y. Prototype laser-activated bimetallic thermal resist for microfabrication // *Mat. Proc. of SPIE*. 2001. Vol. 4274. P. 183.
47. Sigmond P. Theory of sputtering // *Phys. Rev.* 1969. Vol. 184. № 2. P. 383.
48. Sinclair W. R., Rousseau D. L., Stancavish J. J. Iron Oxide – An Inorganic Photoresist and Mask Material // *J. Electrochem. Soc.* 1974. Vol. 121 (7). P. 925.
49. Smith D. J., McCartney M. R., Bursill L. A. The electron-beam-induced reduction of transition metal oxide surfaces to metallic lower oxides // *Ultramicroscopy*. 1987. Vol. 23. P. 299–303.
50. Stefanovich G. B., Pergament A. L., Velichko A. A., Stefanovich L. A. Anodic oxidation of vanadium and properties of vanadium oxide films // *J. Phys.: Cond. Mat.* 2004. Vol. 16. P. 4013–4024.
51. Tai K. L., Sinclair W. R., Vadimsky R. G. Bilevel high resolution photolithographic technique for use with wafers with stepped and/or reflecting surfaces // *J. Vac. Sci. Technol.* 1979. Vol. 16 (6). P. 1977.
52. Thomas I. Ryoung-han Kim, Bruno La Fontaine, Patrick P., Anderson Ch. N., Sandberg R. L. Progress in EUV photoresist technology // *Mat. Proc. of SPIE*. 2007. 6533, 653317.
53. Wakaki M., Nakao R., Sakata H., Shibuya T., Yoshikado A. Maskless patterning characteristics of vanadium pentoxide amorphous films by frequency-doubled Q-seitched Nd:YAG laser irradiation // *Proc. of SPIE – The Int. Society for Optical Engineering*. 2002. Vol. 4915. P. 317–325.
54. Warren B. E. *X-ray diffraction*. New York, 1969. 563 p.
55. Wu Q.-H., Thissen A., Jaegermann W. Photoelectron Spectroscopy of Na Intercalation into V_2O_5 Thin Films // *Sol. St. Ion*. 2004. Vol. 167. P. 155–163.
56. Yoshitaka F., Katsuhiko M., Chie T. On the Electrochromism of Evaporated V_2O_5 Films // *Japan J. Appl. Phys.* 1985. Part 1. Vol. 24. P. 1082–1086.

УДК 537.535:538.6

МАКСИМ СЕРГЕЕВИЧ ГОЛУБЕВ

аспирант кафедры общей физики 1-го физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета
maksider@yandex.ru

ЕЛЕНА СОСЛАНОВНА ДЗЛИЕВА

кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры общей физики 1-го физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета
Viktor.Karasev@pobox.spbu.ru

МАКСИМ АНАТОЛЬЕВИЧ ЕРМОЛЕНКО

аспирант кафедры общей физики 1-го физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета
Viktor.Karasev@pobox.spbu.ru

АРТЕМ ЮРЬЕВИЧ ИВАНОВ

аспирант кафедры общей физики 1-го физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета
artyom_ivanov@hotmail.ru

ВИКТОР ЮРЬЕВИЧ КАРАСЕВ

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики 1-го физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета
Viktor.Karasev@pobox.spbu.ru

А.ЛЕКСЕЙ ИГОРЕВИЧ ЭЙХВАЛЬД

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики 1-го физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета
eichel@e-mail.ru

**УПРАВЛЕНИЕ ПЛАЗМЕННЫМИ СТРУКТУРАМИ И ОТДЕЛЬНЫМИ ЧАСТИЦАМИ
В ГАЗОВЫХ РАЗРЯДАХ**

В настоящей работе приводится обзор применения методов воздействия разной природы на пылевые структуры с целью осуществления управления – изменения их локализации внутри разрядов, их формы, внутреннего расположения отдельных частиц. Акцент ставится на иллюстрации конкретных реализаций воздействий – описаны способы, виды рабочих камер и полученные результаты. Представленные методы воздействия и диагностики могут быть использованы в технологических процессах при работе с микро- и наночастицами.

Ключевые слова: газовый разряд, пылевая плазма, динамика уединенной пылевой частицы, макрочастицы, наночастицы

Макрочастицы размером от десятков нанометров до десятков микрометров, находящиеся внутри газовых разрядных камер, способны влиять на свойства основной плазмы. Например, в работе [1] количественно были обнаружены такие влияния на вольт-амперные характеристики тлеющего разряда, а в работах [22], [27] описано изменение электронной концентрации при росте и агломерации наночастиц. В [1] обнаружено изменение оптических свойств разряда. Следовательно, для работы газоразрядных устройств в условиях возможного появления пылевых частиц необходимо учитывать их влияние на разряд. В энергетических устройствах и установках ИТЭР [23] появление частиц вблизи стенок может приводить к срывам.

В современных технологических процессах обработки поверхностей, плазменном травлении и напылении, пылевые частицы являются нежелательным побочным продуктом. Например, при

изготовлении компьютерных микрочипов вырванные ионами фрагменты материала зависят в виде облаков над изготавливаемыми образцами. В случае их последующего осаждения при существенной агломерации или росте размеров со временем появляется брак в выходящей продукции [24], [27], [45]. На производствах сегодня применяется контроль пылевых облаков в камерах при помощи рассеяния лазерного излучения, а также используются специальные устройства для удаления частиц.

Для оптимизации работы технологических устройств, в которых используется или может появляться пылевая компонента, необходимо применять стойкие к плазменному воздействию материалы покрытия стенок и использовать в качестве управления пылью методы динамики, развитые в последние годы в фундаментальных научных исследованиях пылевой плазмы. Краткое представление последних является предме-

том настоящей статьи, основанной как на специальной учебной литературе и научной периодике, так и на собственных исследованиях авторов [8], [9], [10], [14]. Ряд обзорных изложений можно найти в работах [16], [17], [18].

1. МЕТОДЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Методы воздействия, используемые в лабораторных и промышленных установках, способны действовать на пыль, находящуюся внутри разрядных камер. Они основаны на применении динамики пылевых частиц, описанной в ряде публикаций [16], [20], [25], [37], [39]. Не повторяя их подробно, остановимся на конкретных реализациях воздействий.

1.1. Термофоретическое воздействие может быть рассмотрено на примере работ [1], [3]. За счет внешних по отношению к камере источников тепла создается управляемый температурный градиент нейтрального газа разрядов, в которых находится пылевая компонента. Радиальная позиция частиц определяется силовым балансом между силой термофореза, направленной против градиента температуры, и электрической силой, связанной с амбиполярным полем разряда. При изменении баланса сил возможно вытеснять частицы из приосевой части камеры, оттеснять их к стенкам, разрывая объемную структуру на отдельные части и управлять формой пылевого образования. На рис. 1 показано вертикальное сечение пылевого образования, смещенное из центра разрядной трубки за счет разного нагрева ее стенки.

Размер кадра по горизонтали – 14 мм. Штрихованной линией обозначена ось разряда. Частицы – ниобат лития размером 2–4 мкм. Подсветка вертикальной плоскостью толщиной 1 мм. Условия: газ – неон, давление $p = 0,7$ Торр, разрядный ток $i = 2,5$ мА.

1.2. Сфокусированное излучение лазера, воздействуя на отдельную частицу, может выводить ее из пылевого образования. Подобные эксперименты использовались в работах [28], [40] для диагностики заряда гранул и при исследовании характера сил взаимодействия между пылинками. Рис. 2 и 3 в [40] показывают смещение нижней по потоку ионов частиц при смещении верхней пылинки в сформированном ими рядце-цепочке. Таким образом, воздействуя на верхний слой, оказывается возможным сдвигать все пылевое образование. Аналогичные результаты наблюдались в слабом магнитном поле при вращательном движении пылевых структур (рис. 2).

1.3. Электростатическое воздействие производится полями, создаваемыми электродами разрядных камер или дополнительными электродами и электрическими зондами, вносимыми или перемещаемыми внутри объема камер.

Первые работы (например, [42], см. также [19]) имели целью диагностику параметров пылинки – электрического заряда на их поверхности. Эта задача реализуется в два этапа. Сначала

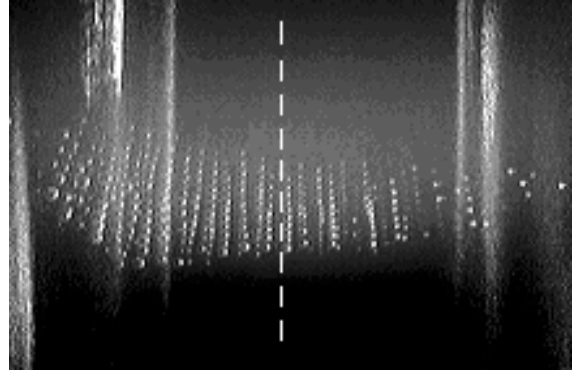
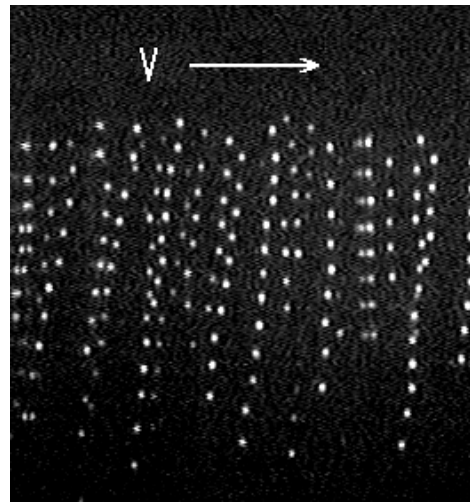
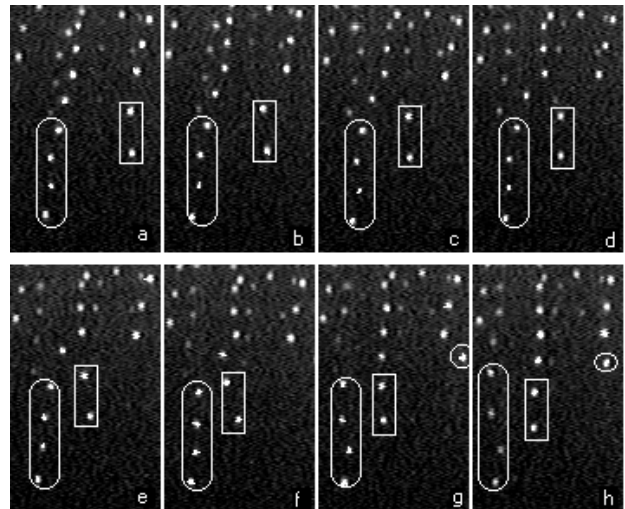


Рис. 1. Вертикальное сечение структуры, смещенной влево с оси разряда с помощью силы термофореза



а)



б)

Рис. 2. а) Вертикальное сечение вращающейся в магнитном поле структуры. Стрелкой обозначено направление движения в показанном сечении. $B = 150$ Гс. Размер кадра по вертикали – 2,8 мм. Частицы – ниобат лития размером 2–4 мкм.

Условия: Ne с малой примесью воздуха, $p = 0,7$ Торр, $i = 1,7$ мА. б) Процесс разрыва цепочек, на рисунке обведены фрагменты цепочек, движущихся как целое

в плазменно-пылевую ловушку вводится единственная частица, по ней определяют распределение потенциала в ловушке. Далее на силовой электрод подается переменная составляющая потенциала, вызывающая периодические или аperiodические движения частицы, после чего по видеозаписи исследуется движение частицы и определяется ее заряд.

Частицы микронного размера для диагностики плазмы и газов использовались и до появления пылевой плазмы. Например, в [21] изложены методы измерения характеристик переноса – теплопроводности и вязкости – по наблюдению за падающими в разряде частицами сферической формы. В [4] указано на возможность измерения диффузии частиц по наблюдению модуляции их блеска.

Электростатическое воздействие используется для управления внешней формой пылевых образований. В работе [41] и других на нижний электрод помещались дополнительные вставки в виде вертикальных игл. На каждую из них подавались независимые потенциалы, различной комбинацией которых производилось изменение формы структуры, а также ее движение в горизонтальном направлении (рис. 3).

Вытеснение пылевых частиц из конкретного места разрядной камеры может быть достигнуто помещением в эту область макротела, подвеса или зонда, находящегося под плавающим потенциалом или с поданным на него отрицательным потенциалом. В работе [35] вблизи частиц располагался провод, на который подавался постоянный или переменный потенциал, что изменяло положение частиц в одном с проводом горизонтальном сечении. В работе [43] применялся сегментный электрод, на каждое кольцо которого подавался свой потенциал (рис. 4). Среди результатов можно отметить полученные в вертикальном сечении структуры конической формы (рис. 5) и кольцевого облака при немонотонной зависимости потенциала в радиальном направлении (рис. 6).

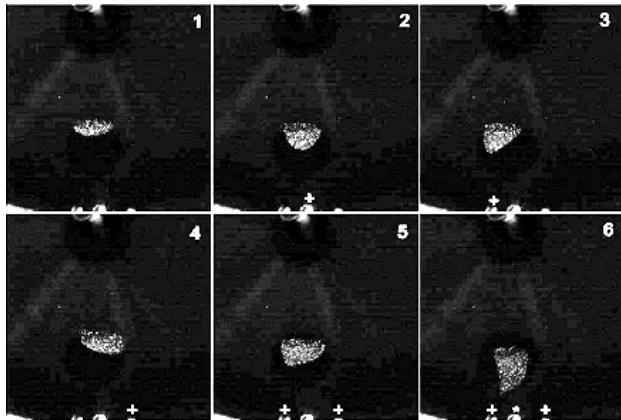


Рис. 3. Варианты облака различной формы, получаемые при различной комбинации потенциалов на дополнительных электродах

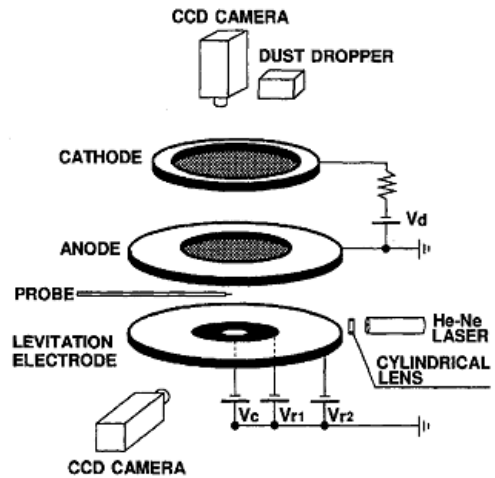


Рис. 4. Схема установки с сегментными электродами

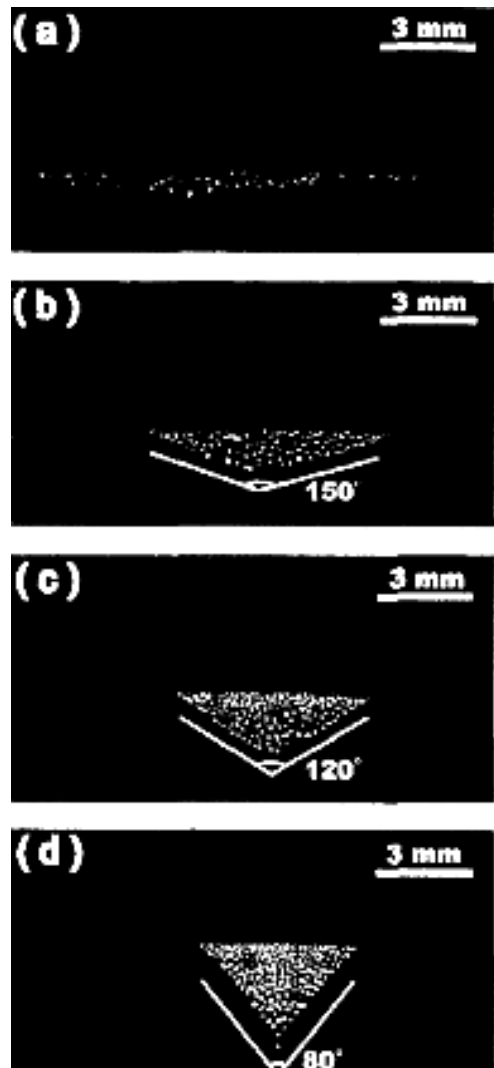


Рис. 5. Демонстрация управления формой облака

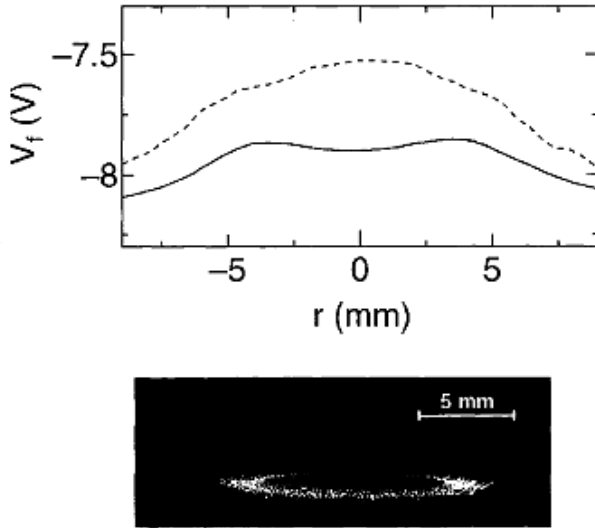


Рис. 6. Получение кольцевого облака

Применение пары заряженных проводящих пластин либо трубки позволяет удалить из разрядной камеры пылевые частицы, что использовалось в работах [5], [37]. Рис. 7 показывает влияние таких пластин на движение пыли. Примененные позднее трубки предназначались для очистки электродов и объема камеры (рис. 8). В [5] трубка-пылесос применена для дистанционного извлечения пыли из камер с ядерно-возбуждаемой плазмой.

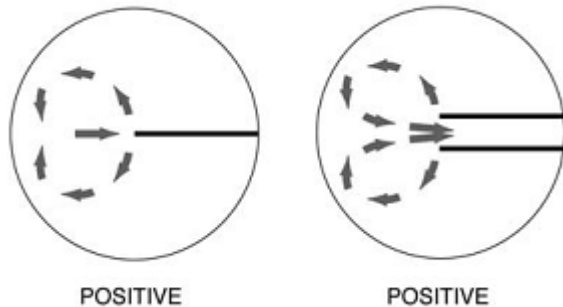


Рис. 7. Пылевые вихри вблизи двух заряженных пластин



Рис. 8. Процесс удаления пылевых структур пылесборником

1.4. Наклон разрядной камеры как целого создает «скагивающую» составляющую силы тяжести, что приводит к самопроизвольному «стеканию» структуры к боковой стенке камеры, откуда ее удаление производится существенно проще. Данное воздействие было предложено в наших исследованиях [6], [7] и служило для перемещения пылевой структуры внутри камеры из приосевой области к пристеночной (рис. 9, 10).

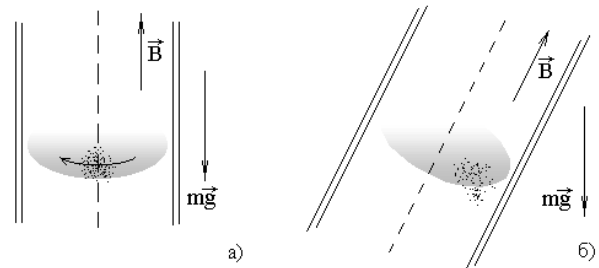
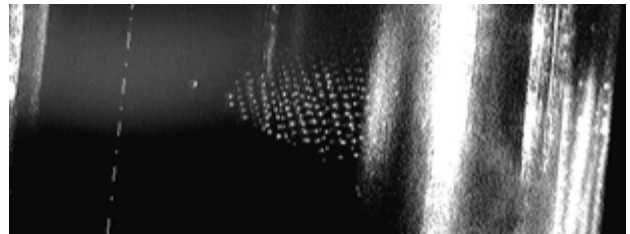


Рис. 9. Изображение пылевого облака в страте и геометрия разрядной трубки при ее наклоне в поле силы тяжести:

а) без наклона трубки, б) при ее наклоне. При переходе от а) к б) первоначально существующее вращение в магнитном поле (показано стрелкой на рис. 9а) прекращается. Структура смещается к стенке трубки и удерживается радиальным электрическим полем.

Рис. 10. Вид сбоку структуры, смещенной с оси разряда с помощью наклона разрядной трубки на угол 6° к вертикали.

Размер кадра по горизонтали – 19 мм. Частицы – ниобат лития размером 2–4 мкм. Подсветка вертикальной плоскостью толщиной 1 мм. Условия: неон, $p = 0,7$ Торр, $i = 2,5$ mA.

Отметим, что данное воздействие, как и термофоретическое, является воздействием неэлектрической природы и очень удобно тем, что действует непосредственно на пылевые частицы, но не на плазменные. Поэтому его очень удобно использовать в сочетании с другими воздействиями, например с наложенным магнитным полем [11]. При комбинации воздействий в камерах можно не только смещать структуры, но и перемешивать частицы внутри пылевого облака.

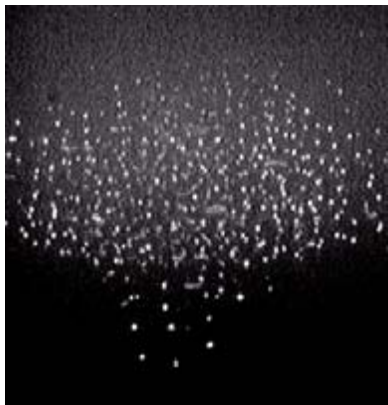
1.5. Наложение магнитного поля первоначально применялось для изучения сил, действующих на пылевые частицы, в частности сил, оказываемых потоками плазмы [31], [33], [44], затем оно использовалось для придания структурам заданной формы. Обзор работ по магнитному полю был представлен ранее в [8], [17], [36]. Некоторые новые данные см. в [26], [29], [32].

Можно управлять процессом образования и изменения внешних и внутренних характеристик пылевых структур, комбинируя свойства порошков и разрядных условий, а также используя перечисленные выше методы воздействия.

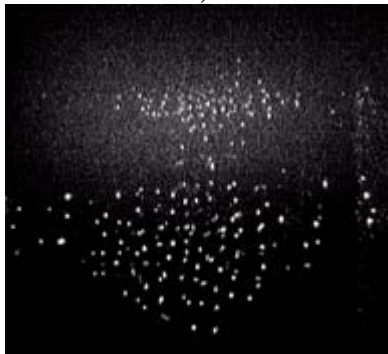
2. СОЗДАНИЕ ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Используя существенно разные по дисперсности засыпные порошки, можно добиваться левитации структур на разных вертикальных координатах в одном разряде. Меняя разрядные условия, можно создавать благоприятные условия либо для верхнего, либо для нижнего пылевого облака (рис. 11, 12, 13 [12]).

Структуры можно вертикально вытягивать в разряде постоянного тока. Подобные исследования выполнялись при криогенных температурах [2], получены структуры длиной до 12 см (см. также [15], [34]). Фрагменты протяженной структуры показаны на рис. 14 [10]. Образованию более протяженных структур препятствовал отрыв верхних элементов по 3–7 частиц, что показано на рис. 15.



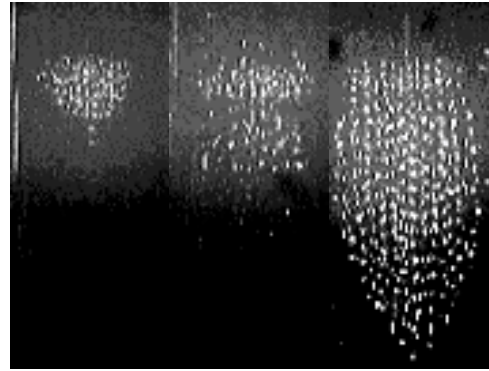
а)



б)

Рис. 11. а), б) Двойные структуры (вертикальные сечения), сформированные из более легких частиц сверху (в центре светящейся части страты) и более тяжелых внизу (под светящейся частью страты):

условия: частицы кварца с характерными размерами 5 и 10 мкм, газ Ne, $p = 0,7$ Торр, $i = 2$ мА. Горизонтальный размер изображения: а) 7,2 мм, б) 9,5 мм.



а) б) в)

Рис. 12. Динамика формирования структуры из полидисперсных частиц

Al_2O_3 в Ar, $i = 1$ мА, $P = 0,2$ Торр. Горизонтальный размер – 4 мм. Из первоначально созданной структуры методом ВЧ-воздействия отфильтрована фракция мелких частиц, на рис. 12а они в центре головы страты, рис. 12б – начало формирования большой структуры при инъекции новой порции частиц, рис. 12в – окончательно сформированная структура. Первоначальное и новое формирования разделены граничным слоем, в котором отсутствуют частицы.

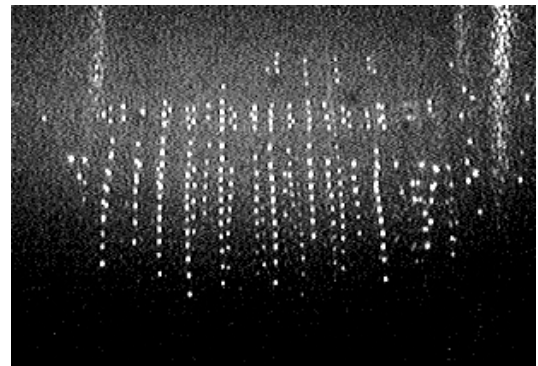


Рис. 13. Вертикальное сечение пылевого образования из трех структур, разделенных двумя горизонтальными граничными слоями:

условия: частицы $LiNbO_3$, газ Ne, $p = 0,7$ Торр, $i = 2$ мА. Горизонтальный размер изображения – 9,5 мм.

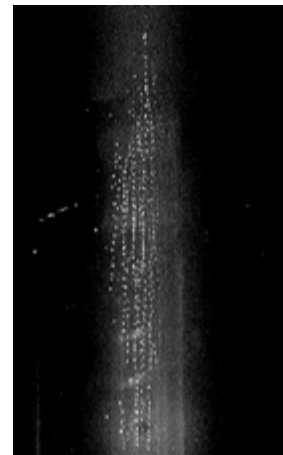


Рис. 14. Фрагмент сечения протяженной пылевой структуры, образованной вертикально вытянутыми цепочками частиц:

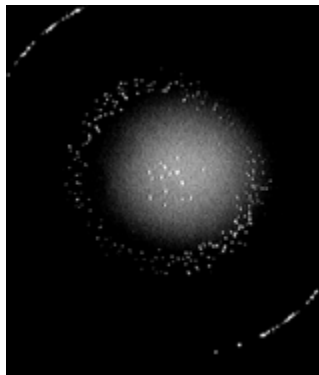
горизонтальный размер изображения – 2,5 см. Условия: газ – воздух, частицы – полидисперсный кремний плотностью $2,5$ г/см³, давление – 0,3 Торр, разрядный ток – 2 мА.



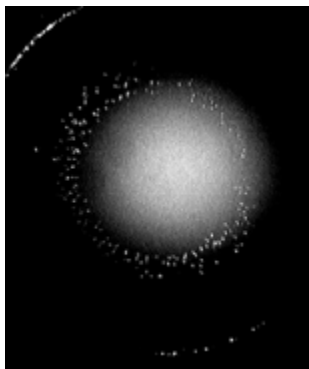
Рис. 15. Последовательные моменты формирования, отрыва и подъема верхних частей пылевой структуры (приведенной на рис. 14):

риской отмечена частица, не участвующая в подъеме цепочки. Интервалы времени между кадрами 1–12 равны 200, 80, 240, 280, 1880, 240, 120, 160, 1800, 1960, 1640 мс соответственно.

Сложные образования в горизонтальном сечении, формируемые за счет неоднородного тепловыделения [1], [3] и за счет применения полидисперсных несферических частиц [14], показаны на рис. 16. В магнитном поле такая неоднородность может существенно усиливаться [29].



а)



б)

Рис. 16. Сложные структуры в горизонтальном сечении:

условия: частицы кварца с характерными размерами 2 и 5 мкм; газ – неон, давление 0,7 мм рт. ст., разрядный ток $i = 1,4$ мА (а), $i = 2$ мА (б).

Механизм изменения положения частиц при воздействиях и изменении разрядных условий наиболее наглядно может быть наблюдаем на элементарных фрагментах структур – горизонтальных кластерах и вертикальных цепочках. Рис. 17 демонстрирует уменьшение межчастичного расстояния при увеличении числа частиц в кластере. На рис. 18 показано изменение межчастичного расстояния при вариации разрядного тока, показывающей существенную анизотропию структуры. К изменению межчастичного расстояния приводят и столкновительные эксперименты с двумя пылевыми структурами. В данном случае изменение концентрации пыли остается устойчивым (рис. 19) и может отражать процессы динамики формирования структуры как в лабораторных экспериментах, так и в космических пылевых образованиях.

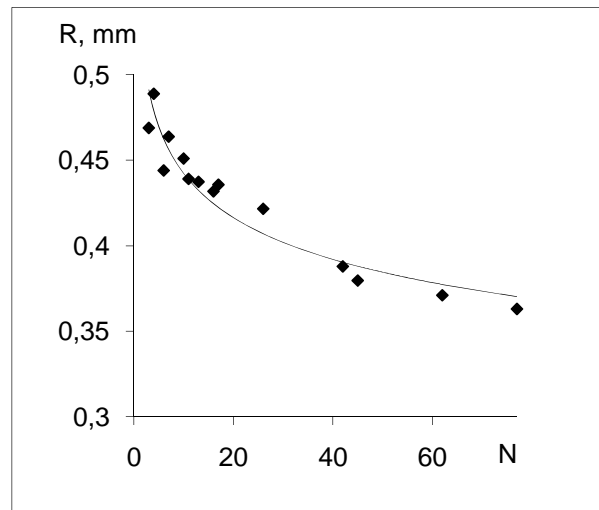


Рис. 17. Зависимость горизонтального межчастичного расстояния в кластере от числа частиц N

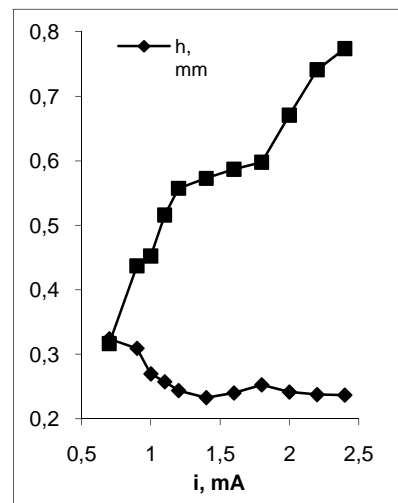
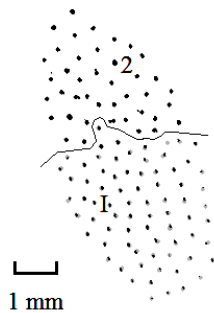


Рис. 18. Зависимость межчастичного расстояния от условий разряда. Продольное h и радиальное r расстояния в малом кластере в зависимости от тока



а)



б)

Рис. 19. а) Динамика столкновения двух структур (вид сверху, горизонтальное сечение структуры):

условия: газ – неон, давление $P = 0,8$ Торр, разрядный ток $i = 1$ мА. Наложено 19 последовательных видеокадров, частота съемки – 1 кадр/с, время записи – 19 с. б) Граница, разделяющая в новой структуре две области (1 и 2) с отношением плотностей $n_1/n_2 = 1,4$.

3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ОТДЕЛЬНЫМИ ПЫЛЕВЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Данные эксперименты в первую очередь представляют интерес для целей диагностики. Кроме того, они могут применяться для изучения взаимодействия потока плазмы с поверхностью гранулы, прецизионного осаждения частиц на поверхность образцов и пленок, а также для модификации материала пылинок в разрядах. На рис. 20 представлена установка, модифицированная по сравнению с [36] и позволяющая извлекать частицы из разряда, а также наблюдать отдельные гранулы с высоким оптическим увеличением [30]. Рис. 21 демонстрирует распределение по размерам полых микросфер, имеющих первоначальные размеры при инъекции 5–60 мкм. В данном случае сепарация частиц в разряде осуществляется по толщине стенок сфер. Диаграмма на рис. 22 пока-

зывает сепарацию полидисперсных частиц кремния, их вариации по характерному среднему проекционному размеру и по фактору формы [14].

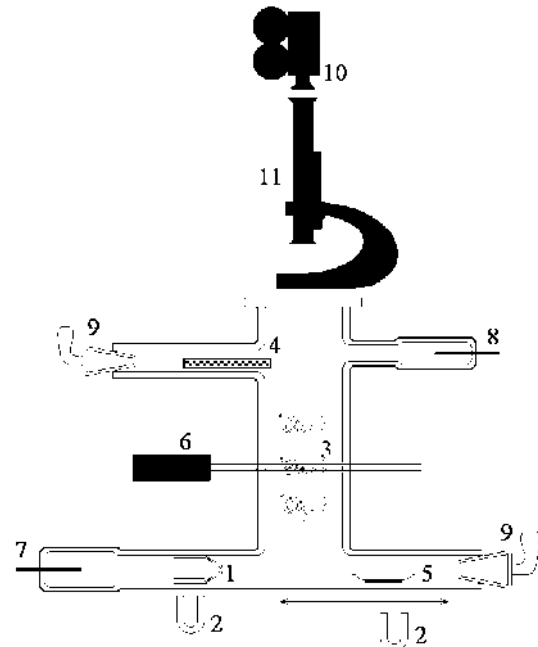


Рис. 20. Экспериментальная установка для наблюдения отдельных частиц:

1 – подвижная диафрагма; 2 – магнит; 3 – страты; 4 – контейнер с частицами; 5 – контейнер для собирания частиц; 6 – лазер; 7 – катод; 8 – анод; 9 – вакуумные краны; 10 – видеокамера; 11 – микроскоп.

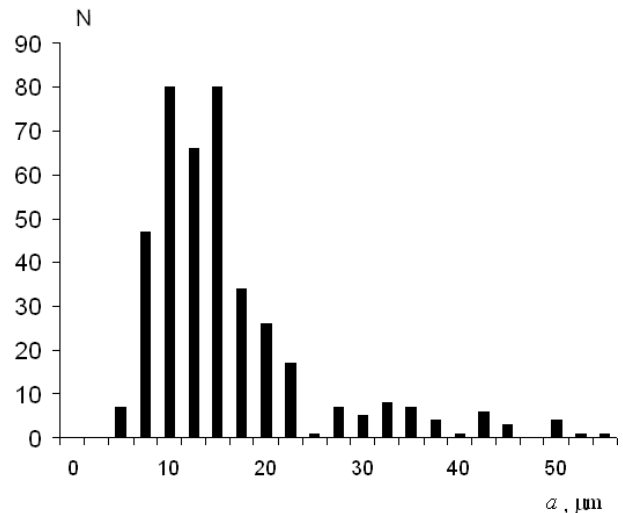


Рис. 21. Распределение по размерам макросфер, левитировавших в разряде:

условия: газ – Ne, давление 0,2 Торр, разрядный ток – 1 мА, a – радиус сферы. Гистограмма построена по данным для 400 частиц.

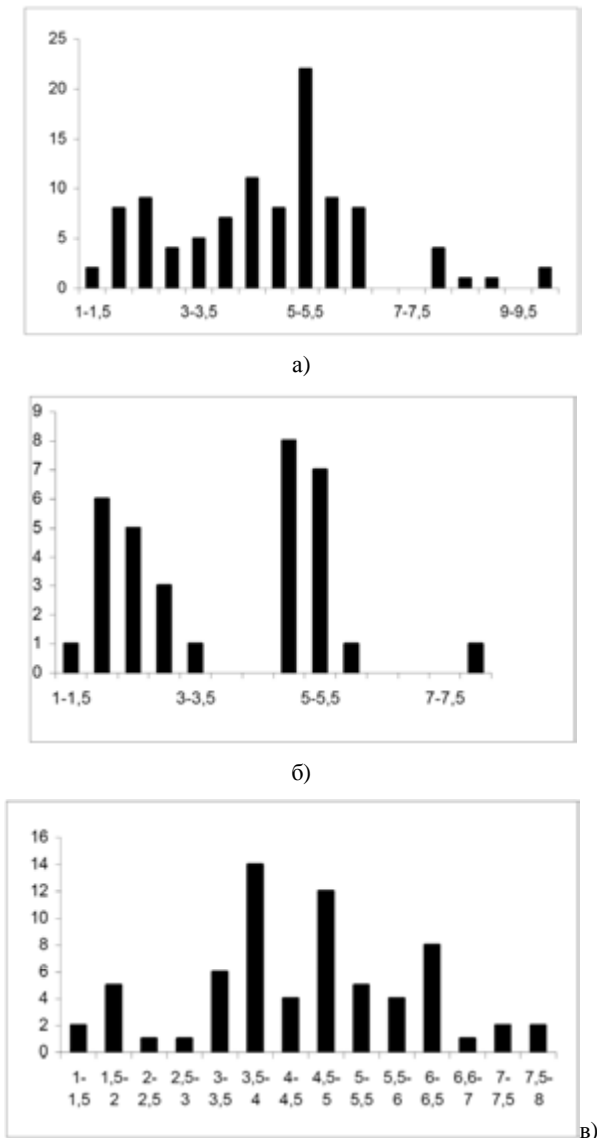


Рис. 22. (а) Распределение по характерному размеру частиц, левитировавших в разряде:

гистограмма построена по данным для 102 частиц. (б) Выборка из гистограммы 22а, соответствующая условно «квадратным» частицам для соотношения между характерными размерами d_{max} и d_{min} менее 1,25. (в) Выборка из гистограммы 22а, соответствующая условно «вытянутым» частицам.

Собственное вращательное движение частиц-сфер и сфер, имеющих дефекты, размером 15–60 мкм, частиц ниобата лития размером 0,5–2,0 мкм и частиц кремния может быть использовано для наблюдения изменения характеристик разряда [13], [30].

На примере отдельных частиц можно изучать магнитные свойства пылевой плазмы – ориентацию магнитных моментов частиц. Предварительные эксперименты показывают проявление парамагнитных свойств пылевых частиц, величину магнитного момента отдельной гранулы до 10^5 магнетонов Бора, наблюдение агломерации ферромагнитных частиц в сильных магнитных полях. Иллюстративный пример левитации отдельной частицы неправильной формы представлен на рис. 23.

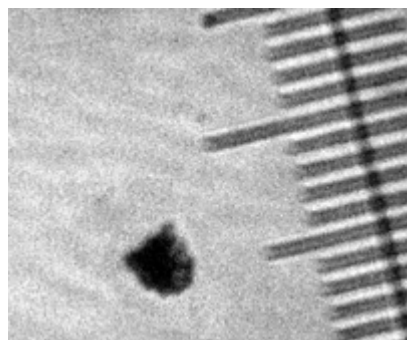


Рис. 23. Фотография осколка стеклянной микросферы, левитирующей в разряде:

подсветка лампой снизу, цена деления шкалы – 14 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перечисленные динамические методы воздействия, а также их экспериментальные реализации в работах разных авторов с различными видами камер и типами разрядов пригодны для управления пылевыми структурами и отдельными частицами в диапазоне от десятков нанометров до десятков микрометров.

Работа поддержана РФФИ № 08-08-00628 и грантом Президента РФ для поддержки молодых ученых № МК-3462.2008.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василяк Л. М. и др. Кооперативный характер образования пылевых структур в плазме // ЖЭТФ. 2002. Т. 121. Вып. 3. С. 609–613.
2. Василяк Л. М. и др. Пылевые частицы в термофоретической ловушке в плазме // ЖЭТФ. 2003. Т. 123. Вып. 3. С. 493–497.
3. Василяк Л. М. и др. Формирование пылевых структур сложной формы в плазме при неоднородном выделении тепла // ЖЭТФ. 2005. Т. 127. Вып. 5. С. 1166–1172.
4. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы: Пер. с англ. Л.: Химия, 1969. 427 с.
5. Депутатова Л. В. и др. Пылевые кристаллы в плазме, создаваемой пучком протонов // Фундаментальные проблемы приложений низкотемпературной плазмы: Материалы школы-семинара. Петрозаводск, 2005. 220 с.
6. Дзиева Е. С., Карасев В. Ю., Эйхвальд А. И. О вращении плазменно-пылевой структуры в магнитном поле при ее смещении с оси разрядной трубки // Материалы конф. ФНТП-2004. Петрозаводск, 2004. Т. 1. С. 273–276.
7. Дзиева Е. С., Карасев В. Ю., Эйхвальд А. И. О гипотезе вращения газа в магнитомеханическом эффекте // Оптика и спектроскопия. 2004. Т. 97. № 1. С. 107–113.

8. Дзлиева Е. С., Карасев В. Ю., Эйхвальд А. И. Пылевая плазма в магнитном поле // Фундаментальные проблемы приложений низкотемпературной плазмы: Материалы школы-семинара. Петрозаводск, 2005. С. 244–263.
9. Дзлиева Е. С., Карасев В. Ю., Эйхвальд А. И., Иванов А. Ю. Об управлении ППС в лабораторных экспериментах и технологических процессах // Лазерные исследования в СПбГУ. СПб., 2009. С. 171–179.
10. Карасев В. Ю., Дзлиева Е. С. О балансе сил и равновесии пылевых частиц // Вестник СПбГУ. Сер. 4. 2009. Вып. 1. С. 136–139.
11. Карасев В. Ю., Эйхвальд А. И., Дзлиева Е. С. Возникновение вращательного движения плазменно-пылевых структур в стратах в тлеющем разряде в магнитном поле // Оптика и спектроскопия. 2006. Т. 100. № 3. С. 499–506.
12. Карасев В. Ю., Эйхвальд А. И., Дзлиева Е. С. Упорядоченные плазменно-пылевые структуры в стратах тлеющего разряда // Вестник СПбГУ. Сер. 4. 2008. Вып. 1. С. 36–41.
13. Карасев В. Ю., Эйхвальд А. И., Дзлиева Е. С. О наблюдении вращательного движения пылевых частиц, помещенных в низкотемпературную плазму // Вестник СПбГУ. Сер. 4. 2008. Вып. 4. С. 115.
14. Карасев В. Ю., Эйхвальд А. И., Дзлиева Е. С. Сепарация полидисперсных пылевых частиц в тлеющем разряде // Вестник СПбГУ. Сер. 4. 2009. Вып. 1. С. 140–144.
15. Липаев А. М., Молотков В. И., Нефедов А. П. и др. Упорядоченные структуры в неидеальной пылевой плазме тлеющего разряда // ЖЭТФ. 1997. Т. 112. Вып. 6. С. 2030–2044.
16. Материалы лекций школ по физике низкотемпературной плазмы / Под ред. А. Д. Хахаева. Петрозаводск, 2001. 360 с.
17. Материалы лекций школ по физике низкотемпературной плазмы / Под ред. А. Д. Хахаева. Петрозаводск, 2002. 200 с.
18. Материалы семинаров-школ молодых ученых, студентов и аспирантов / Под ред. А. Д. Хахаева. Т. 1. Петрозаводск, 2004. 290 с.
19. Морфилл Г. Е., Цытович В. Н., Томас Х. Комплексная плазма: II. Элементарные процессы в комплексной плазме // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 1. С. 3–36.
20. Нефедов А. П., Петров О. Ф., Фортов В. Е. Кристаллические структуры в плазме с сильным взаимодействием частиц // УФН. 1997. Т. 167. № 11. С. 1215–1226.
21. Ротер В. Применение сферических частиц для диагностики низкотемпературной плазмы // Свойства низкотемпературной плазмы и методы ее диагностики / Под ред. М. Ф. Жукова. Новосибирск: Наука, 1977. С. 257–267.
22. Цытович В. Н. Плазменно-пылевые кристаллы, капли и облака // УФН. 1997. Т. 167. С. 57–99.
23. Цытович В. Н., Морфилл Г. Е., Томас Х. Комплексная плазма: IV. Теория комплексной плазмы. Приложения // Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 10. С. 877–929.
24. Фортов В. Е., Петров О. Ф., Молотков В. И. и др. Пылевая плазма // УФН. 2004. Т. 174. № 5. С. 495–544.
25. Фортов В. Е., Храпак А. Г., Якубов И. Т. Физика неидеальной плазмы. М.: Физматлит, 2004. 500 с.
26. D'yachkov L. G., Petrov O. F., Fortov V. E. Dusty plasma structures in magnetic DC discharges // Contrib. Plasma Phys. 2009. Vol. 49. № 3. P. 134–147.
27. Dusty plasmas / Ed. by A. Boushoulle. Orlean, 1999. 408 p.
28. Fortov V. E., Nefedov A. P., Molotkov V. I. et al. Dependence of the Dust-Particle Charge on Its Size in a Glow-Discharge Plasma // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 87. P. 205002.
29. Karasev V. Yu., Dzlieva E. S., Ivanov A. Yu., Éikhval'd A. I. Rotational motion of dusty structures in glow discharge in longitudinal magnetic field // Phys. Rev. E. 2006. Vol. 74. 066403. P. 1–12.
30. Karasev V. Yu., Dzlieva E. S., Ivanov A. Yu., Éikhval'd A. I. Single dust-particle rotation in glow-discharge plasma // Phys. Rev. E. 2009. Vol. 79. P. 026406.
31. Konopka U., Samsonov D., Ivlev A. V., Goree J., Steinberg V., Morfill G. E. Rigid and differential plasma rotation induced by magnetic fields // Phys. Rev. E. 2000. Vol. 61. № 2. P. 1890–1898.
32. Nedospasov A. V. Motion of plasma-dust structures and gas in magnetic field // Phys. Rev. E. 2009. Vol. 79. P. 036401.
33. Nunomura S., Ohno N., Takamura S. Effects of Ion Flow by $\vec{E} \times \vec{B}$ Drift on Dust Particle Behavior in Magnetized Cylindrical Electron Cyclotron Resonance Plasmas // Jpn. J. Appl. Phys. 1997. Vol. 36. Part. 1. № 2. P. 877–883.
34. Podryadchikov S. F. et al. The ordered dusty plasma structures. Experiments and hypothesis // Intern. Conf. PPPT-V. Minsk, 2006. Vol. I. P. 376–379.
35. Samsonov D., Ivlev A. V., Morfill G. E. Long-range attractive and repulsive forces in a two-dimensional complex (dusty) plasmas // Phys. Rev. E. Vol. 59. P. R025401–R025404.
36. Sato N. Magnetic Effects in Dusty Plasmas // Dusty Plasmas in the New Millenium: Verheest AIP Conf. Proc. / Ed. by R. Bharuthram, M. A. Hellberg, P. K. Shukla F. 2002. Vol. 649. P. 66–73.
37. Sato N. Dust collection and removal – NFP collector // Thin Solid Films. 2004. Vol. 457. P. 285.
38. Sato N., Uchida G., Kaneko T., Shimizu S., Iizuka S. Dynamics of Fine Particles in magnetized plasmas // Phys. Plasmas. 2001. Vol. 8. № 5. P. 1786–1790.
39. Shukla P. K., Mamun A. A. Introduction to Dusty Plasma Physics. IoP Publishing. London, 2002. 271 p.
40. Takahashi K., Oishi T., Shimonai K., Hayashi Y., Nishino S. Analyses of attractive forces between particles in Coulomb crystal of attractive forces by optical manipulations // Phys. Rev. E. 1998. Vol. 58. № 6. P. 7805–7811.
41. Thomas E. Controlled interactions of two microparticle clouds in a dc glow discharge dusty (complex) plasma // New Jour. Phys. 2003. Vol. 5. P. 45.1–45.13.
42. Trottenberg T., Melzer A., Piel A. Measurement of the electric charge on particulates forming coulomb crystals in the sheath of a radiofrequency plasma // Plasma. Sources. Sci. Technol. 1995. Vol. 4(3). P. 450–458.
43. Uchida G., Iizuka S., Sato N. Fine-Particle Clouds Controlled in a DC Discharge Plasma // IEEE Trnsactions on Plasma Science. 2001. Vol. 29. № 2. P. 274–277.
44. Uchida G., Ozaki R., Iizuka S., Sato N. Generation and Control of Vortex Flow of Fine Particle With Coulomb Lattice // Proc. 15th Symp. on Plasma Processing, Hamamatsu, Japan. 1998. P. 152–155.
45. Vladimirov S. V., Ostrikov K., Samarian A. A. Physics and Applications of Complex Plasmas / Imperial College. London, 2005.

УДК 537.533.79

ПАВЕЛ ВЛАДИМИРОВИЧ МОСКВИН

лаборант-исследователь Научно-образовательного центра
«Нанокластер» Томского государственного университета
pavelmoskvin@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ В ГАЗЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Проведено исследование потерь энергии электронного пучка длительностью ~ 100 мкс, амплитудой тока ~ 100 А с энергией электронов 15 кэВ в продольном магнитном поле 3,6–30 мТл и давлении 10^{-2} – 10^{-1} Па при его транспортировке на расстояние ~ 20 см. Показано, что потери энергии при малых внешних магнитных полях и низких давлениях достигают 50 % и связаны в основном с замыканием части тока на трубу дрейфа вследствие расфокусировки пучка.

Ключевые слова: электронный пучок, транспортировка, плазменный катод, сетчатая стабилизация

Низкотемпературная плазма, создаваемая электрическими разрядами, с успехом используется в качестве эмитирующей электроны или ионы среды в источниках ускоренных заряженных частиц различного назначения. Импульсные источники электронов на основе плазменного катода активно используются для исследовательских и технологических работ по модификации поверхности металлических и металлокерамических материалов [6], [7], в том числе и для наноструктурирования их поверхности [2], [7]. Перспективность использования этого типа источников обусловлена такими особенностями, как возможность получения импульсов субмиллисекундного и миллисекундного диапазона, возможность работы в частотном режиме, высокое значение однородной плотности тока (до > 10 А/см²) при значительной площади эмиссионной поверхности (до 100 см²), а также возможность плавной и независимой регулировки основных параметров пучка (тока, ускоряющего напряжения, длительности импульса и частоты следования импульсов) [4], [5].

Важным условием устойчивой работы электронно-пучковых источников с плазменным катодом является обеспечение электрической прочности ускоряющего промежутка. С этой целью ускоряющая электродная система источника интенсивных электронных пучков конструктивно выполняется отстоящей на несколько десятков сантиметров от области взаимодействия пучка с облучаемым материалом, так как попадание паров материала в межэлектродный промежуток ускоряющей системы, как правило, приводит к его пробое. В связи с этим существует необходимость детального изучения транспортировки электронного пучка.

Представленные в данной работе исследования были сосредоточены на системе, где эмиссия электронов из газоразрядной плазмы осуществляется через катодный сеточный электрод, а в качестве анодного ускоряющего электрода используется подвижная граница анодной плазмы, которую создает сам электронный пучок при ионизации газа в пространстве дрейфа [3].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 1 представлена схема электронного источника, на котором проводились исследования. Катодная плазма создается двухступенчатой разрядной системой. Иницирующий (поджигающий) разряд зажигается между полым анодом 1, помещенным в поле постоянных магнитов, и электродом 2. Основной дуговой разряд с регулируемой длительностью (до 100 мкс) и током (до 200 А) горит при подаче импульса напряжения U_d на электроды 2 и 3. Постоянное ускоряющее напряжение (до 20 кВ) прикладывается между плоским эмиссионным электродом 5 и извлекающим электродом 6, выполненным в виде диафрагмы $\varnothing 82$ мм. Извлечение электронов под действием ускоряющего потенциала происходит с центральной части эмиссионного электрода, имеющего отверстие $\varnothing 40$ мм, перекрытое мелкоструктурной сеткой 4.

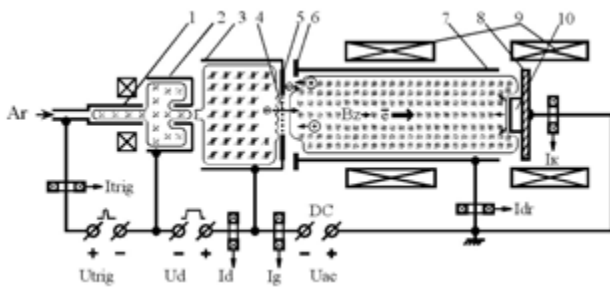


Рис. 1. Упрощенная схема электронного источника

Длительность и ток пучка определяются соответствующими параметрами основного разряда. Транспортировка электронного пучка до коллектора 8 (20 см) осуществляется в трубе дрейфа 7. Система помещена в аксиальное магнитное поле с регулируемой индукцией (от 0 до 30 мТл), создаваемой катушками 9. Напуск рабочего газа – аргона – осуществляется через электрод 1. Давление газа в камере – 10^{-2} – 10^{-1} Па. Поскольку напуск газа осуществлялся в электронный источник, реальное давление в области транспортировки электронного пучка было выше измеряемого в объеме рабочей камеры, причем в области эмиссионной сетки оно превышало измеренные значения в 4–5 раз. В качестве датчиков тока использовались пояса Роговского, ускоряющее напряжение измерялось с помощью резистивного делителя. Электронный пучок попадал на коллектор 10, где установлен образец для импульсной термообработки электронным пучком или интегральный калориметр.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В работах [1], [8] сообщалось, что в аналогичной системе при повышении давления $\geq 3 \cdot 10^{-2}$ Па и наложении аксиального магнитного поля ≥ 30 мТл происходит существенное увеличение тока в ускоряющем промежутке. В не-

которых случаях ток в ускоряющем промежутке в 2 раза и более превышал по амплитуде ток разряда в газоразрядной ячейке плазменного катода. Экспериментально было показано, что значительное увеличение тока в ускоряющем промежутке обусловлено возникновением вторичной ионно-электронной эмиссии на поверхности эмиссионного электрода [8]. При таком режиме генерации ток пучка состоит из электронов, извлеченных из катодной плазмы, и вторичных электронов, выбитых с поверхности эмиссионного электрода и ускоренных в слое пространственного заряда до энергии, соответствующей величине приложенного напряжения. В настоящее время это явление, названное эффектом усиления эмиссии, продолжает интенсивно исследоваться [1].

На рис. 2 приведены построенные по осциллограммам зависимости общего тока от давления при различных значениях магнитного поля (а) и зависимости общего тока в ускоряющем промежутке от величины продольного магнитного поля для различных рабочих давлений (б). Осциллограммы тока снимались в диапазоне рабочих давлений $(1,5\text{--}4) \cdot 10^{-2}$ Па и диапазоне магнитных полей (3,6–30) мТл.

Видно, что с ростом давления ток в ускоряющем промежутке растет. Та же тенденция наблюдается с увеличением аксиального магнитного поля при давлении $\geq 2 \cdot 10^{-2}$ Па. Первый факт связан с увеличением вероятности неупругого столкновения молекул рабочего газа с электронами пучка в пространстве дрейфа вследствие увеличения их концентрации.

Это приводит к увеличению концентрации плазмы в данной области и как следствие – к росту обратного ионного тока на эмиссионный электрод. В дополнение к этому рост обратного ионного тока приводит к увеличению тока вторично эмитированных электронов. В результате ток в цепи ускоряющего электрода, включающий в себя ток эмитированных электронов, обратный ионный ток и ток вторичных электронов, вырастет.

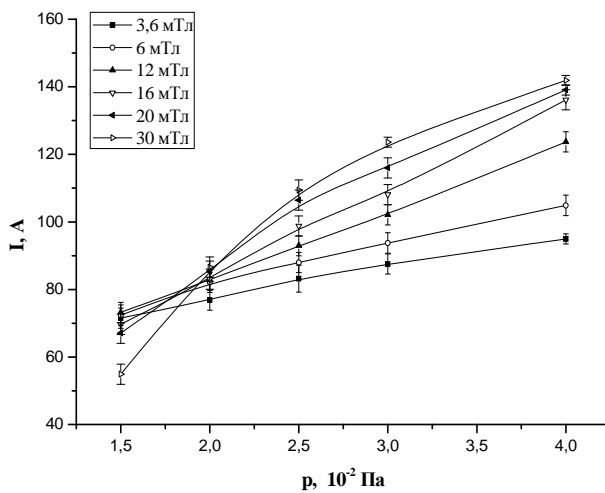
Осциллограммы на рис. 3 иллюстрируют зависимость тока в ускоряющем промежутке от величины магнитного поля при давлении $4 \cdot 10^{-2}$ Па.

Для наименьшего и наибольшего полей из исследуемого диапазона наблюдалось следующее (рис. 3). В слабом (3,6 мТл) поле ток в ускоряющем промежутке равен току разряда (~ 100 А). Ток в цепи коллектора меньше этого значения и составляет ~ 80 А, на трубе дрейфа регистрируется электронный ток с амплитудой ~ 30 А. С увеличением магнитного поля до 30 мТл ток ускоряющего электрода превысил ток основного разряда и составил ~ 160 А, а ток коллектора вырос до ~ 200 А. На трубе дрейфа регистрировался ионный ток с амплитудой до ~ 50 А.

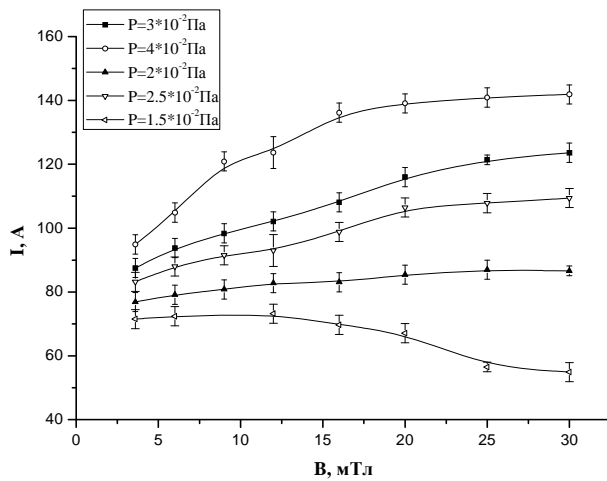
Объяснить эти результаты можно увеличением длины траекторного пробега электронов в пространстве дрейфа, которое приводит к уве-

личению вероятности столкновения электронов пучка с молекулами рабочего газа, то есть к увеличению концентрации плазмы, генерируемой пучком. Возрастающий вместе с концентрацией плазмы обратный ионный ток увеличивает ток вторичных электронов. Следовательно, растет ток в ускоряющем промежутке. Движение плазменных электронов на стенку трубы дрейфа (поперек магнитного поля) затруднено, и их ток замыкается на коллектор (рис. 3б, осциллограмма 3).

Дополнительный возможный механизм, объясняющий увеличение тока в ускоряющем промежутке при увеличении магнитного поля, может быть связан с перераспределением ионных потоков на электроды в пространстве дрейфа



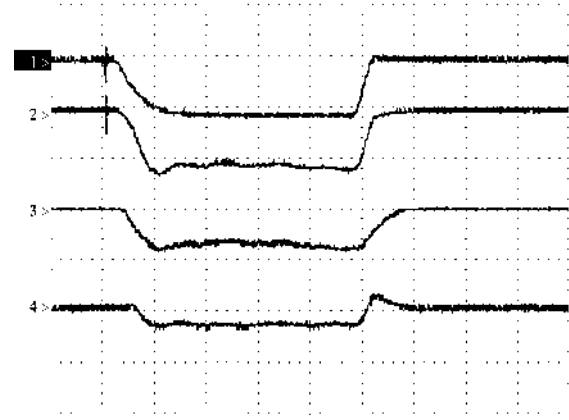
а)



б)

Рис. 2.

а – зависимости общего тока в ускоряющем промежутке от давления в рабочей камере для различных значений внешнего аксиального магнитного поля, б – зависимости общего тока в ускоряющем промежутке от величины внешнего аксиального магнитного поля при разных рабочих давлениях



а)



б)

Рис. 3. Осциллограммы токов

Ток разряда (1); ток в ускоряющем промежутке (2); ток на коллектор (3); ток на трубу дрейфа (4); $p = 4 \cdot 10^{-2}$ Па; $U_{\text{уск.}} = 15$ кВ, масштаб: 100 А/дел., 25 мкс/дел.; а – магнитное поле $B_z = 3,6$ мТл; б – магнитное поле $B_z = 30$ мТл.

пучка. Наложение аксиального магнитного поля в трубе дрейфа затрудняет движение плазменных электронов на стенку трубы (поперек магнитного поля). В результате этого между плазмой и трубой может образоваться слой положительного прианодного падения потенциала. Это дополнительное падение будет препятствовать движению ионов на стенку трубы и направлять большую их часть в сторону эмиссионного электрода и в сторону коллектора. В результате такого перераспределения ионного потока будет происходить увеличение тока ионов на эмиссионный электрод, а следовательно, и вторичного электронного тока с него.

Наличие существенного электронного тока на трубу дрейфа и малая (по сравнению с током ускоряющего промежутка) амплитуда тока на коллекторе в слабых магнитных полях (~3,6 мТл) могут быть связаны с малой эффективностью транспортировки пучка к коллектору. Часть краевых электронов пучка, вероятно, попадает на трубу дрейфа и не доходит до коллектора.

Распределение потерь энергии по длине трубы дрейфа измерялось помещенным в нее калориметром. Прибор изготовлен из восьми медных колец

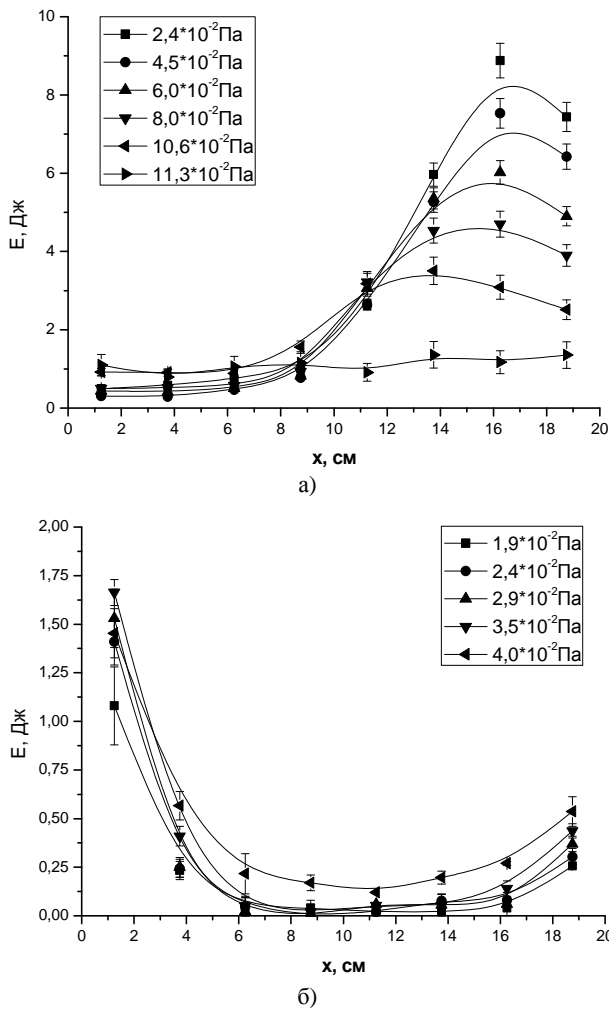


Рис. 4. Распределение потерь энергии по длине трубы дрейфа при разных давлениях $U_{уск} = 15$ кВ, $I_d = 100$ А:

а – 3,6 мТл, б – 30 мТл.

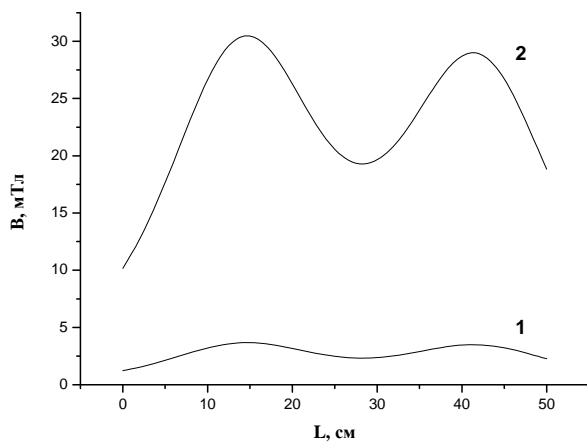


Рис. 5. Распределение величины магнитного поля по длине трубы дрейфа 3,6 мТл (1) и 30 мТл (2)

диаметром 80 мм и шириной 25 мм. На каждом кольце установлен датчик температуры – термистор. Результаты измерений приведены на рис. 4. Как видно, в слабом магнитном поле (3,6 мТл) энергия, приходящая на трубу дрейфа, значительна. Например, при давлении $p = 2,4 \cdot 10^{-2}$ Па она составляет 28 Дж, что сравнимо с энергией на коллекторе. Максимум функции распределения находится на расстоянии 20–30 мм до выходного конца трубы дрейфа, причем с ростом давления максимум потерь в этой области трубы плавно уменьшается, и при давлении 0,113 Па распределение становится равномерным. Тот факт, что суммарные по всей трубе дрейфа (интегральные) потери электронного пучка с ростом давления при слабом внешнем магнитном поле падают, вероятно, связан с лучшими условиями зарядовой нейтрализации электронного пучка при повышенном давлении и с уменьшением глубины модуляции его радиуса. Наличие максимума в функции распределения, по-видимому, связано с особенностями взаимодействия собственного магнитного поля пучка со слабым внешним неоднородным аксиальным магнитным полем.

При увеличении магнитного поля потери уменьшаются (при неизменном давлении) и для поля 30 мТл составляют уже ~ 3 Дж ($p = 2,4 \cdot 10^{-2}$ Па), что не достигает 5 % от энергии, регистрируемой на коллекторе. Характер распределения потерь также сильно меняется с увеличением магнитного поля. На рис. 5 показано распределение величины магнитного поля по длине трубы дрейфа для значений поля в катушках 3,6 мТл и 30 мТл. В сильных полях потери энергии электронного пучка на трубу дрейфа распределяются таким образом, что максимальные их значения приходятся на минимальные значения внешнего аксиального магнитного поля.

С ростом давления при транспортировке в сильном магнитном поле потери на трубу дрейфа растут. Например, для 30 мТл при переходе от давления $1,9 \cdot 10^{-2}$ Па к давлению $4 \cdot 10^{-2}$ Па потери увеличиваются с 1,7 до 3,5 Дж. Рост потерь в этих условиях, по-видимому, связан со значительным ростом тока пучка (потери на трубу дрейфа увеличиваются приблизительно пропорционально). Режим работы электронного источника с большим внешним магнитным полем является более эффективным с точки зрения потерь энергии на трубу дрейфа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, экспериментально показано, что потери электронного пучка, генерируемого электронным источником с плазменным катодом с сетчатой стабилизацией эмиссионной границы и подвижной границей анодной плазмы, на трубе дрейфа при его транспортировке в газе низкого давления существенно зависят от таких парамет-

ров, как давление рабочего газа и величина внешнего продольного магнитного поля. В слабом (3,6–16 мТл) магнитном поле энергия, приходящая на трубу дрейфа, соизмерима с энергией, выделяемой пучком на коллекторе. При этом с увеличением давления рабочего газа наблюдается снижение потерь пучка. В сильном (20 ÷ 30 мТл) магнитном поле потери энергии электронного пучка на трубе

дрейфа не превышают 5 % от энергии на коллекторе во всем диапазоне давлений. В этом режиме с ростом давления наблюдается увеличение потерь на трубу дрейфа. Полученные результаты представляют интерес для оптимизации режимов термообработки импульсным электронным пучком материалов и изделий с целью наноструктуризации их поверхностного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев С. В., Девятков В. Н., Коваль Н. Н., Тересов А. Д. Исследование влияния ионно-электронной эмиссии на характеристики электронного источника с плазменным катодом // Труды III Международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника», 23–30 июня 2009 г., Улан-Удэ. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского научного центра СО РАН, 2009. С. 37–44.
2. Иванов Ю. Ф., Коваль Н. Н., Колубаева Ю. А., Тересов А. Д., Feng Lu, Guangxun Liu, Yukui Gao, Xiaoyun Zhang, Zhihui Tang, Qiang Wang. Модификация поверхности технически чистого титана электронным пучком субмиллисекундной длительности // Известия вузов. Физика. 2008. Т. 51, № 11/3. С. 17–21.
3. Коваль Н. Н., Щанин П. М., Девятков В. Н. и др. Установка для обработки поверхности металлов электронным пучком // ПТЭ. 2005. Вып. 1. С. 135–140.
4. Крейндель Ю. Е. Плазменные источники электронов. М.: Атомиздат, 1977. 144 с.
5. Goebel D. M., Schumacher R. W., Watkins R. M. Long pulse, plasma cathode e-gun // Proc. Conf. on High Power Particle Beams, Washington, DC, May 25–29, 1992. P. 1093–1098.
6. Ivanov Yu. F., Kolubaeva Yu. A., Teresov A. D., Koval N. N., Lu Feng, Liu Guangxun, Gao Yukui, Zhang Xiaoyun, Tang Zhihui, Wang Qiang. Electron beam nanostructuring of titanium alloys surface // Proc. 9th Int. Conf. Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, Tomsk, Russia, 2008. Tomsk, 2008. P. 143–146.
7. Koval N. N., Grigoryev S. V., Devjatkov V. N., Sochugov N. S. et al. Automated power complex for pulse surface treatment of materials by electron beam // Proc. 8th Int. Conf. Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, Tomsk, Russia, 2006. Tomsk, 2006. P. 79–85.
8. Koval N. N., Grigoriev S. V., Devjatkov V. N., Teresov A. D., Schanin P. M. Effect of emission increasing at the generation of low-energy submillisecond electron beam in the diode with the plasma cathode // Proc. of the 17th Int. Conf. on High Power Particle Beams, Xi'an, P. R. China, July 6–11, 2008. P. 177–181.

ХРОНИКА

■ В 2009 году ведущий орнитолог Карелии, доктор биологических наук, профессор Владимир Борисович Зимин отметил 50-летний юбилей трудовой деятельности.

31 августа 1959 года, после окончания Ленинградского государственного университета, В. Б. Зимин поступил на работу в заповедник «Кивач», относившийся тогда к Карельскому филиалу АН СССР. В заповеднике он работал до 1967 года, затем перешел в Институт леса, а в 1970 году – в Институт биологии КФ АН СССР, где и трудится до настоящего времени. Менялись должности, названия организации (теперь это Карельский научный центр РАН), но не угасал интерес к исследованиям птиц. По широте кругозора и области научных интересов В. Б. Зимин относится к редкой в наше время категории ученых-энциклопедистов. Круг его интересов широк и многообразен, он является известным специалистом в различных направлениях популяционной биологии и экологии: биоценологии, изучения годовых циклов и миграций, управления численностью и размещением птиц, природопользования и охраны природы. Он разработал ряд научных гипотез, в том числе по вариабельности величины кладки и сроков размножения, возникновению полициклического размножения и полигинии, путям преодоления дефицита времени в годовом цикле птиц, создал оригинальную теорию формирования границ ареалов у птиц, разработал метод ранней диагностики неблагополучия вида на основе мониторинга периферийных популяций. Детальное знание требований разных видов к среде обитания положено в основу его разработок по привлечению, управлению численностью птиц и их охране.

В. Б. Зимин заложил основы развития популяционной экологии птиц в Карелии, собрал и возглавил группу орнитологов в лаборатории зоологии Института биологии КарНЦ РАН. За долгие годы работы он создал свою научную школу, воспитав целое поколение орнитологов и специалистов-биологов. Под его руководством защищено 7 кандидатских диссертаций, а при защите 2 докторских он выступал научным консультантом. Он всегда щедро делился идеями и охотно приходил на помощь коллегам при решении трудных задач. Многие идеи и гипотезы В. Б. Зимина получили дальнейшее развитие в работах его учеников и соратников.

Владимиром Борисовичем Зиминим опубликовано более 200 научных работ в различных отечественных и международных изданиях, в том числе 10 монографий. Он является автором более 100 оригинальных методов привлечения, отлова, прижизненного изучения и мечения

птиц. На 17 из них получены авторские свидетельства об изобретении.

Во время работы проявились и незаурядные организаторские способности Владимира Борисовича, чему в немалой степени способствовали умение легко находить контакты с людьми, природная скромность и простота в общении, инициатива и энтузиазм в новых начинаниях. В. Б. Зимин в 1968 году вместе с коллегами из Ленинградского университета и Зоологического Института АН СССР Г. А. Носковым и Т. И. Бломенталя организовал Ладожский орнитологический стационар для изучения миграций птиц. Теперь это всемирно известная Ладожская орнитологическая станция Санкт-Петербургского госуниверситета, отметившая в 2008 году свое 40-летие. В 1968 году в Прионежье совместно с сотрудником Института леса И. А. Кузьминым он основал Шокшинский стационар Карельского филиала АН СССР, где до 1978 года велось комплексное изучение влияния гербицидов на природные экосистемы. Для проведения популяционно-экологических исследований он вместе с коллегами в 1979 году основал на побережье Ладожского озера орнитологический стационар Института биологии КарНЦ РАН – Маячино. Мониторинговые исследования ведутся на нем и сегодня.

В настоящее время Владимир Борисович продолжает работу в Институте биологии КарНЦ РАН в должности главного научного сотрудника. Ему присвоены почетные звания: заслуженный деятель науки Российской Федерации, заслуженный изобретатель Российской Федерации, заслуженный деятель науки Карельской АССР. Он полон творческих планов и, несмотря на солидный возраст, продолжает активную научную деятельность. Недавно он сдал в печать свою очередную книгу и работает над новой рукописью.

*А. В. Артемьев,
доктор биологических наук, старший научный
сотрудник Института биологии КарНЦ РАН*



20 ноября 2009 года исполнилось 65 лет доктору технических наук, профессору, проректору по инновационно-производственной деятельности, директору Карельского НИИ лесопромышленного комплекса, заведующему кафедрой технологии и оборудования лесного комплекса лесоинженерного факультета ПетрГУ *Илье Романовичу Шегельману*.

ИЛЬЯ РОМАНОВИЧ ШЕГЕЛЬМАН К 65-летию со дня рождения

Илья Романович Шегельман родился в 1944 году в г. Кок-Янгак, Киргизстан. В 1963 году поступил в Ленинградскую лесотехническую академию. В 1968 году окончил ее и аспирантуру при ЦНИИМЭ. Кандидатскую диссертацию «Исследование процесса механизированной заготовки пневой древесины» защитил в 1981 году в ЛТА; докторскую диссертацию «Обоснование технологических и технических решений для перспективных процессов подготовки биомассы дерева к переработке на щепу» также защитил в ЛТА. С 1969 по 2003 год – научный сотрудник, заведующий сектором, ученый секретарь, заместитель директора КарНИИЛПК, с 2003 года – директор. В 1997 году – президент КРОО «Карельская инженерная академия». В 1998 году был избран заведующим кафедрой технологии и оборудования лесного комплекса лесоинженерного факультета ПетрГУ. С 2007 года – проректор по инновационно-производственной деятельности ПетрГУ.

И. Р. Шегельман – специалист в области техники, технологии и организации лесозаготовок, прогнозирования в лесной промышленности, экономической безопасности предприятий. И. Р. Шегельманом опубликовано более 300 научных работ и 180 изобретений. Только в прошлом году вышло в свет 4-е издание, переработанное и дополненное, словаря «Лесная промышленность и лесное хозяйство» и монография «Лесные трансформации (XV–XXI вв.)», в этом году – совместная с А. В. Ворониным монография «Лесопромышленная интеграция: теория и практика». Под руководством И. Р. Шегельмана за последние годы защищено 8 кандидатских диссертаций.

Илья Романович – заслуженный изобретатель КААСР, почетный член Всероссийского общества изобретателей, заслуженный работник физической культуры РК, дважды лауреат РК, почетный работник лесной промышленности, заслуженный тренер России, член-корреспондент Российской инженерной академии, почетный работник высшего профессионального образования РФ. Илья Романович награжден Почетной грамотой Совета Федерации Федерального собрания РФ, медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени.

От всей души поздравляем Илью Романовича с юбилеем, желаем ему новых научных достижений, благополучия и талантливых учеников!



20 января 2010 года исполняется 70 лет доктору сельскохозяйственных наук, профессору, заведующему кафедрой зоотехнии, товароведения и экспертизы продовольственных товаров агро-технического факультета ПетрГУ, члену редакционной коллегии нашего журнала *Анатолию Ефремовичу Болгову*.

АНАТОЛИЙ ЕФРЕМОВИЧ БОЛГОВ К 70-летию со дня рождения

Анатолий Ефремович Болгов родился в 1940 году в д. Сомовка Ясенеvского района Курской области.

В 1961 году окончил Петрозаводский университет. В 1961–1964 годах работал в Карелии главным зоотехником совхоза «Прогресс». С 1964 года – в Петрозаводском университете: аспирант, преподаватель, доцент, старший научный сотрудник. В 1985 году защитил докторскую диссертацию на тему «Селекция молочного скота по продуктивным и технологическим признакам на Европейском Севере СССР» во Всесоюзном НИИ генетики и разведения животных. Стажировался в Финляндии, США, Норвегии, Германии, Швеции, Италии. С 1986 года – заведующий кафедрой зоотехнии, товароведения и экспертизы продовольственных товаров. Анатолий Ефремович является руководителем проблемной лаборатории генетики резистентности животных к болезням (основанной им в 1989 году), заместителем декана по научной работе. Он инициировал, подготовил и обеспечил открытие на кафедре новой специальности – «Товароведение и экспертиза товаров» (2006).

А. Е. Болгов возглавляет одну из наиболее крупных и плодотворно работающих научных школ по селекции животных. Им разработана система научного и методического обеспечения селекции айрширской породы скота, выведен ее новый тип; впервые разработаны методы повышения генетической резистентности животных к маститу; исследованы и определены паратипические и генотипические факторы повышения уровня воспроизводства в молочном скотоводстве.

Анатолий Ефремович – автор 273 научных и учебно-методических работ, в том числе 9 монографий и 13 брошюр, за рубежом опубликовано более 20 его работ. Им подготовлено 16 кандидатов наук.

А. Е. Болгов имеет почетные звания: «Заслуженный деятель науки КАССР», «Заслуженный деятель науки РФ», «Почетный работник высшего профессионального образования РФ». Награжден орденом Почета (2003).

Поздравляем Анатолия Ефремовича с юбилеем, желаем крепкого здоровья, творчества и дерзаний на многие, многие годы!

ЕДИНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К РУКОПИСЯМ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ В ЖУРНАЛ

Публикации в журнале подлежат статьи, ранее не печатавшиеся в других изданиях.

Статья предоставляется в распечатанном виде на бумаге формата А4 (в двух экземплярах) и в электронном виде, на носителе или вложением в электронное письмо на адрес редакции журнала. Печатная версия статьи подписывается всеми авторами.

Статья набирается в текстовом редакторе Microsoft Word и сохраняется с расширением .doc. Объем оригинальной и обзорной статьи не должен превышать 1 печатный лист, кратких сообщений – 5–6 страниц, отчетов о конференциях и рецензий на книги – 3 страницы. Поля: верхнее и нижнее – 2 см, правое и левое – 3 см. Абзацный отступ – 0,5 см. Шрифт: Times New Roman, размер – 14 пунктов, аннотация, список литературы – 12 пт, межстрочный интервал – полуторный. Нумерация страниц – справа внизу страницы.

Статья должна состоять из следующих элементов: названию статьи должен предшествовать индекс универсальной десятичной классификации (УДК) в левом верхнем углу. Далее через 1 интервал – название статьи жирным шрифтом заглавными буквами, название должно быть по возможности кратким, точно отражающим содержание статьи. Точка в конце названия статьи не ставится. Сведения об авторе (имя, отчество, фамилия автора (-ов) полностью; ученая степень и звание; место работы: вуз, факультет, кафедра; должность; электронный адрес и контактные телефоны). Аннотация (объемом не более 6 строк) на русском и английском языках, перед ней – название статьи и фамилия (-ии) автора (-ов) также на 2 языках; ключевые слова от 3 до 8 слов (или словосочетаний, несущих в тексте основную смысловую нагрузку) также на двух языках. Все перечисленные элементы статьи отделяются друг от друга пустой строкой и печатаются без абзацного отступа через 1 интервал.

Основной материал статьи и цитат, приводимых в статье, должен быть тщательно выверен автором. Сокращения слов не допускаются, кроме общепринятых сокращений химических и математических величин и терминов. Размерность всех физических величин следует указывать в системе единиц СИ.

Список литературы, примечания, комментарии и пояснения по тексту статьи даются в виде концевых сносок. Список литературы должен быть напечатан через одинарный интервал, на отдельном листе. Цитируемая в статье литература (автор, название, место, издательство, год издания и страницы (от и до или количество)) приводится

в алфавитном порядке в виде списка в конце статьи (сначала отечественные, затем зарубежные. Фамилии иностранных авторов приводятся в оригинальной транскрипции). В тексте статьи ссылка на источник делается путем указания в квадратных скобках порядкового номера цитируемой книги или статьи, через точку с запятой – цитируемых страниц, если это необходимо. В книгах иностранных авторов, изданных на русском языке, после заглавия книги через двоеточие указывают, с какого языка сделан перевод. Выходные данные по статьям из журналов и сборников указывают в следующем порядке: фамилия (-ии) автора (-ов) с инициалами, название статьи, через две косые черты – название журнала (год, том, номер, страницы (от и до) или сборника (место издания, год, страницы (от и до))). По авторефератам – фамилия, инициалы, полное название автореферата, после которого ставят двоеточие и указывают, на соискание какой степени и в какой области науки защищена диссертация, место издания, год, страницы.

Таблицы – каждая печатается на отдельной странице, нумеруется соответственно первому упоминанию ее в тексте и снабжается заголовком. Таблицы должны быть предоставлены в текстовом редакторе Microsoft Word (формат .doc). В тексте следует указать место таблицы и ее порядковый номер.

Иллюстрации (рисунки, фотографии, схемы, диаграммы) нумеруются, снабжаются подписями и представляются в виде отдельных растровых файлов (в формате .tif, .jpeg), а в тексте рукописи указывается место, где они должны быть размещены. Для оригиналов (бумажная версия) на обороте каждой иллюстрации ставится номер рисунка, фамилия автора и пометка «верх», «низ». Каждый рисунок (их не должно быть более 5–6) должен иметь название и объяснение всех кривых, цифр, букв и прочих условных обозначений, размещенных под ним. В тексте статьи должна быть ссылка на конкретный рисунок, например (рис. 1).

Статьи, поступившие в редакцию, обязательно рецензируются. Если у рецензентов возникают вопросы, статья возвращается на доработку. Редакция оставляет за собой право внесения редакторских изменений в текст, не искажающих смысла статьи.

Материалы, не соответствующие предъявленным требованиям, к рассмотрению не принимаются.

Решение о публикации принимается редакционной коллегией журнала.

CONTENTS

ARCHITECTURE AND CONSTRUCTIONS

Vachrameeva T. I.

ODIGITRIEVSKAYA CHURCH IN KIMZHA VILLAGE. DOCUMENTS OF THE RESEARCH AND RESTORATION PROPOSALS

Summary: Field examinations of the monument, carried out in 2008, allowed to verify the history of the subject and its architectural and structural solutions. Some remaining archaic details were documented. The need for urgent saving measures was confirmed. Suggested project variations are aimed to maximally preserve authentic body of the monument, taking due account of the time caused layers and to reveal its architectural and artistic value.

Key words: Wooden church, tent-top roof placed on 4 (crossed) barrows, architectural and archaeological measurements, construction periods, restoration project, authenticity and reliability7

Karpenko N. I., Petrov A. N., Voronin Z. A.

FINITE ELEMENT APPROXIMATION FOR DEEP BEAMS WITH OPENINGS THROUGH THE GIRDER

Summary: Finite element method analysis of stress – strain state of deep beams with apertures is reviewed. Design method is based upon the nonlinear model of reinforcement for iron concrete with cracks. Some results of numerical design of the experimental deep beam tested by NII Mosstroy are submitted.

Key words: Nonlinear model of reinforcement for iron concrete with cracks, deep beams with apertures, finite element method13

BIOLOGY

Ivanter E. V.

FAUNISTIC ANALYSIS AND ZOOGRAPHIC ZONING OF TERRITORIES (ON THE EXAMPLE OF KARELIA)

Summary: Based on the analysis of the Karelian fauna and the spread of the vertebrate animals on its territory, the article offers methods for the establishment of real zoographical borders and general principles for zoographic zoning of big territories. The complex fauna structure, heterogeneous and miscellaneous character of its elements are defined by regional elongation from the north to the south, a vast variety and mosaic allocation of natural complexes and historic peculiarities of ecosystem formation.

Key words: Fauna, zoography, terrestrial vertebrate animals, ecosystem19

Shklyarevich G. A.

MYTILUS EDULIS COMMUNITY IN THE INTERTIDAL ZONE OF THE KANDALAKSHA BAY OF THE WHITE SEA

Summary: Some data on the abundance and biomass of the *Mytilus edulis* common species of the White Sea are presented. A number of research was carried out at 2 stations in the intertidal zone of the Kandalaksha bay during 2005–2008. Considerable year-to-year fluctuations of the abundance and biomass of *Mytilus edulis* and members of its community were revealed; annual changes in its life conditions were noted.

Key words: Common species *Mytilus edulis*, abundance, biomass, members of the community, intertidal zone, the Kandalaksha Bay, White Sea26

Sergienko L. A.

MORPHOLOGICAL VARIABILITY IN THE GENUS *PUCCINELLIA* PARL, FAM. *POACEAE*

Summary: Species in the genus *Puccinellia* Parl. are in the process of active speciation due to unstable conditions in the coastal zone. Based on the morphological studies of plants' characteristics and on the epidermal structure of the upper side of lamina (*Puccinellia* Parl.), the new interpretation of the coastal species range is given.

Key words: Coastal zone, halophyte, epidermis of lamina, speciation31

AGRICULTURE AND FORESTRY*Evseeva G. V., Iakovleva K. E., Golubeva O. A.***FORMATION OF THE GRAZING LANDS AGRO-PHYTOCENOSIS IN CONDITIONS OF KARELIA**

Summary: Peculiarities of the development and formation of gramineous grazing lands agro-phytocenosis, including new varieties of perennial ryegrass, June grass and intergeneric hybrid of *Festulolium* are studied. The botanical structure, productivity, energy exchange and nutritive value of grazing lands during two years of usage are determined.

Key words: Perennial grasses, grazing lands agro-phytocenosis, productivity, botanical structure, exchange energy and nutritive value35

*Gavrilov V. N.***ZONAL PECULIARITY OF THE VEGETATION RESOURCES OF THE ARTIFICIALLY AFFORESTED DRAINED MIRES IN KARELIA**

Summary: The article presents some research results of potential vegetation resources of artificially afforested drained mires in different forest zones of Karelian Republic. It is determined that growing of pine forest culture in the southern part of the republic is very effective. The growth of pine corresponds to II–III quality classes. In the northern taiga sub zone, drainage and artificial afforestation did not justify themselves.

Key words: Middle and northern taiga sub zones, drained mires, pine forest culture, growth and formation of the young forests, ground vegetation41

MEDICINE*Meigal A. Yu., Voroshilov A. S.***NON-LINEAR PARAMETERS OF ELECTROMYGRAM IN HUMAN NEWBORNS DURING THE FIRST DAY OF LIFE**

Summary: A temporal structure of the interference electromyography (iEMG) in healthy newborns (n = 37) within the first day of life with the usage of non-linear parameters was analyzed. It was documented that the fractal dimension (D) of iEMG grew with the time increase of the post-natal life. It was also found that the flexor muscles were characterized by lower fractal and correlation dimension and correlation entropy, which testifies in favor of inborn programming of the flexor muscle activity in comparison with the extensor one. It is concluded that the non-linear approach is promising in reference to the model of the early maturing of the anti-gravitation muscle activity.

Key words: Electromyography, newborn, skeletal muscle, non-linear parameters, gravitation44

*Barisheva O. Yu., Hayfetz L. M., Miheeva Yu. S., Rumiantzev A. Sh.***LEFT VENTRICULAR HYPERTROPHY AND CHRONIC KIDNEY DISEASE**

Summary: The article deals with the results of the studies devoted to the peculiarities of the left ventricular hypertrophy formation in the patients during the pre-dialyses period and during chronic dialysis. Some data, reflecting the influence of both uremia and dialysis treatment on the structurally functional features of the left ventricular hypertrophy, are presented in the article.

Key words: Chronic kidney disease, chronic renal failure, pre-dialysis period, hemodialysis, left ventricular hypertrophy, left ventricular mass index50

ENGINEERING SCIENCE*Goldshtein Yu. B.***COMPLETE POTENTIAL ENERGY OF THE STRUCTURE WITH UNILATERAL CONSTRAINTS AND ITS APPLICATION FOR THE SOLUTION OF THE STABILITY PROBLEM**

Summary: Using the theory of the quadratic form, complete potential energy of the elastic systems with unilateral constraints is analyzed. A determination problem of the number of degrees of freedom, in the case when this number is finite, is discussed. It is shown that the problem of the minimum complete potential energy determination is multi-extremal, and that the global minimum can be found only via exhaustive search.

Key words: Stability, full potential energy, quadratic form, unilateral constraints, number of degrees of freedom, spectrum forces of Euler56

*Markov B. G., Markov O. B., Dospechova N. A.***GEOMETRICAL ASPECTS OF PULPWOOD CONTACT INTERACTION IN A DEBARKING DRUM**

Summary: The article describes the methodology of geometrical modeling of pulpwood contact interaction in a debarking drum. The task is solved in 3D system. Each pulpwood is considered to be a straight round cylinder. A three-dimensional area of the contact is determined as a result of modeling. According to the new methodology, obtained

modeling results can be used while building up an algorithm of finding the force of contact interaction by using a discrete element method.

Key words: Mathematical modeling, contact interaction, three-dimensional modeling, debarking drum64

Sokolov A. P., Gerasimov Yu. Yu., Selivestrov A. A.

A METHOD OF SHORT WOOD TRUCKS FLEET OPTIMIZATION BASED ON THE SIMULATION MODELING IN THE ENVIRONMENT OF THE GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM

Summary: The article describes planning methods for the lumber trucks fleet, based on the computerized simulation modeling, mathematical programming and geoinformation system.

Key words: Logging company, wood hauling, timber truck, cut-to-length wood harvesting method, transportation plan72

PHYSICS

All russian seminar for young scientists on the topic “Problems and applications of the electrocharged processing in the industry of nanomaterials and nanosystems”

Belashev B. B., Il'ina B. P., Ternovoi A. N.

TECHNOLOGIES BASED ON THE USAGE OF DIATOMITES IN KARELIA

Summary: Genesis, composition characteristics, qualities, milling methods and possible applications of Karelian diatomites are studied. Granulometric size distribution of the diatomite particles and the distribution of the diatomite pores horizontally and dimensionally were estimated. Applications of the diatomites as filters, pigments and ceramics were tested. Diatomites can be used in nanotechnologies as natural nanomaterials.

Key words: Diatomites, structure, mineral dressing, application, filter, filler, ceramics, pigment78

Velichko A. A., Dutikov D. A., Kuldin N. A., Kundozerova T. V.,

Paranichev D. K., Pergament A. L., Putrolainen V. V., Stefanovich G. B., Cheremisin A. B.

DEVELOPMENT OF TECHNIQUES FOR MICRO-AND NANO-LITHOGRAPHY ON TRANSITION METAL OXIDE FILMS

Summary: The article presents a survey of inorganic resists used in micro- and nanolithography. The results of the studies of transition metal oxides film modification under the action of electron, photon and ion irradiation are discussed. It is shown that vanadium oxides might turn out to be promising materials for micro- and nanolithography. Also, they can be used for micro- and nano-scale electronic components production.

Key words: Transition metal oxides, nanolithography, resists, oxide film modification82

Golubev M. S., Dzlieva E. S., Ermolenko M. A., Ivanov A. Yu., Karasev V. Yu., Aychvald A. I.

CONTROL OF PLASMA STRUCTURES AND SINGLE GRAINS IN GAS DISCHARGES

Summary: The article reviews different methods of influence and their application on dust structures with the purpose to control: changes of their localization inside a discharge, their shape and the internal arrangement of single particles. The focus is cast on the illustration of certain applications of influences. Types of influences, working chambers and received results are described. Presented methods of influence and diagnostics can be used in technological processes dealing with micro- and nanoparticles.

Key words: Dusty plasmas, gas discharge, dust structures control, dynamics of isolated dust particles, thermophoretic force, growth and diagnostics of nano- and microparticles, application of dusty plasmas95

Moskvin P. V.

THE STUDY OF THE ELECTRON BEAM TRANSPORTATION LOSSES IN LOW GAS PRESSURE

Summary: The research of losses of electron beam energy was carried out. Pulse Duration of beam was equal 100 μ s, beam current was equal 100 A and the energy of electrons was 15 kV. Beam was moved in axial magnetic field of 3,6–30 mT, at pressure of 10⁻²–10⁻¹ Pa to distance of 20 cm. It was shown that the losses of energy in low outside magnetic field and low pressure reached 50 %. Basically, it was associated with the closing of the part of the beam current to the drift tube resulting from beam defocusing.

Key words: Electron beam, transporting, grid-controlled plasma cathode104

SCIENTIFIC INFORMATION109

JUBILATION

To the 65th Birthday Anniversary of I. R. Shegelman110

To the 70th Birthday Anniversary of A. E. Bolgov111

INFO FOR THE AUTHORS112

РОССИЙСКИЙ ИНДЕКС НАУЧНОГО ЦИТИРОВАНИЯ: инструмент для оценки научной деятельности и механизм продвижения научных журналов

Во всем мире одним из ключевых показателей для оценки работы отдельных исследователей и научных коллективов, влияния на развитие науки, определения качества исследований служит индекс цитирования авторов и импакт-фактор журнала (как средний показатель цитируемости его авторов). Величина индекса цитирования определяется количеством ссылок на публикацию автора в других источниках. Для корректного определения значимости научных трудов важно не только количество ссылок, но и качество самих ссылок. На статью может ссылаться авторитетное издание или популярный иллюстрированный еженедельник. Значимость таких ссылок разная. Для решения проблемы определения значимости периодического издания разработан свой индекс цитирования – импакт-фактор. В индексе цитирования заинтересованы все те, кто имеет отношение к науке и образованию: 1) Ученые с помощью индекса цитирования отслеживают текущую актуальную библиографию работ по своей тематике. 2) Чиновники, учитывая индексы цитирования, принимают решение о выделении финансовой поддержки для исследовательской деятельности отдельного ученого или научного коллектива. 3) Администраторы университетов и институтов на основании показателей цитирования и объема опубликованных работ определяют размеры финансового вознаграждения своих сотрудников. 4) Издатели научной литературы, используя импакт-факторы журналов, оценивают качество изданий, их авторитет и востребованность как научного продукта.

Федеральное агентство по науке и инновациям Министерства образования и науки РФ и Научная электронная библиотека занимаются реализацией проекта «Разработка системы статистического анализа российской науки на основе данных российского индекса научного цитирования (РИНЦ)». РИНЦ – это специализированная база данных по российским научным периодическим изданиям, создаваемая на основе индексирования библиографических описаний статей, аннотаций или рефератов, а также пристатейных ссылок цитируемой литературы. База оснащена мощной поисковой системой, способной реализовать поисковые запросы различной сложности. Благодаря этому продукту можно получать точные данные по индексу цитирования авторов и импакт-факторам журналов.

**ЖУРНАЛ «УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ПЕТРОЗАВОДСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА» ВКЛЮЧЕН
В РОССИЙСКИЙ ИНДЕКС НАУЧНОГО ЦИТИРОВАНИЯ
(РИНЦ) В ИЮЛЕ 2008 ГОДА.**

**ПОДПИСАТЬСЯ НА СЕРИЮ «ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ
НАУКИ» МОЖНО ПО КАТАЛОГУ ИЗДАНИЙ ОРГАНОВ НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ АГЕНТСТВА «РОСПЕЧАТЬ»
(ИНДЕКС 66093)**