

---

Министерство образования и науки  
Российской Федерации

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

№ 4 (141). Июнь, 2014

---

**Серия: Естественные и технические науки**

---

Главный редактор

*А. В. Воронин*, доктор технических наук, профессор

Зам. главного редактора

*В. Б. Акулов*, доктор экономических наук, профессор

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

*В. С. Сюнёв*, доктор технических наук, профессор

Ответственный секретарь журнала

*Н. В. Ровенко*, кандидат филологических наук

Перепечатка материалов, опубликованных  
в журнале, без разрешения редакции запрещена.

Статьи журнала рецензируются

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

**uchzap.petsu.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)
- МАРЕК ВОХОЗКА**  
доктор экономических наук  
(Чешские Будейовицы, Чешская Республика)
- 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 (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  
(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 (Белград, Сербия)
- Р. М. ЮСУПОВ**  
доктор технических наук, профессор,  
член-корреспондент РАН (Санкт-Петербург)

Редакционная коллегия серии  
«Естественные и технические науки»

- О. Ю. БАРЫШЕВА**  
доктор медицинских наук (Петрозаводск)
- А. Е. БОЛГОВ**  
доктор сельскохозяйственных наук,  
профессор (Петрозаводск)
- В. В. ВАШИРОВ**  
доктор химических наук, профессор (Петрозаводск)
- Т. О. ВОЛКОВА**  
доктор биологических наук (Петрозаводск)
- Е. Ф. МАРКОВСКАЯ**  
доктор биологических наук,  
профессор (Петрозаводск)
- А. Ю. МЕЙГАЛ**  
доктор медицинских 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)
- А. А. РОГОВ**  
доктор технических наук,  
профессор (Петрозаводск)
- Г. Б. СТЕФАНОВИЧ**  
доктор физико-математических наук,  
профессор (Петрозаводск)
- В. И. СЫСУН**  
доктор физико-математических наук,  
профессор (Петрозаводск)
- В. В. ЩИПЦОВ**  
доктор геолого-минералогических наук,  
профессор (Петрозаводск)

---

Ministry of Education and Science  
of the Russian Federation

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

№ 4 (141). June, 2014

---

**Natural & Engineering Sciences**

---

Chief Editor

*Anatoly V. Voronin*, Doctor of Technical Sciences, Professor

Chief Deputy Editor

*Vladimir B. Akulov*, Doctor of Economic Sciences, Professor

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

*Vladimir S. Syunev*, Doctor of Technical Sciences, Professor

Executive Secretary

*Nadezhda V. Rovenko*, Candidate of Philological Sciences

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](mailto:uchzap@mail.ru)

**[uchzap.petrSU.ru](http://uchzap.petrSU.ru)**

---

Editorial Council

- |   |   |
|---|---|
| <p style="text-align: center;"><b>V. BOLSHAKOV</b><br/>Doctor of Biological Sciences,<br/>Professor, the RAS Member (Ekaterinburg)</p>  | <p style="text-align: center;"><b>PAAVO PELKONEN</b><br/>Doctor of Technical Sciences,<br/>Professor (Joensuu, Finland)</p>                         |
| <p style="text-align: center;"><b>I. DUDANOV</b><br/>Doctor of Medical Sciences, Professor,<br/>the RAMS Corresponding Member (Petrozavodsk)</p>                              | <p style="text-align: center;"><b>I. ROMANOVSKY</b><br/>Doctor of Physical-Mathematical Sciences,<br/>Professor (St. Petersburg)</p>                |
| <p style="text-align: center;"><b>V. ZAKHAROV</b><br/>Doctor of Philological Sciences, Professor (Moscow)</p>   | <p style="text-align: center;"><b>E. SENYAVSKAYA</b><br/>Doctor of Historical Sciences,<br/>Professor (Moscow)</p>                                  |
| <p style="text-align: center;"><b>A. ISAYEV</b><br/>Doctor of Biological Sciences,<br/>Professor, the RAS Member (Moscow)</p>   | <p style="text-align: center;"><b>HELENA SULKALA</b><br/>Doctor of Philosophy,<br/>Professor (Oulu, Finland)</p>                                    |
| <p style="text-align: center;"><b>MAREK VOCHOZKA</b><br/>Doctor of Economic Sciences<br/>(Ceske Budejovice, Czech Republic)</p>   | <p style="text-align: center;"><b>L. TIMOFEEVA</b><br/>Doctor of Political Sciences,<br/>Professor (Moscow)</p>                                     |
| <p style="text-align: center;"><b>N. MEL'NIKOV</b><br/>Doctor of Technical Sciences,<br/>Professor, the RAS Member (Apatity)</p>  | <p style="text-align: center;"><b>A. TITOV</b><br/>Doctor of Biological Sciences, Professor,<br/>the RAS Corresponding Member (Petrozavodsk)</p>    |
| <p style="text-align: center;"><b>I. MULLONEN</b><br/>Doctor of Philological Sciences,<br/>Professor (Petrozavodsk)</p>   | <p style="text-align: center;"><b>M. CHARKICH</b><br/>the Leading Professor of Serbian Academy<br/>of Sciences and Arts (Belgrade, Serbia)</p>      |
| <p style="text-align: center;"><b>V. ORPHINSKY</b><br/>Doctor of Architecture, Professor,<br/>Full Member of Russian Academy<br/>of Architectural Sciences (Petrozavodsk)</p> | <p style="text-align: center;"><b>R. YUSUPOV</b><br/>Doctor of Technical Sciences, Professor,<br/>the RAS Corresponding Member (St. Petersburg)</p> |

Editorial Board of the Series  
“Natural & Engineering Sciences”

- |   |   |
|---|---|
| <p style="text-align: center;"><b>O. BARYSHEVA</b><br/>Doctor of Medical Sciences (Petrozavodsk)</p>  | <p style="text-align: center;"><b>V. PATYAKIN</b><br/>Doctor of Technical Sciences,<br/>Professor (St. Petersburg)</p>                |
| <p style="text-align: center;"><b>A. BOLGOV</b><br/>Doctor of Agricultural Sciences,<br/>Professor (Petrozavodsk)</p>                             | <p style="text-align: center;"><b>E. RAT'KOVA</b><br/>Series Executive Secretary<br/>(Petrozavodsk)</p>                               |
| <p style="text-align: center;"><b>V. VAPIROV</b><br/>Doctor of Chemistry, Professor (Petrozavodsk)</p>  | <p style="text-align: center;"><b>A. ROGOV</b><br/>Doctor of Technical Sciences,<br/>Professor (Petrozavodsk)</p>                     |
| <p style="text-align: center;"><b>T. VOLKOVA</b><br/>Doctor of Biological Sciences (Petrozavodsk)</p>   | <p style="text-align: center;"><b>G. STEFANOVICH</b><br/>Doctor of Physical-Mathematical Sciences,<br/>Professor (Petrozavodsk)</p>   |
| <p style="text-align: center;"><b>E. MARKOVSKAYA</b><br/>Doctor of Biological Sciences,<br/>Professor (Petrozavodsk)</p>                          | <p style="text-align: center;"><b>V. SYSUN</b><br/>Doctor of Physical-Mathematical Sciences,<br/>Professor (Petrozavodsk)</p>         |
| <p style="text-align: center;"><b>A. MEYGAL</b><br/>Doctor of Medical Sciences, Professor (Petrozavodsk)</p>                                      | <p style="text-align: center;"><b>V. SHCHIPTSOV</b><br/>Doctor of Geological-Mineralogical Sciences,<br/>Professor (Petrozavodsk)</p> |
| <p style="text-align: center;"><b>N. NEMOVA</b><br/>Doctor of Biological Sciences,<br/>Professor, the RAS Corresponding Member (Petrozavodsk)</p> |   |

## СОДЕРЖАНИЕ

## БИОЛОГИЯ

- Василевская Н. В., Петрова Н. В.*  
Морфологическая изменчивость пыльцы *Pinus sylvestris* L. в условиях промышленного города (на примере г. Мончегорска) . . . . . 7
- Шкляревич Г. А.*  
Восстановление зарослей *Zostera marina* L. в Кандалакшском заливе Белого моря. . . . . 13
- Галибина Н. А., Терехова Е. Н.*  
Физико-химические свойства клеточных стенок тканей ствола деревьев *Betula pendula* Roth . . . . . 19
- Рохлова Е. Л.*  
Травянистые интродуценты Южной Карелии . . . . . 25
- Андреев В. П., Соболев П. С., Лебедева Н. Ш.*  
Координация Zn-ТФП со слабыми основаниями / нуклеофилами. Метод «приближений» . . . . . 28

## МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

- Айзиков Д. Л., Юнаш В. Д., Лотош Т. А., Матвеева Ю. П., Виноградова И. А.*  
Влияние различных режимов освещения на репродуктивную активность и темпы физиологического развития потомства крыс . . . . . 36
- Антонен Е. Г., Хяникяйнен И. В.*  
Соматоформная вегетативная дисфункция как предиктор хронической ишемии мозга . . . . . 43
- Лозовик И. П., Баракат М. Ф., Мельцер Р. И., Иванов Д. В.*  
Комплексная оценка тяжести повреждений у пострадавших с открытыми сегментарными переломами костей голени . . . . . 49
- Мелентьева А. А., Барышева О. Ю., Хейфец Л. М., Зуев А. В., Стратегопуло В. А., Малышева И. Е.*  
Новые биомаркеры минерально-костных нарушений при хронической болезни почек – акцент на FGF23 и фактор Klotho . . . . . 52
- Цицора А. П., Фетюков А. И., Мариев А. И., Ковчур О. И.*  
Комбинированные операции паховых грыж. . . . . 57

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Светова Е. Н., Светов С. А.*  
Агатовая минерализация в эффузивах суйсарского комплекса Центральной Карелии. . . . . 61
- Кулешевич Л. В., Дмитриева А. В., Хазов Р. А.*  
Ba-Sr-P-Ti-TR-полевошпатовое сырье Элисенваарского щелочного комплекса (Карелия): геохимия и минералогия редкоземельных элементов . . . . . 67

- Поташева И. М., Светов С. А.*  
ICP-MS анализ древней керамики как метод определения источников сырья и места производства гончарной продукции . . . . . 71

## СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

- Карпечко Ю. В., Мясникова Н. А.*  
Особенности формирования листового аппарата и транспирации хвойного древостоя. . . . . 78

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Андреев А. А., Колесников Г. Н.*  
О рациональном соотношении количества опилок и стружки в древесно-цементном композите . . . . . 85
- Соколов А. П., Сюньев В. С.*  
Логистическая концепция организации лесозаготовительного производства . . . . . 88
- Лукашевич В. М.*  
Межоперационные подготовительные работы в сквозных процессах лесозаготовок. . . . . 95
- Медведев П. П.*  
Морфология традиционных сельских поселений Архангельского Приморья . . . . . 100

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Паньков А. А.*  
Диэлектрические проницаемости композита с учетом корреляционной функции структуры и максвелл-вагнеровской релаксации. . . . . 107
- Урбан А. Р., Кузнецов В. А.*  
Математические модели и методы учета сроков продукции в задаче раскроя тамбуров бумагоделательных машин . . . . . 112
- Ивашко Е. Е., Ицкарь М. С., Колчина М. В.*  
Тестирование производительности приложения по анализу данных на базе BOINC-грид. . . . . 116

## Юбилей

- К 85-летию В. П. Орфинского . . . . . 121
- К 50-летию Т. Ю. Кузнецовой . . . . . 122
- К 70-летию А. М. Цыпука . . . . . 122

## Информация для авторов . . . . . 123

## Contents . . . . . 124

**Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук**

**Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) с 2008 года**

**Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ РАН**

**Сведения о журнале публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory»**

**Сведения о журнале и его архиве передаются в ОАО «Агентство „Книга-Сервис“» и размещаются на базовом интернет-ресурсе [www.rucont.ru](http://www.rucont.ru)**

**Журнал и его архив размещаются в «Университетской библиотеке онлайн» по адресу <http://biblioclub.ru>**

**Требования к оформлению статей см.:  
<http://uchzap.petrstu.ru/files/reg.pdf>**

Учредитель: ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет»

Редактор С. Л. Смирнова. Корректор И. Н. Дьячкова. Переводчик Н. К. Дмитриева. Верстка М. А. Моросин

Подписано в печать 16.06.2014. Формат 60×90<sup>1/8</sup>. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
10 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. (1-й завод – 155 экз.). Изд. № 191

Индекс 66093. Цена свободная.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77–37987  
от 2 ноября 2009 г. выд. Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций

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

**НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА ВАСИЛЕВСКАЯ**

доктор биологических наук, профессор кафедры естественных наук факультета естествознания, физической культуры и безопасности жизнедеятельности, Мурманский государственный гуманитарный университет (Мурманск, Российская Федерация)  
*n.v.vasilevskaya@gmail.com*

**НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА ПЕТРОВА**

студент магистратуры кафедры естественных наук факультета естествознания, физической культуры и безопасности жизнедеятельности, Мурманский государственный гуманитарный университет (Мурманск, Российская Федерация)  
*natashapetrova1988@yandex.ru*

**МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЫЛЬЦЫ *PINUS SYLVESTRIS* L.  
В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ГОРОДА (НА ПРИМЕРЕ Г. МОНЧЕГОРСКА)**

Представлены данные палинологического анализа пыльцы сосны обыкновенной в условиях техногенного загрязнения г. Мончегорска. На территории города заложено 9 пробных площадей. Для анализа в июне 2013 года собраны мужские шишки сосны и зафиксированы в 50 % растворе этилового спирта, окрашивание для палинологического анализа проводили 1 % раствором ацетокармина. Под световым микроскопом подсчитывали число нормальных и тератоморфных пыльцевых зерен. При палинологическом анализе выявлено 10 типов тератоморфной пыльцы: без пыльцевых мешков, одномешковые, двухразномешковые, трехмешковые, четырехмешковые, без содержимого, с нарушениями экзины, полиады, гигантские и редуцированные пыльцевые зерна. В образцах контроля, Экопарка и проспекта Кирова доля нормальных пыльцевых зерен сосны варьирует от 86 до 90 %. В остальных пробах доля пыльцы неизменной морфологии значительно ниже – от 45 до 76 %. Содержание тератоморфной пыльцы в этих образцах составляет от 24 до 55 %. Часто встречается мелкая пыльца без содержимого или с редуцированным телом. Для всех образцов характерно значительное количество пыльцы с аномалиями воздушных мешков пыльцевых зерен (одномешковые и двухразномешковые), реже встречаются трех- и четырехмешковые. Почти во всех пробах присутствует гигантская пыльца. Количество тератоморфной пыльцы сосны значительно различается по районам г. Мончегорска, что свидетельствует об экологическом неблагополучии ряда районов.

Ключевые слова: палиноиндикация, сосна обыкновенная, техногенное загрязнение, тератоморфизм

**ВВЕДЕНИЕ**

Палиноиндикация широко используется в современных экологических исследованиях для оценки качества окружающей среды [1], [2], [3], [4], [5], [8], [9], [13]. Жизнеспособность пыльцы может служить косвенным показателем мутагенности и фитотоксичности загрязнителей [1]. Под воздействием промышленных эмиссий растения продуцируют большое количество тератоморфных (уродливых) и стерильных пыльцевых зерен. При этом чем хуже экологическая обстановка, тем выше процент содержания патологической пыльцы, и наоборот [5]. Отмечено, что количество тератоморфных пыльцевых зерен значительно увеличивается вблизи промышленных центров [3], [5], [8], [9], [11], [17].

Город Мончегорск расположен за Полярным кругом (67°56' с. ш., 32°52' в. д.), в зоне крайней северной тайги. Мончегорский промышленно-территориальный комплекс включает в себя ряд медно-никелевых месторождений, карьер, ме-

таллургический комбинат «Североникель» с отстойником и шламохранилищем. Выбросы Кольской ГМК и ОАО «Североникель» составили в 2010 году 39,1 тыс. т [7]. Основными загрязняющими веществами комбината при переработке медно-никелевого сырья являются диоксид серы и пыль, содержащая тяжелые цветные металлы (никель, медь, кобальт). Помимо медно-никелевого комбината в городе действуют: завод железобетонных изделий, щебеночный завод, ремонтно-механические предприятия, несколько предприятий легкой и пищевой промышленности [12]. Теплоснабжение города осуществляется от местной ТЭЦ, работающей на мазуте. Основными поставщиками токсичных элементов в окружающую среду являются: металлургический комбинат, местная ТЭЦ, предприятия строительной индустрии и городская инфраструктура. Загрязнение атмосферного воздуха и природной среды происходит за счет газово-дымовых эмиссий комбината «Североникель»,

проведения взрывных работ, транспортировки и механической переработки руд, полуфабрикатов, природного камня, производства строительных материалов, сжигания мазута. Имеет значение и наличие большого количества оголенных грунтов (промплощадки, откосы дорог и песчаных карьеров), которые являются источником естественной геогенной пыли [12].

В то же время Мончегорск является одним из примеров продуманного проектирования промышленного центра. Город построен на достаточном удалении от комбината «Североникель» с учетом розы ветров, при этом сохранены участки естественного леса. Большинство зеленых насаждений сформировано на основе лесных сообществ, в которых доминирует *Pinus sylvestris* L. (сосна обыкновенная).

Сосну обыкновенную часто используют в качестве тест-объекта состояния окружающей среды из-за высокой чувствительности данного вида к загрязнению [3], [9], [10], [11], [22]. В условиях техногенной нагрузки отмечаются изменения морфометрических и морфологических показателей генеративных органов сосны, увеличение гибели семенных зачатков и эмбрионов, уменьшение количества и качества семян, снижение жизнеспособности пыльцы в результате увеличения продукции аномальных пыльцевых зерен [10]. Естественный полиморфизм пыльцы сосны обыкновенной представлен достаточно большим количеством морфотипов. Однако содержание тератоморфных пыльцевых зерен в таких пробах не превышает 3–7 % от общего числа исследованных [6]. В условиях загрязнения число морфотипов аномальной пыльцы и ее количество значительно возрастают [2], [3], [9], [10]. При этом формируется пыльца низкого качества [22], [24], [25], что оказывает значительное влияние на формирование женских шишек: семена продуцируются в основном стерильные [22].

Цель исследования – изучение морфологической изменчивости пыльцы *Pinus sylvestris* L. и палиноиндикация окружающей среды г. Мончегорска.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования выполнены в полевой сезон 2013 года. В парках и скверах г. Мончегорска заложено 9 пробных площадок. В качестве контрольной выбрана площадь у Свято-Вознесенского кафедрального собора, находящегося на наибольшем удалении от комбината «Североникель». Сбор проб осуществлялся в период массового пыления сосны – во второй половине июня 2013 года. Высоту деревьев измеряли при помощи лазерного дальномера Bosch DLE 50. Для сбора проб использовали деревья высотой около 12–13 м. На каждой пробной площадке с 5 деревьев *P. sylvestris* была взята общая проба микростробил с созревшей пылью [9].

Мужские шишки подсушивали и фиксировали в 50 % растворе спирта. Для палиноморфологического анализа использовали микроспорифиллы из средней части микростробил, материал окрашивали в 1 % растворе ацетокармина [4], [18]. Палиноморфологические исследования проводили с помощью световой микроскопии. При первичном анализе микропрепаратов, на основе аномалий развития пыльцы *P. sylvestris*, описанных в литературе [4], [5], [9], выделены морфотипы тератоморфных зерен. В каждом поле зрения микроскопа фиксировалось наличие нормальной, тератоморфной пыльцы разных морфотипов, подсчитывалось их количество и анализировались морфологические особенности [4]. С каждой пробной площади изучено не менее 400 пыльцевых зерен.

Палиноиндикацию городской среды Мончегорска проводили на основе содержания нормально развитой пыльцы сосны в образцах по классификации Н. А. Калашник [9], [11]. Согласно данной шкале экологического районирования территорий, пробы пыльцы условно чистых территорий содержат более 90 % нормально развитой пыльцы, умеренно загрязненных – 89,4–82,9 %, сильно загрязненных – 82,3–75,2 %, критически загрязненных – 68,6–62 %.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате палиноморфологических исследований выявлено, что наибольшее количество нормально развитой пыльцы содержится в образцах контроля (90 %), проспекта Кирова (87 %) и Экопарка (86 %) (см. таблицу). Среди остальных проб диапазон варьирования типичной, морфологически не измененной пыльцы очень широкий. В образцах с площадью Революции и Пяти углов, улицы Ферсмана ее доля составляет от 71 до 76 %, низкое количество у сосен, произрастающих в Городском парке (от 60 до 64 %), на проспекте Metallургов (45 %).

Аномальные (нетипичные) пыльцевые зерна сосны отличаются от нормальных размерами, формой и количеством воздушных мешков. При палиноморфологическом анализе выделено 10 морфотипов тератоморфной пыльцы: без пыльцевых мешков, одномешковые, двухразномешковые, трехмешковые, четырехмешковые, без содержимого, с нарушениями экзины, полиады, гигантские и редуцированные пыльцевые зерна (см. таблицу). В протестированных пробах содержание тератоморфной пыльцы от 10 до 55 %.

Больше всего палиноморф с аномалиями развития в пробах проспекта Metallургов (55 %) и Городского парка (36–41 %). Палиноморфизм у сосен на этих площадках достигает максимума, наблюдается увеличение количества и разнообразия типов тератоморф, выделено 9 морфотипов аномальной пыльцы. Палинотератный комплекс в образце с площади Революции на-

Морфотипы пыльцевых зерен *Pinus sylvestris* L. на территории г. Мончегорска (среднее число, %)

Морфотипы пыльцевых зерен	Места взятия проб (площадки)									
	Городской парк (центр)	Зеленая зона на проспекте Металлургов	Сквер на проспекте Кирова	Экопарк в районе Ленинградской набережной	Территория Свято-Вознесенского кафедрального собора	Городской парк (юг)	Городской парк (север)	Лесопарковая зона на улице Ферсмана	Площадь Революции	Площадь Пяти углов
Нормальные	60,25	45,25	86,75	85,75	90,25	59,5	64,25	76	71,25	72,75
Тератоморфные пыльцевые зерна Из них:	39,75	54,75	13,25	14,25	9,75	40,5	35,75	24	28,75	27,25
Без пыльцевых мешков	5,75	6,5	0,5	1,5	0	8,5	3,5	1	4,25	1,5
Одномешковые пыльцевые зерна	4,75	5,5	1,5	0,5	0,5	2	4,5	2	3,25	4,5
Двухразномешковые пыльцевые зерна	3	6,5	2,5	2,5	0	2,75	2,5	2,25	3,25	2,75
Трехмешковые пыльцевые зерна	0,5	0,5	0	0	0	0,25	0,75	0	1	1
Четырехмешковые пыльцевые зерна	0	0	0,5	0	0	0	0	1	0,75	0
Без содержимого	10,25	14,75	4,5	2,5	2,5	5,25	5,50	4,25	2,75	3
Нарушения экзины	0	4,5	0	0	0	0,75	1,5	0,25	0,25	0
Полиады	2,5	2,5	0	0	0	1	2	1,5	1	1
Гигантское тело	5,5	4,5	0	5,5	1,25	5,25	4,5	3,25	3,25	3,25
Редуцированное тело	7,5	9,5	3,75	1,75	5,5	14,75	11	8,5	9	10,25

считывает 10 типов нарушений развития (29 %), площади Пяти углов – 8 (27 %), проспекта Кирова и Экопарка – 6 (13–14 %). В контроле также содержится аномальная пыльца (10 %), но уровень ее морфологической изменчивости значительно ниже: выделено 4 морфотипа тератоморфной пыльцы.

Наиболее часто у сосен на территории г. Мончегорска встречаются такие аномалии развития, как пыльца с редуцированным телом, без содержимого, гигантская, без пыльцевых мешков, одномешковая и двухразномешковая. Во всех образцах (кроме контроля) выявлены пыльцевые зерна, значительно отличающиеся от общепринятой нормы по своим морфологическим характеристикам, с аномалиями воздушных мешков (безмешковые, одномешковые и двухразномешковые). Самое большое содержание таких нетипичных зерен (18,5 %) у сосен на проспекте Металлургов и двух площадках Городского парка (юг, центр – 13,5 %). Значительно реже в пробах встречается трех- и четырехмешковая пыльца (см. таблицу). Трехмешковая пыльца выявлена в незначительных количествах (от 0,25 до 1 %) в образцах шести площадок, четырехмешковые

пыльцевые зерна обнаружены в пробах трех площадок (от 0,5 до 1 %). Во всех протестированных образцах выявлены мелкие пыльцевые зерна с редуцированным телом. Самая высокая встречаемость такой пыльцы в пробах Городского парка (юг) (15 %) и площади Пяти углов (10 %). Развитие нанопыльцы в загрязненных районах также отмечают многие исследователи [4], [22]. Почти во всех образцах присутствует гигантская гипертрофированная пыльца (1–5,5 %). Полиады и аномальные зерна с нарушениями экзины составляют небольшую долю в палинотератном комплексе (см. таблицу).

В ходе палиноморфологических исследований *P. sylvestris* в г. Мончегорске выявлен высокий уровень полиморфности пыльцы. Количество тератоморфных пыльцевых зерен значительно различается по районам города – от 10 % (контроль) до 55 %. На территории г. Костомукши, находящегося в зоне действия комбината по производству железорудного сырья «Карельский окатыш», содержание аномальной пыльцы в среднем составляет 43 % [3], [9].

Данные по полиморфизму пыльцевых зерен сосны в условиях промышленного загрязнения

г. Мончегорска представляют особый интерес. Многообразие морфотипов пыльцы свидетельствует о высокой лабильности ее структуры. Как известно, для пыльцы семейства сосновых (за исключением лиственницы, тсуги и псевдотсуги) характерны билатерально-симметричные двухмешковые пыльцевые зерна. Воздушные мешки у них образуются в результате расхождений слоев экзины, пространство между которыми у сформированного пыльцевого зерна заполнено воздухом. Как показали исследования [21], развитый воздушный мешок выполняет не столько функцию летательного аппарата, сколько гармомегата, то есть при помощи него регулируется объем пыльцевого зерна в зависимости от содержания в нем влаги. В качестве летательного аппарата они, по-видимому, были использованы вторично. В изученных нами образцах пыльцы сосны г. Мончегорска встречаются такие тератоморфы, как безмешковые, одномешковые, двухразномешковые, трех- и четырехмешковые пыльцевые зерна. Асимметричное расположение воздушных мешков приводит к нарушению летных свойств пыльцы, отсутствие или наличие только одного воздушного мешка также снижает ее парусность. Такие морфотипы наиболее часто встречаются в изученных образцах пыльцы сосны и не могут выполнять адаптивную функцию. Асимметричные пыльцевых зерен с двумя пыльцевыми мешками разного размера и расположения, с их редукцией и с одним пыльцевым мешком можно рассматривать как признак нестабильности развития [23]. Появление же многомешковой пыльцы у хвойных в условиях техногенного загрязнения может быть связано с необходимостью увеличения летучести пыльцевых зерен [15], [16]. Такая пыльца развивается у представителей родов *Pinus* и *Picea* только в экстремальных условиях среды [21].

Среди аномалий пыльцы сосны на территории г. Мончегорска выявлена большая доля зерен с редуцированным телом. Возможно, это реакция на пониженную влажность воздуха, характерную для техногенной среды, когда в ходе микроспорогенеза образуется большое количество пыльцевых зерен, у которых уменьшается объем тела. На образование мелких пыльцевых зерен вследствие сухости воздуха в условиях загрязнения указывают многие авторы [4], [15], [22]. В результате потери воды объем живого пыльцевого зерна сокращается, воздушные мешки смыкаются над вминающейся внутрь тела бороздой и закрывают собой наиболее тон-

кий участок экзины. Эти процессы приводят к снижению испарения и предохраняют пыльцевые зерна от полного высыхания [17], [18]. В то же время другие авторы [14], [23] считают, что палинотератный комплекс с господством карликовых палиноформ в условиях высоких широт связан с адаптацией к низким температурам и избыточному увлажнению. Такие формы выявлены в некоторых поверхностных пробах, отобранных из тундровой зоны Западной Сибири [14].

Считается, что реакция растений разных видов на экологический стресс генетически детерминирована и отражает конкурентоспособность, адаптивные возможности и устойчивость к неблагоприятным воздействиям [17]. Однако современные исследования показывают, что даже видовые признаки пыльцы достаточно изменчивы [19]. Пыльца, как носитель генетической информации, должна обладать устойчивыми видовыми признаками, но полученные результаты свидетельствуют об обратном [16].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Палиноморфологический анализ *P. sylvestris* г. Мончегорска выявил высокую морфологическую изменчивость пыльцы, что проявляется в образовании большого числа тератоморф. Многочисленные нарушения развития пыльцевых зерен свидетельствуют о том, что пыльники микростробил сосны обыкновенной, произрастающей на территории г. Мончегорска, подверглись воздействию промышленных эмиссий, о нарушениях в процессах микроспорогенеза и микрогаметогенеза.

Содержание в образцах типичной и аномальной развитой пыльцы значительно различается по районам г. Мончегорска. При этом можно выделить несколько достаточно экологически благополучных районов города, где отмечено низкое содержание тератов: территория Свято-Вознесенского собора, Экопарк, проспект Кирова. Более высокое содержание тератоморфной пыльцы отмечено у сосен, произрастающих в лесопарке на ул. Ферсмана, на площадях Революции и Пяти углов. Согласно палинологической шкале [11] экологического районирования территорий (по содержанию нормальной пыльцы), эти районы г. Мончегорска можно отнести к сильно загрязненным. Городской парк и проспект Металлургов, где выявлено наименьшее содержание нормальной пыльцы и наиболее высокое содержание тератоморф, являются зонами с критическим уровнем загрязнения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессонова В. П. Состояние пыльцы как показатель загрязнения среды тяжелыми металлами // Экология. 1993. № 3. С. 45–50.
2. Василевская Н. В., Петрова Н. В. Палиноиндикация окружающей среды промышленного города (на примере г. Мончегорска) // Биоэкологическое краеведение: мировые, российские и региональные проблемы: Материалы 2-й Всероссийской научно-практ. конф. Самара, 2013. С. 209–213.

3. Га й д ы ш И. С. Биоиндикация природной среды малого северо-таежного промышленного города: на примере г. Костомукша: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2012. 12 с.
4. Дз ю б а О. Ф. Палиноиндикация качества окружающей среды. СПб.: Недра, 2006. 197 с.
5. Дз ю б а О. Ф. Тератоморфные пыльцевые зерна в современных и палеопалинологических спектрах и некоторые проблемы палиностратиграфии // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2007. № 2. С. 1–22.
6. Дз ю б а О. Ф., Ку л и к о в а Н. К., То к а р е в П. И. О естественном полиморфизме пыльцы *Pinus sylvestris* L. в связи с некоторыми проблемами палеопалинологии // Палинология: теория и практика: Материалы конф. Москва (27 сент. – 1 окт., 2005 г.). М., 2005. С. 65–68.
7. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Мурманской области в 2010 году. Мурманск, 2011. 152 с.
8. Е л ь к и н а Н. А., Мар к о в с к а я Е. Ф. Опыт палинологических исследований воздушной среды городов таежной зоны // Экология. Экспериментальная генетика и физиология. Труды КарНЦ РАН. 2007. Вып. 11. С. 3–9.
9. Е р о х и н а И. С., Е л ь к и н а Н. А., Мар к о в с к а я Е. Ф. Палиноиндикация природной среды г. Костомукши // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2011. № 6 (119). С. 20–23.
10. И б р а г и м о в а Э. Э. Индикация загрязнения окружающей среды в урбанизированных экосистемах с использованием пыльцы *Pinus sylvestris* L. // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Сер. «Биология и химия». 2009. Т. 22 (61). № 4. С. 54–65.
11. К а л а ш н и к Н. А., Я с о в и е в а С. М., П р е с н у х и н а Л. П. Аномалии пыльцы хвойных видов деревьев при промышленном загрязнении на Южном Урале // Лесоведение. 2008. № 2. С. 33–40.
12. К а ш у л и н а Г. М., С а л т а н Н. В. Химический состав растений в экстремальных условиях локальной зоны комбината «Североникель». Апатиты, 2008. 235 с.
13. К р у т с к и х Н. В., Л а в р о в а Н. Б. Загрязнение почв г. Петрозаводска тяжелыми металлами и некоторые аспекты палиноиндикации // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск, 2010. Вып. 13. С. 153–157.
14. Л е в к о в с к а я Г. М. Закономерности распределения пыльцы и спор в современных и голоценовых отложениях севера Западной Сибири // Методические вопросы палинологии. М.: Наука, 1971. С. 97–102.
15. М е д в е д е в а Л. М. Аномальная и многошковая пыльца голосеменных из татарских отложений бассейна р. Северная Двина // Палинология и полезные ископаемые. Минск, 1989. С. 192–193.
16. М е л ь н и к о в а Т. А. Аномальная пыльца рода *Pinus* L. как индикатор палеоклиматических флюктуаций в позднем голоцене // Вестник ДВО РАН. 2004. № 3. С. 178–182.
17. Н о с к о в а Н. Е., Т р е т ь я к о в а И. Н., Н о с к о в Е. А. Особенности формирования мужской генеративной сферы сосны обыкновенной в условиях техногенеза // Хвойные бореальной зоны. 2006. Т. XXIII. № 2. С. 211–214.
18. П а у ш е в а З. П. Практикум по цитологии растений. М.: Агропромиздат, 1988. 272 с.
19. Р у д а я Н. А. Палинологический анализ. Новосибирск, 2010. 48 с.
20. С е в е р ь ю х и н а О. А. Репродуктивные особенности *Taraxacum officinale* S. L. в условиях химического загрязнения среды: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Екатеринбург, 2004. 12 с.
21. То к а р е в П. И. Палинология древесных растений, произрастающих на территории России: Автореф. дисс. ... докт. биол. наук. М., 2004. 55 с.
22. Т р е т ь я к о в а И. Н., Н о с к о в а Н. Е. Пыльца сосны обыкновенной в условиях экологического стресса // Экология. 2004. № 1. С. 26–34.
23. Т у п и ц ы н С. С., Р я б о г и н а Н. С., Т у п и ц ы н а Л. С. Уровень тератогенеза как показатель состояния биообъекта в разных экологических условиях // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 1 (3). С. 822–828.
24. Ф е д о р к о в А. Л. Изменение в мужской генеративной сфере сосны при аэротехногенном загрязнении // Эколого-географические проблемы сохранения и восстановления лесов Севера. Архангельск, 1991. С. 296.
25. Ф е д о р к о в А. Л. Адаптация хвойных к стрессовым условиям Крайнего Севера. Екатеринбург: УрО РАН, 1999. 97 с.

Vasilevskaya N. V., Murmansk State Humanities University (Murmansk, Russian Federation)  
Petrova N. V., Murmansk State Humanities University (Murmansk, Russian Federation)

### MORPHOLOGICAL VARIABILITY OF POLLEN OF *PINUS SYLVESTRIS* L. IN CONDITIONS OF INDUSTRIAL TOWN (RUSSIA, MONCHEGORSK)

Data of palynology analysis of *Pinus sylvestris* pollen in heavily polluted industrial barrens of Monchegorsk (Russia, Murmansk region) are presented. Nine experimental plots were founded on the territory of the town. Male strobiles of pine were gathered in June 2013, immersed in 50 % ethanol solution. Coloration for palynology analysis was carried out by 1 % solution of acetocarmine. Normal and teratomorphen pollen grains were calculated under the lighting microscope. During palynology analysis 10 types of teratomorphen pollen such as without pollen sacs, with one pollen sac, with two various sacs, with three sacs, with four sacs, without content, with damage of exine, polyads, gigantic, and reduced pollen grains were determined. The part of normal pine pollen grains collected in Ecopark and Kirov Street varied from 86 up to 90 % in control samples. In other samples, a part of pollen with unchanged morphology was greatly reduced – from 45 up to 76 %. The content of teratomorphen pollen in these samples varied from 24 up to 55 %. Small pollens without content or with reduced body were encountered rather frequently. All samples are characterized by great quantity of pollen with anomalies of pollen sacs (with one or two various sacs). Pollen with three and four pollen sacs were rare. Gigantic pollen was attended in almost samples. The quantity of pine teratomorphen pollen greatly varied in Monchegorsk districts, which speaks of existing ecological problems intrinsic to some districts.

Key words: palynoindication, *Pinus sylvestris* L., technogenic pollination, teratomorfizm, Murmansk region

#### REFERENCES

1. B e s s o n o v a V. P. Pollen condition as an indicator of the environment pollution by heavy metals [Sostoyanie pyl'tsy kak pokazatel' zagryazneniya sredy tyazhelymi metallami]. *Ecologiya* [Ecology]. 1993. № 3. P. 45–50.

2. Vasilevskaya N. V., Petrova N. V. Palynoindication of environment of industrial town (Monchegorsk, Russia) [Palynoindikatsiya okruzhayushchey sredy promyshlennogo goroda (na primere Monchegorska). *Materialy II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii c mezhdunarodnym uchastiem "Bioecologicheskoe kraevedenie: mirovye, rossiyiskie i regional'nye problemy"* [Proc. II All-Russian science-practical conf. "Bioecological study of local lore: world, russian and regions problems"]. Samara, 2013. P. 209–213.
3. Gaydys I. S. *Bioindikatsiya prirodnoy sredy malogo severo-tayezhnogo promyshlennogo goroda: na primere goroda Kostomuksha. Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk* [Environment bioindication of the small north-taiga industrial town: on an example of Kostomuksha. kand. biol. sci. diss.]. Petrozavodsk, 2012. 12 p.
4. Dzyuba O. F. *Palynoindikatsiya kachestva okruzhayushchey sredy* [Palynoindication of the environmental quality]. St. Petersburg, 2006. 197 p.
5. Dzyuba O. F. Teratomorphny pollen grains in modern and paleopalynology spectras and some problems of palynostratigraphy [Teratomorfnye pyl'tsevy zerna v sovremennykh i paleopalynologicheskikh spektrakh i nekotorye problemy palynostratigrafii]. *Neftegazovaya geologiya, teoriya i praktika* [Oil and gas geology, theory and practice]. 2007. № 2. P. 1–22.
6. Dzyuba O. F., Kulikova N. K., Tokarev P. I. About natural polymorphism of *Pinus sylvestris* L. pollen in connection with some problems of paleopalynology [O estestvennom polimorfizme pyl'tsy *Pinus sylvestris* L. v svyazy s nekotorymi problemami paleopalynologii]. *Trudy Konferentsii "Palinologiya: teoriya i praktika"* [Proc. conf. "Pollinology: theory and practice"]. Moscow, 2005. P. 65–68.
7. *Doklad o sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy Murmanskoy oblasti v 2010 godu* [Report on condition and protection of environment of Murmansk region in 2010]. Murmansk, 2011. 152 p.
8. El'kina N. A., Markovskaya E. F. Experience of palynology research of air in taiga cities [Opyt palynologicheskikh issledovaniy vozdukhnoy sredy gorodov tayezhnoy zony]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Labours of Karelian Scientific Center]. 2007. Vol. 11. P. 3–9.
9. Erokhina I. S., El'kina N. A., Markovskaya E. F. Palynoindication of environment of Kostomuksha town [Palynoindikatsiya prirodnoy sredy goroda Kostomuksha]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Estestvennye i tekhnicheskije nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences]. 2011. № 6 (119). P. 20–23.
10. Ibragimova E. E. Indication of pollution of environment in urban ecosystems with the use of *Pinus sylvestris* L. pollen [Indikatsiya zagryazneniya sredy v urbanizirovannykh ekosistemakh s ispol'zovaniem pyl'tsy *Pinus sylvestris* L.]. *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Ser. "Biologiya i khimiya"* [Proceedings of Tavrichesk National University. Ser. "Biology and chemistry"]. 2009. V. 22 (61). № 4. P. 54–65.
11. Kalashnik N. A., Yasovieva S. M., Presnukhina L. P. Anomalies of pollen in coniferous trees caused by industrial pollution in the South Urals [Anomalii pyl'tsy khvoynykh vidov derev'ev pri promyshlennom zagryaznenii na Yuzhnom Urale]. *Lesovedenie* [Forestry]. 2008. № 2. P. 33–40.
12. Kashulina G. M., Saltan N. V. *Khimicheskii sostav rasteniy v ekstremal'nykh usloviyakh lokal'noy zony kombinata "Severonikel"* [Chemical composition of plants in extreme conditions of local zone of "Severonikel" factor]. Apatity, 2008. 235 p.
13. Krutskikh N. V., Lavrova N. B. Pollution of soils in Petrozavodsk by heavy metals and some aspects of palynoindication [Zagryaznenie pochv Petrozavodska tyazhelymi metallami i nekotorye aspekty palynoindikatsii]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii* [Geology and minerals of Karelia]. 2010. Vol. 13. P. 153–157.
14. Levkovskaya G. M. Patterns of pollen and spores' distribution in modern and Holocene depositions of Siberia [Zakonornosti raspredeleniya pyl'tsy i spor v sovremennykh i golotsenovykh otlozheniyakh Sibiri]. *Metodicheskie voprosy palinologii* [Methodological questions of palinology]. Moscow, 1971. P. 97–102.
15. Medvedeva L. A. Anomalous and polysac pollen of gymnosperms from Tatar depositions of Severnaya Dvina river-basin [Anomal'naya i mnogomeshkovaya pyl'tsa golosemennykh is tatarskikh otlozheniy basseyna reki Severnaya Dvina]. *Palinologiya i poleznye iskopaemye* [Palinology and minerals]. Minsk, 1989. P. 192–193.
16. Melnikova T. A. Anomalous pollen of genus *Pinus* L. as indicator of paleoclimatic fluctuations in late Holocene [Anomal'naya pyl'tsa roda *Pinus* L. kak indikator paleoklimaticheskikh flyuktuatsiy v pozdnem golotsene]. *Vestnik DVO RAN* [Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences]. 2004. № 3. P. 178–182.
17. Noskova N. E., Tret'yakova I. N., Noskov E. A. Characteristic features of Scotch pine male generative sphere development in technogenesis conditions [Osobennosti formirovaniya muzhskoy sfery sosny obyknovennoy v usloviyakh tekhnogeneza]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Coniferous of boreal zone]. 2006. Vol. 23. № 2. P. 211–214.
18. Pausheva Z. P. *Praktikum po tsitologii rasteniy* [Practical work on cytology of plants]. Moscow, 1988. 272 p.
19. Rudaya N. A. *Palynologicheskii analiz* [Palynology analysis]. Novosibirsk, 2010. 48 p.
20. Sever'yukhina O. A. *Reproduktivnye osobennosti Taraxacum officinale S. L. v usloviyakh khimicheskogo zagryazneniya sredy. Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk* [Reproductive features of *Taraxacum officinale* S. L. in conditions of chemical pollution of environment. PhD. biol. sci. diss.]. Ekaterinburg, 2004. 12 p.
21. Tokarev P. I. *Palinologiya drevesnykh rasteniy, proizrastayushchikh na territorii Rossii. Avtoref. diss. ... doct. biol. nauk.* [Palinology of trees growing on the territory of Russia. Doct. biol. sci. diss.]. Moscow, 2004. 55 p.
22. Tret'yakova I. N., Noskova N. E. Scotch pine pollen in condition of ecological stress [Pyl'tsa sosny obyknovennoy v usloviyakh ekologicheskogo stressa]. *Ekologiya* [Ecology]. 2004. № 1. P. 26–34.
23. Tupitsyn S. S., Ryabogina N. S., Tupitsyna L. S. Level of teratogenesis as index of state of biological object in various ecological terms [Uroven' teratogeneza kak pokazatel' sostoyaniya bioob'ekta v raznykh ekologicheskikh usloviyakh]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2012. Vol. 14. № 1 (3). P. 822–828.
24. Fedorkov A. L. Changes in male generative sphere of pine in aerotechnogenic pollution [Izmeneniya v muzhskoy generativnoy sfere sosny pri aerotekhnennom zagryaznenii]. *Ekologo-geograficheskie problemy sokhraneniya i vosstanovleniya lesov Severa* [Ecological and geographical problems of maintainance and renewal of North forests]. Arkhangelsk, 1991. P. 296.
25. Fedorkov A. L. *Adaptatsiya khvoynykh k stressovym usloviyam Kraynego Severa* [Adaptations of coniferous trees to stress conditions of the Far North]. Ekaterinburg, 1999. 97 p.

ГАЛИНА АНДРЕЕВНА ШКЛЯРЕВИЧ

доктор биологических наук, профессор кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
gash@psu.karelia.ru

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЗАРОСЛЕЙ *ZOSTERA MARINA* L. В КАНДАЛАКШСКОМ ЗАЛИВЕ БЕЛОГО МОРЯ

Морская трава *Zostera marina* образует заросли (луга) на мелководных участках дна прибрежных районов Атлантического и Тихого океанов, а также многочисленных морей в этих регионах. *Zostera* является многолетним растением с хорошо развитой корневой системой. Она играет важную роль в позитивном развитии морских экосистем и биоэнергетики Мирового океана в целом. В 30-х годах XX века в северной части Атлантического океана наблюдалась массовая гибель *Zostera* и последующее постепенное восстановление ее лугов. В 60-е годы в Белом море также наблюдалась массовая гибель zostеры, где до этого она обильно встречалась повсеместно. В результате гибели *Zostera* последовала биологическая катастрофа, повлекшая за собой нарушение трофических связей и целую цепочку негативных последствий. Начиная с конца 60-х годов в Белом море наблюдается восстановление популяции *Zostera*. Процесс восстановления популяций этой морской травы был исследован на литорали острова Ряшкова, расположенного в Кандалакшском заливе Белого моря. Площадь зарослей определялась в июне – июле начиная с 1973 года в течение 10 лет ежегодно, а далее один раз в три – пять лет. Таким образом, к настоящему времени исследованиями процесса восстановления зарослей *Zostera* мы охватили период в 37 лет, в дальнейшем планируем их продолжение. В 1973 году на литорали о. Ряшкова были обнаружены лишь небольшие по площади, разрозненные куртины zostеры, составившие в сумме всего 127 м<sup>2</sup>. В 2009 году общая площадь лугов этой морской травы определена в 5177 м<sup>2</sup>. С 1980 года на всех восьми исследованных участках зарегистрированы разнонаправленные колебания площади ее зарослей. Они объясняются различными причинами, обусловленными неодинаковой сезонной и межгодовой изменчивостью условий окружающей среды (абиотических и биотических) во всех восьми местообитаниях zostеры на этом острове. Показана общая тенденция процесса восстановления площади зарослей морской травы на литорали о. Ряшкова в целом.

Ключевые слова: Белое море, Кандалакшский залив, остров Ряшков, морская трава – zostера, процесс восстановления зарослей

### ВВЕДЕНИЕ

Морская трава *Zostera marina* L. – это цветковое однодольное растение, относящееся к порядку частуховые (Alismatales), к семейству взморниковые (Zosteraceae). В акватории Белого моря обитает один вид – *Zostera marina* L., который проявляет широкую морфологическую пластичность в зависимости от различных факторов окружающей среды: глубина произрастания, условия освещенности, характер грунта, термогалинный режим, продолжительность обсыхания во время отлива [6].

Zостера поселяется и образует заросли на мягких илисто-песчаных грунтах мелководных участков побережья морей, в том числе и на литорали. *Zostera marina* – многолетнее растение с хорошо развитой корневой системой, играет важную роль в мелководной части морских экосистем и биоэнергетике Мирового океана в целом [2], [3]. Во-первых, она является продуцентом живой фитомассы, обильной некротомассы, превращающейся в детрит, кисло-

рода, углекислого газа и раствора органических веществ; во-вторых – аккумулирует мягкие фракции грунта и удерживает их, предотвращая их размывание волновыми потоками, тем самым обеспечивая стабильность взморниковых лугов во времени и пространстве, а также устойчивое, позитивное развитие их экосистем. *Zostera marina* – вид-эдификатор или фито- и зооценообразователь, вокруг которого образуются специфические и наиболее продуктивные сообщества. Взморниковые луга являются излюбленным местом нереста сельди *Clupea harengus*, местообитанием молоди ряда пелагических и донных рыб, а также многих видов беспозвоночных животных. Кроме того, zostера сама по себе представляет ценное промышленное сырье, широко применяемое в пищевой, фармацевтической промышленности, а также для медицинских целей.

В 30-х годах XX века в северной части Атлантического океана наблюдалась массовая гибель zostеры и последующее восстановление

ее зарослей. В водах Дании также наблюдались аналогичные процессы гибели и последующего восстановления лугов этой морской травы [12].

Массовая гибель *Zostera marina* в морях Атлантического океана в 30-х годах не коснулась беломорских популяций этого вида, вероятно, вследствие оторванности от основного ареала и относительной изолированности Белого моря [1]. Однако в 60-е годы в Белом море также наблюдалась массовая гибель zostеры [5]. Это событие повлекло за собой целую цепочку негативных явлений и послужило причиной начала ряда деструктивных процессов в его экосистемах. В результате гибели zostеры последовала биологическая катастрофа, повлекшая за собой нарушение трофических связей и целую цепочку последствий. Так, произошли глубокие негативные изменения условий обитания многих морских беспозвоночных животных. Существенно уменьшились уловы донных рыб, таких как треска *Gadus morhua maris-albi*, навага *Eleginus navaga*, полярная камбала *Liopsetta glacialis*, а кормившийся в зарослях zostеры сиг *Coregonus lavaretus* практически исчез, перестала подходить к берегам для икрометания и резко снизилась численность корюшки *Osmerus eperlanus*, беломорской сельди *Clupea harengus* и трехиглой колюшки *Gasterosteus aculeatus*, которые раньше нерестились преимущественно в зарослях zostеры [8]. Вследствие исчезновения zostеры численность полярной крачки *Sterna paradisaea* уменьшилась на порядок и резко возросла гибель ее птенцов ввиду отсутствия у полярной крачки замещающего колюшку корма. Некоторые пролетные птицы вынуждены были искать другие места остановок для отдыха, во время которых им необходима интенсивная кормежка. В результате лебеди-кликуну *Cygnus cygnus* перестали останавливаться, например, в Ругозерской губе, а численность черных казарок *Branta bernicla* в Сумских шхерах сразу вслед за гибелью zostеры резко сократилась [4].

Причиной эпидемической болезни и гибели взморника, по мнению многих исследователей, были паразитические организмы *Labyrinthula zosterae* [12].

В период массовой гибели *Zostera marina* не исчезла полностью как в западной Европе, так и в Белом море. В. В. Кузнецов и Т. А. Матвеева [5] указывают, что на Белом море сохранялись в основном лишь редкие поселения растений с незначительной длиной их надземной части (до 20 см). Это относится и к району Северного архипелага Кандалакшского залива. В гербарии Кандалакшского государственного природного заповедника хранится zostера, собранная 19 августа 1963 года на песчаной литорали о. Вороньего. На гербарном листе имеются 8 генеративных побегов, наибольшая длина которых 16,3 см, и 4 вегетативных с максимальной длиной 18,3 см.

Цель данной работы состояла в исследовании и регистрации процесса восстановления зарослей литоральной zostеры, наблюдавшегося в мелководной акватории Кандалакшского залива со времен депрессивного ее состояния в 1972 году (после массовой гибели) до настоящего времени.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В 1972–1975 годах биология *Zostera marina* изучалась на литорали 24 островов Северного архипелага [10], в том числе и о. Ряшкова. Этот остров был признан как эталонный, и поэтому его литораль выбрана как типичное местообитание для изучения состояния поселений zostеры этого вида после его массовой гибели, а также постоянного многолетнего наблюдения за восстановлением ее лугов.

Площадь зарослей zostеры определялась на литорали во время отлива летом с конца июня по 15–20 июля в течение 10 лет с 1973 по 1982 год ежегодно, далее один раз в три – пять лет. Таким образом, к настоящему времени исследованиями процесса восстановления зарослей zostеры в Кандалакшском заливе охвачен период в 37 лет, в дальнейшем планируется их продолжение. В начале наших исследований местообитания zostеры были локализованы на 8 участках литорали о. Ряшкова. На участке № 1 на протяжении всего периода наблюдений zostера произрастала в виде одной маленькой компактной куртины площадью от 0,25 до 0,5 м<sup>2</sup>, в отдельные годы здесь наблюдались лишь единичные надземные вегетативные побеги. На всех остальных участках (со 2-го по 8-й) площадь зарослей этой морской травы колебалась с течением времени.

При определении площади зарослей *Zostera marina* измерялась величина отдельных куртин, из которых состояли луга, с помощью различных измерительных приборов: рулетки, рамки площадью 1 м<sup>2</sup> и полевого циркуля с метровым расстоянием между концами его ножек. У длинных лентовидных сплошных, но не равномерных поселений измерялась длина и ширина, а также определялся процент проективного покрытия *Zostera marina*.

Литораль на о. Ряшкове располагается на берегах абразионно-денудационного типа, опускается в море полого, поэтому ширина ее колеблется от 50 до 100 м (на мысах до 200 м). По геоморфологическому строению она состоит из двух элементов: каменистой гряды, сконцентрированной вдоль уреза воды в отлив, и пляжа, представляющего собой заиленный песок различных размерных модификаций с примесью небольшого количества гравия и гальки, а также редких полупогруженных в мягкие грунты валунов. Валунно-глыбовая гряда, тянущаяся повсеместно вдоль уреза воды, препятствует полному оттоку воды в отлив и в результате

в отдельных депрессиях пляжей в среднем горизонте литорали остаются лужи (с глубиной до 10 см) или ванны (с глубиной от 15–20 см до полуметра). Литоральные поселения зостеры на о. Ряшкова обитают в самих лужах, ваннах и вокруг них (рис. 1) при температурах, колеблющихся в летний период от 8 до 25 °С, и солености 14–20 ‰. Исключение составляет только поселение в нижнем горизонте литорали Южной губы острова, где почти не остается луж во время отлива, но зато субстрат обильно смачивается распресненной водой, поступающей из горизонта высачивания.

Ежегодно с 1973 по 1985 год проводились наблюдения за влиянием ледового покрова на литоральные заросли *Zostera marina*. Установлено, что в весенне-осенний период во время подвижек льда в некоторых поселениях происходят разрушения. Так, на заложенных для многолетних наблюдений на о. Горелом в Порьей губе 10 площадках (величиной 1 м<sup>2</sup> каждая) на литоральном лугу зостеры в 2005 году от льда пострадали заросли на четырех площадках [9].

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

В 1973 году на литорали о. Ряшкова были обнаружены лишь небольшие по площади, разрозненные куртины зостеры, составившие в сумме всего 127 м<sup>2</sup>. В 1975 году суммарная площадь зарослей увеличилась в 2,3 раза, насчитывалось всего 318 куртин, самая маленькая из них была размером 0,003 м<sup>2</sup>, самая большая – 13,6 м<sup>2</sup>, в среднем площадь куртин составляла 0,9 м<sup>2</sup>. Средняя плотность надземных побегов в поселениях колебалась от 250 до 320 экз./м<sup>2</sup>. В 1975 году впервые в этом месте было обнаружено довольно крупное поселение зостеры (4,2 м<sup>2</sup>) в небольшой и неглубокой луже на северо-восточном мысу – участок № 8 (см. рис. 1).

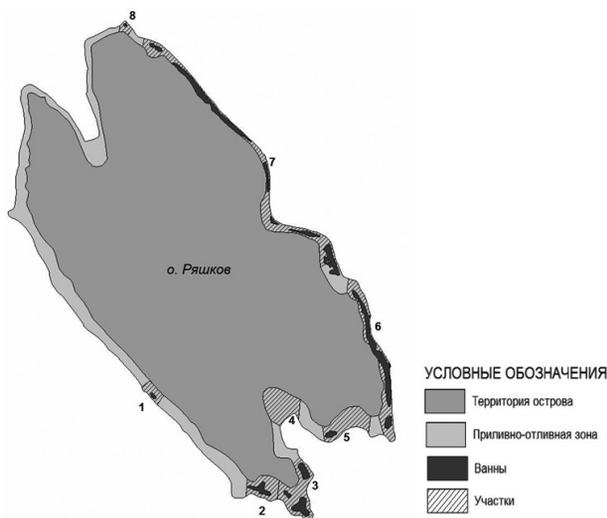


Рис. 1. Карта-схема размещения поселений (зарослей) *Zostera marina* на литорали о. Ряшкова в 2009 году

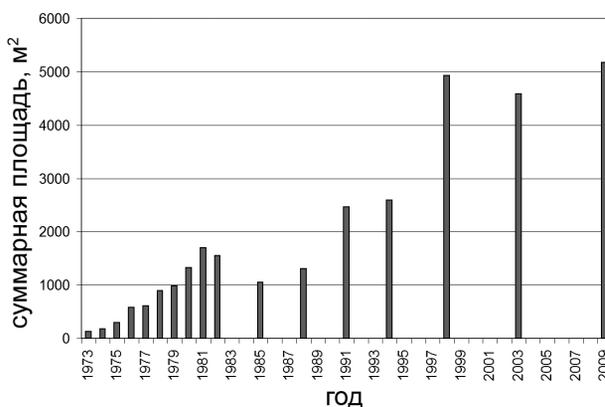


Рис. 2. Суммарная площадь зарослей *Zostera marina* на всех исследуемых площадках о. Ряшкова с 1973 по 2009 год

В 1976 году общая площадь, занятая зарослями зостеры, произрастающей на литорали о. Ряшкова, увеличилась до 580 м<sup>2</sup>, а плотность надземных побегов – до 1500 экз./м<sup>2</sup>. Вокруг куртин появились многочисленные одиночные, отстоящие иногда на довольно значительном расстоянии друг от друга и от краев куртин надземные побеги.

Далее до 1981 года происходило непрерывное увеличение суммарной площади зостеры, но в 1982 году она впервые сократилась на 8,4 % по сравнению с 1981 годом (рис. 2). Во все последующие годы наблюдались колебания суммарной площади зарослей этой морской травы.

Наши исследования показывают возможную цикличность в процессе восстановления зарослей морской травы, отражающуюся в увеличении и уменьшении суммарной площади ее зарослей с периодами в 5–6 лет. Первый цикл постдепресссионного увеличения площади зарослей зостеры на о. Ряшкове завершился в 1981 году. К сожалению, далее мы не могли проводить ежегодные исследования этого процесса, поэтому можем только предполагать, что цикличность периодически выражалась в небольшом уменьшении площади зарослей *Zostera marina* на литорали о. Ряшкова в 1992, 1998, 2003 и 2007 годах.

Количественные характеристики поселений зостеры в двух бухтах губы Чупа (Кандалакшский залив Белого моря) [7] и в мелководьях Датских вод [11] также подвержены межгодовым колебаниям и проявляют временную цикличность, близкую к 5–6 годам.

Циклические не катастрофические снижения суммарной площади произрастания не повлияли в целом на процесс восстановления зостеры во времени. Если проанализировать временные ряды данных по площади зарослей по отдельным площадкам (поселениям) зостеры, то получится, что они не аналогичны (рис. 3).

Колебания площади объясняются неодинаковой сезонной и межгодовой изменчивостью условий окружающей среды во всех восьми место-

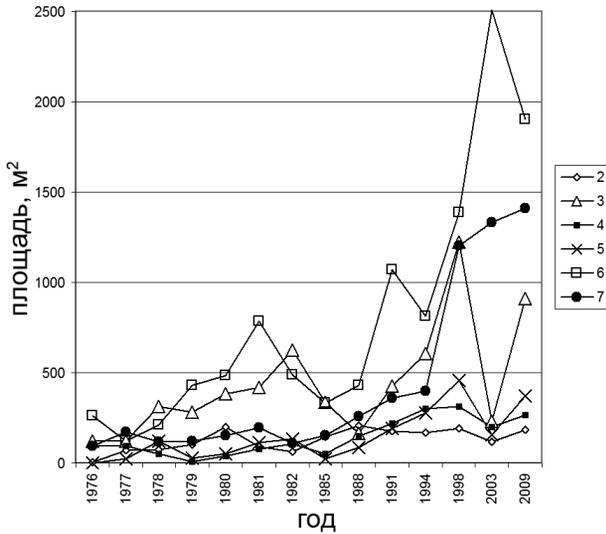


Рис. 3. Межгодовые колебания площади зарослей зостеры на отдельных участках литорали о. Ряшкова

обитаниях зостеры на этом острове. Это степень прибойности, гидродинамическая активность во время приливно-отливных процессов, а также некоторые зависящие от этого гидрохимические параметры мелководных прибрежных вод и состава грунта-субстрата.

Большую роль в формировании восстанавливающихся лугов литоральной зостеры играют физические факторы ледового покрова. В зимний период, когда ледовый покров монолитен и покрывает все море, льдины ложатся на поверхность литорали во время отлива и поднимаются во время полной воды в прилив. В холодное время года зостера во время отлива в некоторых участках местообитаний вмораживает в нижнюю часть льдин, таким образом, лед вырывает вморзанные в него отдельные фрагменты куртин и они отрываются от субстрата, когда лед поднимается с приливной водой. Отрицательное влияние на зостеру оказывает механическое повреждение ее зарослей во время осеннего ледостава, когда ледовый покров периодически взламывается при сильном ветре, пока не станет достаточно толстым. Еще большее повреждающее воздействие на взморник оказывает весеннее разрушение ледового покрова. При торошении отдельные крупные льдины, повернувшись вертикально, а также их массивные обломки во время ветреной погоды могут перепахивать или выворачивать как большие фрагменты сплошных поселений зостеры, так и отдельные ее куртины.

Довольно существенное влияние на изменение состояния зостеры в некоторых ее местообитаниях оказывают биотические условия окружающей среды. В начале лета на поверхность надземных побегов взморника откладывает свою икру беломорская сельдь. Такую лакомую пищу сразу обнаруживают морские птицы – многочисленные чайки, кулики, крохали и др. Они поедают эту

икру вместе с листьями и побегами. Поврежденная таким образом зостера восстанавливается быстро и к осени уже имеет нормальный вид.

Осенью в Кандалакшских и Онежских шхерах останавливаются пролетные серые гуси *Anser anser*, лебеди-кликуну *Cygnus cygnus* и в местах произрастания зостеры активно кормятся этими растениями. Поврежденные таким образом части поселений выглядят угнетенными до второй половины июня следующего года. Все перечисленные причины сокращения численности надземных побегов вызывают разнонаправленные колебания площади зарослей зостеры на всех восьми исследуемых участках.

Несмотря на довольно значительные и разнонаправленные колебания площади зарослей зостеры на отдельных участках, очевиден тренд увеличения суммарной площади зарослей зостеры на литорали о. Ряшкова в целом.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В начале наших исследований, в 1973 году, на литорали о. Ряшкова были обнаружены лишь небольшие по площади, разрозненные куртины зостеры, составившие в сумме всего 127 м<sup>2</sup>. В 1975 году суммарная площадь зарослей увеличилась в 2,3 раза. Далее ежегодно до 1981 года происходило непрерывное увеличение суммарной площади морской травы, но в 1982 году она сократилась на 8,4 %. С 1980 года на всех восьми исследованных участках зарегистрированы разнонаправленные колебания площади ее зарослей. Они объясняются различными причинами, обусловленными неодинаковой сезонной и межгодовой изменчивостью условий окружающей среды (абиотических и биотических) во всех восьми местообитаниях зостеры на этом острове. В 2009 году зарослями *Zostera marina* было занято 5177 м<sup>2</sup>.

За весь период наших исследований обнаружен четко выраженный тренд увеличения площади зарослей зостеры на литорали о. Ряшкова в целом.

Отдельные поселения взморника, в начале наших наблюдений недалеко расположенные друг от друга, в 2009 году, увеличившись в размерах, слились воедино. Некоторые поселения, разрастаясь за это время, увеличили свою площадь в сотни раз. Аналогичное восстановление популяций зостеры наблюдается в настоящее время на литорали всех 24 обследованных островов.

Общая тенденция процесса восстановления площади зарослей *Zostera marina* в Кандалакшском заливе Белого моря очевидна.

Представленные результаты исследований имеют большое значение в связи с тем, что они выполнялись на мониторинговых полигонах особо охраняемой природной территории и акватории Кандалакшского государственного природного заповедника.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белое море. Биологические ресурсы и проблемы их рационального использования. Исследования фауны морей. Вып. 42 (50). Ч. 1. СПб., 1995. 249 с.
2. Бергер В. Я. Продукционный потенциал и промысловая бедность Белого моря // 30 лет морской биологической станции СПбГУ: итоги и перспективы: Сб. науч. тр. / Санкт-Петербург. гос. ун-т, Морская биологич. ст. СПб., 2005. С. 7–25.
3. Бергер В. Я. О продукции zostеры в Белом море // Биология моря. 2011. № 5. С. 362–366.
4. Бианки В. В. Птицы Белого моря (Современное состояние, сезонное размещение и биология): Дисс. ... д-ра биол. наук. СПб., 1993. 51 с.
5. Кузнецов В. В., Матвеева Т. А. К биологическим особенностям zostеры Белого моря // Проблемы использования промысловых ресурсов Белого моря и внутренних водоемов Карелии. Вып. 1. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 145–149.
6. Марковская Е. Ф., Шкляревич Г. А., Сергиенко Л. А., Стародубцева А. А. К вопросу о морфологической изменчивости *Zostera marina* L. на побережьях Белого моря // Материалы Всероссийской конференции «Структурные и функциональные отклонения от нормального роста и развития растений под воздействием факторов среды» (с международным участием) 14–18 июля 2011, г. Петрозаводск. Петрозаводск. Петрозаводск. С. 179–183.
7. Наумов А. Д. Многолетние исследования литорального бентоса Белого моря в губе Чупа (Кандалакшский залив): сезонная и многолетняя динамика биомассы взморника *Zostera marina* // Комплексные исследования процессов, характеристик и ресурсов российских морей Северо-Европейского бассейна (проект подпрограммы «Исследование природы Мирового океана» федеральной целевой программы «Мировой океан»). Вып. 2. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2007. С. 493–502.
8. Садчиков А. П., Кудряшов М. А. Экология прибрежно-водной растительности: учебное пособие для студентов вузов / Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, Междунар. биотехнол. центр МГУ, каф. гидробиологии МГУ. М.: НИИ-Природа: РЭФИА, 2004. 220 с.
9. Шкляревич Г. А., Марковская Е. Ф., Корзунина А. А. Особенности экологии *Zostera marina* L., обитающей на литорали о. Горелый (Порья губа Кандалакшского залива Белого моря) // Труды Петрозаводского государственного университета. Сер. «Биология». Вып. 1. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. С. 264–270.
10. Шкляревич Г. А. О некоторых сторонах биологии *Zostera marina* L. на литорали островов в вершине Кандалакшского залива // Природа заповедников РСФСР и ее изменение под влиянием естественных и антропогенных факторов. М., 1982. С. 76–89.
11. Frederiksen M., Krause-Jensen D., Holmer M., Laursen J. S. Long-term changes in area distribution of eelgrass (*Zostera marina*) in Danish coastal waters // Aquatic Botany. 2004. Vol. 78. № 2. P. 167–181.
12. Rasmussen E. Systematics and ecology of the Isefjord marine fauna (Denmark) // Ophelia. 1973. 11. P. 1–495.

Shklyarevich G. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

RECOVERY OF *ZOSTERA MARINA* L. THICKETS IN KANDALAKSHA BAY OF WHITE SEA

Seagrass *Zostera marina* forms thickets (meadows) in shallow coastal areas of the Atlantic and Pacific Oceans as well as in other numerous seas of these regions. *Zostera* is a perennial with a well-developed root system. It plays an important role in the positive development of bioenergy and marine ecosystems of the oceans as a whole. In the 30s of the XX<sup>th</sup> century, in the North Atlantic Ocean massive destruction of *Zostera* with subsequent gradual recovery of its meadows was registered. In the 60s of the XX<sup>th</sup> century, in the White Sea mass death of seagrass was also observed. This phenomenon was frequently encountered on the territory earlier. The death of *Zostera* was followed by a biological disaster resulting in the violation of trophic links and a chain of negative aftereffects. At the end of the 60th, recovery of the *Zostera* population was observed in the White Sea. The process of seagrass meadows' recovery was investigated in the littoral zone of Ryashkov island located in Kandalaksha Bay of the White Sea. The area of thickets was defined annually in June and July for a period of 10 years starting from 1973, further once in three – five years. Thus, the research process of *Zostera* recovery covers a period of 37 years, and we plan to continue our study. In 1973, only small areas or scattered clumps of seagrass, a total of only 127 m<sup>2</sup>, were discovered in the littoral zone of Ryashkov island. In 2009, the total area of *Zostera marina* meadows reached 5177 m<sup>2</sup>. Multidirectional fluctuations of the area with thickets of eelgrass were registered on all eight studied sites starting from 1980. Their occurrence is conditioned by various reasons caused by unequal seasonal and annual variability of environmental conditions (abiotic and biotic) in all eight habitats of the seagrass found on the island. The general tendency of the recovery process in the area of seagrass meadows in the littoral of Ryashkov island is shown.

Key words: The White Sea, Kandalaksha Bay, Ryashkov island, a seagrass – *Zostera marina*, process recovery of thickets

## REFERENCES

1. *Beloe more. Biologicheskie resursy i problemy ikh ratsional'nogo ispol'zovaniya. Issledovaniya fauny morey* [Biological resources and the problems of their rational exploitation]. Edition 42 (50). Ch. 1. St. Petersburg, 1995. 249 p.
2. Berger V. Ya. The potential productivity of the fishery and poverty of the White Sea [Produktsionnyy potentsial i promyslovaya bednost' Belogo moraya]. *30 let morskoy biologicheskoy stantsii Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta: itogi i perspektivy. Sbornik nauchnykh trudov* [The 30th anniversary of Marine Biological Station St. Petersburg State University]. St. Petersburg, 2005. P. 7–25.
3. Berger V. Ya. On production of *Zostera* in the White Sea [O produktii zostery v Belom more]. *Biologiya morya* [Marine Biology]. 2011. № 5. P. 362–366.
4. Bianki V. V. *Ptitsy Belogo morya (Sovremennoe sostoyanie, sezonnoe razmeshchenie i biologiya)*. Diss. ... d-ra biol. nauk [Birds of the White Sea (Current Situation, seasonal occupancy and biology). Dr biol. sci. diss in the form of a scientific report]. St. Petersburg, 1993. 51 p.

5. Kuznetsov V. V., Matveeva T. A. The biological characteristics of seagrass White Sea [K biologicheskim osobennostyam zostery Belogo morya]. *Problemy ispol'zovaniya promyslovykh resursov Belogo morya i vnutrennikh vodoemov Karelii*. Edition 1. Moscow; Leningrad, AN SSSR Publ., 1963. P. 145–149.
6. Markovskaya E. F., Shklyarevich G. A., Sergienko L. A., Starodubtseva A. A. Morphological variation of *Zostera marina* L. on the White sea coasts [K voprosu o morfologicheskoy izmenchivosti *Zostera marina* L. na poberezh'yakh Belogo morya]. *Materialy Vserossiyskoy konferentsii "Strukturnye i funktsional'nye otkloneniya ot normal'nogo rosta i razvitiya rasteniy pod vozdeystviem faktorov sredy"* 14–18 iyulya 2011, g. Petrozavodsk. Petrozavodsk, 2011. P. 179–183.
7. Naumov A. D. Long-term investigations of the littoral benthos of the White Sea in the Chupa Guba (Kandalaksha Bay): seasonal and long-term dynamics of the biomass of the eelgrass of *Zostera marina* [Mnogoletnie issledovaniya litoral'nogo bentosa Belogo morya v gube Chupa (Kandalakshskiy zaliv): sezonnaya i mnogoletnyaya dinamika biomassy vzmornika *Zostera marina*]. *Kompleksnyye issledovaniya protsessov, kharakteristik i resursov rossiyskikh morey Severo-Evropeyskogo basseyna* [Complex investigations of processes, characteristics and resources of the Russian seas of the North European Basin (project of the Federal program "World Ocean") sub-program "Investigations of the World Ocean Study nature"]. Issue 2. Apatity, Kola Science Centre RAS Publ., 2007. P. 493–502.
8. Sadchikov A. P., Kudryashov M. A. *Ekologiya pribrezhno-vodnoy rastitel'nosti* [Ecology of coastal aquatic vegetation]. Moscow, NIA-Priroda: REFIA Publ., 2004. 220 p.
9. Shklyarevich G. A., Markovskaya E. F., Korzunina A. A. *Osobennosti ekologii Zostera marina L., obitayushchey na litorali o. Gorelyy (Por'ya guba Kandalakshskogo zaliva Belogo morya)* [Ecological Features of *Zostera marina* L., growing in intertidal zone Goreliy Islands (Porya Guba, Kandalaksha Bay, White Sea)]. *Trudy PetrGU. Ser. "Biologiya"*. Vyp. 1. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2008. P. 264–270.
10. Frederiksen M., Krause-Jensen D., Holmer M., Laursen J. S. Long-term changes in the area of eelgrass (*Zostera marina*) distribution in Danish coastal waters // *Aquatic Botani*. Vol. 78. № 2. 2004. P. 167–181.
11. Rasmussen E. Systematics and ecology of the Isefjord marine fauna (Denmark) // *Ophelia*. 1973. 11. P. 1–495.

Поступила в редакцию 27.01.2014

УДК 581.1+582.632.1

НАТАЛИЯ АЛЕКСЕЕВНА ГАЛИБИНА

кандидат биологических наук, и. о. заведующего аналитической лабораторией, Институт леса Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)  
ngalibina@sampo.ru

ЕЛЕНА НИКОЛАЕВНА ТЕРЕБОВА

кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
eterebova@gmail.com

### ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЛЕТОЧНЫХ СТЕНОК ТКАНЕЙ СТВОЛА ДЕРЕВЬЕВ *BETULA PENDULA* ROTH

У обычной березы повислой (*Betula pendula* var. *pendula*) и карельской березы (*B. pendula* var. *carelica*) в период активного роста были изучены физико-химические параметры клеточных оболочек проводящих тканей ствола: коэффициент набухания полимерного матрикса, ионообменная способность, константа ионизации активных групп. Определение этих параметров позволило оценить жесткость клеточных стенок, качественный и количественный состав активных групп, участвующих в ионообменных процессах, то есть структурную и функциональную составляющие клеточной оболочки. У карельской березы коэффициент набухания клеточных стенок был значительно ниже как в тканях флоэмы, так и ксилемы. Сделано предположение, что в тканях ксилемы у *B. pendula* var. *carelica* выше жесткость структуры клеточной стенки по сравнению с *B. pendula* var. *pendula*. Увеличение жесткости структуры ксилемы обусловлено увеличением доли компонентов фенольной природы, как в составе лигнина, так и в виде поперечных диферуловых мостиков. В тканях флоэмы причиной меньшего набухания клеточных стенок у карельской березы было небольшое количество функциональных групп в структуре апопласта, а именно: карбоксильных групп оксикоричных кислот и фенольных -ОН групп. Высказывается предположение, что полученные отличия в составе и свойствах клеточных оболочек тканей ствола между карельской и обычной березой повислой связаны с условиями, в которых идет синтез компонентов клеточных оболочек. Возможно, более высокий уровень углеводов, отмеченный в тканях ствола карельской березы в период, предшествующий интенсивному росту, обеспечивает высокую скорость развития вторичной стенки, большую степень лигнификации и жесткости ее структуры.

Ключевые слова: карельская береза, ксилема, флоэма, клеточная стенка, набухание клеточной стенки, ионообменные свойства

Клеточная стенка – это внешний многофункциональный компартмент растительной клетки с исключительно сложными механизмами формирования и функционирования [6]. Один из подходов к изучению свойств клеточных стенок основывается на их схожести с катионообменными смолами с малой степенью сшивки мономерных соединений [9]. В связи с этим свойства клеточных оболочек характеризуют следующие физико-химическими параметрами: коэффициент набухания полимерного матрикса ( $K_{\text{наб}}$ ), ионообменная способность (S), константа ионизации активных групп ( $pK_a$ ). Определение этих параметров позволяет оценить жесткость клеточных стенок, качественный и количественный состав активных групп, участвующих в ионообменных процессах, то есть структурную и функциональную составляющие клеточной оболочки. Подобный подход широко применяется для изучения физико-химических характеристик апопласта корня травянистых растений

как в норме, так и в условиях засоления [9], состава и функциональной роли ионообменных групп клеточных стенок лишайников [1], влияния антропогенного загрязнения на физиологический статус хвойных [2], [10], [11], [16].

Исследования механизмов формирования тканей ствола карельской березы (*Betula pendula* var. *carelica*) показали, что отклонения от нормального роста и развития клеток и тканей, ведущие к формированию структурных аномалий древесины и коры, обусловлены увеличением во флоэме уровня сахарозы [4], [19], основной транспортной формы сахаров у березы повислой [4]. В результате интенсивной метаболизации сахарозы в аномальных участках накапливаются гексозы, которые через экспрессию ряда генов [18] могут приводить к отклонению в деятельности камбия и, усиливая синтез запасных метаболитов, способствуют превращению камбиальных производных в клетки запасной паренхимы. Субстратная обеспеченность про-

цесса формирования клеточной стенки оказывает влияние на состав и соотношение ее компонентов, что, в свою очередь, должно отразиться и на физико-химических свойствах клеточных оболочек.

В связи с этим для сравнения двух форм березы повислой, различающихся по структуре древесины, было проведено изучение физико-химических свойств клеточных стенок проводящих тканей ствола.

#### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основными объектами исследования являлись формы березы повислой, различающиеся по структуре древесины, – обычная береза повислая (*Betula pendula* var. *pendula*) и карельская береза (*B. pendula* var. *carelica*). Экспериментальные работы проводили в посадках деревьев, произрастающих в одинаковых почвенно-климатических условиях на Агробиологической станции Карельского научного центра РАН вблизи г. Петрозаводска. Возраст деревьев 30–35 лет.

Для сравнительного исследования физико-химических свойств клеточных стенок у двух форм березы повислой отбирали ткани ксилемы текущего года, ткани флоэмы, включающие проводящую и непроводящую флоэму текущего года, и камбиальную зону. Взятие образцов осуществляли из высечек ствола, сделанных на высоте 1,3 м от земли в середине июля, в период активных ростовых процессов.

Выделение клеточной стенки проводили по известной методике [9]. Растительный материал помещали в стеклянную колонку и промывали в следующей последовательности: 10 мМ КОН, дистиллированная вода, 10 мМ HCl. Полученные образцы промывали дистиллированной водой до отсутствия хлорид ионов, а затем высушивали до постоянного веса при 55–60°. С помощью этого метода все катионообменные группы, находящиеся в структуре клеточной стенки, переводятся в H<sup>+</sup>-форму, что позволяет проводить сравнительное исследование ионообменных свойств апопласта с различной структурой функциональных групп.

Весовой коэффициент набухания клеточных стенок определяли гравиметрическим методом. Фрагменты набухших в воде клеточных стенок обсушивали фильтровальной бумагой и определяли их сырую массу ( $G_F$ ). Затем клеточные стенки высушивали при 50° до постоянного веса и определяли их сухую массу ( $G_D$ ). Весовой коэффициент набухания клеточных стенок ( $K_{наб}$ ) определяли по формуле:

$$K_{наб} = (G_F - G_D) \cdot G_D^{-1},$$

где  $G_F$  и  $G_D$  – сырая и сухая масса образцов, г.

Определение состава и количества ионогенных групп в клеточных стенках проводили, используя метод потенциометрического титрования [16].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Способность связывания воды компонентами клеточных стенок была оценена по коэффициенту набухания клеточных оболочек. Как видно из значений  $K_{наб}$  (рис. 1), набухание клеточных стенок ксилемы обеих форм березы существенно не изменяется с изменением pH раствора. Значение  $K_{наб}$  не превышало 2 г воды на 1 г сухой массы клеточной стенки как для карельской, так и для обычной березы повислой.

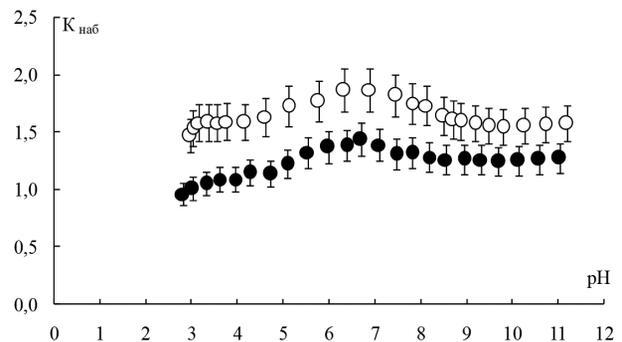


Рис. 1. Зависимость коэффициента набухания ( $K_{наб}$ ) клеточных стенок ксилемы от pH. По оси абсцисс – значения pH раствора, по оси ординат –  $K_{наб}$  (1 г H<sub>2</sub>O на 1 г сухой массы) *B. pendula* var. *pendula* (белый цвет) и *B. pendula* var. *carelica* (черный цвет)

Анализ изменения набухания клеточных стенок флоэмы с изменением pH внешнего раствора у двух форм березы показал, что  $K_{наб}$  полимерного матрикса не является постоянной величиной, а увеличивается с увеличением pH окружающей среды (рис. 2). Максимальные его значения составили  $11 \pm 0,2$  и  $7 \pm 0,1$  для обычной и карельской березы соответственно.

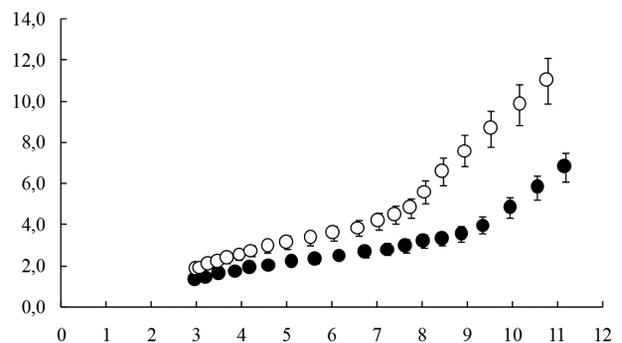


Рис. 2. Зависимость коэффициента набухания ( $K_{наб}$ ) клеточных стенок флоэмы от pH. Обозначения, как на рис. 1

Из полученных результатов можно заключить, что клеточные стенки ксилемы березы повислой отличаются от клеточных стенок флоэмы большей степенью жесткости их полимерной структуры и/или малым количеством ионообменных групп. На границе клеток ксилемы и флоэмы происходит снижение сопротивления току воды, одной из причин которого может быть малая степень сшивки полимеров клеточ-

ных стенок флоэмы. Полученные для тканей флоэмы высокие значения коэффициентов набухания свидетельствуют о том, что их клеточные стенки не являются непроницаемыми для воды, что обуславливает их активное участие в транспорте веществ.

Следует отметить, что между двумя формами березы повислой существуют различия. Так,  $K_{наб}$  клеточных стенок ксилемы и флоэмы у карельской березы ниже по сравнению с обычной березой повислой (см. рис. 1, 2), из чего можно заключить, что жесткость структуры клеточной стенки в тканях ствола у нее выше. Известно, что степень связанности полимерных компонентов в клеточной оболочке определяется микрофибриллами целлюлозы – в поперечном направлении, гликанами, связывающими эти фибриллы, – в продольном направлении и сшивками между молекулами экстенсина – в радиальном направлении [13]. Большое влияние на упрочнение структуры клеточной оболочки оказывает также ее лигнификация. Для выяснения роли различных компонентов клеточных стенок в их упрочнении у растений березы повислой определен качественный и количественный состав ионообменных групп в каждой ткани.

Потенциометрическим титрованием в клеточных стенках флоэмы и ксилемы исследуемых растений определили четыре типа ионообменных групп, для каждой из которых были рассчитаны значения констант ионизации. Исходя из данных литературы [9] и рассчитанных  $pK_a$ , мы заключили, что обнаруженные четыре типа ионообменных групп – это одна анионообменная группа (аминогруппа) и три катионообменные группы (карбоксильные группы (-COOH)  $\alpha$ -D-полигалактуроновой кислоты (ПГУК), -COOH, не относящиеся к ПГУК (СООН), и фенольные -ОН группы) (таблица).

Значение константы ионизации ( $pK_a$ ) для функциональных групп каждого типа в клеточных стенках ксилемы и флоэмы деревьев *Betula pendula* Roth.

Функциональные группы	<i>Betula pendula</i> var. <i>carelica</i>		<i>Betula pendula</i> var. <i>pendula</i>	
	ксилема	флоэма	ксилема	флоэма
Аминогруппы	3,1 ± 0,63	3,5 ± 0,40	3,1 ± 0,61	3,1 ± 0,35
-COOH группы ПГУК	5,6 ± 0,49	5,4 ± 0,47	5,7 ± 0,40	5,2 ± 0,41
-COOH группы	7,6 ± 0,10	7,6 ± 0,21	7,6 ± 0,06	7,7 ± 0,07
Фенольные -ОН группы	9,3 ± 0,43	9,1 ± 0,32	9,4 ± 0,30	9,4 ± 0,35

Примечание. В таблице представлены средние значения из пяти биологических повторностей.

Как видно из рассчитанных нами значений  $pK_a$  (см. таблицу), у карельской березы клеточные стенки флоэмы и ксилемы по качествен-

ному составу функциональных групп не отличались от клеточных стенок обычной березы повислой.

В ксилеме суммарное содержание всех функциональных групп в клеточных стенках у карельской березы составило  $939 \pm 79$  мкм на 1 г сухой ткани, а у обычной повислой –  $773 \pm 28$  мкм на 1 г сухой ткани. В клеточных оболочках ксилемы карельской березы было в 2 раза больше фенольных -ОН групп (рис. 3).

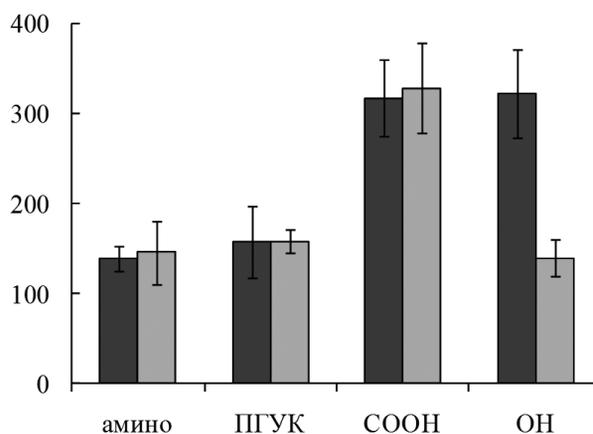


Рис. 3. Количество функциональных групп каждого типа (S) в клеточных стенках ксилемы. По оси абсцисс – функциональные группы: amino (аминогруппы), ПГУК – карбоксильные группы полигалактуроновой кислоты, СООН – карбоксильные группы, ОН – фенольные группы; по оси ординат – S (мкмоль на 1 г сухой массы) *B. pendula* var. *pendula* (светлые столбцы) и *B. pendula* var. *carelica* (темные столбцы)

Гидроксильные -ОН группы с  $pK_a \sim 9$  относятся к компонентам фенольной природы, таким как фенольные спирты и кислоты. В клеточной стенке они могут быть представлены в свободном виде, в связанном с полисахаридами (например, феруловая кислота) и также входят в состав полимера лигнина [15], [17], [20]. Большее количество свободных или в составе полисахаридов фенольных компонентов должно было бы сопровождаться и большим значением  $K_{наб}$  клеточных стенок в диапазоне pH 9–12. Однако этого не происходит. Меньшее набухание клеточных стенок ксилемы карельской березы свидетельствует о принадлежности фенольных групп к компонентам лигнина.

Известно, что полимеризация свободных монолигнолов в лигнин происходит неферментативно, по свободнорадикальному механизму, поэтому регуляция синтеза лигнина возможна на этапе синтеза монолигнолов. Регулирующим фактором в данном случае служит доступность ассимилятов, причем сахара выступают не только как исходный субстрат, но и как сигнал для усиления процесса лигнификации [21].

Так, у карельской березы в аномальных участках ксилемы в период активного роста активность апопластной инвертазы превосходит

таковую у обычной березы повислой примерно в 3 раза [3]. Инвертаза (ЕС 3.2.1.26) – это гидролаза, которая необратимо расщепляет метаболически инертную сахарозу на фруктозу и глюкозу [18], [22] и др. В результате в клеточной стенке накапливаются гексозы, которые могут возвращаться в клетку и там расходоваться на дыхание, а также синтез запасных метаболитов и фенольных соединений – предшественников монолигнолов [8]. Важной каталитической системой, задействованной в утилизации  $H_2O_2$  в процессе синтеза лигнина, является пероксидаза [7], особенно изопероксидаза, локализованная в клеточной оболочке [12; 309–321]. Наши предыдущие исследования показали, что пероксидазная активность в тканях ксилемы у карельской березы была значимо выше, чем у обычной березы повислой [5].

Синтез лигнина потребляет значительную часть углерода растения. Этот полимер никогда не расщепляется, его наличие в клеточной стенке существенно меняет ее свойства. В частности, увеличение лигнификации клеточной стенки приводит к усилению степени жесткости апопласта.

Обобщая эти данные, можно предположить, что повышенное содержание у карельской березы ассимилятов приводит к формированию у нее толстостенных клеточных оболочек. Высокая степень жесткости трехмерной структуры клеточных стенок является причиной меньшего значения их набухания у карельской березы.

В клеточных стенках флоэмы по сравнению с ксилемой общее содержание ионообменных групп было существенно выше (рис. 4). У обычной березы повислой суммарное содержание функциональных групп составило  $2455 \pm 115$ , а у карельской –  $2048 \pm 90$  мкМ на 1 г сухой массы клеточной стенки. Большее количество групп у обычной березы повислой было за счет карбоксильных групп оксикоричных кислот

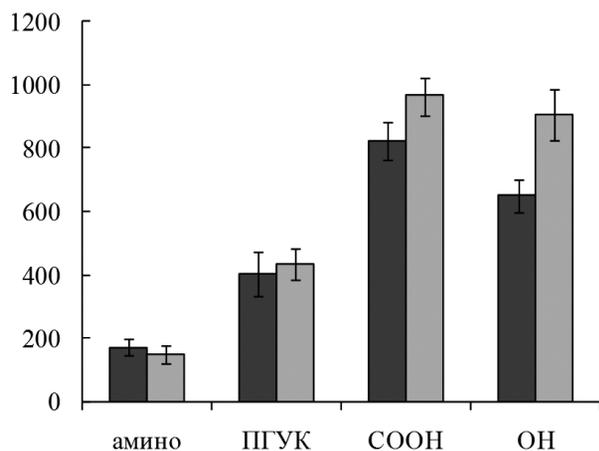


Рис. 4. Количество функциональных групп каждого типа (S) в клеточных стенках флоэмы. Обозначения, как на рис. 3

и фенольных -ОН групп (см. рис. 4). При физиологических значениях рН апопласта (рН 5–6,5) эти группы закрыты и не принимают участия в реакциях ионного обмена [14]. Их ионизация происходит в диапазоне рН 7–12, где и было отмечено большее значение коэффициента набухания у обычной березы по сравнению с карельской (см. рис. 2).

Высокие значения  $K_{\text{наб}}^{\text{ц.об}}$  клеточных оболочек тканей флоэмы у обеих форм березы свидетельствуют об отсутствии в них лигнификации. Карбоксильные группы ПГУК и гидроксильные -ОН группы, вероятно, относятся к гидроксикоричным или фенольным кислотам и фенольным спиртам, находящимся в клеточных стенках флоэмы в свободном виде или в связанном с полисахаридами.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование физико-химических свойств клеточных стенок тканей ствола позволило выявить отличия между карельской и обычной березой повислой в значении коэффициента набухания и количественном содержании ионообменных групп. Для *B. pendula* var. *carelica* коэффициент набухания клеточных оболочек был значительно ниже как для тканей флоэмы, так и ксилемы. Основываясь на полученных данных, можно заключить, что жесткость структуры клеточной стенки в тканях ствола у карельской березы выше по сравнению с обычной березой повислой. Причины более высокой степени связанности полимеров клеточных стенок у *B. pendula* var. *carelica* в разных тканях различны. Так, увеличение жесткости структуры флоэмы, вероятно, обусловлено увеличением доли целлюлозы, ксилана и других гликанов, приводящих к локальным утолщениям вторичной клеточной стенки. В создании же более высокой прочности ксилемы наряду с гелицеллюлозами большую роль могут играть компоненты фенольной природы как в составе лигнина, так и в виде поперечных диферуловых мостиков.

Полученные отличия в составе и свойствах клеточных оболочек тканей ствола между карельской и обычной березой могут быть связаны с условиями, в которых идет синтез компонентов клеточной стенки. Возможно, более высокий уровень углеводов, отмеченный в тканях ствола карельской березы в период, предшествующий интенсивному росту [4], обеспечивает высокую скорость развития вторичной стенки, большую степень лигнификации и жесткости ее структуры. В одних тканях (ксилема) увеличение субстратного обеспечения сопровождается возрастанием лигнификации, в других (флоэма) – изменением направленности дифференциации клеток, приводящим к склерификации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев Д. В. Ионнообменные группы и белки клеточных стенок таллома лишайника *Peltigera aphthosa* (L.) Willd.: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М.: МГУ, 2009. 21 с.
2. Галибина Н. А. Клеточная стенка хвой деревьев сосны обыкновенной и ели сибирской в условиях аэротехногенного загрязнения. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2003. 19 с.
3. Галибина Н. А., Красавина М. С., Новицкая Л. Л., Софронова И. Н. Ферменты метаболизма сахарозы при формировании аномалий карельской березы // Структурные и функциональные отклонения от нормального роста и развития растений под воздействием факторов среды: Материалы междунар. конф. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 79–84.
4. Галибина Н. А., Новицкая Л. Л., Софронова И. Н. Динамика сахаров в тканях ствола *Betula pendula* (*Betulaceae*) при выходе из зимнего покоя // Растительные ресурсы. 2012. Т. 48. № 4. С. 554–564.
5. Галибина Н. А., Целищева Ю. Л., Андреев В. П., Софронова И. Н., Никерова К. М. Активность пероксидазы в органах и тканях деревьев березы повислой // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2013. № 4 (133). С. 7–13.
6. Горшкова Т. А. Растительная клеточная стенка как динамическая система. М.: Наука, 2007. 429 с.
7. Граскова И. А., Боровский Г. Б., Колесниченко А. В., Войников В. К. Пероксидаза как компонент сигнальной системы клеток картофеля при патогенезе кольцевой гнили // Физиология растений. 2004. Т. 51. № 5. С. 692–697.
8. Запрометов М. Н. Фенольные соединения: распространение, метаболизм и функции в растениях. М.: Наука, 1993. 272 с.
9. Мейчик Н. Р. Ионный обмен и диффузия в клеточных стенках растений: Автореф. дисс. ... д-ра биол. наук. М.: МГУ, 2007. 49 с.
10. Теребова Е. Н., Галибина Н. А. Структурно-функциональное состояние хвой *Pinus sylvestris* (*Pinaceae*) в условиях загрязнения диоксидом серы и тяжелыми металлами // Растительные ресурсы. 2010. № 2. С. 61–73.
11. Теребова Е. Н., Галибина Н. А. Устойчивость сосны обыкновенной в условиях загрязнения Европейского Севера России // Аграрная Россия. 2009. С. 108–109.
12. Фенольные соединения: фундаментальные и прикладные аспекты / Ин-т физиологии растений РАН. М.: Научный мир, 2010. 400 с.
13. Шарова Е. И. Клеточная стенка растений. СПб: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2004. 156 с.
14. Demarty M., Morvan C., Thellier M. Calcium and the cell wall // Plant Cell Environ. 1984. Vol. 7. P. 441–448.
15. Donaldson L. A. Lignification and lignin topochemistry – an ultrastructural view // Phytochemistry. 2001. Vol. 57. P. 859–873.
16. Galibina N. A., Terebova E. N. Characterization of cell wall properties in needles from scotch pine trees of various vigor // Russian Journal of Plant Physiology. 2008. Vol. 55. № 3. P. 378–384.
17. Iiyama K., Lam T., Stone B. Covalent cross-links in the cell wall // Plant Physiol. 1994. Vol. 104. P. 315–320.
18. Koch K. E. Sucrose metabolism: regulatory mechanisms and pivotal roles in sugar sensing and plant development // Curr. Opin. Plant Biol. 2004. Vol. 7. P. 235–246.
19. Novitskaya L. L., Kushnir F. V. The role of sucrose in regulation of trunk tissue development in *Betula pendula* Roth // Journal of Plant Growth Regulation. 2006. Vol. 25. № 1. P. 18–29.
20. Ralph J., Quideau S., Grabber J. H., Hatfield R. D. Identification and synthesis of new ferulic acid dehydromers present in grass cell walls // J. Chem. Soc. 1994. Vol. 1. P. 13485–13498.
21. Rogers N., Slack E., Edwards A., Nolte M., Schulz O., Schweighoffer E., Williams D., Gordon S., Tybulewicz V., Brown G. and Reis E., Sousa C. Syk-dependent cytokine induction by dectin-1 reveals a novel pattern recognition pathway for C-type lectins // Immunity. 2005. Vol. 22. P. 507–517.
22. Tymowska-Lalanne Z., Kreis M. The plant invertases: physiology, biochemistry and molecular biology // Advances in Botanical Research. 1998. Vol. 28. P. 71–117.

Galibina N. A., Institute of Biology Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Terebova E. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

**PHYSICAL-CHEMICAL PROPERTIES OF *BETULA PENDULA* ROTH TRUNK TISSUE CELL WALLS**

The physical-chemical parameters of the cell walls in the trunk conducting tissues (polymer matrix swelling index, ion exchange capacity, ionization constant of active groups) were studied during active growth in two forms of silver birch differing in wood texture – common silver birch (*Betula pendula* var. *pendula*) and Karelian birch (*B. pendula* var. *carelica*). By determining these parameters, we assessed the rigidity of studied cell walls, the qualitative and quantitative composition of active groups in the ion exchange processes, i.e. the structural and functional dimensions of the cell wall. The cell wall swelling index in Karelian birch was much lower both in phloem and in xylem tissues. The reasons behind the lower swelling of the cell walls in Karelian birch differed depending on the types of tissue. We assumed that the rigidity of the cell wall structure in xylem tissues was higher in *B. pendula* var. *carelica* in comparison with *B. pendula* var. *pendula*. Higher rigidity of the xylem structure is due to an increased proportion of phenolic compounds, both within lignin and in the form of diferulic cross-bridges. The reason for lower cell wall swelling in the phloem tissues of Karelian birch was the lower number of functional groups in the apoplast, which was in turn conditioned by carboxyl groups of hydroxycinnamic acids and phenolic -OH groups. The distinctions between Karelian birch and common silver birch in the composition and properties of trunk tissue cell walls are assumed to be related to the conditions under which cell wall components are synthesized. The high content of carbohydrates recorded in Karelian birch trunk tissues in the period preceding intensive growth may be a factor promoting rapid development of the secondary wall, its greater lignification, and structural rigidity.

Key words: Karelian birch, xylem, phloem, cell wall, swelling coefficient, ion exchange properties

## REFERENCES

1. Vorob'ev D. V. *Ionoobmennye gruppy i belki kletochnykh stenok talloma lishaynika Peltigera aphthosa (L.) Willd.: Avtoref. diss. ... kand. biol. nauk* [Ionogenic groups and proteins of cell wall of lichen thallome *Peltigera aphthosa* (L.) Willd. Cand. biol. sci. diss.]. Moscow, 2009. 21 p.
2. Galibina N. A. *Kletochnaya stenka khvoi derev'ev sosny obyknovennoy i eli sibirskoy v usloviyakh aerotekhnogennogo zagryazneniya: Avtoref. diss. ... kand. biol. nauk* [Cell wall of Scots pine and Sibirica spruce needles in conditions air pollution. Cand. biol. sci. diss.]. Petrozavodsk, 2003. 19 p.
3. Galibina N. A., Krasavina M. S., Novitskaya L. L., Sofronova I. N. Enzymes of sucrose metabolism during formation of abnormalities in curly birch [Fermenty metabolizatsii sakharozy pri formirovanii anomalii karel'skoy berezy]. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii "Strukturnye i funktsional'nye otkloneniya ot normal'nogo rosta i razvitiya rasteniy pod vozdeystviem faktorov sredy"* [Material of international conference "Structural and functional deviations from normal growth and development of plants under the influence of environmental factors"]. Petrozavodsk, Karel'skiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2011. P. 79–84.
4. Galibina N. A., Novitskaya L. L., Sofronova I. N. Dynamics of sugars in trunk tissues of *Betula pendula* (*Betulaceae*) when exiting from winter dormancy [Dinamika sakharov v tkanyakh stvola *Betula pendula* (*Betulaceae*) pri vykhode iz zimnego pokoya]. *Rastitel'nye resursy* [Plant resources]. 2012. Vol. 48. № 4. P. 554–564.
5. Galibina N. A., Tselishcheva Yu. L., Andreev V. P., Sofronova I. N., Nikerova K. M. Peroxidase activity in organs and tissues of trees of silver birch [Aktivnost' peroksidazy v organakh i tkanyakh derev'ev berezy povisloy]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudastvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Science]. 2013. № 4. P. 7–13.
6. Gorshkova T. A. *Rastitel'naya kletochnaya stenka kak dinamicheskaya sistema* [The plant cell wall as a dynamic system]. Moscow, Nauka Publ., 2007. 429 p.
7. Graskova I. A., Borovskiy G. B., Kolesnichenko A. V., Voynikov V. K. Peroxidase as a Component of the Signaling Pathway in Potato Cells during Ring Rot Infection // *Russian Journal of Plant Physiology*. 2004. Vol. 51. № 5. P. 621–626.
8. Zaprometov M. N. *Fenol'nye soedineniya: rasprostranenie, metabolizm i funktsii v rasteniyakh* [Phenolic compounds: Distribution, metabolism and functions in plants]. Moscow, Nauka Publ., 1993. 272 p.
9. Meychik N. R. *Ionnyy obmen i difuziya v kletochnykh stenkakh rasteniy: Avtoref. diss. ... dokt. biol. nauk* [Ion-exchange properties and diffusion in cell walls of plants. Dr. biol. sci. diss.]. Moscow, 2007. 49 p.
10. Terebova E. N., Galibina N. A. Characterization of needles from Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) trees subjected to industrial pollutions with sulfur and heavy metals [Strukturno-funktsional'noe sostoyanie khvoi *Pinus sylvestris* (*Pinaceae*) v usloviyakh zagryazneniya dioksidom sery i tyazhelymi metallami]. *Rastitel'nye resursy* [Plant resources]. 2010. Vol. 2. P. 61–73.
11. Terebova E. N., Galibina N. A. Resistance of Scotch Pine to Pollutions of Russian European North [Ustoychivost' sosny obyknovennoy v usloviyakh zagryazneniya Evropeyskogo Severa Rossii]. *Agrarnaya Rossiya* [Agricultural Russian]. 2009. P. 108–109.
12. *Fenol'nye soedineniya: fundamental'nye i prikladnye aspekty* [Phenolic compounds: fundamental and applied aspects]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2010. 400 p.
13. Sharova E. I. *Kletochnaya stenka rasteniy* [The plant cell wall]. St. Petersburg, 2004. 156 p.
14. Demarty M., Morvan C., Thellier M. Calcium and the cell wall // *Plant Cell Environ*. 1984. Vol. 7. P. 441–448.
15. Donaldson L. A. Lignification and lignin topochemistry – an ultrastructural view // *Phytochemistry*. 2001. Vol. 57. P. 859–873.
16. Galibina N. A., Terebova E. N. Characterization of cell wall properties in needles from scotch pine trees of various vigor // *Russian Journal of Plant Physiology*. 2008. Vol. 55. № 3. P. 378–384.
17. Iiyama K., Lam T., Stone B. Covalent cross-links in the cell wall // *Plant Physiol*. 1994. Vol. 104. P. 315–320.
18. Koch K. E. Sucrose metabolism: regulatory mechanisms and pivotal roles in sugar sensing and plant development // *Curr. Opin. Plant Biol*. 2004. Vol. 7. P. 235–246.
19. Novitskaya L. L., Kushnir F. V. The role of sucrose in regulation of trunk tissue development in *Betula pendula* Roth // *Journal of Plant Growth Regulation*. 2006. Vol. 25. № 1. P. 18–29.
20. Ralph J., Quideau S., Grabber J. H., Hatfield R. D. Identification and synthesis of new ferulic acid dehydrodimers present in grass cell walls // *J. Chem. Soc*. 1994. Vol. 1. P. 13485–13498.
21. Rogers N., Slack E., Edwards A., Nolte M., Schulz O., Schweighoffer E., Williams D., Gordon S., Tybulewicz V., Brown G. and Reis E., Sousa C. Syk-dependent cytokine induction by dectin-1 reveals a novel pattern recognition pathway for C-type lectins // *Immunity*. 2005. Vol. 22. P. 507–517.
22. Tymowska-Lalanne Z., Kreis M. The plant invertases: physiology, biochemistry and molecular biology // *Advances in Botanical Research*. 1998. Vol. 28. P. 71–117.

Поступила в редакцию 16.09.2014

ЕЛЕНА ЛЕОНИДОВНА РОХЛОВА

аспирант кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
rokhlova@gmail.com

### ТРАВЯНИСТЫЕ ИНТРОДУЦЕНТЫ ЮЖНОЙ КАРЕЛИИ\*

Современные флородинамические процессы во многом связаны с натурализацией интродуцированных видов. Негативным последствием натурализации растений-интродуцентов в новых условиях могут быть инвазии чужеродных видов. В связи с этим важной становится оценка вклада интродуцируемых растений в расширение состава флоры регионов. В настоящее время в Южной Карелии в открытом грунте культивируется 422 вида травянистых интродуцентов. Основная часть всех культивируемых в регионе видов (около 72 %) не проявляют признаков дичания. Самостоятельное семенное и/или вегетативное размножение отмечено для 117 видов (28 % культивируемых видов). Подавляющее большинство дичающих из культуры травянистых интродуцентов не способны конкурировать с аборигенными видами и не выходят за пределы культурных участков. В настоящее время репродуктивный потенциал большинства видов-интродуцентов недостаточен для их широкого распространения с мест возделывания и перехода в категорию инвазионных видов.

Ключевые слова: интродуцируемые виды, дичающие из культуры виды, адвентивные виды

Региональная флора представляет собой совокупность видов растений, естественно произрастающих на данной территории; во флоре выделяют аборигенную и адвентивные фракции. Современные флородинамические процессы во многом связаны с расширением состава адвентивных видов. Существует два пути изменения состава адвентивной фракции флоры: индукция и интродукция; последняя часто сопровождается натурализацией видов. В результате возникает группа дичающих из культуры видов, которые характеризуются самостоятельным возобновлением и расселением из мест возделывания.

В настоящее время во всем мире актуальна проблема биологического загрязнения окружающей среды, в том числе биологических инвазий [1]. В связи с этим важным становится исследование натурализации интродуцентов, характера их взаимодействия с видами местной флоры, оценка инвазионного потенциала и инвазионного статуса дичающих видов [7].

Целью данной работы является оценка вклада травянистых интродуцируемых растений в расширение состава региональной флоры севера (на примере Южной Карелии). Исследование выполнено в 2011–2014 годах на территории Южной Карелии. Было обследовано 15 городов и поселков, включая их окрестности (города Кондопога, Лахденпохья, Олонец, Петрозаводск, Пудож, Питкяранта, Сортавала, Суоярви, п. Пряжа) и 15 дачных кооперативов (Лучевое, Лососинное, Шапшезеро, Меери, Вуорио и др.). В кооперативах число дачных хозяйств составляло от 10 до 50 со средней площадью участка 1000 м<sup>2</sup>.

При инвентаризации видового состава интродуцированных растений маршруты охватывали территории городских озеленений, дачных и приусадебных участков, где выращиваются культурные растения, сельскохозяйственные угодья, различные вторичные местообитания, где выявлялись дичающие виды (обочины автомобильных дорог, железнодорожные насыпи, овраги, городские лесопарковые территории и т. д.). Коллекционные участки Ботанического сада Петрозаводского государственного университета в исследование не включались. Особое внимание уделялось интродуцентам, для которых отмечено самостоятельное вегетативное и/или семенное размножение. Такие виды признаются нами дичающими из культуры и включаются в состав адвентивной фракции флоры [6].

Географические элементы флоры приведены по Н. Н. Цвелеву [4]; названия видов – по А. В. Кравченко [3] и «Аннотированному списку...» [6]; адвентивные виды рассматриваются в понимании А. В. Кравченко [3].

В открытом грунте в Южной Карелии выявлено 422 вида травянистых растений-интродуцентов, среди которых декоративные, пищевые, лекарственные, почвоулучшающие и другие растения. Больше всего видов представлено в семействах *Asteraceae* (62 вида), *Poaceae* (28), *Lamiaceae* (23), *Ranunculaceae* (21), *Brassicaceae* (18).

Подавляющее большинство культивируемых растений (305 видов) не проявляют признаков дичания. Самостоятельное семенное и/или вегетативное размножение отмечено для 117 видов (28 % всех травянистых интродуцентов). По времени заноса на северную территорию

и вхождения в региональную флору все они являются неофитами, причем многие появились только в последние 10–20 лет. По способу заноса дичающие виды являются эргазиофитофитами, то есть адвентивными видами, входящими в состав региональной флоры из культуры.

Среди дичающих видов представлены однолетние растения (39 видов, 33 % дичающих), которые способны в условиях региона проходить полный жизненный цикл, формировать полноценные семена и ежегодно возобновляться семенами местной репродукции (*Cosmos bipinnatus* Сав., *Hordeum vulgare* L., *Secale cereale* L.). Основную же группу дичающих видов составляют травянистые многолетники (78 видов, 67 % дичающих), которые в течение ряда лет успешно зимуют в условиях региона и самостоятельно размножаются либо только вегетативно (*Aster x salignus* Willd., *Reynoutria japonica* Houtt., *Lysimachia nummularia* L.), либо и вегетативно, и семенами (*Centaurea montana* L., *Symphytum asperum* Lerech.).

При анализе адвентивных видов флоры по степени закрепления на новой территории выделяют четыре группы: эфемерофиты, колонофиты, эпекофиты, агриофиты. Эту классификацию можно применить к дичающим из культуры видам.

Дичающие из культуры виды-эфемерофиты (46 видов, см. рисунок) могут в течение нескольких лет давать полноценные семена или поддерживать распространение вегетативными диаспорами, не выходя за границы культурных участков, но затем их возобновление прекращается чаще всего из-за сильных морозов зимой или весенних и осенних заморозков. Среди эфемерофитов в регионе представлены как однолетние растения (*Brassica napus* L., *Cucurbita pepo* L., *Tropaeolum majus* L.), так и многолетние (*Monarda didyma* L., *Asparagus officinalis* L.).

Виды-колонофиты – травянистые многолетники, самостоятельно возобновляющиеся на культурных участках вегетативными диаспорами, так как они не успевают пройти полный жизненный цикл и сформировать полноценные

семена. Эта группа включает 44 вида (см. рисунок), для которых отмечено устойчивое самостоятельное вегетативное возобновление в течение ряда лет (*Rudbeckia laciniata* L., *Iris x germanica* L.).

Эпекофиты – группа видов, которые проходят в условиях региона полный жизненный цикл, успешно зимуют и устойчиво самостоятельно возобновляются семенами в пределах культурных и нарушенных участков. Группа представлена 16 видами (см. рисунок). Среди них отмечены как однолетние растения (*Calendula officinalis* L., *Cosmos bipinnatus*), так и многолетние и двулетние виды (*Dianthus barbatus* L., *Valeriana wolgensis* Kazak.). Изредка виды этой группы выходят за пределы культурных участков, сохраняются на местах заброшенного озеленения, но внедрения в естественные фитоценозы для них не отмечено.

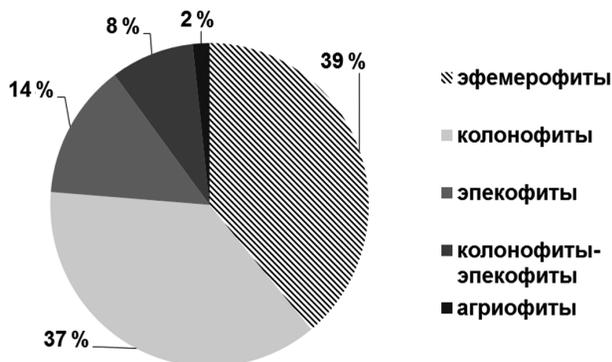
Среди исследованных видов можно выделить еще одну группу – колонофиты-эпекофиты – это травянистые многолетние растения, которые способны к самостоятельному возобновлению и распространению по культурным и нарушенным участкам как вегетативным, так и семенным путем. Для них невозможно однозначно выделить преобладающий способ размножения. Группа включает 10 видов (см. рисунок), интересных сочетанием двух способов диссеминации (*Xanthoxalis stricta* (L.) Small, *Centaurea montana* L.). Иногда представители этой группы встречаются за пределами культурных участков (по обочинам дорог, на мусорных местах).

Агриофиты – это полностью натурализовавшиеся виды, внедряющиеся в естественные растительные сообщества и активно взаимодействующие с аборигенной растительностью (*Heracleum sosnowskyi* Manden., *Impatiens glandulifera* Royle).

Некоторые из культивируемых в регионе травянистых интродуцентов (*Echinocystis lobata* (Michx.) Torr. et A. Gray, *Lupinus polyphyllus* Lindl., *Symphytum caucasicum* Bieb., *Solidago canadensis* L.) в более южных регионах России внесены в список наиболее злостных и широко распространенных инвазионных видов [2]. Однако на севере эти виды пока не обладают достаточным репродуктивным потенциалом для широкого распространения за пределы культурных и нарушенных участков и тем более перехода в категорию инвазионно опасных.

Е. А. Шуйской [5] на основе монографии А. В. Кравченко [3] подсчитано, что флора Южной Карелии включает около 1300 видов, из них 475 – адвентивные. Таким образом, на сегодняшний день вклад группы травянистых видов-эргазиофитофитов в адвентивную фракцию флоры Южной Карелии составляет 25 %, в региональную флору в целом – 9 %.

Можно говорить о том, что без дичания растений-интродуцентов региональная флора была бы беднее по видовому составу, изменился



Соотношение групп видов по степени закрепления во флоре

бы и один из основных флористических показателей – соотношение аборигенных и адвентивных видов. Сейчас это соотношение составляет (в %) 63:37; без дичающих интродуцентов оно составило бы 70:30. Дичающие из культуры виды, входя в состав адвентивной фракции флоры региона, расширяют состав не только этой фракции, но и региональной флоры в целом.

\* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградова Ю. К. Очередные задачи инвазионной биологии // Проблемы изучения адвентивной и синантропной флор России и ближнего зарубежья: Материалы IV междунар. конф., Ижевск, 4–7 декабря 2012 г. М.; Ижевск, 2012. С. 56–59.
2. Виноградова Ю. К., Майоров С. Р., Хорун Л. В. Черная книга флоры Средней России. М.: ГЕОС, 2010. 512 с.
3. Кравченко А. В. Конспект флоры Карелии. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2007. 403 с.
4. Цвелев Н. Н. Определитель сосудистых растений Северо-Западной России (Ленинградская, Псковская и Новгородская области). СПб.: Изд-во СПХФА, 2000. 781 с.
5. Шуйская Е. А. Синантропная флора южной Карелии: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Сыктывкар, 2009. 24 с.
6. Антипина Г. С., Шуйская Е. А., Гнатюк Е. П., Рохлова Е. Л. Аннотированный список интродуцированных видов травянистых растений, культивируемых в городе Петрозаводске // Hortus botanicus. 2012. № 7 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://hb.karelia.ru>
7. Richardson D. M., Pysek P., Rejmanek M., Barbour M. G., Panetta F. D., West C. J. Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions // Diversity and distribution. 2000. Vol. 6. P. 93–107.

Rokhlova E. L., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

## HERBACEOUS INTRODUCED PLANTS OF SOUTH KARELIA

Contemporary flora-dynamic processes are mainly concerned with naturalization of introduced species. Naturalization of introduced plants can lead to invasions of alien species. Therefore, the investigation of contribution of introduced plants into the expansion of alien flora of regions is so important. People in South Karelia currently cultivate 422 species of herbaceous introduced plants. The overwhelming majority of all species cultivated in the region (about 72 %) did not show signs of naturalization. We observed an independent seed and/or vegetative reproduction of 117 species (28 % of cultivated species). The overwhelming majority of herbaceous plants running wild is not able to compete with native species and hardly ever goes beyond cultivated areas. Currently, reproductive potential of multiple introduced species is insufficient for their wide dissemination from their cultivated locations and subsequent transition into the category of invasive species.

Key words: introduced species, naturalization, alien species

## REFERENCES

1. Vinogradova Yu. K. The next tasks of invasive biology [Ocherednye zadachi invazionnoy biologii]. *Problemy izucheniya adventivnoy i sinantropnoy flory Rossii i blizhnego zarubezh'ya: Materialy IV mezhdunar. konf., Izhevsk, 4–7 dekabrya 2012 g.* [The problems of studying the alien and the synanthropic flora of Russia and neighboring countries. Proceedings of the IV Intern. conf. Izhevsk, December. 4–7 2012]. Moscow; Izhevsk, 2012. P. 56–59.
2. Vinogradova Yu. K., Mayorov S. R., Khorun L. V. *Chernaya kniga flory Sredney Rossii* [The Black Book of flora of Central Russia]. Moscow, GEOS Publ., 2010. 512 p.
3. Kravchenko A. V. *Konspekt flory Karelii* [The synopsis of the flora of Karelia]. Petrozavodsk, KarNTs RAN Publ., 2007. 403 p.
4. Tsvelev N. N. *Opredelitel' sosudistyykh rasteniy Severo-Zapadnoy Rossii (Leningradskaya, Pskovskaya i Novgorodskaya oblasti)* [The field guide of vascular plants of the North-Western Russia (Leningrad, Pskov and Novgorod Regions)]. St. Petersburg, SPKhFA Publ., 2000. 781 p.
5. Shuyskaya E. A. *Sinantropnaya flora yuzhnoy Karelii: Avtoref. diss. ... kand. biol. nauk* [The synanthropic flora of southern Karelia: Author. dis. ... Ph. d. biol. Sciences.]. Syktyvkar, 2009. 24 p.
6. Antipina G. S., Shuyskaya E. A., Gnatyuk E. P., Rokhlova E. L. Annotated list of introduced species of herbaceous plants cultivated in Petrozavodsk [Annotirovannyi spisok introdutsirovannykh vidov travyanistykh rasteniy, kul'tiviruemykh v gorode Petrozavodske]. *Hortus botanicus*. 2012. № 7. Available at: <http://hb.karelia.ru>
7. Richardson D. M., Pysek P., Rejmanek M., Barbour M. G., Panetta F. D., West C. J. Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions // Diversity and distribution. 2000. Vol. 6. P. 93–107.

Поступила в редакцию 09.04.2014

УДК 547.979.733 + 547.233 + 541.124 + 541.121:536.7

**ВЛАДИМИР ПЕТРОВИЧ АНДРЕЕВ**

доктор химических наук, профессор кафедры молекулярной биологии, биологической и органической химии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*andreev@psu.karelia.ru*

**ПАВЕЛ СЕРГЕЕВИЧ СОБОЛЕВ**

кандидат химических наук, старший преподаватель кафедры молекулярной биологии, биологической и органической химии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*terneie@pochta.ru*

**НАТАЛЬЯ ШАМИЛЬЕВНА ЛЕБЕДЕВА**

доктор химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории 1–7: физической химии растворов макроциклических соединений, Институт химии растворов им. Г. А. Крестова РАН (Иваново, Российская Федерация)

*nat.lebede2011@yandex.ru*

## КООРДИНАЦИЯ ZN-ТФП СО СЛАБЫМИ ОСНОВАНИЯМИ / НУКЛЕОФИЛАМИ. МЕТОД «ПРИБЛИЖЕНИЙ»

Предложено в рамках электронной спектроскопии методом «приближений» оценивать константы устойчивости комплексов (К) Zn-ТФП с *n*-донорными лигандами, являющимися слабыми основаниями Льюиса (спирты, эфиры, альдегиды, кетоны) или плохо растворимыми в малополярных растворителях (4-нитроанилин). Значения К и термодинамические параметры, рассчитанные обычным способом (А) и методом «приближений» (Б), являются очень близкими для аминов, пиридинов и гетероароматических N-оксидов ( $K \sim 12\text{--}105000 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1}$ ). Со спиртами и эфирами К ( $0,56\text{--}11,7 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1}$ ) обнаруживают тем бóльшие отличия, чем ниже их значения (рассчитанные методом (Б) имеют более высокие значения, а для эфиров отличаются в 1,5–2,5 раза). С этими лигандами величины  $\Delta H^0$  и  $\Delta S^0$ , рассчитанные методом (А), являются более низкими (у эфиров различия в  $\Delta H^0$  доходят до 4, а  $\Delta S^0$  – даже до 20 единиц, как в случае этоксиэтана), чем при использовании метода «приближений». Для спиртов между значениями К, рассчитанными двумя методами, выполняется соотношение  $\lg K(\text{Б}) = 1,12 \cdot \lg K(\text{А}) - 0,0597$ , между  $\Delta H^0$  и  $\Delta S^0$ :  $\Delta H^0(\text{Б}) = 0,747 \cdot \Delta H^0(\text{А}) - 2,10$ ;  $\Delta S^0(\text{Б}) = 0,775 \cdot \Delta S^0(\text{А}) - 0,856$ . Обсуждаются преимущества предложенной нами новой шкалы нуклеофильности по сравнению со шкалой Гутмана и причины несовпадения кинетических и термодинамических констант, определяемых методами спектроскопии (электронная, ЯМР) и калориметрии.

Ключевые слова: координация, металлопорфирины, нуклеофильность, электронная спектроскопия, ядерный магнитный резонанс

Ранее [1], [2], [3], [4], [5], [6] мы описывали координационное взаимодействие металлопорфиринов (МП) с различными классами *n*-донорных лигандов в хлороформе, используя кинетические и термодинамические характеристики процесса, полученные методом электронной спектроскопии (ЭСП). В основе расчетов при этом лежало вычисление коэффициента экстинкции комплекса ( $\varepsilon$ ) при постепенном добавлении к МП лиганда до тех пор, пока положение максимума полосы поглощения не становилось постоянным. Однако, чем более слабым основанием / нуклеофилом является лиганд, тем большее его количество требуется для полного перевода МП в комплекс, а значит, тем в большей степени будут изменяться такие свойства раствора, как дипольный момент, диэлектрическая постоянная,

а в некоторых случаях – состав и даже строение комплексов. Так, при добавлении к цинк (II)-тетрафенилпорфирину (Zn-ТФП) лиганда в некоторый момент может стать существенной координация МП с его второй молекулой (образование билигандного комплекса). Если же этот лиганд является кислотой Бренстеда – Лоури (как спирты), то по мере увеличения ее концентрации должна возрастать роль специфических взаимодействий, в частности с участием атомов азота МП.

При исследовании комплексообразования Zn-ТФП даже с предельными спиртами для полного перевода МП в комплекс требуется очень большой избыток лиганда ( $30000 \div 150000$ ), и это может повлиять на достоверность определения значений  $\varepsilon$  и  $\Delta \lambda_{\text{max}}$  комплекса. Поэтому нами

были рассчитаны кинетические и термодинамические параметры комплексообразования Zn-ТФП с такими слабыми основаниями/нуклеофилами, как спирты, эфиры, альдегиды и кетоны, компьютерным подбором коэффициентов экстинкции комплексов, удовлетворяющих изменениям электронных спектров при гораздо более низком избытке лиганда: от  $1 \div 700$  до  $1 \div 7000$  (для трет-бутилового спирта до  $1 \div 12000$ ). Этот способ расчета мы назвали методом «приближений».

После математических преобразований выражения

$$K = \frac{[\text{Zn-ТФП} \cdot L]}{[\text{Zn-ТФП}] \cdot [L]} \quad (1)$$

(при условии  $C_L \gg C_{\text{Zn-ТФП}}$ , принимая, что  $[L] \sim C_L$ ) мы получили равенство:

$$K = \frac{(D_{\lambda k} - \varepsilon_{n\lambda k} \cdot C_n \cdot l) \cdot (\varepsilon_{n\lambda n} - \varepsilon_{k\lambda n})}{(\varepsilon_{k\lambda k} - \varepsilon_{n\lambda k}) \cdot (D_{\lambda n} - \varepsilon_{k\lambda n} \cdot C_k \cdot l) \cdot [L]} \quad (2)$$

и выразили равновесную молярную концентрацию лиганда

$$[L] = \frac{(D_{\lambda k} - \varepsilon_{n\lambda k} \cdot C_n \cdot l) \cdot (\varepsilon_{n\lambda n} - \varepsilon_{k\lambda k})}{(\varepsilon_{k\lambda k} - \varepsilon_{n\lambda k}) \cdot (D_{\lambda n} - \varepsilon_{k\lambda n} \cdot C_k \cdot l) \cdot K} \quad (3)$$

где  $K$  – константа устойчивости комплекса,  $C_n$  и  $C_k$  – равновесные молярные концентрации Zn-ТФП и комплекса;  $D_{\lambda n}$  и  $D_{\lambda k}$  – оптическая плотность в максимуме поглощения Zn-ТФП и комплекса;  $\varepsilon_{n(\lambda n)}$  – коэффициент экстинкции Zn-ТФП в максимуме поглощения Zn-ТФП;  $\varepsilon_{n(\lambda k)}$  – коэффициент экстинкции Zn-ТФП в максимуме поглощения комплекса;  $\varepsilon_{k(\lambda n)}$  – коэффициент экстинкции комплекса в максимуме поглощения Zn-ТФП;  $\varepsilon_{k(\lambda k)}$  – коэффициент экстинкции комплекса в максимуме поглощения комплекса;  $l$  – толщина оптического слоя.

В этом уравнении содержатся три неизвестных параметра:  $K$ ,  $\varepsilon_{k(\lambda \text{ Zn-ТФП max})}$  и  $\varepsilon_{k(\lambda k \text{ max})}$ . Дальнейший расчет констант устойчивости проводили по методу минимизации в среде Excel с использованием надстройки «Поиск решения».

Суть данного метода заключается в том, что для каждой опытной пробы с экспериментально определенными значениями оптической плотности и заданной концентрацией лиганда компьютер рассчитывает значения  $K$ ,  $\varepsilon_{k(\lambda \text{ Zn-ТФП max})}$  и  $\varepsilon_{k(\lambda k \text{ max})}$  таким образом, чтобы сумма рассчитанных равновесных молярных концентраций лиганда в опытных образцах показывала наименьшее отличие от экспериментальных. Для того чтобы воспользоваться данным методом расчета констант устойчивости, необходимы эмпирические концентрации лиганда, исходная молярная концентрация Zn-ТФП, величина  $\varepsilon_{\text{Zn-ТФП}(\lambda k \text{ max})}$  и значения  $D$  в двух максимумах поглощения. После ввода перечисленных данных

на рабочий лист Excel задавали произвольные значения  $K$ ,  $\varepsilon_{k(\lambda \text{ Zn-ТФП max})}$  и  $\varepsilon_{k(\lambda k \text{ max})}$ , например, равными 1. Далее с использованием функции «Поиск решения» осуществляли минимизацию по суммарному отланию экспериментальных и рассчитанных концентраций лиганда ( $\Sigma \Delta C_i = (C_{i(\text{эксп})} - C_{i(\text{расч})})^2$ ). Кроме того, такой способ расчета констант устойчивости требует введения ряда ограничений, которые необходимо учитывать, исходя из экспериментальных данных, а именно:

1.  $K \geq 0,1 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;

2. Из всех ранее полученных нами спектральных характеристик Zn-ТФП и его  $n$ ,  $v$ -комплексов следует, что  $\varepsilon_{\text{Zn-ТФП}(\lambda k \text{ max})} \leq \varepsilon_{k(\lambda \text{ Zn-ТФП max})}$ ;

3.  $\varepsilon_{k(\lambda k \text{ max})} \geq 20000 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  (самое низкое значение коэффициента экстинкции полученного нами  $n$ ,  $v$ -комплекса).

Приведенные в табл. 1 значения констант устойчивости комплексов, рассчитанных нами обычным способом (А) [6] и методом «приближений» (Б), являются очень близкими для таких классов лигандов, как первичные, вторичные и третичные амины, пиридины и гетероароматические N-оксиды (сильные электронодонорные лиганды). Эти классы соединений образуют довольно прочные комплексы с Zn-ТФП ( $K \sim 292\text{--}105000 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1}$ ). Поэтому вычисление их коэффициентов экстинкции не требует создания высоких концентраций лигандов.

Несмотря на более слабую нуклеофильность ( $K 12\text{--}180 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1}$ ) некоторых гетероароматических N-оксидов (например, N-оксида 4-нитропиридин), анилинов и непредельных третичных аминов (например, триаллиламин), константы устойчивости их комплексов с Zn-ТФП совпадают друг с другом в пределах погрешности расчетов. С другой стороны, для комплексов Zn-ТФП со спиртами, простыми и сложными эфирами, являющимися еще более слабыми электронодонорными лигандами, константы устойчивости комплексов ( $0,56\text{--}11,7 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1}$ ), рассчитанные двумя методами, обнаруживают тем большие отличия, чем ниже их значения. При этом почти во всех случаях значения  $K$ , рассчитанные методом (Б), имеют более высокие значения, а для простых и сложных эфиров (самые слабые нуклеофилы в табл. 1) отличаются в 1,5–2,5 раза. Для спиртов между значениями  $K$ , рассчитанными двумя методами, выполняется следующее соотношение  $\lg K_{(Б)} = 1,12 \cdot \lg K_{(А)} - 0,0597$  ( $n 7, r 0,90$ ). Подтверждением этого является и тот факт, что использование полученных нами методом (А) констант устойчивости комплексов Zn-ТФП с N-оксидами пиридинов ( $n = 5$ ) в чистом и содержащем 3 % этанола хлороформе дает на графиках  $\lg K - pK_a(\sigma)$  близкие к параллельным прямые.

Методом (Б) нами вычислены  $K$  при нескольких температурах, что позволило определить термодинамические характеристики процесса

Таблица 1

Значения констант устойчивости ( $K$ ) комплексов Zn-ТФП с  $p$ -донорными лигандами при 25 °С и термодинамических параметров процессов комплексообразования, рассчитанные обычным методом (А) и методом «приближений» (Б)\*

№	Лиганд	$K$ , л · моль <sup>-1</sup> (А)	$K$ , л · моль <sup>-1</sup> (Б)	$-\Delta H^0$ , кДж · моль <sup>-1</sup> (А)	$-\Delta H^0$ , кДж · моль <sup>-1</sup> (Б)	$\Delta S^0$ , Дж · моль <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup> (А)	$\Delta S^0$ , Дж · моль <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup> (Б)
1	DAVCO	105000 ± 1700	105000 ± 3900	14,85 ± 0,65	14,72 ± 0,74	46,3 ± 1,5	48,0 ± 3,0
2	н-бутиламин	15210 ± 300	15830 ± 620	11,85 ± 0,51	12,89 ± 0,51	40,0 ± 1,7	36,5 ± 3,0
3	4-метилпиридин	6480 ± 240	6820 ± 230	14,36 ± 0,59	13,91 ± 0,24	25,0 ± 1,6	27,0 ± 1,0
4	3-метилпиридин	4660 ± 240	4740 ± 110	15,6 ± 0,6	14,61 ± 0,11	18,1 ± 0,1	21,4 ± 0,7
5	N-оксид 4-метокси- пиридина	2470 ± 63	2840 ± 150	13,94 ± 0,26	13,42 ± 0,59	19,0 ± 0,8	21,0 ± 1,6
6	ди-н-пропиламин	1360 ± 24	1390 ± 40	18,13 ± 0,28	18,04 ± 0,48	-1,52 ± 0,65	-1,2 ± 1,0
7	N-оксид 3-метилпи- ридина	1030 ± 11	1140 ± 40	13,82 ± 0,31	13,30 ± 0,51	11,4 ± 0,7	14,0 ± 1,0
8	N-оксид 2-метил- 4-хлор хинолина	292 ± 4	318 ± 25	12,02 ± 0,32	13,90 ± 0,39	7,2 ± 0,6	10,5 ± 1,1
9	метилдиоктиламин	170 ± 3	174 ± 3	17,16 ± 0,61	16,70 ± 0,56	-14,7 ± 1,3	-12,9 ± 0,9
10	N-оксид 4-нитропи- ридина	134 ± 3	140 ± 6	13,74 ± 0,15	13,60 ± 0,41	-5,7 ± 0,4	-4,8 ± 1,2
11	4-броманилин	109 ± 3	122 ± 10	15,62 ± 0,15	16,34 ± 0,11	-13,2 ± 0,3	-17,3 ± 1,0
12	3-хлоранилин	72 ± 2	72 ± 1	14,59 ± 0,11	15,17 ± 0,19	-13,4 ± 0,3	-15,2 ± 0,8
13	3-нитроанилин	49 ± 1	52 ± 2	14,87 ± 0,19	14,82 ± 1,49	-17,3 ± 0,6	-16,8 ± 4,5
14	ди-циклогексила- мин	48,5 ± 0,6	47,1 ± 0,5	16,95 ± 0,81	14,55 ± 1,04	-24,6 ± 1,3	-17,0 ± 3,0
15	N-пропаргиланилин	40,5 ± 1,5	36,1 ± 3,1	14,52 ± 0,29	14,20 ± 0,61	-17,6 ± 0,9	-16,4 ± 1,1
16	2,5-дихлоранилин	29,8 ± 0,9	30,2 ± 2	14,40 ± 0,41	14,62 ± 0,22	-20,2 ± 1,3	-20,8 ± 0,8
17	2,6-дихлоранилин	3,35 ± 0,12	3,71 ± 0,11	15,5 ± 0,3	14,78 ± 0,19	-40,4 ± 1,3	-39,1 ± 0,7
18	N, N-диметиланилин	20,4 ± 0,8	25,0 ± 1,1	14,78 ± 0,48	15,02 ± 0,51	-24,5 ± 1,3	-23,5 ± 1,5
19	триаллиламин	14,1 ± 0,2	13,5 ± 0,5	15,33 ± 0,45	14,27 ± 0,27	-29,5 ± 1,9	-6,0 ± 0,6
20	три-н-бутиламин	12,0 ± 0,2	11,0 ± 0,9	19,65 ± 0,57	20,40 ± 1,12	-45,1 ± 2,2	-47,6 ± 2,4
21	4-нитроанилин*	–	12,4 ± 0,3	–	–	–	–
22	диэтиланилин*	–	2,5 ± 0,2	–	–	–	–
23	метанол	7,3 ± 0,2	7,8 ± 0,5	15,14 ± 0,24	13,84 ± 0,71	-35,0 ± 1,4	-30,0 ± 2,1
24	этанол	10,1 ± 0,3	11,9 ± 0,3	13,54 ± 0,26	11,36 ± 0,91	-26,7 ± 1,2	-18,0 ± 1,9
25	н-пропанол	9,1 ± 0,2	11,7 ± 0,2	13,63 ± 0,27	12,57 ± 0,95	-27,6 ± 1,4	-21,8 ± 0,9
26	н-бутанол	10,2 ± 0,2	11,3 ± 0,1	11,79 ± 0,24	11,11 ± 0,41	-20,5 ± 1,0	-19 ± 1,1
27	н-гептанол	9,5 ± 0,2	11,2 ± 0,2	9,14 ± 0,22	9,25 ± 0,53	-11,9 ± 0,8	-11,0 ± 0,9
28	н-октанол	9,9 ± 0,3	10,7 ± 0,1	10,31 ± 0,24	9,18 ± 0,71	-15,5 ± 0,9	-10,8 ± 1,4
29	н-нонанол	9,7 ± 0,2	10,9 ± 0,2	9,51 ± 0,34	9,42 ± 0,21	-13,0 ± 2,0	-11,8 ± 0,3
30	диэтиловый эфир	1,26 ± 0,08	3,1 ± 0,2	15,72 ± 0,39	11,74 ± 0,25	-50,4 ± 3,1	-30,3 ± 1,5
31	метилацетат	0,98 ± 0,07	0,62 ± 0,02	11,16 ± 0,42	7,83 ± 2,11	-38,5 ± 2,9	-30 ± 7
32	γ-бутиролактон	0,56 ± 0,02	0,94 ± 0,02	14,00 ± 0,18	11,19 ± 0,71	-52,2 ± 1,5	-38,0 ± 2,7

Примечание: \* – методом (А) не удалось определить значения  $K$ , для 4-нитроанилина зависимость  $K$  от температуры практически отсутствует.

координации при меньшем, чем при использовании способа (А), изменении (в течение эксперимента) природы раствора. Как видно из табл. 1, они, как и значения констант устойчивости, могут существенно различаться в случае очень слабых оснований / нуклеофилов (спирты, простые и сложные эфиры), причем во всех случаях величины  $\Delta H^0$  и  $\Delta S^0$ , рассчитанные методом (А), являются более низкими (у эфиров различия в  $\Delta H^0$  доходят до 4, а  $\Delta S^0$  – даже до 20 единиц, как в случае этоксиэтана), чем при использовании метода «приближений». Как отмечалось выше, это обусловлено особенностями в определении  $\varepsilon_{\kappa} (\lambda_{\text{Zn-ТФПmax}})$  и  $\varepsilon_{\kappa} (\lambda_{\text{Kmax}})$ , вызванными изменением свойств растворителя (среды) из-за создания  $30\,000 \div 200\,000$  кратных избытков лигандов, требуемых для полной закомплексованности Zn-ТФП. Однако для спиртов между  $\Delta H^0$  и  $\Delta S^0$ , рассчитанными методами (А) и (Б), все-таки соблюдаются линейные зависимости ( $\Delta H^0_{(Б)} = 0,747 \cdot \Delta H^0_{(А)} - 2,10$ ,  $r 0,96$ ;  $\Delta S^0_{(Б)} = 0,775 \cdot \Delta S^0_{(А)} - 0,856$ ,  $r 0,95$ ).

Очень часто органические соединения (например, изониазид и 4-нитроанилин в хлороформе) имеют растворимость, недостаточную для того, чтобы полностью перевести Zn-ТФП в комплекс и определить значения  $\varepsilon$  последнего. Однако, воспользовавшись методом «приближений», нам удалось рассчитать значения констант устойчивости для некоторых комплексов Zn-ТФП с подобными лигандами (см. табл. 1); для 4-нитроанилина  $K$  равно  $12,3 \text{ л}\cdot\text{моль}^{-1}$ . Для проверки надежности полученного значения мы внесли его в уравнение  $\lg K = 0,31 pK_a + 0,82$  ( $n 12$ ,  $r 0,97$ ) [5], и оказалось, что коэффициент корреляции даже несколько улучшился ( $\lg K = 0,32 pK_a + 0,78$  ( $n 13$ ,  $r 0,98$ )).

Таким образом, метод «приближений» позволяет получать все необходимые количественные характеристики процессов комплексообразования, не прибегая к использованию чрезвычайно больших концентраций лиганда.

Мы решили проверить, насколько полученные нами значения констант устойчивости молекулярных комплексов Zn-ТФП соответствуют значениям нуклеофильности и электронодонорной способности лигандов / оснований / нуклеофилов / субстратов, определяемых параметрами предложенных ранее в литературе уравнений.

Уравнением Литвиненко коррелируются параметры  $n$ , введенные Холлом [7] для третичных аминов. Этот факт свидетельствует о том, что величины  $n$  не могут считаться простой характеристикой нуклеофильности реакционного центра, поскольку в них содержится также стерическая составляющая [10; 294]. В 1977 году А. В. Пальм отметил, что «следует признать в общем несостоятельной саму процедуру обработки данных в соответствии с уравнениями типа Бренстеда, Свена – Скотта или Эдвардса.

В качестве корректной процедуры можно рассматривать корреляции в соответствии с уравнениями, учитывающими эффекты заместителей, данные для неизменной пары центров нуклеофильности и электрофильности при варьировании заместителей у этих центров, если таковые имеются. Лишь после такого выделения эффектов заместителей могут быть получены величины (соответствующие  $\lg k^0$ ), пригодные для отыскания параметров, характеризующих нуклеофильность и электрофильность реакционных центров» [10].

К сожалению, до настоящего момента так и не была предложена корректная процедура оценки таких параметров. Поэтому созданная нами шкала [1], основанная на параметрах, характеризующих образование аксиальных комплексов Zn-ТФП с  $p$ -донорными лигандами, по видимому, является полезной и перспективной для количественного сравнения нуклеофильности органических соединений.

Традиционно используемая шкала Гутмана (для оценки электронодонорной способности) 180 растворителей [13] характеризует их основность по Льюису или способность акцептировать атом водорода при образовании водородной связи. С одной стороны, донорные числа (DN) Гутмана численно равны  $-\Delta H$  образования комплексов этих молекул с кислотой Льюиса  $\text{SbCl}_5$  состава 1:1 в 1,2-дихлорэтаноле. С другой стороны, критерием [9] электронодонорной способности органических оснований могут быть термодинамические характеристики процесса их координации металлопорфиринами, например, синтетическим симметрично замещенным Zn-ТФП (гораздо более слабой кислотой Льюиса, чем  $\text{SbCl}_5$ ), периферийные  $\text{C}_6\text{H}_5$ -заместители которого не оказывают стерических препятствий координации оснований на центральном ионе металла порфирина и специфически не сольватируются электронодонорными молекулами. Поэтому сравнение параметров DN (табл. 2) с  $K$ ,  $\Delta\lambda_{\text{max}}$ ,  $\Delta H^0$  и  $\Delta S^0$  (см. табл. 1) для координации Zn-ТФП с теми же лигандами является крайне интересным и целесообразным.

Основность и нуклеофильность основных классов органических соединений в апротонных растворителях типа хлороформа и 1,2-дихлорэтана в первом приближении можно представить в виде следующей последовательности:

фенолы < альдегиды, кетоны, простые и сложные эфиры < анилины < N-оксиды пиридино < пиридины < предельные амины.

Представленные в табл. 2 величины DN позволяют заключить, что существенные отличия в их значениях наблюдаются в случае сильно различающихся по строению веществ, тогда как для соединений одного и того же класса они довольно близки. В целом изменения значений DN находятся в соответствии с рядом основности /

Значения чисел (DN) Гутмана [13] для основных классов *n*-донорных лигандов

Класс	<i>n</i> -донор	DN
Сложные эфиры	метилацетат	16,3
	$\gamma$ -бутирлактон	18,0
Простые эфиры	диэтиловый эфир	19,2
	1,4-диоксан	14,8
Спирты	метанол	19 (30)
	этанол	32
	пропанол-2	36
	бутанол-1	29
	2-метилпропанол-2	38
	3-метилбутанол-1	32
	<i>n</i> -октанол	32
Анилины	анилин	35
	2-хлоранилин	31
	<i>N</i> -метиланилин	33
	<i>N</i> -этиланилин	33
	<i>N,N</i> -диметиланилин	27
	<i>N,N</i> -диэтиланилин	33
<i>N</i> -оксиды пиридинов	<i>N</i> -оксид пиридина	32
	<i>N</i> -оксид 4-метилпиридина	36
	<i>N</i> -оксид 4-метокси-пиридина	41
Пиридины	пиридин	33,1
	4-метилпиридин	34
Первичные амины	метиламин	39
	этиламин	40
	<i>n</i> -пропиламин	38
	изо-пропиламин	57,5
	<i>n</i> -бутиламин	42
	трет-бутиламин	57,5
	этилендиамин	55
Вторичные амины	диметиламин	51
	диэтиламин	50
	ди- <i>n</i> -пропиламин	40
	пиперидин	40
Третичные амины	триметиламин	64
	триэтиламин	61
	три- <i>n</i> -бутиламин	50
	диметилбензиламин	21
	аммиак	59 (42)
Хинолины	хинолин	32

нуклеофильности, приведенным выше, и нашей шкалой нуклеофильности / основности, однако есть и противоречия. Например, у диэтилового эфира (DN 19,2) параметр Гутмана выше, чем у диоксана (DN 14,8). Полученные же нами значения констант устойчивости *K* изменяются в обратной последовательности и составляют

соответственно 1,23 и 46 л·моль<sup>-1</sup>. У *n*-октанола (DN 32; *K* = 11,7 л·моль<sup>-1</sup>) значение DN меньше, чем у 2-метилпропанола-2 (DN 38; *K* = 6,1 л·моль<sup>-1</sup>), но согласно стерическим факторам и полученным нами данным эффект должен быть обратным; у *N,N*-диэтиланилина (DN 33; *K* = 2,5 л·моль<sup>-1</sup>) – выше, чем у *N,N*-диметиланилина (DN 27; *K* = 20,4 л·моль<sup>-1</sup>), мы же в первом случае из-за низкой нуклеофильности лиганда методом (А) не смогли определить константу устойчивости, а у пиперидина (DN 40; *K* = 49 700 л·моль<sup>-1</sup>) – меньше, чем у трет-бутиламина (DN 57,5; *K* = 3510 л·моль<sup>-1</sup>) и даже три-*n*-бутиламина (DN 50; *K* = 12,0 л·моль<sup>-1</sup>). В большинстве случаев (за исключением *N*-оксидов пиридинов:  $\lg K = 0,0534 \cdot DN + 1,205$ ,  $r = 0,9999$ ;  $DN = 7,48 \cdot \Delta\lambda_{\text{II}} - 67,35$ ,  $r = 0,9995$ ;  $n = 3$ ) между DN и  $\lg K$  ( $\Delta\lambda$ ) линейные корреляции даже внутри одного класса соединений отсутствуют.

Таким образом, шкала Гутмана не позволяет получить ясного представления о взаимосвязи между донорной способностью оснований / нуклеофилов и их способностью к образованию молекулярных комплексов, а также вывести корреляционные уравнения, позволяющие количественно предсказывать реакционную способность соединений. В основе этой неудачи, на наш взгляд, лежат следующие причины:

1. Чрезвычайное разнообразие используемых растворителей (при малом количестве однотипных объектов) приводит к тому, что образующиеся молекулярные комплексы со  $SbCl_5$  сложно классифицировать и корректный количественный учет электронных, стерических и других факторов на  $\Delta H^0$  процесса координации становится трудноосуществимым.

2. Пентахлорид сурьмы является очень сильным акцептором электронов, в результате чего контроль за сохранением его чистоты в процессе эксперимента сопряжен с огромными трудностями. Этой же причиной обусловлено существенное нивелирование влияния величины электронной плотности на реакционном центре донора на энтальпию процесса образования молекулярного комплекса. Так, значения DN для анилинов, приведенных в табл. 2, изменяются от 27 до 36, а аммиака и предельных аминов – от 39 до 61 единицы, то есть в достаточно узком диапазоне; для некоторых же соединений они определены очень грубо (DN для аммиака 59 (42), метанола 19 (30)).

Наличие же линейных корреляций в случае гетероароматических *N*-оксидов ( $n = 3$ ) при использовании чисел Гутмана можно объяснить высокими (супер-) нуклеофильностью атома кислорода вследствие его пространственной доступности, а также эффективностью статической и динамической поляризации молекулы.

**Таблица 3**  
Данные ЯМР ( $\Delta\delta$ ) и электронной  
( $\Delta\lambda_{II}$  и  $\lg K$ ) спектроскопии  
для координации Cd-ТФП и Zn-ТФП  
с пиридинами

	Пиридины	Cd-ТФП [11]		Zn-ТФП [12]	Zn-ТФП [4] ЭСП	
		<sup>15</sup> N ЯМР $\Delta\delta$ , м.д.	<sup>111</sup> Cd ЯМР $\Delta\delta$ , м.д.	<sup>15</sup> N ЯМР $\Delta\delta$ , м.д.	ЭСП $\Delta\lambda_{II}$ нм	$\lg K$
1	4-CN	-0,13	9,31	-1,12	13,2	2,90
2	4-COMe	-0,19	6,84	-0,51	14,4	3,33
3	H	0	0	0	15	3,55
4	3-Me	-	-	0,16	15,8	3,67
5	4-Me	0,15	-0,35	0,23	16,1	3,81
6	4-NH <sub>2</sub>	0,26	-7,86	0,74	17,5	4,24

В предложенной нами шкале нуклеофильности (значения  $K$  изменяются от 0,6 до 105 000 л·моль<sup>-1</sup>) мы учли перечисленные недостатки: в качестве акцептора используется слабая кислота Льюиса – Zn-ТФП и исследуются только молекулярные комплексы  $\pi$ ,  $\nu$ -типа состава 1:1, причем корреляционные уравнения выведены для достаточно больших групп нуклеофилов, относящихся к одному и тому же классу органических соединений. Мы попытались на основании этих уравнений найти сходные черты и различия в кинетическом и термодинамическом поведении различных классов азот- и кислородсодержащих доноров в качестве нуклеофилов / лигандов / субстратов, и нам удалось обнаружить неизвестные ранее закономерности [1], [2], [3], [4], [5], [6].

Предложенный нами новый подход к оценке нуклеофильности молекул на основе данных, характеризующих устойчивость их комплексов с МП, несомненно имеет массу достоинств. Однако значения констант устойчивости, полученные методами электронной и флуоресцентной спектроскопии, близки между собой, но сильно отличаются от тех, которые оценены с помощью ЯМР-спектроскопии и особенно калориметрии [8].

Прежде всего оказалось, что данные метода ЯМР не согласуются с другими спектроскопическими результатами. В работах [11], [12] представлены результаты <sup>15</sup>N- и <sup>111</sup>Cd ЯМР-спектроскопии в хлороформе для молекулярных комплексов Zn-ТФП и Cd-ТФП с 3-, 4-замещенными пиридинами.

Их сопоставление с нашими данными, вычисленными методом ЭСП [3], выявило, что между изменениями химических сдвигов ( $\Delta\delta$ ) в ЯМР-спектроскопии, смещениями положений максимумов полос поглощения ( $\Delta\lambda$ ) и  $\lg K$  в ЭСП выполняются следующие линейные корреляции:

$$\text{для Cd-ТФП (n = 5) } \lg K = 2,43 \cdot \Delta\delta^{15N} + 3,52 \text{ r } 0,91$$

$$\Delta\lambda_{II} = 1,03 \cdot \Delta\delta^{15N} + 12,15 \text{ r } 0,99$$

$$\lg K = 0,07 \cdot \Delta\delta^{111Cd} + 3,68 \text{ r } 0,97$$

$$\Delta\lambda_{II} = 0,234 \cdot \Delta\delta^{111Cd} + 15,61 \text{ r } 0,97$$

$$\text{для Zn-ТФП (n = 6) } \lg K = 0,688 \cdot \Delta\delta^{15N} + 3,64 \text{ r } 0,99$$

$$\Delta\lambda_{II} = 2,25 \cdot \Delta\delta^{15N} + 15,52 \text{ r } 0,98$$

Следовательно, величины  $\Delta\delta$  (в комплексах Zn-ТФП они более чувствительны, чем Cd-ТФП, к изменениям электронной плотности на атоме донора) в ядерном магнитном резонансе, как и  $\Delta\lambda$  в электронной спектроскопии, можно использовать для оценки основности / нуклеофильности лигандов, способных к образованию молекулярных комплексов  $\pi$ ,  $\nu$ -типа и состава 1:1. Таким образом, изменения  $\Delta\delta$  пространственно доступных атомов донора и акцептора, принимающих непосредственное участие в образовании новой связи, правильно характеризуют электронные эффекты заместителей, влияющие на устойчивость молекулярных комплексов. Другое дело, что методы расчета констант устойчивости комплексов на основании изменений химических сдвигов атомов, стерически затрудненных или удаленных от донорно-акцепторной связи, обычно используемые в литературе, требуют корректировки, учитывающей и другие эффекты (например, стерические, гидрофобные и т. д.). Не исключены случаи, когда расчеты констант устойчивости на основании изменений химических сдвигов невозможны (например, при независимости  $\Delta\delta$  удаленных от донорно-акцепторных центров атомов от природы заместителя) или же приводят к неверным результатам (в случае изменения  $\Delta\delta$  по мере увеличения концентрации лиганда за счет конкурентного образования других комплексов).

Например, в ряду гетероароматических N-оксидов подобные ошибки возможны при изучении координации с N-оксидами 4-(4-диметиламиностирил) – и 2,6-диметил-4-нитропиридинов: в первом случае за счет образования  $\pi$ ,  $\nu$ -комплекса с участием диметиламиногруппы, а во втором –  $\pi$ ,  $\pi$ -комплексов между порфириновой системой и молекулами лиганда. Действительно, согласно данным работы [8], константа устойчивости комплекса Zn-ТФП с N-оксидом 2,6-диметил-4-нитропиридина, определенная методом ЯМР, равна 5622, в то время как в электронных спектрах МП не происходит видимых изменений даже при очень большом избытке лиганда. Последний факт свидетельствует о чрезвычайно слабой донорно-акцепторной связи Zn – O и согласуется с низкими электронной плотностью и пространственной доступностью атома кислорода в указанном соединении.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Электронные спектры снимали на приборе СФ 2000-02. Константы устойчивости Zn-ТФП с пиридинами в хлороформе методом (А) определяли, как описано в работе [6].

Термодинамические константы процесса комплексообразования рассчитывали графиче-

ским методом с учетом формулы (первое приближение Улиха):

$$\ln K_T = -\Delta H_{298}^0 / RT + \Delta S_{298}^0 / R,$$

предполагая, что в исследуемом узком интервале температур (273–313 К) значения  $\Delta H$  и  $\Delta S$  остаются постоянными.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В. П., Нижник Я. П., Лебедева Н. Ш. Новая шкала основности/ нуклеофильности, основывающаяся на параметрах, характеризующих образование аксиальных (n, v-типа) комплексов Zn-ТФП с лигандами (основаниями/ нуклеофилами) // Журнал органической химии. 2008. Т. 44. № 6. С. 914–922.
2. Андреев В. П., Вапиров В. В., Нижник Я. П., Тунина С. Г., Соболев П. С. Комплексообразование цинк (II)-тетрафенилпорфина и реакции нуклеофильного замещения с участием пиридинов и N-оксидов пиридинов // Журнал органической химии. 2010. Т. 46. Вып. 10. С. 1556–1563.
3. Андреев В. П., Соболев П. С. Количественные корреляции, связывающие взаимодействие Zn(II)-тетрафенилпорфина и пероксидазы хрена с аминами // Биоорганическая химия. 2012. Т. 38. № 2. С. 242–250.
4. Андреев В. П., Соболев П. С., Ларкина Е. А., Ткачевская Е. П. Комплексообразование металлопорфиринов и реакции нуклеофильного замещения с участием пиридинов // Химия гетероциклических соединений. 2012. № 3. С. 529–537.
5. Андреев В. П., Соболев П. С., Зайцев Д. О. Количественные корреляции, связывающие процессы координации Zn-ТФП и реакции нуклеофильного замещения с участием анилинов // Журнал органической химии. 2012. Т. 48. Вып. 6. С. 776–783.
6. Андреев В. П., Соболев П. С., Зайцев Д. О., Ремизова Л. А., Тунина С. Г. Координация Zn-ТФП с первичными аминами и со спиртами в хлороформе // Журнал органической химии. 2012. Т. 82. Вып. 6. С. 1023–1033.
7. Богатков С. В., Попов А. Ф., Литвиненко Л. М. Использование стерических констант Тафта для характеристики нуклеофильности аминов // Реакционная способность органических соединений. 1969. Т. 6. Вып. 4 (22). С. 1011–1022.
8. Губарев Ю. А., Лебедева Н. Ш., Голубев С. Н., Андреев В. П., Кумеев Р. С., Вьюгин А. И., Альпер Г. А. Определение устойчивости молекулярных комплексов мезо-тетрафенилпорфина цинка с пиридином и его N-оксидами различными методами // Макрогетероциклы. 2013. Т. 6. № 1. С. 106–110.
9. Лебедева Н. Ш., Павлычева Н. А., Вьюгин А. И. Параметр основности слабых органических оснований, разработанный на основе термодинамических характеристик взаимодействия оснований с цинк(II)тетрафенилпорфином // Журнал органической химии. 2004. Т. 40. Вып. 11. С. 1523–1571.
10. Пальм В. А. Основы количественной теории органических реакций. Л.: Химия, 1977. 360 с.
11. Dominguez D. D., King M. M. A. NMR study of metal-ligand interaction in doubly labeled  $^{113}\text{Cd}$  meso-tetraphenylporphyrin ( $^{15}\text{N}_4$ ) // J. Magn. Res. 1978. Vol. 32. № 1. P. 161–165.
12. Gust D., Neal D. N.  $^{15}\text{N}$  Nuclear magnetic resonance studies of ligand binding to Zinc tetraphenylporphyrin // J. Chem. Soc., Chem. Comm. 1978. № 16. P. 681–682.
13. Marcus Y. The Effectivity of Solvents as Electron Pair Donors // J. Sol. Chem. 1984. Vol. 13. № 9. P. 599–604.

Andreev V. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Sobolev P. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Lebedeva N. Sh., G. A. Krestov Institute of Solution Chemistry of Russian Academy of Sciences (Ivanovo, Russian Federation)

### COORDINATION OF ZN-TPHP WITH WEAK BASES / NUCLEOPHILES. METHOD OF “APPROXIMATION ALGORITHM”

The stability constants of complexes (K) Zn-TPhP with n-donor ligands, which are weak Lewis bases (alcohols, ethers, aldehyds and ketons), or low-soluble in low-polar solvents (4-nitroaniline) are examined implying “approximation algorithm” in electronic spectroscopy. K-values and thermodynamic parameters, calculated by either standard (A) method, or “approximation algorithm” (B) are very close for amines, pyridines and heteroaromatic N-oxides ( $K \sim 12\text{--}105000 \text{ l}\cdot\text{mole}^{-1}$ ). With alcohols and ethers, K-values ( $0,56\text{--}11,7 \text{ l}\cdot\text{mole}^{-1}$ ) display more differences the lower their values are (calculated by the (B) method have more high values, and for the ethers differ by 1,5–2,5 times). With these ligands,  $\Delta H^0$  и  $\Delta S^0$  values, calculated with (A) method, are lower, than with “approximation algorithm” (for ethers the difference in  $\Delta H^0$  reaches 4, and in  $\Delta S^0$  even 20 points, as for ethoxyethane). For the alcohols, K-values calculated with both methods demonstrate correlation  $\lg K (B) = 1,12\text{--}\lg K (A) - 0,0597$ , between  $\Delta H^0$  and  $\Delta S^0$ :  $\Delta H^0 (B) = 0,747 \cdot \Delta H^0 (A) - 2,10$ ;  $\Delta S^0 (B) = 0,775 \cdot \Delta S^0 (A) - 0,856$ . The authors discuss advantages of the introduced new scale of nucleophilicity as compared with the Gutman scale, and origins of incongruity of kinetic and thermodynamic constants defined by spectroscopy methods (electronic and NMR) and calorimetry.

Key words: coordination, metalloporphyrins, nucleophilicity, electronic spectroscopy, nuclear magnetic resonance

### REFERENCES

1. Andreev V. P., Nizhnik Ya. P., Lebedeva N. Sh. New Basicity/Nucleophilicity Scale on the Basis of Parameters of Formation of Axial n, v-Complexes Derived from Tetraphenylporphyrinatozinc (II) and Base/Nucleophile as Ligand // Russian journal of organic chemistry. 2008. Vol. 44. № 6. P. 906–915.
2. Andreev V. P., Vapirov V. V., Nizhnik Ya. P., Tunina S. G., Sobolev P. S. Complex Formation of Tetraphenylporphyrinatozinc (II) and Nucleophilic Substitution Reactions with Pyridines and Pyridine N-Oxides // Russian Journal of Organic Chemistry. 2010. Vol. 46. № 10. P. 1563–1570.

3. Andreev V. P., Sobolev P. S. Quantitative Correlations relating the Interaction of Zn (II) -Tetraphenylporphine and Horseradish Peroxidase with Amines // Russian Journal of Bioorganic Chemistry. 2012. Vol. 38. № 2. P. 211–218.
4. Andreev V. P., Sobolev P. S., Larkina E. A., Tkachevskaya E. P. Complex formation of Zinc-containing metalloporphyrins and nucleophilic substitution reactions involving pyridines // Chemistry of Heterocyclic Compounds. 2012. Vol. 48. № 3. P. 497–504.
5. Andreev V. P., Sobolev P. S., Zaytsev D. O. Quantitative Relations Holding in Coordination of (Tetraphenylporphyrinato) zinc (II) and Nucleophilic Substitution with Anilines // Russian Journal of Organic Chemistry. 2012. Vol. 48. № 6. P. 772–779.
6. Andreev V. P., Sobolev P. S., Zaytsev D. O., Remizova L. A., Tunina S. G. Tetraphenylporphine zinc (II) Coordination with Primary Amines and Alcohols in Chloroform // Russian Journal of General Chemistry. 2012. Vol. 82. № 6. P. 1157–1166.
7. Bogatkov S. V., Popov A. F., Litvinenko L. M. The use of Taft's steric constants to characterize nucleophilicity of amines [Ispol'zovanie stericheskikh konstant Tafta dlya kharakteristiki nukleofil'nosti aminov]. *Reaktivnaya sposobnost' organicheskikh soedineniy* [Reactive capacity of organic compounds]. 1969. Vol. 6. № 4. P. 1011–1022.
8. Gubarev Y. A., Lebedeva N. Sh., Golubev S. N., Andreev V. P., Kumeev R. S., V'yugin A. I., Al'per G. A. Determination of Stability of Molecular Complexes of Zinc (II) meso-Tetraphenylporphyrin with Heterocyclic N-Oxide and Pyridine by Different Methods // Macroheterocycles. 2013. Vol. 6. № 1. P. 106–110.
9. Lebedeva N. Sh., Pavlycheva N. A., V'yugin A. I. Basicity Parameter of Weak Organic Bases, Derived from Thermodynamic Parameters of Their Reactions with (Tetraphenylporphyrinato) zinc (II) // Russian Journal of Organic Chemistry. 2004. Vol. 40. № 12. P. 1727–1736.
10. Pal'm V. A. *Osnovy kolichestvennoy teorii organicheskikh reaktsiy* [Basics of quantitative theory of organic reactions]. Leningrad, Khimiya Publ., 1977. 360 p.
11. Dominguez D. D., King M. M. A. NMR study of metal-ligand interaction in doubly labeled <sup>111</sup>Cd meso-tetraphenylporphyrin (<sup>15</sup>N<sub>4</sub>) // J. Magn. Res. 1978. Vol. 32. № 1. P. 161–165.
12. Gust D., Neal D. N. <sup>15</sup>N Nuclear magnetic resonance studies of ligand binding to Zinc tetraphenylporphyrin // J. Chem. Soc. Chem. Comm. 1978. № 16. P. 681–682.
13. Marcus Y. The Effectivity of Solvents as Electron Pair Donors. // J. Sol. Chem. 1984. Vol. 13. № 9. P. 599–604.

Поступила в редакцию 01.11.2013

**ДМИТРИЙ ЛЬВОВИЧ АЙЗИКОВ**

старший преподаватель кафедры фармакологии, организации и экономики фармации, микробиологии и гигиены медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*weyi@yandex.ru*

**ВИКТОРИЯ ДМИТРИЕВНА ЮНАШ**

старший преподаватель кафедры фармакологии, организации и экономики фармации, микробиологии и гигиены медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*yunashvd@psu.karelia.ru*

**ТАТЬЯНА АНАТОЛЬЕВНА ЛОТОШ**

старший преподаватель кафедры фармакологии, организации и экономики фармации, микробиологии и гигиены медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*lotosh@petrsu.ru*

**ЮЛИЯ ПАВЛОВНА МАТВЕЕВА**

старший преподаватель кафедры фармакологии, организации и экономики фармации, микробиологии и гигиены медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*piwitepisma@list.ru*

**ИРИНА АНАТОЛЬЕВНА ВИНОГРАДОВА**

доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой фармакологии, организации и экономики фармации, микробиологии и гигиены медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*irinav@petrsu.ru*

## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ОСВЕЩЕНИЯ НА РЕПРОДУКТИВНУЮ АКТИВНОСТЬ И ТЕМПЫ ФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ПОТОМСТВА КРЫС

В работе исследовалось влияние различных режимов освещения на репродуктивную активность крыс и темпы физиологического развития потомства. Самки крыс в период беременности и их потомство находились в различных режимах освещения (стандартное, постоянное, естественное). Установлено, что нарушение стандартного чередования света и темноты в период беременности влияло на частоту возникновения беременностей и количество приплода. Световое загрязнение в перинатальном периоде онтогенеза приводило к нарушению скорости физиологического развития потомства и темпов полового созревания больше у самок, чем у самцов. Наиболее выраженные негативные последствия на развитие потомства наблюдались в условиях, при которых в постнатальном периоде особи развивались в условиях постоянного освещения. Воздействие естественного освещения Карелии осеннего сезона, характеризующегося пониженным уровнем освещенности, в ante- и постнатальный период онтогенеза приводило к нарушению темпов физиологического развития потомства крыс: отставание скорости появления первичного волосяного покрытия, отлипание ушных раковин и темпов полового созревания – по сравнению с аналогичными показателями в режиме стандартного чередующегося освещения.

Ключевые слова: свет ночью, естественное освещение, световое загрязнение, онтогенез, половое созревание, темпы физиологического развития

### ВВЕДЕНИЕ

В районах Крайнего Севера и на приравненных к ним территориях (Республика Карелия) существует проблема нарушения циркадианных ритмов и светового загрязнения. В данных регионах наблюдается естественное изменение соотношения светлого и темного времени суток, что отражается на световом режиме проживающего

на данной территории населения. Характеристики светового режима в значительной степени зависят от широты места проживания. Суточный ритм освещенности стабилен в течение года на экваторе и подвержен существенным сезонным изменениям на Севере: от полярной ночи зимой до полярного дня летом. Введение часовых поясов на территории России привело к тому, что на

большей части солнечное время перестало совпадать с социальным, что в последующем привело к изменению роли географических факторов на рост новообразований у женщин и мужчин и преобладанию влияния экономических факторов [5]. Известно, что свет в ночное время (световое загрязнение) вызывает нарушение функций циркадианной системы, что является фактором риска возникновения злокачественных новообразований, серьезных расстройств поведения и состояния здоровья, включая сердечно-сосудистые заболевания [1]. Установлено, что развитие детей в районах Крайнего Севера сопряжено с более частыми отклонениями от нормы и развитием соматических заболеваний [12].

Нарушение циркадианых ритмов, как независимый фактор окружающей среды, по всей видимости, также может влиять на способность к оплодотворению, вынашиванию потомства и скорость развития в раннем постнатальном онтогенезе [15]. При изучении комплексного регулирования процессов выработки гормонов эпифиза у млекопитающих установлена прямая связь между характером освещенности и процессом выработки мелатонина [19].

Цель данного исследования – изучение влияния различных световых режимов на самок крыс в период беременности и на динамику физиологического созревания потомства.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В эксперименте были использованы крысы линии Вистар. Животных содержали в стандартных клетках при температуре окружающего воздуха  $22 \pm 2$  °C [11]. Все животные получали стандартный готовый лабораторный корм [4] и имели свободный доступ к отстоянной водопроводной воде. Работа выполнена с соблюдением международных принципов Хельсинкской декларации о гуманном отношении к животным, принципов гуманности, изложенных в директиве Европейского сообщества (86/609/ЕС), «Правил проведения работ с использованием экспериментальных животных» [14].

Беременные самки крыс были рандомизированно (по весу) разделены на три группы и содержались до родов в различных световых режимах. Первая группа ( $n = 13$ ) находилась при постоянном искусственном освещении (750 лк; LL). Вторая группа ( $n = 16$ ) – в условиях естественного освещения (NL). В данном случае учитывались особенности светового режима Северо-Запада России (Петрозаводск расположен на  $61^{\circ}40'$  северной широты). В августе в период разведения продолжительность светового дня составила 15,5 часа; в сентябре в период ошенивания – 11,75 часа; в октябре – 9,6 часа. Таким образом, происходило естественное постепенное уменьшение светового дня. Также освещенность в помещении менялась в течение суток

(на уровне клеток в утренние часы – 50–200 лк, днем – до 1000 лк в ясный день и 500 лк в пасмурный день, к вечеру – 150–500 лк). Третья группа ( $n = 20$ ) содержалась при искусственно созданном стандартном фиксированном чередующемся режиме освещения (750 лк; 12 часов свет и 12 часов темнота, LD) и рассматривалась в качестве контроля.

Потомство от самок, находившихся во время беременности при естественном (NL) и постоянном (LL) режимах освещения, оставалось в тех же световых условиях, что и их матери при естественном (NL/NL) и постоянном освещении (LL/LL) соответственно. После рождения потомство от самок группы LD было рандомизированно разделено на две подгруппы. Первая подгруппа была переведена в условия постоянного освещения (LD/LL), вторая – оставалась в условиях стандартного освещения (LD/LD) и считалась группой контроля.

В каждой группе фиксировали: количество щенков в помете, число мертворожденных щенков, случаи поедания самками детенышей. Ежедневно производился учет числа павших особей в помете. Кроме этого, определяли время отлипания ушных раковин, открытия глаз, появления первичного волосяного покрова и скорость полового созревания (опускание семенников у самцов и открытие влагалища у самок).

Для данных была применена описательная статистика: подсчитаны средние значения и стандартные ошибки среднего. В качестве непараметрического критерия использован критерий Вилкоксона – Манна – Уитни. Различия определены при 0,05 уровне значимости. Статистическую обработку полученных результатов проводили на персональном компьютере с помощью пакета прикладных программ STATISTICA 5.5 и Microsoft Excel 2007 [9].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение нормального чередования света и темноты в нашем эксперименте оказывало достоверное влияние на количество беременностей, приплода и его жизнеспособность. Влияние фотопериодических экспозиций в конце беременности на лактацию и репродуктивную активность грызунов было показано в работах ряда авторов [15].

В режимах NL и LL по сравнению с контрольной группой (LD) отмечалось снижение частоты случаев беременности и оценок, уменьшение количества щенков в пометах (см. таблицу). У крыс, содержащихся в LD-режиме, количество беременностей и оценок составило 75 % от общего числа самок. В естественном освещении у 68 % самок крыс произошло оплодотворение и ошенивание, а в режиме постоянного освещения – только у 61 % особей. Число беременностей в условиях постоянного

Показатели разведения крыс в различных режимах освещения

№ п/п	Показатель	Режимы освещения		
		LD	NL	LL
1	Количество самок (шт.)	20	16	13
2	Количество оценок (шт.), в скобках в процентах от числа самок, участвующих в разведении	15 (75 %)	11 (68 %)	8 (61 %)*
3	Гибель самок в разведении (шт.), в скобках в процентах от числа самок, участвующих в разведении	0	1 (6,25 %)*	1 (7,69 %)*
4	Всего щенков (шт.)	124	77	70
5	Гибель щенков (%)	6,2 %	23,3 %*	15,7 %*
6	Среднее количество щенков в помете (шт.)	6,2	4,8*	5,3
7	Количество беременностей на 1 самку	0,75	0,68	0,61*

Примечание. \* $p < 0,01$  – изменения достоверны по сравнению с аналогичным показателем в LD-режиме (метод  $\chi^2$ ).

освещения было сопоставимо с аналогичным параметром в условиях естественного освещения Карелии в осенний период. Таким образом, количество беременностей на одну самку составило в режимах: LD – 0,75; NL – 0,68; LL – 0,61. Гибель самок при разведении и во время родов произошла в режимах NL и LL и составила 6,25 % и 7,69 % соответственно. Гибель самок при разведении и во время родов в режиме NL составила 6,25 %, в режиме LL – 7,69 %. Возможно, в нашем эксперименте наблюдалась материнская передача фотопериодической информации [16].

В естественном и постоянном режимах освещения смертность в период раннего постнатального развития была достоверно выше, чем в контрольной группе: в группе контроля – 6,2 %; в естественном освещении Карелии – 23,3 %; при постоянном освещении – 15,7 %. Таким образом, среднее количество щенков в помете составило: в режиме LD – 6,2; NL – 4,8; LL – 5,3.

Согласно эпидемиологическим исследованиям, в условиях Севера отмечается ухудшение биологических свойств материнского и детского организмов, что проявляется более высокой частотой осложненного течения беременности и родов у женщин, высокой заболеваемостью детского населения [10], [12], возможно, что одним из факторов риска является нарушение светового режима, что косвенно подтверждают наши экспериментальные исследования.

Соотношение самцов и самок в помете сохраняло общебиологическую закономерность: в каждом из световых режимов количество самцов преобладало над количеством самок.

Скорость физиологического созревания потомства определяли по темпам отлипания ушной раковины, появления первичного волосяного покрова, открытия глаз и времени полового созревания. Из рис. 1 и 2 видно, что отлипание ушей и появление шерсти у щенков происходили в определенной последовательности: быстрее у особей, перемещенных в условия постоянного освещения сразу после рождения (LD/LL). Замедленное появление первичного волосяного покрова и отлипание ушных раковин по сравнению с группой контроля (LD/LD) наблюдалось в режимах постоянного (LL/LL), а затем и естественного освещения (NL/NL).

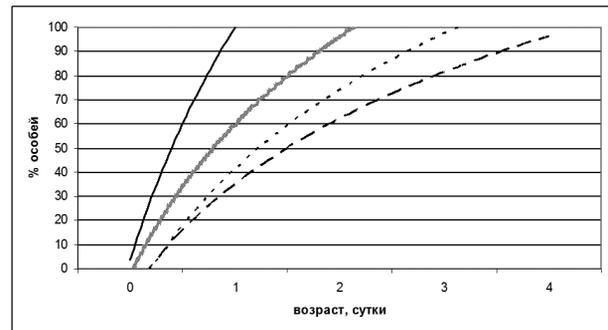


Рис. 1. Отлипание ушных раковин у крысят в различных световых режимах (линии тренда).

В режиме LD/LL – сплошная линия; в режиме NL/NL – прерывистая линия; в режиме LL/LL – точечная линия; в режиме LD/LD – штриховая линия

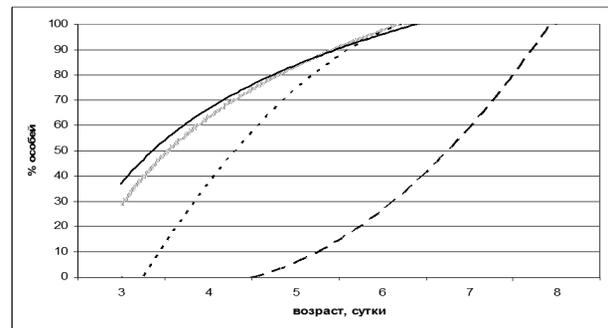


Рис. 2. Появление первичного волосяного покрова у крысят в различных световых режимах (линии тренда).

Обозначения, как на рис. 1

Открытие глаз у потомства проходило несколько в другой последовательности (рис. 3). Первыми открыли глаза (как отлипание ушной раковины и появление шерсти) щенки в режиме LD/LL на 16-е сутки. Затем следовали особи в режимах NL/NL и LL/LL. Последними открыли глаза крысята в стандартном режиме освещения (LD/LD).

Очевидно, что воздействие постоянного (LL/LL), а особенно естественного, освещения Карелии осеннего сезона (NL/NL) в анте- и постнатальный период онтогенеза приводило к нарушению темпов физиологического развития потомства крыс. Естественное освещение Севе-

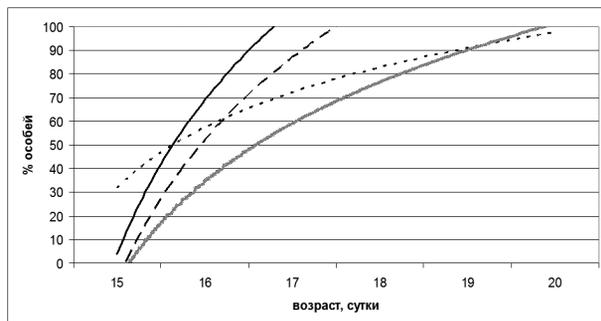


Рис. 3. Открытие глаз у крысят в различных световых режимах (линии тренда). Обозначения, как на рис. 1

ро-Запада являлось тем фактором окружающей среды, которое оказывало влияние на развитие потомства. Имело место отставание сроков появления первичного волосяного покрытия, отлипания ушных раковин по сравнению с аналогичными показателями в режиме стандартного чередующегося освещения. В работе Б. Я. Рыжавского и соавт. [13] показано, что потомство самок крыс, находившихся при длительном непрерывном освещении, отличалось от контрольного меньшей массой тела, яичников, толщиной коры надпочечников, диаметром извитых семенных канальцев, толщиной коры полушарий мозга.

В нашем исследовании половое созревание у самок крыс, содержащихся в LD/DD-режиме, наступало в среднем на 42-й день жизни (первые особи с раскрывшимся влагалищем зафиксированы на 38-е сутки, последние — на 46-е), что является физиологической нормой. В условиях естественного освещения (NL/NL) в осенний период среднее время созревания самок крыс наступало в среднем на 48-й день жизни (первые особи с раскрывшимся влагалищем зафиксированы на 38-е сутки, последние — на 61-е) (рис. 4). При постоянном освещении (LL/LL) среднее время созревания самок составило 50 суток (первые особи с раскрывшимся влагалищем зафиксированы на 40-е сутки, последние — на 61-е сутки).

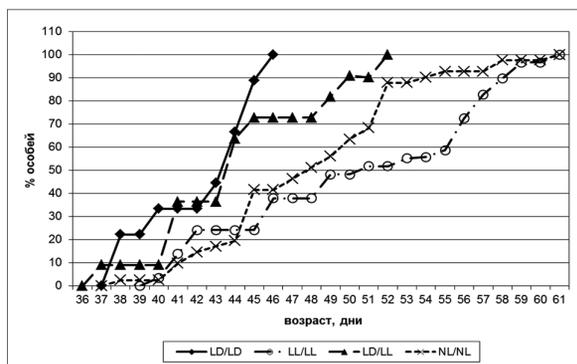


Рис. 4. Динамика полового созревания самок крыс. LD/DD — стандартное освещение; LL/LL — постоянное освещение; NL/NL — естественное освещение; LD/LL — постоянное освещение с рождения

В группе крыс с измененными условиями светового режима (LD/LL) среднее время созревания самок зафиксировано на 44-е сутки (первые особи с раскрывшимся влагалищем зафиксированы на 37-е сутки, последние — на 52-е).

Таким образом, изменение нормального чередования света и темноты в период анте- и постнатального онтогенеза приводило к замедлению полового созревания самок во всех экспериментальных группах, причем наиболее поздние сроки отмечались в режимах LL/LL и NL/NL. Так, в работе И. А. Виноградовой и соавт. [6] установлено, что на возрастную динамику показателей эстральной функции у крыс-самок оказывали влияния различные световые режимы. Отмечено, что воздействие круглосуточного освещения в течение всего года вызывало более выраженные и более ранние изменения эстрального цикла, чем воздействие естественного освещения Северо-Запада России со своеобразной годовой фотопериодичностью (короткий световой день в осенне-зимний период и белые ночи в весенне-летний период).

У самцов наблюдалась несколько отличная картина по срокам полового созревания, чем у самок. У крыс-самцов, содержащихся в LD/DD-режиме, среднее время созревания составляло 38 дней (первые особи с опустившимися в мошонку яичками зафиксированы на 34-е сутки, последние — на 40-е), что соответствовало физиологической норме (рис. 5). Половое созревание самцов, находящихся в условиях NL/NL, запаздывало и наступало в среднем на 41-й день жизни (первые половозрелые особи зафиксированы на 36-е сутки, последние — на 46-е). В условиях постоянного освещения с периода беременности (LL/LL) и с момента рождения (LD/LL) половое созревание начиналось несколько позже, на 35–36-й день жизни, но заканчивалось к 39–40-м суткам, как и в группе контроля (LD/DD). Известно, что женский организм более чувствителен к действию света, чем мужской [3].

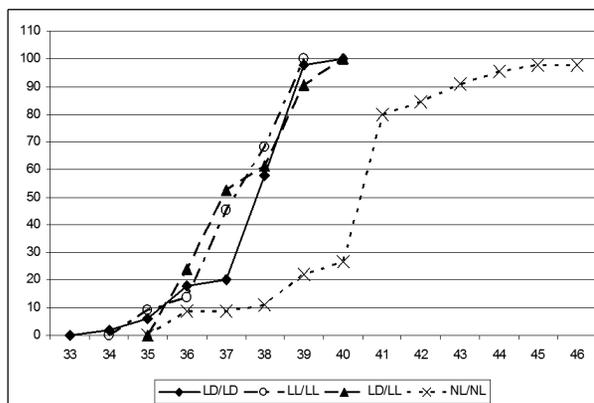


Рис. 5. Динамика полового созревания самцов. Обозначения, как на рис. 4

В наших исследованиях крысята-самцы оказались менее чувствительными к изменениям светового режима, чем крысята-самки. Сроки полового созревания в режимах LL и LD/LL достоверно не отличались от физиологической нормы. Тем не менее в группе NL/NL сроки опускания семенников сдвигались в сторону удлинения, аналогично измерению у крысят-самок.

На рост и темпы индивидуального развития животных и человека оказывает воздействие множество биотических и абиотических факторов. Длительность светового дня и интенсивность освещения влияют на показатели биологического возраста и продолжительность жизни млекопитающих, в частности мышей, активная роль в этом процессе отведена пептиду эпифиза [2]. Известно, что искусственное увеличение продолжительности светового периода у самок крыс приводит к увеличению продолжительности эстрального цикла и его нарушению [7]. Вместо циклической продукции гонадотропинов, пролактина, эстрогенов и прогестерона, характеризующей нормальный репродуктивный период, в условиях постоянного освещения эти гормоны секретируются ациклически, что приводит к нарушению репродуктивной функции животных [6]. В период беременности и раннего постнатального онтогенеза организм млекопитающих наиболее чувствителен к различного рода воздействиям [8], [20].

Из изученных показателей наиболее сильно изменялись темпы полового созревания самок крыс, развивавшихся в естественных условиях и при постоянном освещении. Нами установлено неблагоприятное влияние постоянного и естественного режимов освещения на показатели физиологического созревания самок крыс, что согласуется с результатами ряда исследований о связи эпифиза с эндокринной регуляцией обменных процессов [6], [15], [16], [17], [19], [20].

Полученные данные не противоречат ранее опубликованным результатам, свидетельствующим о том, что уже в период внутриутробного развития световой сигнал передается от матери к плоду [15], [20]. В качестве возможного канди-

дата, опосредующего передачу этого сигнала, можно рассматривать мелатонин [16], [18].

Световое загрязнение, отсутствие нормального чередования света и темноты приводило к нарушению репродуктивной активности млекопитающих, изменялась частота беременностей и число щенков в помете [15]. Нарушение фотопериодичности в период внутриутробного развития особи приводит к снижению ее жизнеспособности. Нарушение циркадианных ритмов явилось причиной изменения темпов физиологического развития потомства и темпов полового созревания больше у самок, чем у самцов крыс. Подобные изменения отмечаются и у других животных, в частности у самцов хомячков [18]. Наиболее выраженные негативные последствия на развитие потомства наблюдались при постоянном освещении щенков с момента их рождения при условии нормального чередования света в период внутриутробного развития.

Воздействие естественного освещения Карелии осеннего сезона, характеризующегося пониженным уровнем освещенности, на антенатальный период онтогенеза приводило к нарушению темпов физиологического развития потомства крыс. Имело место отставание скорости появления первичного волосяного покрытия, отлипания ушных раковин и темпов полового созревания по сравнению с аналогичными показателями в режиме стандартного чередующегося освещения. Наши исследования согласуются с работами по изучению сезонных изменений здоровья новорожденных [10], в которых выявлены определенные закономерности в распространенности осложнений у детей, рожденных в разные сезоны года, в частности, показано, что в осенний период наблюдалась большая частота преждевременных родов, внутриутробной гипотрофии плода, чаще рождались дети с низкой массой тела [12].

Вероятно, именно нарушения циркадианных ритмов и световое загрязнение в районах Крайнего Севера можно рассматривать в качестве независимых факторов риска в нарушении темпов развития различных систем и органов млекопитающих.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов В. Н., Виноградова И. А. Световой режим, мелатонин и риск развития рака // Вопросы онкологии. 2006. Т. 52. № 5. С. 491–498.
2. Анисимов В. Н., Хавинсон В. Х. и др. Влияние пептида эпифиза на показатели биологического возраста и продолжительность жизни мышей // Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова. 2001. Т. 87 (1). С. 125–135.
3. Анисимов В. Н., Виноградова И. А. Старение женской репродуктивной системы и мелатонин. СПб.: Система, 2008. 44 с.
4. Анисимов В. Н., Забежинский М. А., Попович И. Г. Модели и методы изучения геропротекторной активности фармакологических препаратов // Успехи геронтологии. 2009. Т. 22. № 2. С. 237–252.
5. Борисенков М. Ф., Анисимов В. Н. Риск развития рака у женщин: возможная связь с географической широтой и некоторыми экономическими и социальными факторами // Вопросы онкологии. 2011. Т. 57. № 3. С. 343–354.
6. Виноградова И. А., Чернова И. В. Световые режимы и овуляторная функция у крыс в онтогенезе // Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова. 2007. Т. 93. № 1. С. 90–98.
7. Гайдин И. В., Баранова Ю. П., Виноградова И. А. Влияние продолжительности светового дня в условиях Карелии на показатели эстральной функции у самок крыс // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2011. № 6 (119). С. 45–49.

8. Герасимович Г. И., Стасевич С. М. Сравнительный анализ факторов риска перинатальных поражений ЦНС у новорожденных // Репродуктивное здоровье Белорусии. 2011. № 4. С. 71–78.
9. Гланц С. Медико-биологическая статистика. М.: Практика, 1998. 495 с.
10. Калентьева С. В. Сезонные изменения здоровья новорожденных детей // Бюллетень сибирской медицины. 2005. Т. 4. Приложение 1. С. 61–75.
11. Каркищенко Н. Н. Руководство по лабораторным животным и альтернативным моделям в биомедицинских исследованиях: Учебное пособие для системы медицинского и фармацевтического послевузовского образования. М.: Профиль, 2010. 358 с.
12. Макарова В. И., Меньшикова Л. И. Основные проблемы здоровья детей на Севере России // Экология человека. 2003. № 1. С. 39–41.
13. Рыжовский Б. Я., Николаева И. В., Учакина Р. В. и др. Влияние длительного непрерывного освещения самок крыс на показатели развития мозга их 40-дневного потомства // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2009. Т. 147. № 1. С. 8–11.
14. Хельсинкская Декларация Всемирной Медицинской Ассоциации: рекомендации для врачей по проведению биомедицинских исследований на людях. Хельсинки, 1964. Дополнения 1975, 1983, 1996, 2000.
15. Bishnupuri K. S., Haldar C. Impact of photoperiodic exposures during late gestation and lactation periods on the pineal and reproductive physiology of the Indian palm squirrel, *Funambulus pennanti* // Journal of Reproduction and Fertility. 2000. Vol. 118. P. 295–301.
16. Gunduz B., Stetson M. N. Maternal transfer of photoperiodic information in Siberian hamsters. vi. effects of time-dependent 1-hr melatonin infusions in the mother on photoperiod-induced testicular development of her offspring // J. Pineal Res. 2003. Vol. 34. P. 217–225.
17. Hardeland R., Coto-Montes A., Poeggeler B. Circadian Rhythms, Oxidative Stress, and Antioxidative Defense Mechanisms // Chronobiology international. 2003. Vol. 20. № 6. P. 921–962.
18. Shaw D., Goldman B. D. Influence of Prenatal and Postnatal Photoperiods on Postnatal Testis Development in the Siberian Hamster // Biology of reproduction. 1995. P. 833–838.
19. Simonneau V., Ribelayga C. Generation of the Melatonin Endocrine Message in Mammals: A Review of the Complex Regulation of Melatonin Synthesis by Norepinephrine, Peptides, and Other Pineal Transmitters // Pharmacol. Rev. 2003. Vol. 55. P. 325–395.
20. Stetson M. H., Elliott J. A., Goldman B. D. Maternal transfer of photoperiodic information influences the photoperiodic response of prepubertal Djungarian hamsters (*Phodopus sungorus*) // Biology of Reproduction. 1986. Vol. 34. P. 664–669.

**Ayzikov D. L.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Yunash V. D.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Lotosh T. A.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Matveeva Yu. P.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Vinogradova I. A.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

### INFLUENCE OF DIFFERENT ILLUMINATION MODES ON REPRODUCTIVE ACTIVITY AND RATES OF PHYSIOLOGICAL DEVELOPMENT IN RATS' OFFSPRING

The influence of different lighting regimes on the reproductive activity in rats and the rate of physiological development in their offspring are studied. In the course of the experiment, female rats during pregnancy and their offspring were subjected to different lighting modes (standard, permanent, natural). It was found out that violation of the standard alternation of light and darkness during pregnancy period affected both the incidence of pregnancies and the number of offspring. Light pollution in the perinatal period of ontogenesis also led to the violation of speed in physiological development of rats' offspring. The rate of sexual maturation in female species was higher than in male species. The most pronounced negative effect on the development of offspring was observed in conditions of constant light preserved in the postnatal period. Exposure to natural illumination in the ante- and postnatal period of ontogenesis during Karelian fall period, characterized by low level of illumination, led to the loss of pace in rats' physiological development: delay in growing lanugo hair, delay in pinna detachment, and delay in sexual maturation. These deviations were registered when the data were compared with the similar data obtained under the regime of standard alternating mode of lighting.

Key words: night light, natural light, light pollution, ontogenesis, puberty, the rate of physiological development

#### REFERENCES

1. Anisimov V. N., Vinogradova I. A. Light-dark conditions, melatonin and risk of cancer [Svetovoy rezhim, melatonin i risk razvitiya raka]. *Voprosy onkologii* [Problems in Oncology]. 2006. Vol. 52. № 5. P. 491–498.
2. Anisimov V. N., Khavinson V. Kh. et al. Effect of pineal peptide on parameters of biological age and life span in mice [Vliyaniye peptida epifiza na pokazateli biologicheskogo vozrasta i prodolzhitel'nost' zhizni myshey]. *Rossiyskiy fiziologicheskii zhurnal im. I. M. Sechenova* [Russian Journal of physiology]. 2001. Vol. 87 (1). P. 125–135.
3. Anisimov V. N., Vinogradova I. A. *Starenie zhenskoy reproduktivnoy sistemy i melatonin* [Aging of female reproductive system and melatonin]. St. Petersburg, Sistema Publ., 2008. 44 p.
4. Anisimov V. N., Zabezhinskiy M. A., Popovich I. G. Models and methods of evaluation of geroprotective activity of pharmacological drugs [Modeli i metody izucheniya geroprotektoynoy aktivnosti farmakologicheskikh preparatov]. *Uspekhi gerontologii* [Advances in gerontology]. 2009. Vol. 22. № 2. P. 237–252.
5. Borisenkov M. F., Anisimov V. N. Cancer risk in women: possible associations with latitude and some economic and social factors [Risk razvitiya raka y zhenshchin: vozmozhnaya svyaz' s geograficheskoy shirotoy i nekotorymi ekonomicheskimi i sotsial'nymi faktorami]. *Voprosy onkologii* [Problems of Oncology]. 2011. Vol. 57. № 3. P. 343–354.

6. Vinogradova I. A., Chernova I. V. Light modes and ovulation function in rats in ontogenesis [Svetovye rezhimy i ovulyatornaya funktsiya u krysov v ontogeneze]. *Rossiyskiy fiziologicheskiy zhurnal im. I. M. Sechenova* [Russian Journal of Physiology]. 2007. Vol. 93. № 1. P. 90–98.
7. Gaydin I. V., Baranova Yu. P., Vinogradova I. A. The influence of daylight duration on the indicators of the estral cycle of female-rats in the conditions of daylight in Karelia [Vliyaniye prodolzhitel'nosti svetovogo dnya v usloviyakh Karelii na pokazateli estral'noy funktsii u samok krysov]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences]. 2011. № 6 (119). P. 45–49.
8. Gerasimovich G. I., Stasevich S. M. Comparative analysis of risk factors of perinatal CNS lesions in newborns [Srvnitel'nyy analiz faktorov riska perinatal'nykh porazheniy TsNS u novorozhdennykh]. *Reproduktivnoye zdorov'e v Belorussii* [Reproductive Health in Belarus]. 2011. № 4. P. 71–78.
9. Glants S. *Mediko-biologicheskaya statistika* [Primer of biostatistics]. Moscow, Praktika Publ., 1998. 495 p.
10. Kalent'eva S. V. Seasonal changes in the health of newborns [Sezonnyye izmeneniya zdorov'ya novorozhdennykh detey]. *Byulleten' sibirskoy meditsyny* [Bulletin of Siberian Medicine]. 2005. Vol. 4. Suppl. 1. P. 61–75.
11. Karkishchenko N. N. *Rukovodstvo po laboratornym zhyvotnym i al'ternativnym modelyam v biomeditsinskikh issledovaniyakh* [Guidelines for laboratory animals and alternative models in biomedical research Rukovodstvo po laboratornym zhyvotnym i al'ternativnym modeljam v biomeditsinskikh issledovaniyakh]. Moscow, Profil' Publ., 2010. 358 p.
12. Makarova V. I., Men'shikova L. I. The main problems of children's health in the north of Russia [Osnovnyye problemy zdorov'ya detey na Severe Rossii]. *Ekologiya cheloveka* [Journal Human Ecology]. 2003. № 1. P. 39–41.
13. Ryzhavskiy B. Ya., Nikolaeva I. V., Uchakina R. V. et al. Effect of the long-term constant illumination of female rats on the parameters of brain development in their 40-day-old progeny [Vliyaniye dlitel'nogo nepreryvnogo osveshcheniya samok krysov na pokazateli razvitiya mozga u 40-dnevnogo potomstva]. *Byulleten' eksperimental'noy biologii i meditsyny* [Bulletin of Experimental Biology and Medicine]. 2009. Vol. 147. № 1. P. 8–11.
14. *Hel'sinskaya Deklaratsiya Vsemirnoy Meditsinskoy Assotsiatsii: rekomendatsii dlya vrachey po provedeniyu biomeditsinskikh issledovaniy na lyudyakh* [Declaration of Helsinki: Recommendations Guiding Physicians in Biomedical Research Involving Human Subjects]. Helsinki, 1964. Dopolneniya 1975, 1983, 1996, 2000.
15. Bishnupuri K. S., Haldar C. Impact of photoperiodic exposures during late gestation and lactation periods on the pineal and reproductive physiology of the Indian palm squirrel, *Funambulus pennanti* // *Journal of Reproduction and Fertility*. 2000. Vol. 118. P. 295–301.
16. Gunduz B., Stetson M. N. Maternal transfer of photoperiodic information in Siberian hamsters. vi. effects of time-dependent 1-hr melatonin infusions in the mother on photoperiod-induced testicular development of her offspring // *J. Pineal Res.* 2003. Vol. 34. P. 217–225.
17. Hardeland R., Coto-Montes A., Poeggeler B. Circadian Rhythms, Oxidative Stress, and Antioxidative Defense Mechanisms // *Chronobiology international*. 2003. Vol. 20. № 6. P. 921–962.
18. Shaw D., Goldman B. D. Influence of Prenatal and Postnatal Photoperiods on Postnatal Testis Development in the Siberian Hamster // *Biology of reproduction*. 1995. P. 833–838.
19. Simonneau V., Ribelayga C. Generation of the Melatonin Endocrine Message in Mammals: A Review of the Complex Regulation of Melatonin Synthesis by Norepinephrine, Peptides, and Other Pineal Transmitters // *Pharmacol. Rev.* 2003. Vol. 55. P. 325–395.
20. Stetson M. H., Elliott J. A., Goldman B. D. Maternal transfer of photoperiodic information influence on photoperiodic response of prepubertal Djungarian hamsters (*Phodopus sungorus*) // *Biology of Reproduction*. 1986. Vol. 34. P. 664–669.

Поступила в редакцию 20.01.2014

**ЕЛЕНА ГЕННАДЬЕВНА АНТОНЕН**

доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры неврологии и психиатрии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*aanto@onego.ru*

**ИГОРЬ ВИКТОРОВИЧ ХЯНИКЯЙНЕН**

кандидат медицинских наук, психиатр-нарколог Медико-санитарной части, УФСБ России по Республике Карелия (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*hanikainen@yandex.ru*

## СОМАТОФОРМНАЯ ВЕГЕТАТИВНАЯ ДИСФУНКЦИЯ КАК ПРЕДИКТОР ХРОНИЧЕСКОЙ ИШЕМИИ МОЗГА

Изучены клинические, нейрофизиологические, психологические особенности хронической ишемии мозга (ХИМ) у лиц с соматоформной вегетативной дисфункцией (СВД) при проведении диспансерных осмотров декретированных контингентов г. Петрозаводска (рабочая группа – пациенты-военнослужащие ( $n = 108$ ); контрольная – здоровые добровольцы ( $n = 35$ )). СВД принадлежит ведущая роль в генезе дебютных стадий ХИМ у трудоспособных лиц (35,2 %). Для лиц с ХИМ вследствие СВД патогномично: лабильный церебрастенический синдром, гиперсинхронный тип электроэнцефалографии; гипокINETический тип центрального кровообращения; тенденция к двустороннему снижению линейных скоростей кровотока по передней и средней мозговым артериям; ангиодистонический тип церебральной гемодинамики; дистоническая ангиопатия сетчатки; легкие надсегментарные вегетативные расстройства (преимущественно ваготонические) ( $p < 0,05$ ).

Ключевые слова: соматоформная вегетативная дисфункция, дебют хронической ишемии мозга, надсегментарные нарушения, ваготония

### ВВЕДЕНИЕ

Соматоформная вегетативная дисфункция – хроническое полиэтиологическое заболевание, характеризующееся наличием неспецифических сенестопатических, носящих характер вегетативного раздражения жалоб и синдромов (кардиальных, дыхательных, общемозговых, вегетативно-сосудистых, психоэмоциональных), отсутствием органических изменений со стороны кардиоваскулярной системы [1; 755], а также доброкачественностью течения и хорошим прогнозом для жизни [7; 59]. Распространенность данного заболевания в общей медицине составляет в среднем 30 % [13; 185], чаще у лиц с генетической отягощенностью по ишемической болезни сердца и у женщин трудоспособного возраста [16; 418], что делает своевременную диагностику и эффективное лечение данной патологии социально значимыми. Актуальность изучения темы продиктована также и сложной социально-психологической ситуацией в современной России вследствие негативных изменений среды обитания человека, межличностных отношений, микросоциального окружения, роста уровня невротизации, превышающих адаптационные возможности человека и формирующих риск вегетативных, а в последующем кардиоваскулярных нарушений.

В МКБ-10 расстройства, синонимичные диагнозам «кардионевроз», «вегетососудистая /

нейроциркуляторная дистония», «синдром Da Costa», отнесены к категории «Соматоформные расстройства» (F45), занимают положение самостоятельного таксона, в пределах которого выделяется «Соматоформная вегетативная дисфункция» (F45.3), включающая при расширении кодировки до пятого знака рубрику «Соматоформная вегетативная дисфункция сердца и сердечно-сосудистой системы» (СВД) (F45.30). Достоверный диагноз «СВД» устанавливают при наличии двух и более основных и не менее двух дополнительных клинических критериев [13; 192].

При СВД вследствие дисрегуляции вазомоторных центров с тенденцией к симпатикотонии с недостаточной инактивацией катехоламинов развивается церебральный вазоспазм функционального характера, что приводит к недостаточной приспособляемости и неадекватности мозгового кровообращения регионального характера при нарушении тканевых систем перекисного окисления липидов и дислипидемии в сочетании с гиперкортизолемией [9; 62]. Таким образом, исходы СВД различны. Возможно выздоровление или формирование сердечно-сосудистой патологии: артериальной гипертензии (АГ) (30 %) [15; 7], сосудистых заболеваний головного мозга (СЗГМ) (чаще всего ХИМ в виде доклинической (38 %) и/или клинической (47,9 %) стадий ее развития) [14; 793].

По психопатологической характеристике, преморбиду и модусу поведения в болезни лиц с СВД можно разделить на два типа: у 65 % пациентов доминируют тревожно-фобические расстройства, у остальных преобладают патологические телесные ощущения (конэнестезиопатии) [6; 31]. Причем первую группу больных составляют в основном лица с истерическим и пограничным типами личности, вторую – с шизоидными, обсессивно-компульсивными и зависимыми расстройствами личности [10; 21]. Доказано, что сопутствующая психическая патология является фактором риска сердечно-сосудистых заболеваний, замыкая тем самым порочный круг развития СЗГМ [12; 23].

Цель исследования – показать роль соматоформной вегетативной дисфункции в генезе развития инициальных форм хронической ишемии мозга.

Задачи исследования – показать удельный вес соматоформной вегетативной дисфункции в развитии сосудистого заболевания головного мозга и выявить маркеры дебюта хронической ишемии мозга, развившегося на фоне соматоформной вегетативной дисфункции.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Клинический материал составили данные обследования лиц зрелого возраста с ХИМ ( $n = 108$ ), выявленных при проведении диспансерных осмотров воинских декретированных контингентов ( $n = 824$ ) г. Петрозаводска Республики Карелия РФ. Для верификации диагнозов «ХИМ» [5] и «СВД» [4] проводили: анкетирование по авторской «Анкету по выявлению факторов риска доинсультных заболеваний» со «Шкалой балльной оценки наличия доинсультного заболевания» [2; 97]; клинический осмотр; исследование глазного дна; осуществляли клинический анализ и биохимическое исследование крови (коагулограмма, липидный спектр); инструментальные методы (электрокардиография (ЭКГ); ультразвуковая доплерография брахиоцефальных артерий и транскраниальная доплерография (ТКДГ) («Сономед 300» ООО «Спектрмед», Москва, 2003); электроэнцефалография (ЭЭГ) («Нейрон-спектр-4» ООО «Нейрософт», Иваново, 2003); реоэнцефалография и тетраполярная реография по Кубичеку («Мицар-рео-201», версия 3.2, Санкт-Петербург, 2001)); лучевые методы диагностики (рентгенография шейного отдела позвоночника, спиральная компьютерная томография головного мозга); нейропсихологические методы (Мини-тест психического состояния – Mini-Mental State Examination (MMSE), Госпитальная шкала тревоги и депрессии – Hospital Anxiety and Depression (HADS), тесты Леонгарда – Шмишека, Бурдона – Анфимова, Лурия [8] и Вейна [4]).

Контрольную группу (КГ) составили 35 здоровых добровольцев. Половозрастной состав рабочей и контрольной групп был статистически однороден: преобладали лица зрелого возраста (средний возраст  $41 \pm 7$  лет) без гендерных различий ( $p > 0,05$ ).

Статистическая обработка полученных данных проведена с помощью пакета Statistica 6.0 ( $M \pm \sigma$ ,  $p < 0,05$ ). Проверка нормальности распределения изучаемых признаков проводилась с помощью критериев Колмогорова – Смирнова, Лиллиефорса, вероятностной бумаги; статистических гипотез – непараметрического корреляционного анализа Спирмена, тестов Манна – Уитни – Вилкоксона и Краскела – Уоллиса; сопряженности – с помощью критерия Пирсона ( $p < 0,05$ ).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

У пациентов основной причиной развития ХИМ на инициальных стадиях явилась СВД (35,2 %,  $n = 38$ , рабочая группа – РГ), другие причины встречались реже – дегенеративно-дистрофическое поражение шейного отдела позвоночника с пороками развития (34,3 %,  $n = 37$ ), артериальная гипертензия (12 %,  $n = 13$ ), церебральный атеросклероз (6,5 %,  $n = 7$ ), синдром депрессивных расстройств (8,3 %,  $n = 9$ ), ожирение (3,7 %,  $n = 4$ ).

Анализ результатов «Анкету по выявлению факторов риска доинсультных заболеваний» [2; 97] показал, что наиболее значимыми факторами риска развития ХИМ у лиц с СВД были: психоэмоциональный стресс ( $n = 36$ ; 94,7 %), патологическая акклиматизация ( $n = 31$ ; 81,6 %), алкоголизация ( $n = 13$ ; 34,2 %), отягощенная наследственность по гипертонической болезни ( $n = 11$ ; 29 %) ( $p < 0,05$ ), что соответствует данным литературы [18; 651]. Кроме того, в ходе нашего наблюдения за лицами декретированного контингента с СВД был дополнен перечень факторов риска СЗГМ социальной направленности. Так, сочетание СВД с особенностями профессиональной деятельности (частыми рабочими командировками по региону,  $n = 21$ , 55,3 %), а также с нерешенными социальными проблемами (фрустрация служебного и профессионального роста;  $n = 6$ , 15,8 %) ( $p < 0,05$ ) способствовали развитию ХИМ.

У лиц РГ выявили наличие общемозгового и лабильного (регресс в течение суток после окончания психогенного воздействия) церебрального синдрома [17; 763]. В структуре клинических синдромов пациенты чаще предъявляли жалобы на головные боли ( $n = 34$ ; 89,5 %) и общую слабость (31,6 %) ( $p < 0,05$ ). Метеозависимость регистрировали в 79 % случаях ( $n = 30$ ). Преобладали головные боли умеренной интенсивности ( $n = 18$ ; 47,3 %), чаще затылочной локализации ( $n = 16$ ; 41,1 %) по типу гемикрании

( $n = 8$ ; 21,1 %). Прочие жалобы, традиционные для ХИМ [3; 25] и СВД [9; 65] (например, головокружение, диссомния, кардиалгии), встречались редко, вероятно, в связи с инициальной стадией ХИМ.

При соматическом осмотре пациентов с СВД выявили признаки вегетативно-сосудистой нестабильности надсегментарного характера [4; 104], о чем свидетельствовала оценка неврологического статуса с качественной постановкой вегетативных проб (при этом отметили преобладание симптомов ваготонии: замедление пульса более чем на 10 ударов в минуту в пробе Даньини, урежение частоты сердечных сокращений менее чем на 10 в минуту при проведении ортоклиностагической пробы, а также разлитой красный стойкий дермографизм ( $n = 24$ ; 63,2 %;  $p < 0,05$ )). Кроме того, вегетососудистый дисбаланс подтверждали: результатами тестирования по опроснику Вейна (РГ – 45,11 ± 8,86 б.; КГ – 5,06 ± 3,48 б.), изменением показателей сердечного ритма (синусовой тахикардией – 2,6 %, частота сердечных сокращений – 95–111 ударов в минуту или брадикардией – 5,3 %, до 48 в минуту) по данным ЭКГ ( $p < 0,05$ ).

Надсегментарный отдел вегетативной нервной системы (лимбико-ретикулярный комплекс и гипоталамус) интегрирует психические, соматические и вегетативные функции. При этом активация переднего гипоталамуса поддерживает гомеостаз через вагоинсулярную ориентацию вегетативных сдвигов (трофотропный эффект), заднего – осуществляет адаптивные процессы посредством мобилизации симпатико-адреналового звена вегетативных сегментарных структур (эрготропный эффект). Поэтому патология надсегментарных образований (например, стресс-обусловленная дисфункция гипоталамуса) вызывает «синдром дезинтеграции» сосудистых реакций, где вегетативные нарушения не являются детерминированными (ни по форме, ни по локализации) [4; 104]. Так, по данным литературы, у лиц с ХИМ чаще преобладают признаки симпатикотонии [19; 136]. В то же время было установлено, что у лиц с ХИМ вследствие СВД доминируют ваготонические расстройства [9; 65], что совпадает с результатами, полученными в данном исследовании. Преобладание симптомов ваготонии в клинической картине вегетативно-сосудистой неустойчивости у лиц РГ, вероятно, обусловлено декретированностью контингента изучаемой выборки. При проведении диспансеризации военнослужащие часто диссимилируют жалобы и/или успешно используют каналы утилизации нервно-психического перенапряжения для уменьшения клинических проявлений симпатикотонии.

Установлено, что в клинической картине ХИМ всегда регистрируется психовегетатив-

ный синдром без заинтересованности периферических вегетативных образований [4; 106]. Полученные нами результаты нейропсихологического тестирования соответствовали данным литературы [14; 789]. Так, при исследовании преморбида личности у лиц с ХИМ на фоне СВД выявили более высокие значения по акцентуациям эмотивного (впечатлительность, слезливость, эмпатийность) ( $19,5 \pm 5,56$  б.; в КГ –  $9,09 \pm 4,63$  б.), экзальтированного (лабильность психики, склонность к паническим атакам, перепады настроения) ( $19,63 \pm 4,76$  б.; в КГ –  $8,97 \pm 4,59$  б.), тревожного (внутреннее напряжение, неуверенность в себе, ожидание беды) ( $20,45 \pm 4,23$  б.; в КГ –  $8,14 \pm 5,33$  б.) типам ( $p < 0,05$ ). У больных в дебюте ХИМ вследствие СВД установили субклинический интеллектуальный и когнитивный дефицит ( $28,1 \pm 1,52$  б.; в КГ –  $29,69 \pm 0,47$  б. по MMSE) в сочетании с клинически повышенной тревожностью и субклинической депрессией ( $11 \pm 4,37$  и  $8,29 \pm 3,02$  б.; в КГ –  $2,74 \pm 0,82$  и  $2,54 \pm 2,95$  б. по подшкалам HADS) ( $p < 0,05$ ). При оценке памяти и внимания выявили быструю истощаемость и снижение устойчивости внимания (средний показатель чистой продуктивности работы  $0,96 \pm 0,06$  и  $0,94 \pm 0,09$ ; в КГ – по  $1 \pm 0,02$  на 4–5-й минуте в пробе Бурдона – Анфимова) ( $p < 0,05$ ), а также ослабление кратковременной слуховой вербальной памяти ( $8,34 \pm 1,56$ ; в КГ –  $9,31 \pm 0,47$  воспроизведенных слов после 5-го повторения 10 слов в пробе Лурия) ( $p < 0,05$ ). Исследование глазного дна у лиц с ХИМ на фоне СВД также выявило наличие дистонической ангиопатии сетчатки ( $n = 12$ ; 31,6 %) ( $p < 0,05$ ). У пациентов в дебюте ХИМ на фоне соматоформной вегетативной дисфункции преобладал гипокинетический тип системного кровообращения (систематический индекс  $2,19 \pm 0,69$ ; КГ –  $2,63 \pm 0,69$  л/мин/м<sup>2</sup>) ( $p < 0,05$ ), вероятно, за счет превалирования у лиц изучаемой выборки в структуре вегетативно-сосудистого дисбаланса ваготонических расстройств.

При исследовании объемного кровотока головного мозга выявили ангиодистонический тип реографической кривой (в 100 % случаев отмечалась лабильность расположения дикротического зубца; «размахи» дикротического индекса составили в каротидном бассейне 40–75/50–72 %, в вертебрально-базиллярном бассейне 47–85/40–81 % справа и слева соответственно).

У лиц с СВД уже в дебюте ХИМ отмечена прогрессирующая в динамике тенденция к снижению линейных скоростей кровотока по передней мозговой ( $44,32 \pm 8,85$  и  $44,7 \pm 9,4$  см/с) и средней мозговой артерии ( $56,32 \pm 10,16$  и  $56,53 \pm 11$  см/с справа и слева соответственно) по сравнению с КГ ( $p < 0,05$ ) (рис. 1–2), без достоверного снижения линейной скорости кровотока по другим

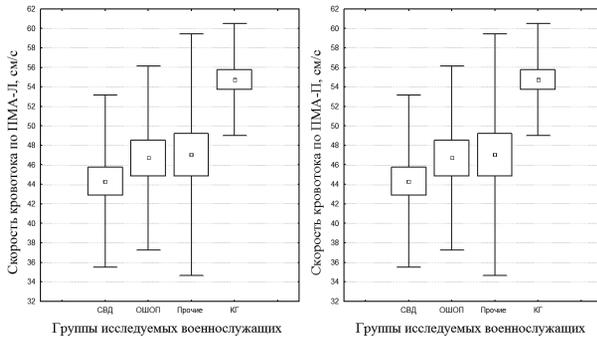


Рис. 1. Оценка средней линейной скорости кровотока по передней мозговой артерии у лиц с дебютом ХИМ мозга: ПМА-Л – левая передняя мозговая артерия, ПМА-П – правая передняя мозговая артерия, СВД – соматоформная вегетативная дисфункция, ОШОП – остеохондроз шейного отдела позвоночника, КГ – контрольная группа ( $p < 0,05$ )

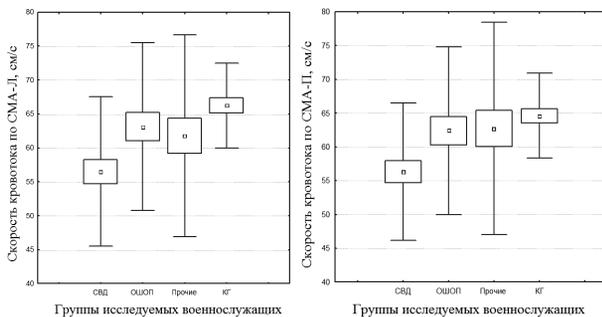


Рис. 2. Оценка средней линейной скорости кровотока по средней мозговой артерии у лиц с дебютом ХИМ мозга: СМА-Л – левая средняя мозговая артерия, СМА-П – правая средняя мозговая артерия, СВД – соматоформная вегетативная дисфункция, ОШОП – остеохондроз шейного отдела позвоночника, КГ – контрольная группа ( $p < 0,05$ )

сосудистым бассейнам, что совпадало с данными литературы [11; 65].

При исследовании биоэлектрической активности головного мозга у лиц с СВД преобладали нормальный ( $n = 25$ ; 65,8 %) и гиперсинхронный ( $n = 4$ ; 10,5 %) типы ЭЭГ без признаков очагового поражения центральной нервной системы [7; 60]. У лиц с гиперсинхронным типом ЭЭГ альфа-ритм был представлен регулярной компонентой с максимальной амплитудой до  $90,94 \pm 14,31$  мкВ, межполушарной асимметрией  $16 \pm 5,63$  %, доминирующей частотой  $9,84 \pm 0,64$  Гц, индексом выраженности  $95,29 \pm 4,59$  %; с правильным зональным распределением и не имел зональных различий; отмечались всплески гиперсинхронизации только по альфа-ритму. Бета-ритм ампли-

тудой до  $15,65 \pm 3,95$  мкВ, частотой  $18,24 \pm 1,56$  Гц был представлен преимущественно в передних отделах без зональных различий. Появление медленных и острых волн зарегистрировано не было.

Достоверных изменений коагулограммы, липидного спектра крови, а также наличия патологических изменений при проведении спондилографии шейного отдела позвоночника и спиральной компьютерной томографии головного мозга у лиц с дебютом ХИМ вследствие СВД выявлено не было ( $p > 0,05$ ).

Полученные результаты используются при проведении авторских программ медико-психологической реабилитации лиц с ХИМ в зависимости от этиопатогенетической мишени в рамках первичной профилактики инсульта [3; 26].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Соматоформной вегетативной дисфункции принадлежит ведущая роль в генезе дебютных стадий хронической ишемии у декретированных лиц трудоспособного возраста (35,2 %). Дополнительным условием для развития инициальных форм сосудистого заболевания головного мозга на фоне СВД является социальный фактор, такой как фрустрация служебного и профессионального роста у лиц с эмотивным, экзальтированным, тревожным личностным преромбидом.

Появление частых умеренных метеозависимых головных болей, возникающих чаще в затылочной области по типу гемикрании, и общая слабость в сочетании с нейропсихологическими и эмоциональными нарушениями непсихотического уровня в рамках лабильного церебрального синдрома у лиц с СВД могут быть первыми симптомами дебюта сосудистого заболевания головного мозга. Предположить развитие сосудистого заболевания головного мозга на фоне СВД у пациента необходимо в случае выявления (при проведении дополнительного нейрофизиологического исследования) комбинации таких показателей, как гиперсинхронный тип электроэнцефалографии в сочетании с гипокинетическим типом центрального кровообращения, тенденцией к двустороннему снижению линейных скоростей кровотока по передней и средней мозговым артериям; ангиодистонического типа церебральной гемодинамики и дистонической ангиопатии сетчатки на фоне легких надсегментарных вегетативных расстройств с преобладанием признаков ваготонии.

## ЛИТЕРАТУРА

- Амосова Е. Н. Клиническая кардиология: В 2 т. Киев: Здоровье, 2002. Т. 2. 992 с.
- Антонен Е. Г., Буркин М. М., Хяникяйнен И. В., Кручек М. М. Характеристика начальных проявлений недостаточности мозгового кровообращения на доклинической стадии у лиц трудоспособного возраста // Профилактическая и клиническая медицина. 2011. № 3. С. 94–98.

3. Антонен Е. Г., Хяникяйнен И. В. Особенности церебральной гемодинамики у военнослужащих с начальными проявлениями недостаточности мозгового кровообращения на доклинической стадии // Военно-медицинский журнал. 2010. № 7. С. 19–26.
4. Вегетативные расстройства: Клиника, лечение, диагностика / Под ред. А. М. Вейна. М.: Медицинское информационное агентство, 2003. 752 с.
5. Кадыков А. С., Манвелов Л. С., Шахпаронова Н. В. Хронические сосудистые заболевания головного мозга (дисциркуляторная энцефалопатия). М.: ГЭОТАР-Медиа, 2006. 224 с.
6. Лас Е. А., Албантова К. А. Клинико-психологические особенности пациентов с кардионеврозом // Психические расстройства в общей медицине / Под ред. А. Б. Смудевича. 2011. № 3–4. С. 26–31.
7. Латфуллин И. А. Нейроциркуляторная дистония: диагноз или синдром? // Кардиология. 2008. № 4. С. 59–61.
8. Лурия А. Р. Основы нейропсихологии. М.: Академия, 2002. 384 с.
9. Маколкин В. И. Нейроциркуляторная дистония: миф или реальность? // Кардиология. 2008. № 4. С. 62–65.
10. Медведев В. Э., Албантова К. А., Григорьева К. В., Сыркин А. Л. Психопатологические и патохарактерологические характеристики пациентов с кардионеврозом (нейроциркуляторная дистония) // Психические расстройства в общей медицине / Под ред. А. Б. Смудевича. 2008. № 2. С. 18–21.
11. Николаева И. И., Пархоменко Ю. В., Захарова Н. И. Особенности нарушения церебральной гемодинамики при нейроциркуляторной дистонии // Сибирский медицинский журнал. 2006. № 6. С. 62–65.
12. Петрова Н. Н., Леонидова Л. А., Баранцевич Е. Р., Поляков И. А. Психические расстройства у неврологических больных // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. 2006. № 7. С. 20–23.
13. Попов Ю. В., Вид В. Д. Современная клиническая психиатрия. СПб.: Речь, 2002. 402 с.
14. Яхно Н. Н. Сосудистые когнитивные расстройства // Русский медицинский журнал. 2005. № 12. С. 789–793.
15. Esler M., Kaye D. Sympathetic nervous system activation in essential hypertension, cardiac failure and psychosomatic heart disease // J. Cardiovasc. Pharmacol. 2000. Vol. 35. P. 1–7.
16. Fink P. The prevalence of somatoform disorders among internal medical inpatients // J. Psychosom. Res. 2004. Vol. 56. P. 413–418.
17. Goldstein D. S., Robertson D., Esler M. Dysautonomias: clinical disorders of the autonomic nervous system // Ann. Intern. Medicine. 2002. Vol. 137. P. 753–763.
18. Rozanski A., Blumenthal J. A., Davidson K. W. The epidemiology, pathophysiology and management of psychosocial risk factors in cardiac practice: the emerging field of behavioral cardiology // J. Amer. Coll. Cardiol. 2005. Vol. 45. P. 637–651.
19. Sansone R. A., Hendricks C. M., Gaither G. A., Reddington A. Prevalence of anxiety symptoms among a sample of outpatients in an internal medicine clinic // Depression and Anxiety. 2004. Vol. 19. P. 133–136.

**Antonен E. G.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Hyanikeyaynen I. V.**, Health Department of the Russian Federal Security Service Directorate  
of Karelian Republic (Petrozavodsk, Russian Federation)

### SOMATOFORM AUTONOMOUS DYSFUNCTION AS PREDICTOR OF CHRONIC CEREBRAL ISCHEMIA

The clinical, neurophysiological, psychological characteristics of chronic cerebral ischemia (CCI) in patients with somatoform autonomic dysfunction (SAD) have been studied during medical checkups of decreed contingents in Petrozavodsk city (working group – military patients (n = 108), control group – healthy volunteers (n = 35)). SAD plays a leading role in the genesis of debut stages of CCI in the employable patients (35,2 %). Labile cerebrostenic syndrome; gipersinhronny type of electroencephalography; hypokinetic central circulation; tendency for bilateral reduction of linear velocity of blood flows in the anterior and middle cerebral arteries; angiodystonic type of cerebral hemodynamics; dystonic retinal angiopathy; mild suprasegmental vegetative disorders (mainly vagotonic) (p < 0,05) are pathognomonic for persons with CCI because of SAD.

Key words: somatoform autonomic dysfunction, the debut of chronic cerebral ischemia, suprasegmental disorders, vagotonia

#### REFERENCES

1. Amosova E. N. *Klinicheskaya kardiologiya: V 2 t.* [Clinical cardiology: in 2 volumes]. Kiev, Zdorov'e Publ., 2002. Vol. 2. 992 p.
2. Antonen E. G., Burkin M. M., Hyanikeyaynen I. V., Kruchek M. M. The features of initial presentations of a cerebral circulatory insufficiency at a symptomless stage at persons of working age [Kharakteristika nachal'nykh proyavleniy nedostatochnosti mozgovogo krovoobrashcheniya na doklinicheskoy stadii u lits trudospobnogo vozrasta]. *Profilakticheskaya i klinicheskaya meditsina* [Preventive and clinical medicine]. 2011. № 3. P. 94–98.
3. Antonen E. G., Hyanikeyaynen I. V. Features of a cerebral hemodynamics at military men with initial exhibiting of cerebral circulation insufficiency of the pre-existing initial manifestations [Osobennosti tserebral'noy gemodinamiki u voennosluzhashchikh s nachal'nymi proyavleniyami nedostatochnosti mozgovogo krovoobrashcheniya na doklinicheskoy stadii]. *Voenno-meditsinskiy zhurnal* [Military medical journal]. 2010. № 7. P. 19–26.
4. *Vegetativnye rassstroystva: Klinika, lechenie, diagnostika* [Autonomic disorders: clinic, treatment, diagnostics]. Moscow, Meditsinskoe informatsionnoe agentstvo Publ., 2003. 752 p.
5. Кадыков А. С., Манвелов Л. С., Шахпаронова Н. В. *Khronicheskie sosudistye zabolevaniya golovnogogo mozga (distsirkulyatornaya entsefalopatiya)* [Chronic disease of the brain (discirculatory encephalopathy)]. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2006. 224 p.
6. Лас Е. А., Албантова К. А. Clinico-psychological characteristics of patients with cardioneurosis [Kliniko-psikhologicheskie osobennosti patsientov s kardionevrozom]. *Psikhicheskie rassstroystva v obshchey meditsine / Pod red. A. B. Smulevicha* [Mental disorders in somatic medicine / Ed. A. V. Smulevich]. 2011. № 3–4. P. 26–31.

7. Latfullin I. A. Cardiopsychoneurosis: is it diagnosis or syndrome? [Neyrotsirkulyatornaya distoniya: diagnoz ili sindrom?]. *Kardiologiya* [Cardiology]. 2008. № 4. P. 59–61.
8. Luriya A. R. *Osnovy neyropsikhologii* [Basics of neuropsychology]. Moscow, Akademy Publ., 2002. 384 p.
9. Makolkin V. I. Cardiopsychoneurosis: is it myth or reality? [Neyrotsirkulyatornaya distoniya: mif ili real'nost'?). *Kardiologiya* [Cardiology]. 2008. № 4. P. 62–65.
10. Medvedev V. E., Albantova K. A., Grigor'eva K. V., Syrkin A. L. Psychopathological and patocharacterological characteristics of patients with cardioneurosis (neurocirculatory dystonia) [Psikhopatologicheskie i patokharakterologicheskie kharakteristiki patsientov s kardionevrozom (neyrotsirkulyatornaya distoniya)]. *Psikhicheskie rasstroystva v obshchey meditsine / Pod red. A. B. Smulevicha* [Mental disorders in somatic medicine / Ed. A. V. Smulevich]. 2008. № 2. P. 18–21.
11. Nikolaeva I. I., Parkhomenko Yu. V., Zakharova N. I. Features of the disorders of cerebral hemodynamics in neurocirculatory dystonia [Osobennosti narusheniya tserebral'noy gemodinamiki pri neyrotsirkulyatornoy distonii]. *Sibirskiy meditsinskiy zhurnal* [Siberian Medical Journal]. 2006. № 6. P. 62–65.
12. Petrova N. N., Leonidova L. A., Barantsevich E. R., Polyakov I. A. Mental disorders in neurological patients [Psikhicheskie rasstroystva u nevrologicheskikh bol'nykh]. *Zhurnal nevrologii i psikhiatrii im. S. S. Korsakova* [Journal of neurology and psychiatry named by S. S. Korsakow]. 2006. № 7. P. 20–23.
13. Popov Yu. V., Vid V. D. *Sovremennaya klinicheskaya psikhiatriya* [Modern clinical psychiatry]. St. Petersburg, Rech' Publ., 2002. 402 p.
14. Yakhno N. N. Vascular cognitive disorders [Sosudistye kognitivnye rasstroystva]. *Russkiy meditsinskiy zhurnal* [Russian medical journal]. 2005. № 12. P. 789–793.
15. Esler M., Kaye D. Sympathetic nervous system activation in essential hypertension, cardiac failure and psychosomatic heart disease // *J. Cardiovasc. Pharmacol.* 2000. Vol. 35. P. 1–7.
16. Fink P. The prevalence of somatoform disorders among internal medical inpatients // *J. Psychosom. Res.* 2004. Vol. 56. P. 413–418.
17. Goldstein D. S., Robertson D., Esler M. Dysautonomias: clinical disorders of the autonomic nervous system // *Ann. Internal Medicine.* 2002. Vol. 137. P. 753–763.
18. Rozanski A., Blumenthal J. A., Davidson K. W. The epidemiology, pathophysiology and management of psychosocial risk factors in cardiac practice: the emerging field of behavioral cardiology // *J. Amer. Coll. Cardiol.* 2005. Vol. 45. P. 637–651.
19. Sansone R. A., Hendricks C. M., Gaither G. A., Reddington A. Prevalence of anxiety symptoms among a sample of outpatients in an internal medicine clinic // *Depression and Anxiety.* 2004. Vol. 19. P. 133–136.

Поступила в редакцию 24.12.2013

**ИЛЬЯ ПЕТРОВИЧ ЛОЗОВИК**

врач травматолог-ортопед травматологического отделения, Республиканская больница им. В. А. Баранова (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*ilyalozovik@me.com*

**МОЭЗ ФАУЗИ БАРАКАТ**

кандидат медицинских наук, главный врач, Центр костно-суставной патологии (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*barakat18@hotmail.com*

**РУДОЛЬФ ИОНТЕЛЕВИЧ МЕЛЬЦЕР**

доктор медицинских наук, профессор кафедры общей и факультетской хирургии, заведующий курсом травматологии, ортопедии и военно-полевой хирургии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*o-f-surgery@petsu.ru*

**ДАНИЛ ВИКТОРОВИЧ ИВАНОВ**

интерн кафедры общей и факультетской хирургии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*danik\_ivanov@mail.ru*

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ТЯЖЕСТИ ПОВРЕЖДЕНИЙ У ПОСТРАДАВШИХ С ОТКРЫТЫМИ СЕГМЕНТАРНЫМИ ПЕРЕЛОМАМИ КОСТЕЙ ГОЛЕНИ**

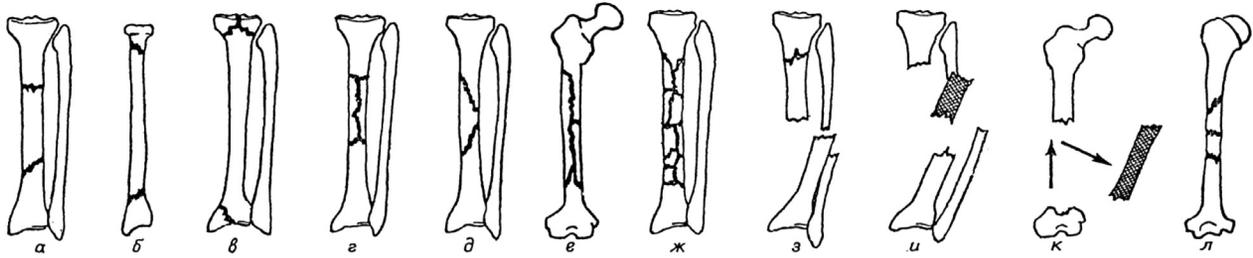
Открытые сегментарные переломы костей голени (ОСПГ) отличаются не только большой тяжестью, но и значительной распространенностью разрушений как в области непосредственного удара, так и на значительном протяжении за его пределами. Границы очагов повреждения трудно определимы. Характерной особенностью многих из существующих классификаций открытых переломов является то, что они недостаточно полно отражают тяжесть и сложность сегментарных переломов длинных трубчатых костей (ДТК). Анализируется лечение ОСПГ у 77 пациентов. Разработан и предложен вариант классификационного комплекса, который позволяет суммарно оценить особенности ОСПГ. Предложенный способ определяет тяжесть повреждения при ОСПГ, включая и рентгенологическую характеристику травмы кости.

Ключевые слова: открытый перелом, голень, сегментарный перелом

Как известно, травма мягких тканей при ОСПГ отличается большой тяжестью и значительной распространенностью разрушений как в области непосредственного удара, так и на значительном протяжении за его пределами [1], [2]. При этом границы очагов повреждения зачастую трудно определимы. Во многих из существующих классификаций открытых переломов либо вообще не выделена эта группа повреждений, либо они недостаточно полно отражают тяжесть и сложность сегментарных переломов ДТК [2]. В данном исследовании анализируется лечение открытых сегментарных переломов голени у 77 пациентов, из которых, согласно классификации Gustilo [3], I типу соответствуют 32 случая, II типу – 25 случаев, III, наиболее тяжелому, типу – 20 случаев.

При выполнении первичной хирургической обработки раны голени нами неоднократно отмечалось, что размеры видимого повреждения покровных тканей при открытом сегментар-

ном переломе очень часто не дают истинного представления о тяжести, распространенности травматических изменений во всех глубжележащих структурах сегмента. Это соответствовало описанию такой особенности подобных повреждений, происходящих под воздействием высокоэнергетического механизма авто- или кататравмы, которое приводило в своих публикациях и другие исследователи [3], [4]. Так, при открытом переломе I типа, когда размер раны покровных тканей не превышает 1 см, смещение отломков на 2 уровнях, иногда с раздроблением (фрагментацией) контактных поверхностей отломков (повреждение кости типа С по классификации АО), обычно наблюдалось значительное повреждение мышечного футляра и сосудистых ветвей, которые непосредственно кровоснабжают промежуточный(ые) фрагмент(ы). Происходит его как бы закрытое скелетирование. Объем и распространенность отека мягких тканей, по нашим наблюдениям, превышали средние значения для монофокальных повреждений на



Варианты повреждения костной основы и смещения отломков при ОСПГ

3,5 см и охватывали при этом практически всю длину голени.

То есть при ревизии места перелома во время выполнения погружного остеосинтеза практически всегда отмечалось несоответствие между наружными размерами раны и степенью повреждения глубоких слоев мягких тканей, их расслоением и имбибицией кровью. Чем больше было смещение отломков, тем более значительные внутренние повреждения мягких тканей его сопровождали.

Все это приводит к мысли, что классификация Gustilo и, пожалуй, другие классификации открытых переломов недостаточно отражают степень повреждения мягких тканей при сегментарной травме. Это существенно усложняет тактику ее оперативного лечения, негативно сказывается на сроках сращения этой группы переломов и ухудшает исход лечения.

К сожалению, во многих существующих классификациях учитывается только характер повреждения мягких тканей «снаружи – кнутри». По всей видимости, этот параметр необходимо оценивать в едином комплексе с характером смещения и степенью травматической деструкции кости, что дает возможность заранее предсказать масштаб повреждений мяг-

ких тканей, с которыми доведется столкнуться оперирующему хирургу по ходу вмешательства, и составить рациональный план для конкретного пострадавшего. Учитывая требования практики, по материалам данного исследования разработан такой вариант классификационного комплекса, который позволяет суммарно оценить особенности ОСПГ (см. таблицу). В основу положены принципы аналогичных разработок А. В. Каплана и О. Н. Марковой (1975), а также R. V. Gustilo (1984), к которым добавлены параметры, характеризующие тяжесть повреждений костной основы сегмента. Количество баллов 50, где 0 баллов – закрытый перелом без смещения.

Предложенная схема должна рассматриваться не как попытка создания новой классификации, а как способ более полно определить тяжесть повреждения при ОСПГ, включая и рентгенологическую характеристику травмы кости, которая страдает не меньше, чем мягкотканый компонент сегмента (см. рисунок).

Получаемая таким путем более полная классификационная характеристика конкретного повреждения позволяла выработать определенный алгоритм принятия решения при составлении плана ПХО.

Шкала балльной оценки сегментарных переломов

Тяжесть повреждения кости	Классификация открытых переломов ДТК (Gustilo)				
	Тип I. 10 баллов	Тип II. 20 баллов	Тип III		
			III A – 30 баллов	III B – 40 баллов	III C – 50 баллов
Перелом без смещения (0 баллов)	10	20	30	40	50
Смещение на проксимальном уровне (10 баллов)	20	30	40	50	60
Смещение на дистальном уровне (10 баллов)	20	30	40	50	60
Смещение всего промежуточного фрагмента (20 баллов)	30	40	50	60	70
Фрагментация контактных поверхностей (30 баллов)	40	50	60	70	80

Свыше 50 баллов – угроза гибели конечности

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордиенко Д. И., Скороглядов А. В., Литвина Е. А., Митиш В. А. Лечение открытых переломов голени // Вестник травматологии и ортопедии им. Н. Н. Приорова. 2003. № 3. С. 75–78.
2. Соколов В. А. Множественная и сочетанная травма. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2006. 518 с.
3. Gustilo R. B., Merkow R. L., Templeman D. Current concepts review: the management of open fractures. *J. Bone and joint Surg.* 1990. 72:299–304.
4. Lerner A. Functional limb salvage in severe war injuries to limbs. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology.* 2010. Vol. 20. Issue 5. P. 381–388.

---

**Lozovik I. P.**, Republican Hospital named after V. A. Baranov (Petrozavodsk, Russian Federation)

**Barakat M. F.**, Center of Osseous-Articular Pathology (Petrozavodsk, Russian Federation)

**Mel'tser R. I.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

**Ivanov D. V.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

### COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF TRAUMA SEVERITY IN PATIENTS WITH OPEN SEGMENTAL TIBIA FRACTURES

OSTF are characterized not only by the severity of inflicted trauma but also by the significant spread of destruction in the area of direct impact. The damage is also revealed far beyond the area of direct impact. Borders of the lesion are difficult to define. One of the most characteristic features of existing classifications on open fractures is that they do not adequately reflect the gravity and complexity of segmental fractures in long bones. The treatment of 77 patients suffering from open segmental tibia fractures is analyzed. A variant of the complex classification instrumental in assessment of OSTF characteristic features is developed. The proposed method helps to determine severity of the trauma in OSTF, including radiological characteristics of the bone injury.

Key words: open fracture, leg, segmental fracture

## REFERENCES

1. Gordienko D. I., Skoroglyadov A. V., Litvina E. A., Mitish V. A. Open fractures treatment [Lechenie otkrytykh perelomov goleni]. *Vestnik travmatologii i ortopedii im. N. N. Priorova* [Journal of Traumatology and Orthopedics N. N. Priorova]. 2003. № 3. P. 75–78.
2. Sokolov V. A. *Mnozhestvennaya i sochetannaya travma* [Multiple and combined trauma]. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2006. 518 p.
3. Gustilo R. B., Merkow R. L., Templeman D. Current concepts review: the management of open fractures. *J. Bone and joint Surg.* 1990. 72:299–304.
4. Lerner A. Functional limb salvage in severe war injuries to limbs. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology.* 2010. Vol. 20. Issue 5. P. 381–388.

Поступила в редакцию 27.08.2013

**АНАСТАСИЯ АЛЕКСАНДРОВНА МЕЛЕНТЬЕВА**

ординатор отделения гемодиализа, Республиканская больница им. В. А. Баранова (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*aamelenteva@rambler.ru*

**ОЛЬГА ЮРЬЕВНА БАРЫШЕВА**

доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры госпитальной терапии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*olvar@karelia.ru*

**ЛЮДМИЛА МИХАЙЛОВНА ХЕЙФЕЦ**

кандидат медицинских наук, доцент кафедры госпитальной терапии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*carat@sampo.ru*

**АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ ЗУЕВ**

заведующий отделением гемодиализа, Республиканская больница им. В. А. Баранова (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*dialys@medicine.karelia.ru*

**ВИКТОР АЛЕКСАНДРОВИЧ СТРАТЕГОПУЛО**

заведующий нефрологическим отделением, Республиканская больница им. В. А. Баранова (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*dialys@medicine.karelia.ru*

**ИРИНА ЕВГЕНЬЕВНА МАЛЫШЕВА**

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт биологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*i.e.malysheva@yandex.ru*

**НОВЫЕ БИОМАРКЕРЫ МИНЕРАЛЬНО-КОСТНЫХ НАРУШЕНИЙ ПРИ ХРОНИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНИ ПОЧЕК – АКЦЕНТ НА FGF23 И ФАКТОР KLOTHO**

В последние годы отмечается рост количества больных хронической болезнью почек. Это заболевание сейчас занимает 5-е место среди причин смертности. Клинические проявления хронической болезни почек очень разнообразны. Среди них большое значение имеют минерально-костные нарушения, которые встречаются практически у всех больных, характеризуются сложным многофакторным патогенезом, значимо ухудшают прогноз, требуют особых подходов к консервативной терапии, а также своевременного оперативного лечения. Анализируется место фактора роста фибробластов 23 (FGF23) и фактора Klotho среди факторов риска развития и прогрессирования минерально-костных нарушений при хронической болезни почек, а также факторов, повышающих кардиоваскулярный риск. Особое внимание уделено гиперфосфатемии – одному из инициаторов минерально-костных нарушений при хронической болезни почек, связи с активностью FGF23 и фактором Klotho и возможностью коррекции на современном этапе. Активность FGF23 и фактора Klotho может являться предиктором развития и прогрессирования минерально-костных нарушений при хронической болезни почек на доклинической стадии, соответственно, коррекция нарушений на этой стадии может замедлить развитие и прогрессирование столь серьезных нарушений, приводящих к инвалидизации больных.

Ключевые слова: хроническая болезнь почек, минерально-костные нарушения, фактор роста фибробластов 23, фактор Klotho, гиперфосфатемия

В настоящее время минерально-костные нарушения (МКН) при хронической болезни почек (ХБП) («Chronic Kidney Disease-Mineral and Bone Disorder», CKD-MBD) составляют значительную проблему для мирового здравоохранения. Причиной тому является, с одной стороны, рост числа пациентов с ХБП и связанными с ней скелетными нарушениями, с другой – доказан-

ным влиянием СКД-МБД на сердечно-сосудистую заболеваемость и смертность.

ХБП занимает среди хронических неинфекционных болезней особое место, поскольку она широко распространена (встречается, по данным различных исследований, у 6–20 % населения), связана с резким ухудшением качества жизни, высокой смертностью и в терминальной

стадии приводит к необходимости применения дорогостоящих методов заместительной терапии – диализа и пересадки почки.

В России, по данным Регистра Российского диализного общества, в 2010 году различные виды заместительной поддерживающей терапии получали более 24 000 человек, ежегодный прирост числа этих больных в среднем составил 10,5 %. При этом на лечение одного диализного больного в течение года в нашей стране расходуется не менее 1–1,5 млн рублей, что в 100 раз выше подушевого норматива Программы государственных гарантий.

МКН занимают особое место среди других распространенных осложнений ХБП. Эта патология значимо ухудшает прогноз и встречается практически у всех больных, начиная с ранних стадий ХБП.

В связи с этим рабочей группой в 2009 году были опубликованы новые рекомендации по диагностике и терапии МКН при ХБП (KDIGO CKD-MBD, 2009).

Благодаря открытым недавно фактору роста фибробластов 23 (Fibroblast Growth Factor 23, FGF23) и Klotho, значимая роль в патогенезе МКН отводится гиперфосфатемии как инициатору каскада МКН при ХБП.

Нарушение экскреции фосфатов начинается уже с III стадии ХБП в результате снижения массы действующих нефронов. На этом этапе постоянство концентрации фосфора в крови какое-то время компенсируется снижением его реабсорбции в проксимальном извитом канальце, что регулируется паратиреоидным гормоном (ПТГ), уровень которого начинает повышаться. По мере дальнейшего прогрессирования ХБП повышенный уровень ПТГ больше не может компенсировать сниженную фосфор-экскретирующую функцию почек и развивается гиперфосфатемия. По мере утраты почечной функции развивается также дефицит активного метаболита витамина D<sub>3</sub> – кальцитриола (КТ), синтезируемого в почках, что обусловлено уменьшением синтеза и активности 1-альфа-гидроксилазы. К ХБП-специфическим причинам падения уровня КТ можно отнести протеинурию (потеря 25 (ОН) D<sub>3</sub>-связывающего протеина-DBP) и низкую чувствительность кожи к ультрафиолету. В свою очередь, недостаток КТ вызывает снижение абсорбции кальция и фосфора в кишечнике, а также уменьшение супрессивного эффекта на синтез и секрецию ПТГ по механизму отрицательной обратной связи, действуя через собственные рецепторы (VDR), расположенные на поверхности клеток парашитовидных желез (ПЩЖ). Возникающая гипокальциемия воздействует на функцию ПЩЖ через недавно клонированные кальций-чувствительные рецепторы (CaSR) по принципу обратной связи, что способствует повышению секреции ПТГ, под влия-

нием которого в костной ткани активизируются остеокласты, приводя к усилению ее резорбции, и активизации реабсорбции кальция в дистальных извитых канальцах почек.

При уремии в результате снижения количества CaSR- и VDR-рецепторов ПЩЖ теряют чувствительность к кальцию и КТ, а секреция ПТГ становится постоянно высокой.

Согласно последним исследованиям, повышенный уровень фосфора плазмы независимо от уровня ионизированного кальция и КТ может непосредственно стимулировать секрецию ПТГ и гиперплазию ПЩЖ в результате прямого влияния гиперфосфатемии на КТ-рецепторы с нарушением связи кальцитриола со своими рецепторами, подавлением активности 1-альфа-гидроксилазы, конвертирующей 25 (ОН) D<sub>3</sub> в 1,25 (ОН) 2D<sub>3</sub>, снижением числа кальциевых рецепторов и развитием резистентности к действию ПТГ.

Описанные механизмы ведут к повышению секреторной активности клеток ПЩЖ, хронической сверхстимуляции синтеза ПТГ, пролиферации клеток и увеличению массы парашитовидных желез, приводя к их гиперплазии [2], [3], [5], [11], [14].

Важную роль, существенно изменившую современные представления о патогенезе ВГПТ, отводят новому классу гормонов, так называемым фосфатонинам, к которым относятся FGF23 и Klotho. В отличие от ПТГ и кальцитриола, первично регулирующих гомеостаз кальция, действие фосфатонинов направлено на первичную регуляцию баланса фосфатов.

FGF23 – белок с молекулярной массой 32 kDa и периодом полужизни 58 минут, состоящий из 251 аминокислоты, синтезирующийся в остеобластах и остеокластах в ответ на действие гиперфосфатемии и КТ. Согласно проведенным исследованиям, наблюдался рост FGF23 в ответ на назначение диализным пациентам 1,25 (ОН) 2D<sub>3</sub>, что делает возможным использование этого фактора в качестве предиктора эффективности терапии препаратами витамина D вторичного гиперпаратиреоза у диализных больных [6].

FGF23 избирательно уменьшает реабсорбцию фосфора в почках, оказывая супрессивный эффект на экспрессию натрийфосфорного котранспортера типа IIa и IIc (NaPiIIa и NaPiIIc), по сути являясь фосфатурическим гормоном, а также уменьшает поступление фосфатов из кишечника за счет снижения концентрации КТ [1], [6], [16]. Реализация эффекта FGF23 осуществляется через сложный рецептор, состоящий из собственного FGF-рецептора (FGF1c) и корепрептора Klotho, экспрессирующихся в почках и ПЩЖ [20].

Klotho является трансмембранным пептидом с молекулярной массой 130 kDa, бета-глюкокортикоидной, назван в честь одной из трех греческих богинь судьбы, прядущей нить жизни и определяющей ее срок. В ходе исследований было установлено, что Klotho участвует в механизмах

старения и его уровень существенно снижается с возрастом [15]. Мыши с выбитым геном *Klotho* быстро старели параллельно со стремительным развитием атеросклероза и кальциноза [6], [12], [15]. Генетически модифицированные мыши, в организме которых отсутствовал FGF23, также характеризовались тяжелой кальцификацией сосудов и мягких тканей.

В настоящее время установлено, что повышение активности FGF23 происходит уже на ранних стадиях ХБП, значительно опережая увеличение ПТГ (в ответ на гипокальциемию), и возрастает соразмерно снижению скорости клубочковой фильтрации, достигая максимума на V стадии ХБП. У больных с терминальной ХБП его уровень может быть в 1000 раз больше по сравнению с нормой [15], но это не оказывает должного эффекта по поддержанию нейтрального баланса фосфатов, что связано с развивающимся дефицитом необходимого кофактора *Klotho*. Возникающий положительный баланс фосфатов в организме по неизвестным пока механизмам активирует остециты, приводя к избыточному образованию FGF23 и нормализации уровня фосфора на ранних стадиях ХБП [1], [9].

FGF23/*Klotho* также участвует в регуляции ПТГ, действуя через свои рецепторы в ПЩЖ, снижая экспрессию мРНК ПТГ и его секрецию. Возникающий парадокс, связанный с увеличением ПТГ на фоне фосфатурического действия FGF23, в ходе исследований объясняется снижением экспрессии FGFR и *Klotho* на фоне пролиферативных и гиперпластических процессов в ПЩЖ, что приводит к относительной резистентности ПЩЖ к FGF23, с одной стороны, подобно отсутствию ответа ПЩЖ на прием кальция и КТ при резистентом ВГПТ. С другой стороны – вследствие снижения синтеза КТ, индуцированного FGF23, что приводит к компенсаторному росту ПТГ и развитию ВГПТ [1], [6], [7]. Следует отметить, что при ХБП FGF23 прямо коррелирует с уровнем ПТГ, тогда как в норме имеется обратная зависимость [6].

С FGF23 связана реализация еще нескольких эффектов: во-первых, повышение его уровня ассоциировано с риском гипертрофии левого желудочка независимо от наличия или отсутствия артериальной гипертензии, что имеет прямую корреляцию с высокой летальностью у пациентов с терминальной ХБП вне зависимости от уровня фосфора, во-вторых, совместно с гиперфосфатемией способствует развитию кальцификации сосудов, частота которой у диализных больных варьирует от 3 до 83 % [14]. Особенностью кальцификации является медиа-склероз, протекающий с апоптозом гладкомышечных клеток сосудов (СГМК), остеогенной трансформацией с экспрессией на поверхности СГМК генов костных белков и отложением кальций-фосфатных соединений, что приводит

к повышенной жесткости сосудов в отличие от стенозирующего поражения интимы при атеросклерозе [17].

По данным многих исследований, в последние годы обнаружена корреляция между увеличением этого фактора в крови и прогрессированием ХБП, а также смертностью пациентов как на преддиализном этапе, так и на диализе, после трансплантации почки и даже у лиц без ХБП [1], [10], [16].

Целевые значения фосфора в рекомендациях KDIGO значительно изменили свои параметры относительно рекомендаций 2003 года K/DOQI, в которых лабораторные параметры фосфатов рекомендовалось поддерживать в пределах 1,78 ммоль/л для пациентов, получающих заместительную почечную терапию, и 1,45 ммоль/л у преддиализных пациентов. Подчеркивая важную роль в патогенезе МКН гиперфосфатемии и в связи с доказанным увеличением числа неблагоприятных исходов, в том числе смерти пациентов, ассоциированной с сердечно-сосудистыми заболеваниями, KDIGO стремится удерживать уровень фосфатов в пределах нормальных значений для всех стадий ХБП. И чем раньше будет начата коррекция изменений, тем более благоприятный прогноз у пациентов.

Основой терапевтического подхода, учитывая звенья патогенеза МКН, является предупреждение и коррекция гиперфосфатемии, что достигается при ограничении потребления диетарного фосфора, а это в условиях лечения диализом является крайне затруднительным в связи со снижением поступления белковой пищи и риском развития белково-энергетической недостаточности.

Натуральными источниками фосфора, где он содержится в качестве органического фосфата, обеспечивая достаточно большую биодоступность, являются богатые белком продукты питания – мясо, рыба, молоко и молочные продукты, яйца. Биодоступность фосфатов из растительных продуктов питания (бобовые, злаки, орехи) за счет наличия фитатов и малой активности фитазы в человеческом организме мала и составляет, по мнению некоторых авторов, менее 50 % [19]. Опасность составляют «скрытые» фосфаты в качестве консервантов, стабилизаторов вкуса, пищевых добавок, красителей, в большом количестве перечисленных в продуктах питания под маркировкой «Е», содержащихся в газированных напитках типа колы, в мясных полуфабрикатах, колбасах, чипсах и т. п.

В настоящее время широкое распространение получили фосфат-связывающие препараты, уменьшающие интестинальную абсорбцию кальция. Потенциальные различия данной группы препаратов сводятся к кратности приема, индивидуальной переносимости, кальциевой нагрузке на организм, токсичности и, конечно, цене.

Традиционные соли кальция – дешевые и достаточно эффективные препараты. Однако при

их применении необходимо учитывать риск всасывания значительной доли поступающего в желудочно-кишечный тракт кальция. Эта доля, по данным фармакокинетических исследований, составляет более половины от всей массы кальция, поступающего в организм больного ХБП, способствуя кальцификации сосудов и мягких тканей. Из представленных препаратов ацетат кальция является предпочтительным, поскольку в отличие от кальция карбоната не требует активации в условиях кислой среды желудка, что зачастую является невозможным на фоне длительного приема пациентами  $H_2$ -гистаминовых блокаторов и ингибиторов протонной помпы.

Алюминийсодержащие фосфат-связывающие препараты являются эффективными и доступными препаратами, но длительность их применения ограничена проявлением токсичности.

Ограничение применения солей лантана на фоне его значимого снижения уровня фосфора и хорошей переносимости связано с его способностью за счет большого катиона лантана в небольшом количестве абсорбироваться в кишечнике.

Наиболее изученный бескальциевый фосфор-связывающий препарат – севеламера гидроксид и севеламера карбонат – в большинстве контролируемых исследований продемонстрировал способность тормозить процесс кальцификации артерий (в сравнении с солями кальция) [2], [3], [5], [14]. Но относительно высокая

стоимость лечения этим препаратом ограничивает использование данной группы препаратов в широкой практике.

По данным проспективного исследования, включившего 10044 пациента, получающего гемодиализ, назначение фосфор-связывающего препарата в течение первых 90 дней от начала диализа достоверно снижало риск смерти от всех причин в течение первого года диализной терапии по сравнению с пациентами, не принимающими фосфатбиндеры [17].

В некоторых случаях повышение эффективности диализной терапии (увеличение диализного времени / кратности сеансов) может способствовать устранению гиперфосфатемии.

Таким образом, FGF23 и Klotho играют важную физиологическую роль в регуляции каскада минерально-костных нарушений при ХБП, являясь ранними биомаркерами последних и привлекательной целью фармакотерапии нарушений баланса фосфатов. Идеальной терапией МКН при ХБП являлась бы та, которая воздействовала бы на все звенья патогенеза: FGF23 и Klotho, ПТГ, кальций, фосфор. Рекомендации KDIGO применительно к FGF23 отсутствуют, не имея на сегодняшний день возможностей прямого воздействия. Обнадеживающими являются результаты исследований с применением цинакальцета, который снижал уровень FGF 23, подавляя функцию остеобластов [6].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добронравов В. А. Современный взгляд на патофизиологию вторичного гиперпаратиреоза: роль фактора роста фибробластов 23 и Klotho // *Нефрология*. 2011. Т. 15. № 4. С. 11–20.
2. Земченков А. Ю., Герасимчук Р. П. Активаторы рецепторов витамина Д и сосудистая кальцификация // *Нефрология и диализ*. 2009. Т. 11. № 4. С. 276–289.
3. Милованова Л. Ю., Милованов Ю. С., Козловская Л. В. Нарушения фосфорно-кальциевого обмена при хронической болезни почек III–V стадий // *Клиническая нефрология*. 2011. № 1. С. 58–68.
4. Рожинская Л. Я. Вторичный гиперпаратиреоз и почечные остеопатии при хронической почечной недостаточности // *Нефрология и диализ*. 2000. Т. 2. № 4. С. 241–247.
5. Шило В. Ю. Селективная активация VDR – новаторский подход к профилактике и лечению вторичного гиперпаратиреоза, кардио- и ренопротекции // *Клиническая нефрология*. 2012. Т. 2. С. 32–41.
6. Шуртов Е. В. Значение фактора роста фибробластов-23 у больных хронической болезнью почек – обзор современных исследований // *Лечащий врач*. 2012. Сентябрь. № 8. С. 12–16.
7. Iddo B.-D. Z., Hillel H. The parathyroid is a target organ for FGF 23 in rats. *J. Clin. Invest.* 2007. Vol. 117 (12). P. 4003–4408.
8. Albaaj F., Hatchinson A. J. Phosphat control in renal disease. *European Nephrology*. 2007. Vol. 1. P. 30–34.
9. Gutierrez O., Isakova T., Shee E. et al. Fibroblast growth factor 23 mitigates hyperphosphatemia but accentuates calcitriol deficiency in chronic kidney disease. *J. Am. Soc. Nephrol.* 2005. Jul 16 (7). P. 2205–2215.
10. Joachim I. H., Shlipaki M. G., Wassel C. L. et al. Fibroblast growth Factor 23 and early decrements in kidney function: The Heart and Soul study *Nephrol. Dial. Transplant.* 2010. Vol. 25. P. 993–997.
11. Kidney Disease: Improving Global Outcomes (KDIGO) CKD-MBD Work Group. KDIGO clinical practice guideline for the diagnosis, evaluation, prevention, and treatment of chronic kidney disease – mineral and bone disorder (CKD-MBD). *Kidney International*. 2009. Suppl 113. P. 1–130.
12. Hu M. C., Shi M., Zhang J. et al. Klotho Deficiency causes vascular calcification in Chronic Kidney Disease. *J. Am. Soc. Nephrol.* 2011. Vol. 22. P. 124–136.
13. Moe S. M. et al. Uraemic vascular calcification. *J. R. Coll. Physicians Edinb.* 2004. Vol. 34. P. 280–286.
14. National Kidney Foundation. K/DOQI Clinical Practice Guidelines for Bone Metabolism and Disease in Chronic Kidney Disease. *Am. J. Kidney Dis.* 2003 (suppl. 3). 42. P. 1–202.
15. Schlemmer U., Frolich W., Prieto R. M. Phytate in foods and significance for humans: Food sources, intake, processing, bioavailability protective role and analysis. *Mol. Nutr. Food Res.* 2009. Vol. 53. P. 330–375.
16. Shimada T., Hasegawa H., Yamazaki Y. FGF 23 is a potent regulator of vitamin D metabolism and phosphate homeostasis. *J. Bone Miner. Res.* 2004. Mar. Vol. 19 (3). P. 429–435.
17. Shroff R., Shanahan C. M. Klotho: An elixir of youth for the vasculature? *J. Am. Soc. Nephrol.* 2011. Vol. 22. P. 5–7.
18. Stenvinkel P., Carrero J. J., Axelsson J. et al. Emerging Biomarkers for Evaluating Cardiovascular Risk in the Chronic Kidney Disease Patient: How Do New Pieces Fit into the Uremic Puzzle? *Am. Soc. Nephrol.* 2008. Vol. 3. P. 505–521.
19. Toussaint N. D., Pedagogos E., Tan S.-J. et al. Phosphate in early chronic kidney disease: Associations with clinical outcomes and a target to reduce cardiovascular risk. *Nephrology*. 2012. Vol. 17. P. 433–444.

20. Ura kawa I., Yamazaki Y., Shimada T. et al. Klotho converts canonical FGF receptor into a specific receptor for FGF 23. *Nature*. 2006. Dec. Vol. 7. P. 770–774.

**Melent'eva A. A.**, Karelian Republican Hospital named after V. A. Baranov (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Barysheva O. Yu.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Kheyfets L. M.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Zuev A. V.**, Karelian Republican Hospital named after V. A. Baranov (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Strategopulo V. A.**, Karelian Republican Hospital named after V. A. Baranov (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Malysheva I. E.**, Karelian Republican Hospital named after V. A. Baranov (Petrozavodsk, Russian Federation)

## NEW BIOMARKERS OF MINERAL BONE DISORDERS IN CHRONIC KIDNEY DISEASE – FOCUS ON FGF23 AND FACTOR KLOTHO

The increasing number of patients suffering from chronic kidney disease has been registered recently. At present, the disease ranks 5<sup>th</sup> among all causes of death. Clinical manifestations of chronic kidney disease are very diverse. The study pays special attention to mineral and bone disorders occurring almost in all patients suffering from this illness. The mentioned disorders have multifactoral pathogenesis, significantly worsen the prognosis, and require special medical approach to conservative therapy and timely surgical treatment. The article is concerned with the role that FGF23 (fibroblast growth factor 23) and factor Klotho play among other risk factors forwarding development and progression of mineral bone disorders in chronic kidney disease. The research is also aimed at identification of other factors enhancing cardiovascular risks. Particular attention is paid to hyperphosphatemia, which is one of the initiators of mineral bone disorders in chronic kidney disease, to the association between FGF23 activity level and factor Klotho, and to the possible ways of disorders' correction currently available in medicine. Activity of FGF23 and factor Klotho may be predictors of mineral bone disorders' development and progression in case of chronic kidney disease in the pre-clinical stage, therefore, correction of disorders at this stage may slow down both the development and progression of such serious abnormalities leading to disability of patients.

Key words: chronic kidney disease, mineral and bone disorder, fibroblast growth factor 23, factor Klotho, hyperphosphatemia

### REFERENCES

1. Dobronravov V. A. Modern view on the pathophysiology of secondary hyperparathyroidism: the role of fibroblast growth factor 23 and Klotho [Sovremennyy vzglyad na patofiziologiyu vtorichnogo giperparatireoza: rol' faktora rosta fibroblastov 23 i Klotho]. *Nefrologiya*. 2011. Vol. 15. № 4. P. 11–20.
2. Zemchenkov A. Yu., Gerasimchuk R. P. Activators' receptors of vitamin D and vascular calcification [Aktivatory retseptorov vitamina D i sosudistaya kal'tsifikatsiya]. *Nefrologiya i dializ*. 2009. Vol. 11. № 4. P. 276–289.
3. Milovanova L. Yu., Milovanov Yu. S., Kozlovskaya L. V. Disorders of calcium and phosphorus metabolism in chronic kidney disease of III-IV stages [Narusheniya fosforno-kal'tsiyevogo obmena pri khronicheskoy bolezni pochek III–V stadii]. *Klinicheskaya nefrologiya*. 2011. № 1. P. 58–68.
4. Rozhinskaya L. Ya. Secondary hyperparathyroidism and renal osteopathy in chronic renal failure [Vtorichnyy giperparatireoz i pochechnye osteopatii pri khronicheskoy pochechnoy nedostatochnosti]. *Nefrologiya i dializ*. 2000. Vol. 2. № 4. P. 241–247.
5. Shilo V. Yu. Selective activation VDR – innovative approach to the prevention and treatment of secondary hyperparathyroidism, cardio and renoprotective disorders [Selektivnaya aktivatsiya VDR – novatorskiy podkhod k profilaktike i lecheniyu vtorichnogo giperparatireoza, kardio- i renoprotektsii]. *Klinicheskaya nefrologiya*. 2012. Vol. 2. P. 32–41.
6. Shutov E. V. The value of fibroblast growth factor-23 in patients with chronic kidney disease – an overview of current research [Znachenie faktora rosta fibroblastov-23 u bol'nykh khronicheskoy boleznyu pochek – obzor sovremennykh issledovaniy]. *Lechashchiy vrach*. 2012. September. № 8. P. 12–16.
7. Iddo B.-D. Z., Hillel H. The parathyroid is a target organ for FGF 23 in rats. *J. Clin. Invest*. 2007. Vol. 117 (12). P. 4003–4408.
8. Albaaj F., Hutchinson A. J. Phosphat control in renal disease. *European Nephrology*. 2007. Vol. 1. P. 30–34.
9. Gutierrez O., Isakova T., Shee E. et al. Fibroblast growth factor 23 mitigates hyperphosphatemia but accentuates calcitriol deficiency in chronic kidney disease. *J. Am. Soc. Nephrol*. 2005. Jul 16 (7). P. 2205–2215.
10. Joachim I. H., Shlipaki M. G., Wessel C. L. et al. Fibroblast growth Factor 23 and early decrements in kidney function: The Heart and Soul study *Nephrol. Dial. Transplant*. 2010. Vol. 25. P. 993–997.
11. Kidney Disease: Improving Global Outcomes (KDIGO) CKD-MBD Work Group. KDIGO clinical practice guideline for the diagnosis, evaluation, prevention, and treatment of chronic kidney disease – mineral and bone disorder (CKD-MBD). *Kidney International*. 2009. Suppl 113. P. 1–130.
12. Hu M. C., Shi M., Zhang J. et al. Klotho Deficiency causes vascular calcification in Chronic Kidney Disease. *J. Am. Soc. Nephrol*. 2011. Vol. 22. P. 124–136.
13. Moe S. M. et al. Uraemic vascular calcification. *J. R. Coll. Physicians Edinb*. 2004. Vol. 34. P. 280–286.
14. National Kidney Foundation. K/DOQI Clinical Practice Guidelines for Bone Metabolism and Disease in Chronic Kidney Disease. *Am. J. Kidney Dis*. 2003 (suppl. 3). 42. P. 1–202.
15. Schlemmer U., Frolich W., Prieto R. M. Phytate in foods and significance for humans: Food sources, intake, processing, bioavailability protective role and analysis. *Mol. Nutr. Food Res*. 2009. Vol. 53. P. 330–375.
16. Shimada T., Hasegawa H., Yamazaki Y. FGF 23 is a potent regulator of vitamin D metabolism and phosphate homeostasis. *J. Bone Miner. Res*. 2004. Mar. Vol. 19 (3). P. 429–435.
17. Shroff R., Shanahan C. M. Klotho: An elixir of youth for the vasculature? *J. Am. Soc. Nephrol*. 2011. Vol. 22. P. 5–7.
18. Stenvinkel P., Carrero J. J., Axelsson J. et al. Emerging Biomarkers for Evaluating Cardiovascular Risk in the Chronic Kidney Disease Patient: How Do New Pieces Fit into the Uremic Puzzle? *Am. Soc. Nephrol*. 2008. Vol. 3. P. 505–521.
19. Toussaint N. D., Pedagogos E., Tan S.-J. et al. Phosphate in early chronic kidney disease: Associations with clinical outcomes and a target to reduce cardiovascular risk. *Nephrology*. 2012. Vol. 17. P. 433–444.
20. Ura kawa I., Yamazaki Y., Shimada T. et al. Klotho converts canonical FGF receptor into a specific receptor for FGF 23. *Nature*. 2006. Dec. Vol. 7. P. 770–774.

**АЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ ЦИЦОРА**

ассистент кафедры госпитальной хирургии, лор-болезней, офтальмологии, стоматологии, оперативной хирургии и топографической анатомии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*cap-74@mail.ru*

**АЛЕКСЕЙ ИВАНОВИЧ ФЕТЮКОВ**

доктор медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой госпитальной хирургии, лор-болезней, офтальмологии, стоматологии, оперативной хирургии и топографической анатомии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*fetukov@psu.karelia.ru*

**АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ МАРИЕВ**

доктор медицинских наук, профессор кафедры госпитальной хирургии, лор-болезней, офтальмологии, стоматологии, оперативной хирургии и топографической анатомии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*asta@psu.karelia.ru*

**ОЛЕГ ИВАНОВИЧ КОВЧУР**

кандидат медицинских наук, доцент кафедры госпитальной хирургии, лор-болезней, офтальмологии, стоматологии, оперативной хирургии и топографической анатомии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*olan@drevlanka.ru*

**КОМБИНИРОВАННЫЕ ОПЕРАЦИИ ПАХОВЫХ ГРЫЖ**

Представлен обобщенный опыт хирургического лечения паховых грыж с использованием комбинированной техники операции. Цель исследования – изучение комбинированных методов пластики задней стенки пахового канала для улучшения результатов хирургического лечения паховых грыж. Задачами работы являются разработка и изучение результатов комбинированной пластики задней стенки пахового канала с использованием методики Bassini с одновременным укреплением ее сеткой при хирургическом лечении паховых грыж IIIA, IIIB, IVA и IVB типов (классификация по L. Nyhus, 1993). Проведен анализ результатов хирургического лечения паховых грыж у 101 больного. Больные были разделены на две группы. Первую группу составили 67 больных, перенесших радикальные операции при паховых грыжах с пластикой по Bassini. Во вторую группу были включены 34 пациента, оперированных с использованием комбинированной герниопластики. Проведен анализ всей группы больных по возрасту, полу, длительности грыженосительства и количеству рецидивов заболевания. Отдаленные результаты в обеих группах оценивали по наличию рецидива грыжи в сроки от 6 месяцев до 4 лет. В первой группе рецидив грыжи выявлен у 4 пациентов из 67 (5,9 %), во второй – у 1 пациента из 34 (2,9 %). Применяемая методика комбинированной герниопластики позволила снизить число рецидивов при паховых грыжах IIIA, IIIB, IVA и IVB типов в сравнении с традиционными способами герниопластики. Комбинированная методика снижает нагрузку на имплантат в раннем послеоперационном периоде, что обеспечивает формирование более полноценной рубцовой ткани вокруг сетки.

Ключевые слова: паховая грыжа, комбинированная герниопластика, отдаленные результаты

Одним из наиболее частых заболеваний в абдоминальной хирургии являются паховые грыжи. Ежегодно в мире выполняется более 20 миллионов операций по поводу паховых грыж, что составляет от 10 до 15 % всех оперативных вмешательств на органах брюшной полости. В России ежегодно выполняется около 200 000 плановых операций по поводу паховых грыж [5], [7]. Проблема хирургического лечения грыж остается актуальной, так как не решена проблема безрецидивного способа

операций паховых грыж. Частота рецидивов паховых грыж составляет 3–16 %, при осложненных формах достигает 30 % [4]. Наличие более 300 способов оперативного лечения паховых грыж оставляет возможность поиска новых способов и модификаций коррекции данной патологии. Мнения исследователей об объеме и способе герниопластики при паховых грыжах расходятся.

Существуют классические способы натяжной герниопластики. Способ Bassini, предло-

женный в 1889 году, считается классической операцией для укрепления задней стенки пахового канала местными тканями. Недостатки натяжных способов пластики задней стенки пахового канала хорошо изучены, основным из них является механическое натяжение сопоставляемых тканей. Указанный момент сказывается на результатах оперативного лечения паховых грыж у пациентов с различной степенью выраженности разрушений задней стенки пахового канала и внутреннего пахового кольца. При расширенном внутреннем паховом кольце, но с хорошо выраженной задней стенкой пахового канала, что наблюдается у молодых людей с небольшим сроком грыженосительства, данная методика остается весьма надежной. Пациентам с разрушенной задней стенкой пахового канала, у которых при пальцевом исследовании легко прощупывается внутренняя поверхность лонной кости, выполнение классических натяжных способов герниопластики сопряжено с риском развития рецидива заболевания. Больные с рецидивными грыжами имеют измененные анатомические взаимосвязи, что сказывается на целостности задней стенки пахового канала и требует тщательного выбора способа хирургического лечения.

Современные технологии привели к смене ориентации герниопластики в пользу ненапряжных методов, включающих широкое использование сетчатых трансплантатов при операциях сложных форм паховых грыж. Наиболее распространенным методом протезирования задней стенки пахового канала с использованием полипропиленовой сетки является способ I. Lichtenstein (1995) с прямым доступом к паховому каналу. Результаты применения герниопластики по I. Lichtenstein продемонстрировали низкий показатель послеоперационных осложнений и рецидивов (0,7–1,5 %) [1], [2], [3]. Однако и этот вид пластики при паховых грыжах не всегда является адекватным. После фиксации протеза остается без изменения внутреннее паховое кольцо, а применяемый имплантат не способен сдерживать периодически возникающие повышения внутрибрюшного давления, в связи с чем внутреннее паховое кольцо может быть источником рецидива грыжи. Также при пластике по I. Lichtenstein [8] не изменяется высота пахового промежутка, что в раннем послеоперационном периоде приводит к повышенной нагрузке на имплантат и, как следствие, в определенном проценте случаев к несостоятельности швов и рецидиву грыжи [3]. Современная герниохirurgия, особенно при использовании методов без натяжения, требует от хирургов досконального знания уязвимых мест паховой области при герниопластике.

Цель исследования – дать анатомо-физиологическое и клиническое обоснование целе-

сообразности выполнения комбинированных методов пластики задней стенки пахового канала с целью улучшения результатов хирургического лечения сложных форм паховых грыж.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи: разработать и изучить результаты комбинированной пластики задней стенки пахового канала с использованием методики Bassini с одновременным укреплением ее сеткой при хирургическом лечении паховых грыж IIIA, IIIB, IVA и IVB типов (классификация по L. Nyhus, 1993).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проведен ретроспективный анализ отдаленных результатов хирургического лечения паховых грыж у 101 больного. Больные были разделены на две группы. Первую группу составили 67 (66,3 %) больных, перенесших радикальные операции при паховых грыжах с пластикой по Bassini. Во вторую группу были включены 34 (33,6 %) пациента, перенесших операции с использованием комбинированной герниопластики. Возраст больных от 19 до 83 лет. Средний возраст составил 53,6 года. Подавляющее большинство пациентов – мужчины (92, или 91,1 %), женщин – 9 (8,9 %). Длительность грыженосительства – от одного месяца до 15 лет. Рецидивные грыжи наблюдались у 19 (18,8 %) из 101 больного.

Пластика по Bassini в классическом виде выполнялась с использованием для опоры подвздошно-лобкового тракта (*tractus iliopubicus*) у больных с первичными паховыми грыжами с типом грыж IIIA, IIIB с высотой пахового промежутка не более 2 см.

Комбинированный способ пластики задней стенки пахового канала применялся с типом грыж IIIA, IIIB, IVA и IVB с высотой пахового промежутка более 2 см. Грыжи IVA и IVB типов во всех случаях являлись показанием к комбинированной герниопластике вне зависимости от высоты пахового промежутка и возраста пациента. После окончательной интраоперационной диагностики вида паховой грыжи, определения степени разрушения задней стенки пахового канала, обработки грыжевого мешка выполнялась пластика задней стенки пахового канала по методике Bassini с целью ликвидации пахового промежутка (рис. 1). В последующем поверх выполненной пластики фиксировалась полипропиленовая сетка фирмы «Линтекс». Нижний край сетки подшивали к лонному бугорку монофиламентной полипропиленовой нитью (2/0). Далее непрерывным швом нижний край сетки фиксировался к пупартовой связке с формированием внутреннего отверстия пахового канала. Верхний край сетки фиксировали отдельными швами к влагалищу прямой мыш-

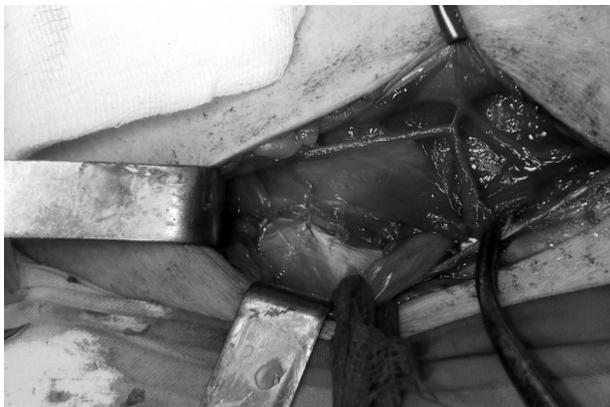


Рис. 1. Этап герниопластики по Bassini



Рис. 2. Этап укладки сетки

цы живота и внутренней косой мышце живота. Семенной канатик укладывался на вновь созданное ложе. Передняя стенка ушивалась край в край (рис. 2).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Отдаленные результаты оценивали по наличию рецидива грыжи в сроки от 6 месяцев до 4 лет в двух группах пациентов: 1-я группа – классическая герниопластика по Bassini (67), 2-я группа – комбинированная герниопластика (34).

В 1-й группе рецидив грыжи выявлен у 4 пациентов из 67 (5,9 %). Во 2-й группе рецидив выявлен у 1 пациента из 34 (2,9 %).

Таким образом, применение комбинированной герниопластики позволило снизить число рецидивов примерно в два раза. Применение коррекции задней стенки пахового канала с использованием аутопластики по Bassini при комбинированной герниопластике позволяет избежать ранней нагрузки на сетку, что создает ей покой в отличие от пластики по I. Lichtenstein. К 90-му дню после имплантации, когда образуется плотная капсула вокруг элементов сетки [6], происходит более полноценная адаптация имплантата к имеющейся нагрузке.

## ВЫВОДЫ

1. При сложных вариантах паховых грыж с разрушенной задней стенкой пахового канала применение комбинированной герниопластики позволяет снизить количество рецидивов в сравнении с традиционными способами натяжной герниопластики.

2. Комбинированная методика снижает нагрузку на имплантат в раннем послеоперационном периоде, что позволяет сформировать рубцовую ткань вокруг сетки, обеспечить более полноценную адаптацию ее к имеющейся нагрузке и, как следствие, добиться снижения количества рецидивов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А да мя н А. А. и др. Комбинированная пластика при паховых грыжах // *Анналы пластической, реконструктивной и эстетической хирургии*. 2007. № 2. С. 74–79.
2. Ар ч в а д з е В. Ш. и др. Пластика пахового канала без натяжения при грыжах // *Хирургия*. 2005. № 7. С. 50–52.
3. Б о ч к а р е в А. А. и др. Хирургическое лечение паховых грыж // *Сибирский медицинский журнал*. 2008. № 4. С. 53–55.
4. М а р и е в А. И., У ш а к о в Н. Д. Наружные грыжи живота. Петрозаводск, 1989. 10 с.
5. П р и ш в и н А. П., М а й с т р е н к о Н. А., С и н г а е в с к и й С. Б. Оптимизация методики лапароскопической герниопластики // *Вестник хирургии*. 2003. № 6. С. 71–75.
6. С у р к о в Н. А. Особенности репаративных процессов передней брюшной стенки в зоне имплантации сетки из пропилена в эксперименте // *Анналы пластической, реконструктивной и эстетической хирургии*. 2002. № 1. С. 52–61.
7. Т о с к и н К. Д., Ж е б р о в с к и й В. В. Грыжи живота. М.: Медицина, 1983. 240 с.
8. L i c h t e n s t e i n I. L., S h u l m a n A. G., A m i d P. K. Tension-Free of Groin Hernias // *Hernia / Ed. by L. M. Nyhus, R. E. Condon*. 4 ed. 1995. P. 237–249.

**Tsitsyura A. P.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

**Fetyukov A. I.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

**Mariev A. I.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

**Kovchur O. I.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

## COMBINED GROIN HERNIA SURGERIES

The summarized experience of surgery treatment of groin hernias with the use of combined surgery procedure is presented in the article. The goal of the research is to study combined methods of plastic surgery of the posterior wall of the inguinal canal with the aim to improve outcomes of groin hernia surgery treatment. The objective of the research consists in the development and

study of the outcomes of combined plastic surgery conducted on the posterior wall of the inguinal canal with the use of Bassini's procedure together with its simultaneous reinforcement by a surgical mesh during surgical treatment of IIIA, IIIB, IVA and IVB types groin hernia (classification according to L. Nyhus, 1993). The analysis of the results of groin hernia surgeries in 101 patients was carried out. The patients were divided into two groups. The first group included 67 patients after major groin hernia surgeries with the plastic surgery using Bassini's procedure. The second group included 34 patients after surgeries with the use of combined hernioplasty. The data of all patients involved in the study were analyzed according to age, sex, duration of the hernia disease, and recurrence rate. The remote results were evaluated by recurrence rates during the period from 6 months to 4 years. In group 1 recurrence was found in 4 patients out of 67 (5,9 %). In group 2 recurrent hernia was identified in 1 patient out of 34 (2,9 %). The applied technique of combined hernioplasty allowed to reduce the recurrence rate for complex forms of groin hernia, compared with traditional techniques of tension hernioplasty. The combined technique allows to reduce implant loading in the early post-surgery period, which makes it possible for the scar tissue to develop around the mesh.

Key words: groin hernia, combined hernioplasty, remote results

#### REFERENCES

1. Adamyan A. A. et al. Combined plastic surgery of groin hernia [Kombinirovannaya plastika pri pakhovykh gryzhakh]. *Annaly plasticheskoy, rekonstruktivnoy i esteticheskoy khirurgii* [Annals of plastic, reconstructive and aesthetic surgery]. 2007. № 2. P. 74–79.
2. Archvadze V. Sh. et al. Hernia tension-free plastic surgery of the inguinal canal [Plastika pakhovogo kanala bez natyazheniya pri gryzhakh]. *Hirurgiya* [Surgery]. 2005. № 7. P. 50–52.
3. Bochkarev A. A. et al. Surgical treatment of groin hernia [Hirurgicheskoe lechenie pahovykh gryzh]. *Sibirskiy meditsinskiy zhurnal* [Siberian medical journal]. 2008. № 4. P. 53–55.
4. Mariev I. A., Ushakov N. D. *Naruzhnye gryzhi zhivota* [Exterior abdominal hernias]. Petrozavodsk, 1989. 10 p.
5. Prishvin A. P., Maystrenko N. A., Singaevskiy S. B. Optimization of laparoscopic hernioplasty technique [Optimizatsiya metodiki laparoskopicheskoy gernioplastiki]. *Vestnik khirurgii* [Medical Bulletin]. 2003. № 6. P. 71–75.
6. Surkov N. A. Specifics of reparative processes of the anterior abdominal wall in the zone of propylene mesh implantation in the experiment [Osobennosti reparativnykh protsessov peredney bryushnoy stenki v zone implantatsii setki iz propelena v eksperimente]. *Annaly plasticheskoy, rekonstruktivnoy i esteticheskoy khirurgii* [Annals of plastic, reconstructive and aesthetic surgery]. 2002. № 1. P. 52–61.
7. Toskin K. D., Zhebrovskiy V. V. *Gryzhi zhivota* [Abdominal hernia]. Moscow, Medicine Publ., 1983. 240 p.
8. Lichtenstein I. L., Shulman A. G., Amid P. K. Tension-Free of Groin Hernias // *Hernia* / Ed. by L. M. Nyhus, R. E. Condon. 4 ed. 1995. P. 237–249.

Поступила в редакцию 08.11.2013

УДК 548.03:549.02:470.22

**ЕВГЕНИЯ НИКОЛАЕВНА СВЕТОВА**

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*ensvetova@igkrc.ru*

**СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ СВЕТОВ**

доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геохимии и моделирования природных и техногенных процессов, Институт геологии Карельского научного центра РАН, профессор кафедры геологии и геофизики горно-геологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*ssvetov@krc.karelia.ru*

**АГАТОВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ЭФФУЗИВАХ  
СУЙСАРСКОГО КОМПЛЕКСА ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАРЕЛИИ**

Излагаются результаты минералого-геохимического изучения агатовых образований из подушечных лав суйсарского вулканического комплекса Центральной Карелии (район Пиньгубы Онежского озера). Исследования выполнены с использованием комплекса современных методов: оптической и электронной микроскопии, микрозондового, рентгенодифракционного анализа, спектроскопии комбинационного рассеяния света, масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Показано, что основную роль в строении агатов выполняют минералы семейства кремнезема – мелкокристаллический кварц и волокнистый халцедон, отдельные слои которых активно пигментированы хлоритом и окислами железа. Для агатов характерны выделения крупнокристаллического кальцита, микровключения эпидота, пирита, титанита, альбита. Установлено, что наличие контрастных ритмов внутри агатовых миндалин маркируется не только изменением состава примесных минеральных фаз, их морфологией, но и различными концентрациями рассеянных микроэлементов, что может быть следствием гетерогенности питающего раствора, в котором наблюдался эффект «химического истощения» по мере длительности циркуляции.

Ключевые слова: агаты, минералогия, геохимия, суйсарский вулканический комплекс, Центральная Карелия

Агатами называют ритмично-полосчатые поликристаллические агрегаты, сложенные в основном минералами семейства кремнезема (халцедоном, кварцином, кварцем, опалом) с зонами и включениями других низкотемпературных минералов (карбонатов, цеолитов, оксидов и гидроксидов железа и т. д.). К ним также относят полупрозрачные и окрашенные разновидности халцедона, содержащие моховидные, игольчатые и другие включения характерной формы, получившие по ним названия моховых, дендритных агатов и т. п. [3]. Агаты наиболее широко распространены среди эффузивных горных пород – базальтов, андезитов, риолитов, реже встречаются в осадочных породах и корях выветривания. О происхождении агатов высказано множество предположений, в том числе принципиально различных [5], [13] и мн. др. Однако в настоящее время большинством исследователей признается секреторный механизм образования агатов: растворы, циркулировавшие по ранее образованным полостям и каналам (например, газовые пузыри в эффузивных породах или пустоты выщелачивания в осадочных породах), последовательно отлагали там слои халцедона, кварца, опала и других минералов.

Источником кремнезема при формировании агатов в эффузивах служили поздние гидротермальные пересыщенные кремнеземом растворы, циркулирующие по трещинам и газовым каналам в лавах на завершающих этапах вулканической активности. Текстурированный рисунок агатов определяется особенностями морфологии полостей выполнения, структурными свойствами минералов кремнезема, составом пигментирующих веществ и концентрацией их компонентов. По мнению многих специалистов, формирование параллельно-полосчатых и концентрических структур в агатах обусловлено дискретным характером осаждения кремнистого вещества на стенках газовых полостей и трещин, то есть внедрение новых порций раствора в агатовую миндалину происходило в условиях пульсационного режима, что отразилось в повторяющихся ритмах слагающих агат минералов [11].

К одним из известных вмещающих агатовую минерализацию комплексов на территории Карелии относятся палеопротерозойские вулканы суйсарского комплекса, распространенные в пределах Онежской структуры Центральной Карелии [4]. Первое упоминание о находках халцедона с зональной структурой в базальтах

острова Суйсарь Онежского озера приведено в Трудах Императорского Санкт-Петербургского общества естествоиспытателей в 1912 году В. М. Тимофеевым, где петрографически описаны формы кремнезема в мандельштейнах и обсуждаются вопросы их генезиса [10]. Агатовидные образования встречаются и на других островах Онежского озера, а также местами на его побережье, что хорошо известно коллекционерам – любителям камня. Однако по своим художественно-декоративным свойствам онежские агаты заметно уступают забайкальским, приморским и тиманским, вследствие чего, вероятно, они являются редкостью для российских геологических музеев и, к сожалению, пока мало изучены.

В настоящей работе излагаются результаты минералого-геохимического изучения агатовых образований из подушечных лав суйсарского вулканического комплекса, выполненного с использованием комплекса современных методов исследования: оптической и электронной микроскопии, микрозондового, рентгенодифракционного анализа, спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР), масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Фазовый состав агатов изучен на рентгеновском дифрактометре Thermo Scientific ARL X'TRA в порошковых препаратах, диагностика индивидуальных включений проведена на рамановском микроскопе Thermo Scientific Nicolet Almega DXR в полированных агатовых пластинах. Изучение поверхности сколов, морфологии и состава минералов-примесей в агатах проведено на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LSH (Tescan) с энергодисперсионным анализатором INCA Energy 350 с использованием напыленных углеродом аншлифов и сколов агатов. Определение редких и рассеянных элементов в отдельных слоях концентрически-зональных агатов выполнено на квадрупольном масс-спектрометре X-SERIES 2 (Thermo scientific) с приставкой для лазерной абляции LA-UP-266 MACRO (лазер Nd: YAG, длина волны излучения 266 нм, энергия импульса 0,133 мДж, скорость сканирования 70 мкм/с, частота повторения импульса 10 Гц). Данный комплекс (LA-ICP-MS-технология) позволяет проводить прямое определение микроэлементного состава твердофазных объектов с локальностью измерения до 10–20 мкм. Размер пятна абляции в настоящем эксперименте составлял 40 × 120 мкм. Количественный анализ содержания элементов осуществлялся по внешней калибровке с использованием стандарта NIST 612. В ходе анализа выполнено определение Li, Be, Mg, K, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, In, Sn, Sb, Ba, Hf, Ta, W, Au, Pb, Bi, Th, U, PЗЭ. Все аналитические исследования проведены в Институте геологии Карельского научного центра РАН.

Объектом работы послужила коллекция агатов, собранная авторами в береговых обнажениях Пиньгубы Онежского озера (район дачного поселка Пиньгуба, 15 км севернее г. Петрозаводска). Агатовую минерализацию вмещают вулканыты, представленные подушечными лавами с массивными и миндалекаменными текстурами в ядрах подушек. Подушки имеют плотную упаковку, размер их варьирует от 0,3 × 0,6 м до 0,8 × 2,5 м, цемент представлен туфовым материалом с примесью терригенной составляющей. Внешне это мелкозернистые серо-зеленые породы, сложенные плагиоклазом, пироксеном (авгитом), амфиболом, хлоритом, на отдельных участках биотитизированны и эпидотизированны. По петрохимическим характеристикам породы отвечают пикробазальтовой серии. Возраст пород суйсарского комплекса, по Sm-Nd изотопным данным, составляет 1975 ± 24 млн лет [7]. На данном проявлении агатовые образования встречаются в коренных выходах пород в виде выступающих желваков, выполняющих межшаровое пространство в подушечных лавах и тектонических трещинах, заполняют газовые пустоты в базальтах, а также присутствуют в виде гальки и других обломков в береговой зоне. Обнажения прослеживаются вдоль уреза воды на расстоянии около 1 км при ширине 5–10 м. Агатовые выделения в большинстве случаев имеют конусовидную форму, обусловленную их выполнением межподушечного пространства, реже встречаются линзовидные, прожилковые формы. Размер таких выделений в поперечнике варьирует от 3–5 до 50 см. Окраска агатов данного участка довольно своеобразная и не отличается широкой цветовой гаммой. В основной массе агатовых выделений доминируют буровато-красные тона, что позволяет отнести их к карнеол-агатам [3]. Характерной декоративной особенностью почти всех образцов являются контрастные зеленые выделения хлорита. По конфигурации слоев макроскопической зональности агаты отвечают концентрически-зональному бастионному типу (рис. 1),

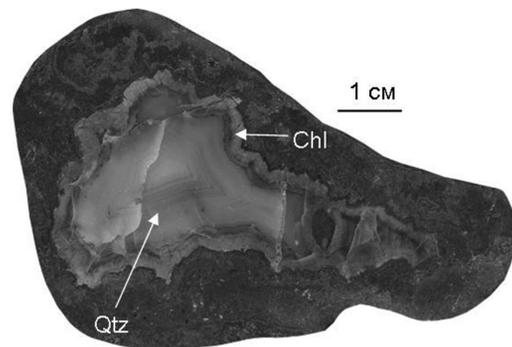


Рис. 1. Агатовая миндалина с облакающим типом зональности в базальте, пигментирована по контуру хлоритом (Chl), в центре – кварц (Qtz)

встречаются также очковые (глазковые), моховые разновидности, а также выделения с неясно-рисунчатой макротекстурой [1], [3]. Количество чередующихся разноокрашенных полос в агатах обычно невелико, до 4–5 на 1 см, из-за наложенных трещин и развитых по ним налетов оксидов железа и других включений декоративность рисунка часто снижена. Центральные части агатовых секретий обычно выполнены либо однородным мелкокристаллическим молочно-белым кварцем, либо чередующимися, в разной степени прозрачными слоями кварца и халцедона. Ширина таких слоев варьирует в широких пределах – от сотых долей миллиметра до сантиметров.

Изучение шлифов тонкополосчатых агатов под микроскопом в проходящем свете показало, что выделяемые визуально слои обладают различной микротекстурой. Они сложены разномасштабными агрегатами кварца, мелкочешуйчатого и волокнистого халцедона, в редких случаях отмечаются волокна кварца. Внешние, обычно более массивные слои секретий, близкие к контакту с вмещающими базальтами, почти всегда активно пигментированы оксидами железа и хлоритом. Нередко в центральных частях секретий обнаруживаются пустоты, поверхность которых устилается натечными агрегатами халцедона либо кристалликами кварца, кальцита. В ряде случаев кварцевые агатовые секретии содержат достаточно крупные выделения кальцита, замещающие халцедон, в том числе в виде крупных, до 2–4 см, кристаллов, иногда расщепленных, вплоть до груболучистых сферолитов. Минерализованные газовые пузыри размером от 0,1 до 1–2 см, отмечаемые местами в базальтовом покрове, имеют преимущественно округлые очертания и заполняют до 10 % объема породы. Миндалины выполнены халцедоном или кальцитом в основном однородного строения. Лишь для крупных халцедоновых миндалин (>1 см) характерна концентрическая зональность, где роль чередующихся полос в них выполняют тончайшие слои разноструктурированного халцедона и кварца.

На дифрактограммах образцов из неокрашенной силикатной части агатовых секретий устанавливаются лишь отражения  $\alpha$ -кварца, иных форм кремнезема методом рентгенографии не обнаружено. Электронно-микроскопическое изучение поверхности сколов кварц-халцедоновых агрегатов секретий при увеличении до 8 тысяч раз показало, что отдельные слои в изломе обладают различными внутренними микротекстурами. Наиболее типичными для исследованных агатов являются структуры, обусловленные развитием индивидов кварца с четкими кристаллографическими очертаниями, размеры которых варьируют от 3 до 50 мкм (рис. 2а). Отмечаются также структуры с нечетко выраженной бугорчатой поверхностью.

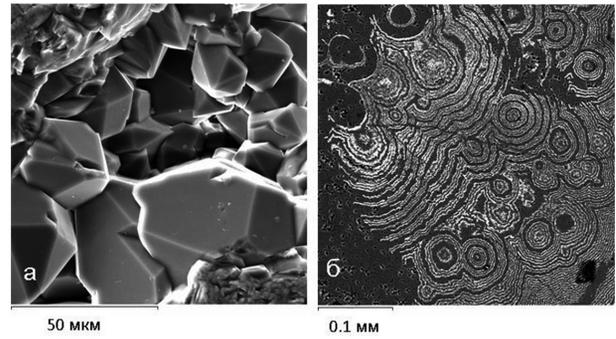


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения: а – скульптура скола кварцевой зоны агата; б – псевдоморфоза эпидота (светлое) по кремнезему (темное) в текстуре агата

Методом КР-спектроскопии в агатах диагностированы многочисленные включения хлорита и гематита, обуславливающие красно-зеленую окраску отдельных слоев халцедона, микровключения кальцита и альбита (рис. 3). Помимо перечисленных минералов, методом микрондового анализа в агатах установлены микроминеральные фазы, отвечающие по составу эпидоту, титаниту, пириту, оксидам и гидроксидам железа, ковеллину. Хлорит – один из основных примесных минералов изученных агатов, отмечаемый во всех образцах, рассеян в отдельных прослоях халцедона в виде чешуйчатых скоплений. Минерал характеризуется достаточно высокой стабильностью состава в пределах изученной группы агатов и относится к магнезиально-железистой разновидности. В отдельных зонах агатовых прослоев широко проявлено присутствие микровключений оксидов и гидроксидов железа, различающихся степенью окисления железа и степенью гидрата-

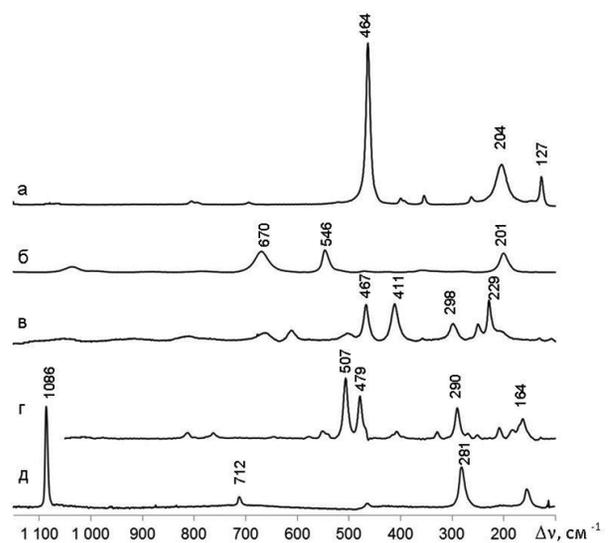


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния света минеральных фаз агатовых секретий: а – кварц, б – хлорит, в – гематит, г – альбит, д – кальцит

ции. Магнетит и гематит представлены кристаллическими выделениями размером до 200 мкм и их фрагментами, в которых часто проявлена микронеоднородность, являющаяся, возможно, следствием срастания фаз. Гидроокислы железа (гетит) представлены нитевидными образованиями из тонкоигольчатых кристаллов, выполняющими трещинки в кварце. Включения эпидота встречались эпизодически в приконтактной зоне агатового халцедона с вмещающим базальтом в виде концентрических структур и их фрагментов (рис. 2б). Такие структуры, по-видимому, являются следствием замещения эпидота одной из легкорастворимых в определенных термодинамических условиях разностей кремнезема в текстуре агата. К выделениям эпидота иногда приурочены включения пирита. Помимо крупных кристаллических выделений, в кварцевых прослоях агатов отмечаются включения кальцита микронных размеров. Таким образом, минералогия агатов Пиньгубы Онежского озера достаточно своеобразна и представлена силикатами, окислами и гидроокислами, сульфидами и карбонатами. В сравнительном плане изучаемые агаты имеют определенное минералогическое сходство с «салминскими агатами», связанными с рифейскими вулканитами северо-восточного Приладожья (район пос. Салми, Южная Карелия) [6].

Изучение ритмично-полосчатых агатовых образований представляет специальный интерес для выяснения условий миграции химических элементов и отложения минерального вещества в пределах древних базальтовых толщ [2], [12], [14]. Нами проведен анализ распределения редких и рассеянных элементов в отдельных слоях концентрически-зональных агатов изучаемого проявления. Для исследования из небольших халцедоновых агатовых секретий ( $d \sim 4$  см) с облекающей текстурой, подчеркнутой пигментацией хлоритом и окислами железа, были вырезаны плоскопараллельные пластинки, в которых по профилю от края секретии к центру послойно определялся элементный состав в заданных точках (рис. 4). Методика твердофазного анализа была использована нами ранее при геохимическом изучении жильного и породообразующего кварца, а также при профильном химическом опробовании зонального биогенного карбоната ростров белемнитов [8], [9].

Результаты послойного геохимического микроопробования образцов агатов из суйсарских вулканитов показывают, что наличие контрастных границ (слоев) внутри агатовых образований маркируется не только изменением состава примесных минеральных фаз, их морфологией, но и различными концентрациями рассеянных микроэлементов (рис. 4). Для большинства элементов отмечается высокая степень обогащения первично сформированных прослоев по

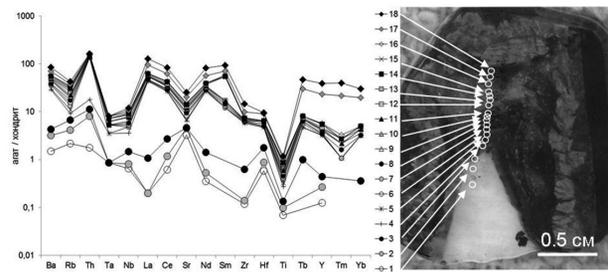


Рис. 4. Профиль распределения концентраций редких элементов в агате, нормировано к хондриту [15]

отношению к наиболее поздним центральным частям агатовых секретий, в частности, для легких РЗЭ она достигает 100-кратного уровня. Такая тенденция может быть результатом химической реакции первых порций гидротермального раствора с базальтовым субстратом, что привело к формированию в контактных зонах слоистых участков, имеющих максимальные содержания флюид-мобильных элементов (Li, Be) и химических фаз, вынесенных из породы, – Mg, Ti, V, Mn, Zn, а также максимального содержания РЗЭ (с менее фракционированным спектром тяжелых РЗЭ). Последующие порции флюида осаждали гетерогенные по составу слои кремнезема, в меньшей степени обогащенные Mg, Mn, Fe, Ti, крупноионными литофильными элементами (Rb, K, Ba, Sr, Pb) и легкими РЗЭ, что, вероятно, связано с изменением химического состава питающего раствора, в котором наблюдался эффект «постепенного истощения» по мере длительности циркуляции. На завершающей стадии агатообразования формировались кварцевые ядра, наиболее стерильные в отношении рассеянных элементов примесей, что отражает процесс самоочищения матрицы кремнезема в ходе кристаллизации. Однако для ряда элементов, таких как K, Cr, Ni, Y, Hf, Ta, Th, выявлена стабильность их содержания по всему профилю.

Таким образом, в результате проведенных исследований выявлены основные минералогические особенности агатов из вулканитов суйсарского комплекса района Пиньгубы Онежского озера. По конфигурации ритмов зональности агаты отвечают концентрически-зональному бастионному типу, встречаются очковые, моховые разновидности, выделения неясно-рисунчатой макротекстуры. Отсутствие онисов (параллельно-слоистых агатов), возможно, свидетельствует об относительно низких концентрациях кремнезема в гидротермальных растворах, препятствующих процессу гравитационной отсадки их коллоидной составляющей. Основную роль в строении агатов выполняют минералы семейства кремнезема – мелкокристаллический кварц и волокнистый халцедон, отдельные слои которых активно пигментированы хлоритом и окислами железа. Для агатов

характерны выделения крупнокристаллического кальцита, микровключения эпидота, пирита, титанита, альбита. Наличие контрастных ритмов внутри агатовых миндалин маркируется не только изменением состава примесных минеральных фаз, их морфологией, но и различными концентрациями рассеянных микроэлементов, что может быть следствием гетерогенности питающего раствора, в котором наблюдался эффект «химического истощения» по мере длительности циркуляции.

Инициированные исследования агатовых образований района Пиньгубы Онежского озера являются начальным этапом более глубокого и всестороннего изучения вопроса агатовой минерализации суйсарского вулканического комплекса. Агаты и вмещающие их базальтовые толщи являются природной геологической

системой, представляющей специальный интерес для выяснения условий эволюции гидротермальных минералообразующих процессов в вулканических структурах. Сравнительно легкая доступность рассматриваемого агатового проявления способствует возможности знакомства с агатоносными породами в учебно-образовательном процессе, в том числе для студентов-геологов, проходящих учебную практику на территории Карелии вблизи г. Петрозаводска.

Авторы выражают признательность за содействие в проведении исследований А. С. Парамонову – аналитику LA-ICP-MS, Ю. Л. Кюлленену, подготовившему большое количество полировок и аншлифов из агатов, и С. Я. Соколову, любезно подсказавшему месторасположение данного агатового проявления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барсанов Г. П., Яковлева М. Е. Минералогия поделочных и полудрагоценных разновидностей тонкозернистого кремнезема. М.: Наука, 1984. 144 с.
2. Гептнер А. Р. Гидротермальная минерализация в рифтовой зоне Исландии (тектонический контроль формирования минеральных концентраций) // Литология и полезные ископаемые. 2009. № 3. С. 227–252.
3. Годовиков А. А., Рипинен О. И., Моторин С. Г. Агаты. М.: Недра, 1987. 368 с.
4. Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения) / Отв. ред. Л. В. Глушанин, В. Н. Шаров, В. В. Щипцов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2011. 431 с.
5. Пилипенко П. П. К вопросу о генезисе агатов // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1934. Т. 12 (2). С. 281–295.
6. Полеховский Ю. С., Пунин Ю. О. Агатовая минерализация базальтоидов северо-восточного Приладожья (Ю. Карелия) // ЗРМО. 2007. № 3. С. 96–103.
7. Пухтель И. С., Богатилов О. А., Куликов В. С., Куликова В. В., Журавлев Д. З. Роль коровых и мантийных источников в петрогенезисе континентального магматизма: изотопно-геохимические данные по раннепротерозойским пикробазальтам Онежского плато, Балтийский щит // Петрология. 1995. Т. 3. № 4. С. 397–419.
8. Светов С. А., Светова Е. Н. LA-ICP-MS геохимическая характеристика ростров белемнитов как отражение изменения палеоэкологических условий морских бассейнов // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар: Геопринт, 2013. № 5. С. 2–5.
9. Светова Е. Н., Светов С. А., Данилевская Л. А. Редкие и редкоземельные элементы в кварце как индикаторы условий минералообразования // Труды КарНЦ РАН. 2012. № 3. С. 137–145.
10. Тимофеев В. М. Халцедоны острова Суйсари // Труды Спб Об-ва естествоиспытателей. 1912. Т. 35. Вып. 5. С. 157–174.
11. Халцедоны Северо-Востока СССР / В. И. Гончаров, М. Е. Городинский, Г. Ф. Павлов и др. М.: Наука, 1987. 191 с.
12. Gotze J., Tichomirowa M., Fuchs H., Pilot J., Sharp Z. D. Geochemistry of agates: a trace element and stable isotope study // Chemical Geology. 2001. Vol. 175. P. 523–541.
13. Liesegang R. E. Die Achate. Dresden; Leipzig: T. Steinkopf, 1915. 126 p.
14. Mockel R., Götze J., Sergeev S. A., Kapitonov I. N., Adamskaya E. V., Goltsin N. A., Vennemann T. Trace-Element Analysis by Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS): a Case Study for Agates from Nowy Kościół, Poland // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. «Техника и технологии». 2012. Т. 5. № 1. С. 3–18.
15. Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Magmatism in the ocean basins. Geol. Soc. Spec. / Publ. A. D. Saunders, M. J. Norry (eds.). 1989. № 42. P. 313–345.

**Svetova E. N.**, Institute of Geology, Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

**Svetov S. A.**, Institute of Geology, Karelian Research Centre of RAS,  
Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

#### AGATE MINERALIZATION IN EFFUSIVES OF SUYSAR COMPLEX LOCATED IN CENTRAL KARELIA

The paper is concerned with the results of mineralogical and geochemical study of agates from pillow lavas of the Suysar volcanic complex (Central Karelia, Onega Lake Pin'guba). The results were obtained by the complex of modern research methods: optical and electron microscopy, electron microprobe, X-ray diffraction analysis, Raman spectroscopy, mass spectrometry with inductively coupled plasma. It is shown that the main role in the agates' structure is executed by the silica minerals: quartz and fine-grained fibrous chalcedony, the individual layers are actively pigmented with chlorite and iron oxides. Coarse-crystalline calcite, microinclusions of epidote, pyrite, titanite, albite are typical of agate. The carried out research has shown that the contrasting rhythms' presence within agate is marked not only by the change in the alloy composition of mineral phases and their morphology, but also by different concentrations of trace elements. This phenomenon may be conditioned by the heterogeneity of the feed solution, in which "chemical exhaustion" effect, demonstrating dependence upon circulation duration, was observed.

Key words: agates, mineralogy, geochemistry, suysar volcanic complex, Central Karelia

## REFERENCES

1. Barsanov G. P., Yakovleva M. E. *Mineralogiya podelochnykh i poludragotsennykh raznovidnostey tonkozernistogo kremnezema* [Mineralogy of ornamental and semi-precious varieties of the fine-grained silica]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 144 p.
2. Geptner A. R. Hydrothermal mineralization in the Iceland rift zone (tectonic control of the formation of mineral concentrations). *Litologiya i poleznye iskopaemye* [Lithology and Mineral Resources]. 2009. Vol. 44. № 3. P. 205–228.
3. Godovikov A. A., Ripinen O. I., Motorin S. G. *Agaty* [Agates]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 368 p.
4. *Onezhskaya paleoproterozoyanskaya struktura (geologiya, tektonika, glubinnoe stroenie i minerageniya)* [Paleoproterozoic Onega structure (Geology, tectonics, deep structure, mineralogeny)] / Executive editors L. V. Glushanin, V. N. Sharov, V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk, Karel'skiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2011. 431 p.
5. Pilipenko P. P. On the genesis of agates [K voprosu o genezise agatov]. *Bull. MOIP. Otd. geol.* [Bull. Moscow Society of Naturalists, Div. Geol.]. 1934. Vol. 12 (2). P. 281–295.
6. Polekhovskiy Yu. S., Punin Yu. O. Agate mineralization in basaltoids of Northeastern Ladoga region (South Karelia) [Agatovaya mineralizatsiya bazal'toidov severo-vostochnogo Priladozh'ya]. *ZRMO*. 2007. № 3. P. 96–103.
7. Pukhtel' I. S., Bogatikov O. A., Kulikov V. S., Kulikova V. V., Zhuravlev D. Z. The role of crystal and mantle sources in the petrogenesis of continental magmatism: evidence from isotope and geochemical study of the early proterozoic parties from Onega plateau, Baltic shield. *Petrologiya* [Petrology]. 1995. Vol. 3. P. 397–419.
8. Svetov S. A., Svetova E. N. LA-ICP-MS Geochemical characteristics of belemnite as reflection of paleoecological changes in conditions of the sea basins [LA-ICP-MS geokhimicheskaya kharakteristika rostrov belemnitov kak otrazhenie izmeneniya paleoekologicheskikh usloviy morskikh basseynov]. *Vestnik Instituta geologii Komi NTs UrO RAN*. Syktyvkar, Geoprint Publ., 2013. № 5. P. 2–5.
9. Svetova E. N., Svetov S. A., Danilevskaya L. A. Rare and rare-earth elements in quartz as indicators of mineral conditions [Redkie i redkozemel'nye elementy v kvartse kak indikator usloviy mineraloobrazovaniya]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Writings of the Karelian research centre of the Russian Academy of Sciences]. 2012. № 3. P. 137–145.
10. Timofeev V. M. Chalcedony of Suysar Island [Khaltsedony ostrova Suysari]. *Trudy St. Peterburgskogo obshchestva estestvoispytateley* [Writings of the Society of St. Petersburg Naturalists]. 1912. Vol. 35. Issue 5. P. 157–174.
11. *Khaltsedony severo-vostoka SSSR* [Chalcedony of the USSR North-East] / V. I. Goncharov, M. E. Gorodinskiy, G. F. Pavlov et al. Moscow, Nauka Publ., 1987. 191 p.
12. Gotze J., Tichomirowa M., Fuchs H., Pilot J., Sharp Z. D. Geochemistry of agates: a trace element and stable isotope study // *Chemical Geology*. 2001. Vol. 175. P. 523–541.
13. Liesegang R. E. *Die Achate*. Dresden; Leipzig: T. Steinkopf, 1915. 126 p.
14. Mockel R., Götze J., Sergeev S. A., Kapitonov I. N., Adamskaya E. V., Goltsin N. A., Venemann T. Trace-Element Analysis by Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS): a Case Study for Agates from Nowy Kościół, Poland // *Журнал Сибирского федерального университета. Сер. «Техника и технологии»*. 2012. Т. 5. № 1. С. 3–18.
15. Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Magmatism in the ocean basins*. Geol. Soc. Spec. / Publ. A. D. Saunders, M. J. Norry (eds.). 1989. № 42. P. 313–345.

Поступила в редакцию 23.05.2014

УДК 553.493(470.22)

**ЛЮДМИЛА ВЛАДИМИРОВНА КУЛЕШЕВИЧ**

кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и геофизики горно-геологического факультета, Петрозаводский государственный университет, ведущий научный сотрудник, Институт геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)

*kuleshev@krc.karelia.ru***АНТОНИНА ВАСИЛЬЕВНА ДМИТРИЕВА**

аспирант, Институт геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)

*DmitrievaA-V@yandex.ru***РУФ АНДРЕЕВИЧ ХАЗОВ**

кандидат геолого-минералогических наук, консультант, Институт геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)

## ВА-SR-P-TI-TR-ПОЛЕВОШПАТОВОЕ СЫРЬЕ ЭЛИСЕНВААРСКОГО ЩЕЛОЧНОГО КОМПЛЕКСА (КАРЕЛИЯ): ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Приводятся данные по экономической оценке комплексного Ва-Sr-P-Ti-TR-полевошпатового сырья Элисенваарского дифференцированного щелочного комплекса в северо-западном Приладожье (Карелия), содержанию и распределению в породах редкоземельных элементов (REE) и их минеральными ассоциациями. Они представлены монацитом, ортитом, TR-эпидотом, TR-апатитом и титанитом, бастнезитом, паризитом, лантанитом, Ca-Sr-Ce-карбонатом. В незначительном количестве REE встречаются в цирконе и прочих силикатах.

Ключевые слова: редкоземельные элементы и REE-минералы (монацит, ортит, бастнезит), TR-содержащие минералы (апатит, титанит), щелочной комплекс, Элисенваара, Карелия

### ЭЛИСЕНВААРСКИЙ ЩЕЛОЧНОЙ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ПРИЛАДОЖЬЯ

Элисенваарский щелочной дифференцированный комплекс северо-западного Приладожья с возрастом ~1,775 млрд лет [2] включает интрузивные тела Кайвоямки, Райвямьяки и более мелкие интрузии (около 12), образующие массивы сложного строения на площади ~100 км<sup>2</sup>. Интрузии имеют штокообразную, овальную форму и дифференцированное кольцевое строение [3]. Комплекс объединяет гипабиссальные, диатремовые и дайковые тела, сформировавшиеся в результате двух фаз магматизма – интрузивной ультрамафит-мафитовой и эксплозивной (или диатремовой) сиенитовой. Щелочные породы дифференцированы от ультраосновных до основных и средних. В диатремовых фациях присутствуют многочисленные обломки глубинных пород более ранних фаз, ксенолиты, мегакристаллы и нодулы клинопироксена, флогопита-биотита и апатита размером 1–10 см. Породы недосыщены кремнеземом, имеют высокое содержание K<sub>2</sub>O (Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O = 0,34–0,84), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0,43–0,5 %), SrO (0,45–2,2 %), BaO (0,23–2 %), F (0,12–1,5 %) [3]. Типоморфными минералами этих щелочных пород являются калиевые полевые шпаты с микропертитами (от 20–45 до

80 %), содержащие Sr, Ba, Na, клинопироксен, амфибол, биотит-флогопит, титанит, апатит, REE-минералы. В связи с этим сами породы рассматриваются как источник полевошпатового сырья с P, Ti, REE.

Р. А. Хазовым для массивов Райвямьяки и Кайвоямки были рассчитаны прогнозные ресурсы комплексного оруденения (пород с полезными компонентами), а в нем апатитового, редкоземельно-титанитового и Sr-Ba-полевошпатового сырья (см. таблицу). Содержание P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> колеблется и составляет 0,43–10,5 % (среднее 2,5–5 %), SrO 0,45–2,2 %, BaO 0,23–2,0 %, F 0,12–1,5 %, средняя сумма REE – 0,2–0,5 %, в концентратах и монофракциях апатита и титанита установлены наиболее высокие содержания Ce, La, Nd, Y. Прогнозные ресурсы комплексного сырья (см. таблицу) оцениваются в 6–7,5 млрд т руды: P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 200–250 млн т (при среднем содержании P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 3,5 %), титанита 240–300 млн т (при среднем содержании титанита в породе 4 %), Sr-Ba-полевошпатового сырья 2 млрд т (в тенсбергитах – до 12 млрд т). Ресурсы REE оцениваются в 15 млн т (при среднем содержании суммы REE 0,25 %).

### ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА РАБОТЫ

REE в последние годы нашли широкое применение в различных отраслях промышленно-

Прогнозные ресурсы и содержание полезных компонентов в породах, рудах и обогащенных концентратах [3]

Сырье	Ресурсы P <sub>3</sub> (млрд т)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> % P <sub>3</sub> (млн т)	REE % (млн т)	SrO % (млн т)	BaO % (млн т)	Fsp % (млн т)	TiO <sub>2</sub> % (млн т)
Комплексное сырье (ладогиты)	6–7,5	3,5 (200–250)	0,25 (15)	1,0 (60)	1 (60)	30–35 (2000)	1,5 (90)
Апатитовый концентрат	0,5–0,6	38–40 (200)	1 (5)	1,5 (7,5)			
Кпш-концентрат	2,0			1–3 (50)	2–6 (50)	99 (2000)	
Концентрат REE-титаниита	0,15–0,2 (до 0,3)		1,5 (2,2–3)				36 (50–70)

сти и новых технологиях. Наиболее крупные их месторождения локализируются преимущественно на древних кристаллических щитах в щелочных массивах, поэтому изучение щелочных пород и метасоматитов имеет важное значение [1]. В задачи настоящей работы входило установление минералов-концентраторов и распределение редкоземельных элементов в породах и рудах массивов Райвимики и Кайвомяки Элисенваарского комплекса.

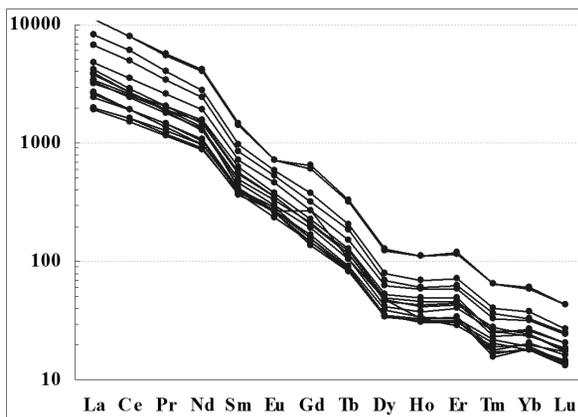
Изучение рудной (REE-содержащей апатитовой и титанитовой) минерализации и щелочных пород проводилось с использованием методов химического и RFA. Содержание REE в породах, концентратах и рудах проводилось ранее в лаборатории ЦНИГРИ (г. Москва). Современное изучение REE осуществлялось с использованием ICP-MS-анализа, парагенезисов и минералов REE в аншлифах на электронном сканирующем микроскопе VEGA II LSH с микроанализатором INCA Energy-350 в Институте геологии КарНЦ РАН (г. Петрозаводск).

**Распределение редкоземельных элементов.** По данным современных прецизионных ICP-MS-исследований установлено, что породы и руды (REE-apatит-титанитовые) глубинной и диатремовой фаций имеют подобные спектры распределения REE и содержат преимущественно элементы La-Ce-группы (в сумме 0,15–1,1 %, в среднем ~3916 ppm, рис. 1а). Меланократовые породы (невоиты, мелано- и мезократовые ладогиты) глубинных фаций и ксенолиты более обогащены REE относительно лейкократовых, а также диатремowych фаций. В более лейкократовых породах с микроклином и сиенитах наблюдается Eu минимум (рис. 1б).

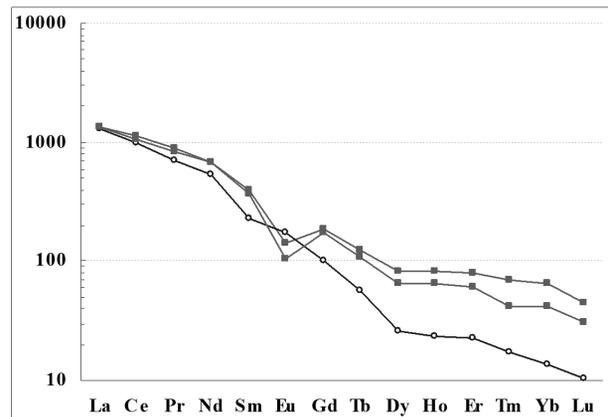
Суммарное содержание REE в апатитовых концентратах из мегакритов и нодулей, по Р. А. Хазову, может достигать 1,3 % (среднее 0,7 %), в титанитовых – 0,8–1,07 %.

**Минералы-концентраторы REE.** В щелочных породах массива (ладоголитах) установлены собственные REE-минералы – фосфаты, силикаты, карбонаты (рис. 2), а также TR-содержащие апатит, титанит и эпидот.

*Монацит* обычно образует отдельные, более крупные зерна, их скопления, а в апатите – микровключения (размером от 60–200 мкм до 3–5 мкм). Он цементируется ортитом. *Ортит* (алланит) обычно образует цепочки зерен (размером от 1 до 80 мкм) и каймы вокруг нодулей апатита и кристаллов титаниита, выделяется в них в микротрещинках (рис. 2б). Реже встречаются более крупные хорошо ограненные кристаллы и зональные алланиты-TR-эпидоты (рис. 2в). Крупный апатит ксенолитов и нодулей обычно бывает «насыщен» и окаймлен REE-минералами (10–15 % от массы гнезд апатита). На стадии



а



б

Рис. 1. Распределение редкоземельных элементов в породах Элисенваарского комплекса (нормирование по хондриту C1): а – невоиты, меланолдогиты (в том числе с апатитом и титаниитом); б – сиениты и лейкократовые микроклин-биотит-амфиболовые ладогиты

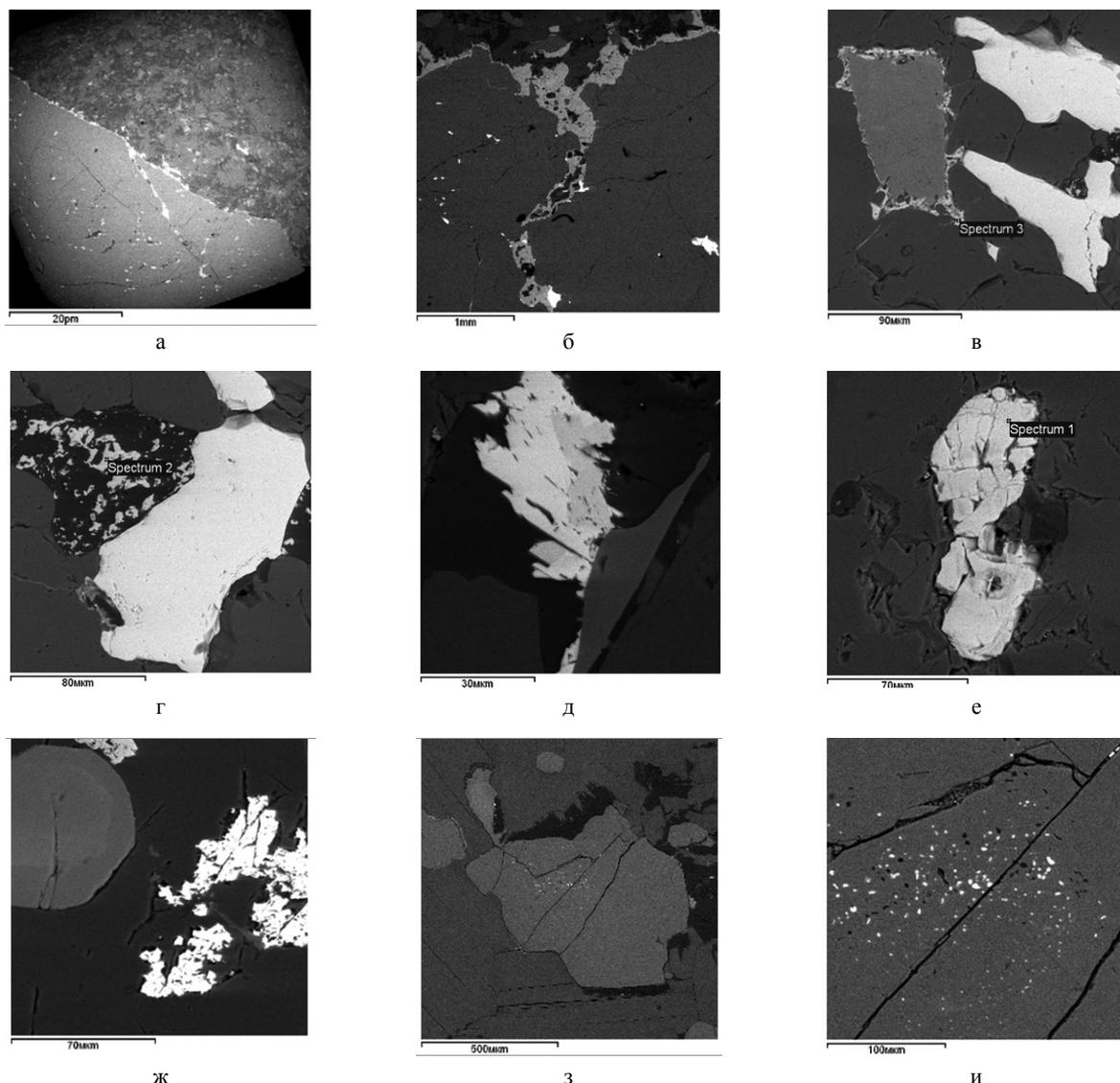


Рис. 2. Минеральные ассоциации щелочных пород Элисенваарского комплекса: а) Нодули апатита (светло-серый) с включениями TR-минералов; б) Апатит (темно-серый), ортит (серый), монацит (белый); в) Монацит (белый) в апатите, TR-эпидот (серый) с каймой бастнезита (sp. 3); г) Монацит (белый), Sr-барит (sp. 2), апатит (темно-серый); д) Sr-Ce-La-карбонат (белый, зональный); е) Zr-La-Ce-титанит (sp. 1); ж) Зональный Ce-apatит (серый) и Sr-барит (белый); з) Целестин (белые точки) в апатите (серый); и) Целестин (белые точки) в апатите

более позднего низкотемпературного преобразования пород, сопровождающегося образованием хлорита, кальцита, иногда сульфидов, образуются редкие минералы – лантанит, бастнезит и паризит, а также более редкие Ca-Sr-Ce-карбонаты, они встречаются с хлоритом, сульфидами, Sr-баритом, целестином (рис. 2г, д). Бастнезит иногда замещает ортит и TR-эпидоты.

*Апатиты* всех выделяемых генераций относятся к фтористым (незначительно содержат Cl 0,2–0,4 %). Содержание апатита составляет 5–15 % в породах и до 90 % в крупных кристаллах, нодулярных стяжениях и гнездах – природных концентратах (рис. 2а, б). Он содержит тонкодисперсные включения монацита, целестина-стронциобарита и сам является концентратом REE. Кристаллы апатита зонального

строения с изоморфными включениями REE имеют центральные более высокоцериевые ядра (Ce ~1,3–1,5 %) и более светло-серую окраску (рис. 2ж). Содержание Sr, изоморфно входящего в апатит, составляет около 1,2–1,6 %. Апатит с микро- и нановключениями – вростками Sr-минералов (рис. 2з, и) содержит гораздо более высокую концентрацию Sr. Следует отметить, что Sr входит также в Ba-содержащие полевые шпаты, незначительно в минералы группы эпидота и образует собственные более низкотемпературные минералы – целестин, стронциобарит (4–6 % Sr), целестобарит и Ca-Sr-Ce-карбонат (анцилит).

В ультраосновных и основных разностях пород (невоитах и ладогитах, используются местные названия, по Р. А. Хазову) обычны сроста-

ния титанита, ильменита и апатита. *Титанит* преобладает в основных разновидностях пород (в ладогитах ~4–5 %). Он выделяется самостоятельно, в сростках с апатитом (в рудах и гнездах), ильменитом и реже магнетитом. Титанит, как и апатит, бывает окаймлен ортитом. Установлены цериевые, а также иногда Th и Zr-содержащие титаниты (цирконолит, рис. 2е). В более крупных кристаллах титанита наблюдается зональность: в центральных частях зерен содержание REE увеличивается до 2,83 %. *Циркон* и реже *бадделлит* встречаются в небольших и аксессуарных количествах почти во всех типах пород, но чаще в лейкократовых с пертитовыми Ba-Sr-полевыми шпатами. Циркон содержит примеси Ca, Hf, реже TR (до 4,6 % Ce). Бадделлит иногда образует игольчатые кристаллы в сростании с ортитом.

#### ВЫВОДЫ

Благодаря микрондовым исследованиям установлен широкий спектр минералов, содержащих редкоземельные элементы, и изоморфные замещения в апатите и титаните. Среднее

содержание редкоземельных элементов в ладогитах составляет 0,39 %, более высокие концентрации (1–1,3 %) характерны для меланократовых пород и глубинных ксенолитов, содержащих апатит и титанит. REE-минералы тяготеют преимущественно к рудным скоплениям апатита и титанита, поэтому концентраты этих минералов вполне оправданно могут рассматриваться как основное сырье на редкоземельные элементы (табл. 1).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом комплексного характера полезных компонентов и большого объема пород Элисенваарский комплекс еще с 90-х годов прошлого столетия был выделен для освоения как перспективный на Ba-Sr-полевошпатовое сырье с Ti, P и TR [3]. Благодаря развитию новых технологий переработки и возросшим потребностям в редкоземельных элементах крупные щелочные ультраосновные массивы Райвямьяки и Кайвомяки Элисенваарского комплекса становятся еще более инвестиционно привлекательными для комплексного освоения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулешевич Л. В., Дмитриева А. В. Минералы и источники редкоземельных элементов в Карелии // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2012. № 4 (125). С. 62–66.
2. Ранний докембрий Балтийского щита / Под ред. чл.-кор. РАН В. А. Глебовицкого. СПб.: Наука, 2005. 711 с.
3. Хазов Р. А., Попов М. Г., Бискэ Н. С. Рифейский калиевый щелочной магматизм южной части Балтийского щита. СПб.: Наука, 1993. 217 с.

**Kuleshevich L. V.**, Petrozavodsk State University,  
Institute of Geology Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Dmitrieva A. V.**, Institute of Geology Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Khazov R. A.**, Institute of Geology Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

#### BA-SR-P-TI-TR-FELDSPAR RAW MATERIALS OF EISENVAARA ALKALINE COMPLEX, KARELIA: GEOCHEMISTRY AND MINERALOGY OF RARE-EARTH ELEMENTS

The data obtained by the economic evaluation of the complex Ba-Sr-P-Ti-TR-feldspar raw materials of Elisenvaara differentiated alkaline complex, located in the northwestern area of Lake Ladoga, Karelia, the concentrations and distribution of REE in the rocks and their mineral assemblages are reported. They are represented by monazite, orthite, TR-epidote, TR-apatite and titanite, bastnaesite, parisite, lanthanite, and Ca-Sr-Ce-carbonate. REE occur in small quantities in zircon and other silicates.

Key words: rare-earth elements and REE-minerals (monazite, orthite, bastnaesite), TR-bearing minerals (apatite, titanite), alkaline complex, Elisenvaara, Karelia

#### REFERENCES

1. Kuleshevich L. V., Dmitrieva A. V. Minerals and sources of rare-earth elements in Karelia [Mineraly i istochniki redcozemel'nykh elementov v Karelii]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Estestvennyye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences]. 2012. № 4 (125). P. 62–66.
2. *Ranniy dokembriy Baltiyskogo shchita* [The Early Precambrian of the Baltic Shield] / Pod. red. chl.-kor. RAN V. A. Glebovitskogo. St. Petersburg, Nauka Publ., 2005. 711 p.
3. Khazov R. A., Popov M. G., Biske N. S. *Rifeyskiy kalievyy shchelochnoy magmatizm yuzhnoy chasti Baltiyskogo shchita* [Riphean potassic alkaline magmatism of the southern Baltic Shield]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1993. 217 p.

Поступила в редакцию 13.03.2014

**ИРИНА МИХАЙЛОВНА ПОТАШЕВА**

младший научный сотрудник, Институт языка, литературы и истории Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*irina.potasheva@mail.ru*

**СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ СВЕТОВ**

доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геохимии и моделирования природных и техногенных процессов, Институт геологии Карельского научного центра РАН, профессор кафедры геологии и геофизики горно-геологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*ssvetov@krc.karelia.ru*

**ICP-MS АНАЛИЗ ДРЕВНЕЙ КЕРАМИКИ КАК МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ СЫРЬЯ И МЕСТА ПРОИЗВОДСТВА ГОНЧАРНОЙ ПРОДУКЦИИ\***

Излагаются результаты ICP-MS анализа образцов формовочных масс гончарной керамики средневековых городищ Северо-Западного Приладожья, древнего Новгорода, крепости Орешек и глин из предполагаемых источников сырья. Проведенный ранее масс-спектрометрический анализ 48 образцов теста городищенских сосудов и 4 проб глин из близлежащих источников сырья выявил наличие в керамическом наборе памятников трех групп изделий: горшки местного производства из ожелезненной глины; сосуды из светложгущейся глины без привязки к источнику сырья; привозные горшки из ожелезненной глины. Полученные данные обусловили необходимость продолжения работы для определения возможного места изготовления привозных и светлоглиняных сосудов. Проведение второй серии анализов (52 образца: 46 – сосуды, 6 – глины) позволило расширить эталонную базу и привлечь для сопоставления материалы из ближайших центров с развитым гончарством – Новгорода и Орешка.

Ключевые слова: масс-спектрометрия, ICP-MS, гончарная керамика, древнекарельские городища, Северо-Западное Приладожье, Средневековье

Первый опыт применения масс-спектрометрического анализа (ICP-MS) в исследовании древнего гончарства на примере образцов формовочных масс круговой керамики древнекарельских городищ Северо-Западного Приладожья позволил выделить три группы керамики с радикально различающимся химическим составом теста [3]. В результате удалось установить, что в керамическом наборе городищ присутствуют: I – сосуды местного производства из глины различной степени ожелезненности; II – горшки из слабоожелезненной или неожелезненной глины (каолин); III – привозные изделия из ожелезненной глины. Следует отметить, что на данном этапе географические рамки исследования ограничены ареалом памятников Северо-Западного Приладожья, расположенных на территории Карелии вблизи г. Сортавала, поселков Куркиёки и Терву Лахденпохского района, в Ленинградской области – в окрестностях п. Васильево Приозерского района. Всего проанализированы 52 пробы, 48 из которых являются образцами формовочных масс горшков указанных памятников и экспериментально включенная проба теста сосуда из раскопок древнего Олонца для сравнения с эталонным образцом

глины из современного города. Остальные четыре пробы сырья представлены глинами, взятыми в окрестностях п. Куркиёки (два); фрагментом глиняной обмазки из фундамента постройки городища Тиверск (обмазывание глиной – типичный прием домостроительства древних карел, что предполагает использование местного источника сырья); пробой глины из современной гончарной мастерской г. Олонца. Проведенный анализ позволил доказать наличие привозных горшков в городищенской керамике и констатировать местное производство большинства горшков из ожелезненной глины. Вместе с тем возникли новые задачи, связанные с определением места изготовления привозных изделий и, что не менее интересно, источника глинистого сырья для производства белоглиняной керамики.

Отмечая высокую эффективность выбранного авторами метода, необходимо учитывать пределы возможностей масс-спектрометрического анализа, обусловленные в первую очередь спецификой археологической керамики как объекта подобного прецизионного геохимического исследования. Данное обстоятельство главным образом связано с особенностями технологии керамического производства в древно-

сти. По археологическим и этнографическим материалам известно, что с появлением керамики в эпоху неолита и вплоть до эпохи Средневековья рецептуры формовочных масс крайне разнообразны. Для изготовления глиняного теста древние гончары использовали как глинистое (глина, суглинок) и глиноподобное (ил, лесс), так и неглинистое сырье (песок, дресва<sup>1</sup>, шамот<sup>2</sup>) [5; 53]. Кроме того, традиции древнего гончарства предполагали введение в глину различных отощителей для получения формовочной массы нужной консистенции, пригодной для дальнейшего керамического производства. Помимо упомянутых минеральных добавок (песок, дресва, шамот), широко использовались примеси растительного и животного происхождения (трава, солома, кость, шерсть) [1; 99–108]. Добавление отощителей способствовало повышению физико-технических характеристик глиняного изделия. Например, чистой пластичной глине свойственно «оплывание» еще на стадии изготовления основных частей сосуда. Сушка и дальнейшая температурная обработка (обжиг) могли привести к значительной усадке изделия, растрескиванию и деформации впоследствии, а иногда и к разлому сосуда. Добавка различных отощителей позволяла сохранить форму, снизить усадку изделий при обжиге и сделать его более качественным. Так, органические добавки, выгорая, оставляли лакуны, облегчая тем самым прокаливание меньшей глиняной массы; минеральный отощитель, нагреваясь, обеспечивал лучшую спекаемость глиняного теста.

Для гончарной керамики укрепленных поселений Северо-Западного Приладожья, датированных XII – началом XV века по инвентарю из железа и цветных металлов, установлено, что абсолютное большинство сосудов (80 %) изготовлено из красножгущейся глины с добавлением неорганической примеси – дресвы и песка. Преобладают сосуды (125 горшков) с дресвой в составе формовочной массы, тогда как в тесте почти 30 % керамики обнаружен песок. Подавляющее количество емкостей с примесью песка в тесте относятся к типам посуды, появившимся в XIII веке (сосуды с гофрированным венчиком типа IV) или позднее, в XIV веке (тип V, горшки с ребром на плечике). Два позднегончарных изделия из Лопотти также изготовлены из глины с добавлением песка.

Вопрос о происхождении песчаной примеси остается нерешенным. Сложно сказать, был ли песок искусственно добавлен в тесто сосудов в качестве отощителя или являлся естественной примесью в глинистом сырье. В тесте девяти сосудов (типы III, IV) обнаружены следы от органических включений. Остальная керамика представлена горшками из нежелезистой каолиновой, в редких случаях слабо ожелез-

ненной светложгущейся глины с добавлением крупнотолченой дресвы, реже (четыре сосуда) – органики.

Анализируя данные геохимии формовочных масс керамики археологических памятников, важно принимать в расчет гетерогенность объектов. Напомним, что один из этапов подготовки проб заключается в измельчении материала до тонкодисперсного состояния, что приводит к смешению химических составов глины и примесного компонента. Следовательно, в анализатор попадает уже валовый состав пробы, и минеральная примесь может существенно повлиять на содержание редких и редкоземельных элементов (REE) в химическом составе образца керамического теста.

Второй этап ICP-MS анализа, результаты которого представлены в настоящей статье, включал исследование также 52 проб теста круговой керамики и образцов глин из предполагаемых источников сырья. Не считая необходимостью останавливаться на подробном описании методики масс-спектрометрического анализа, уже излагавшейся авторами в предыдущей публикации [3], напомним, что определялась концентрация в пробах следующих элементов: Li, Be, P, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Tl, Pb, Bi, Th, U. Графический анализ полученных данных приводится на бинарных диаграммах – Nb-Zr, Ti-Li, Ti-U, Ti-Zr (ppm). Установлено, что по содержанию указанных элементов исследуемые образцы керамики и сырья классифицируются наиболее четко. В таблице представлен список и краткая характеристика образцов, прошедших аналитическое исследование.

Во вторую серию проб ICP-MS анализа попали образцы посуды и глин не только из раскопок памятников Карелии, но также древнего Новгорода, крепости Орешек. Значительно расширена эталонная база за счет образцов глин из Великого Новгорода (Н-53–Н-64); глиняной обмазки с городища Паасо (П-70), проб глин из окрестностей городища (п. Хелюля (Хл-72) и берега р. Тохмайоки (Хл-73)); глиняного теста, используемого в современном гончарстве (п. Реускула<sup>3</sup>) и образца сырья из п. Матросы (М-104) Пряжинского района. Эталонные пробы светложгущих и каолиновых глин из предполагаемых источников по-прежнему не получены. Основные задачи настоящего исследования состояли в выделении привозной продукции, определении возможного места ее изготовления, а также сопоставлении данных геохимии проб светлоглиняных сосудов городищ Северо-Западного Приладожья, Новгорода и Орешка для выявления степени их сходства или различия, что внесет ясность в вопрос их принадлежности к единому производственному центру.

## Список проб второй серии ICP-MS анализа проб гончарной керамики и образцов глин

№ пробы	Наименование объекта	Шифр объекта	Памятник / место добычи	География объекта
53	Образец материковой глины (ожелезненная). Обожжен	-	Новгород	г. Великий Новгород
54	Фрагмент горшка. Нежелезненная глина	-	Новгород	г. Великий Новгород
55	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	-	Новгород	г. Великий Новгород
56	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	-	Новгород	г. Великий Новгород
57	Фрагмент горшка. Нежелезненная глина	-	Новгород	г. Великий Новгород
58	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	-	Новгород	г. Великий Новгород
59	Фрагмент горшка. Нежелезненная глина	-	Новгород	г. Великий Новгород
60	Фрагмент горшка. Слабоожелезненная глина (либо смесь глин)	-	Новгород	г. Великий Новгород
61	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	-	Новгород	г. Великий Новгород
62	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	-	Новгород	г. Великий Новгород
63	Фрагмент горшка. Нежелезненная глина	-	Новгород	г. Великий Новгород
64	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	-	Новгород	г. Великий Новгород
65	Фрагмент горшка. Нежелезненная глина	0–75–38	Орешек (крепость)	о. Ореховый (Ленинградская область)
66	Фрагмент горшка. Нежелезненная глина	0–69–377	Орешек	о. Ореховый
67	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	0–75–413	Орешек	о. Ореховый
68	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	0–75–363	Орешек	о. Ореховый
69	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	0–75–409	Орешек	о. Ореховый
70	Фрагмент глиняной обмазки	-	Паасо (городище)	р-н г. Сортавала
71	Образец глины. Соврем. гонч. мастерская. Ожелезненная, отмученная, необоженная	-	п. Реускула	р-н г. Сортавала
72	Образец глины. Ожелезненная, обоженная. Получена при копании ямы для септика	-	п. Хелюля	р-н г. Сортавала
73	Образец глины. Ожелезненная, необоженная	-	п. Хелюля, берег р. Тохмайоки	р-н г. Сортавала
74	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	1443_185	Паасо (городище)	р-н г. Сортавала
75	Фрагмент горшка. Нежелезненная глина	3249_99	Паасо	р-н г. Сортавала
76	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	1443_181, 186	Паасо	р-н г. Сортавала
77	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	3249_216	Паасо	р-н г. Сортавала
78	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	1443_238	Паасо	р-н г. Сортавала
79	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	1443_116, 117, 120–130	Паасо	р-н г. Сортавала
80	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	1571_52	Паасо	р-н г. Сортавала
81	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	1443_150	Паасо	р-н г. Сортавала
82	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	1443_293	Паасо	р-н г. Сортавала
83	Фрагмент горшка. Нежелезненная глина	1443_297	Паасо	р-н г. Сортавала
84	Фрагмент горшка. Нежелезненная глина	1571_626	Паасо	р-н г. Сортавала
85	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	787_2518	Тиверск (городище)	п. Васильево (Ленинградская область)
86	Фрагмент горшка. Нежелезненная глина	787_1386	Тиверск	п. Васильево
87	Фрагмент горшка. Нежелезненная глина	787_2379	Тиверск	п. Васильево
88	Фрагмент горшка. Нежелезненная глина	787_2437	Тиверск	п. Васильево
89	Фрагмент горшка. Нежелезненная глина	787_49	Тиверск	п. Васильево
90	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	1051_884	Тиверск	п. Васильево
91	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	787_1707	Тиверск	п. Васильево
92	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	1050_330	Тиверск	п. Васильево

Список проб второй серии ICP-MS анализа проб гончарной керамики и образцов глин (окончание)

№ пробы	Наименование объекта	Шифр объекта	Памятник / место добычи	География объекта
93	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	787_845	Тиверск	п. Васильево
94	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	787_270	Тиверск	п. Васильево
95	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	787_1178	Тиверск	п. Васильево
96	Фрагмент ручки сосуда. Ожелезненная глина	787_762	Тиверск	п. Васильево
97	Фрагмент ручки сосуда. Ожелезненная глина	915_190	Тиверск	п. Васильево
98	Фрагмент кувшина. Ожелезненная глина	3249_60	Паасо (городище)	р-н г. Сортавала
99	Фрагмент горшка. Неожелезненная глина	726_95	Лопотти (городище)	п. Куркиёки
100	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	726_23	Лопотти	п. Куркиёки
101	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	726_45	Лопотти	п. Куркиёки
102	Фрагмент горшка. Ожелезненная глина	3294_23	Терву-Линнасаари (городище)	п. Терву
103	Фрагмент горшка. Неожелезненная глина	3294_21	Терву-Линнасаари	п. Терву
104	Образец глины	-	Окрестности п. Матросы	п. Матросы

В бинарных системах Nb-Zr, Ti-Li, Ti-U, Ti-Zr (ppm) фигуративные точки образцов формируют как минимум четыре области (рис. 1)<sup>3</sup>. На диаграмме Nb-Zr четко выделяются пять групп маркеров:

Группа I – пробы теста горшков из красножгущейся глины, включающие образцы коллекций памятников Северо-Западного Приладожья, Орешка, Новгорода и все эталонные пробы сырья<sup>4</sup>.

Группа II представлена пробами теста светлоглиняных сосудов древнекарельских городищ.

Группа III – привозные горшки с отличающимся химическим составом формовочной массы. Так же, как и в первой серии анализов, где пробы сопоставлялись по отношениям Ti-U, La-Th, Ti-SREE, в группу III попали образцы с шифрами X-9, T-32, T-40, П-19 (см. диаграммы Nb-Zr, Ti-U на рис. 1, диаграмму Ti-U на рис. 2). Определен невыявленный ранее привозной сосуд под номером П-19 (см. диаграммы Ti-U, Ti-Zr на рис. 2).

В поле группы IV находятся маркеры белоглиняных горшков из Новгорода и Орешка.

Группа V – образцы позднегончарной красной глиняной керамики городища Лопотти.

Остальные диаграммы (Ti-Li, Ti-U, Ti-Zr) преимущественно иллюстрируют наличие групп I, II, IV и V.

На этом этапе исследования можно сформулировать следующие выводы. Во-первых, керамика Лопотти, по крайней мере сосуды из ожелезненной глины (два маркера группы V), не может быть отнесена к продукции традиционного гончарства древних карелов. Ее исключение из стандартного набора посуды городищ не

удивительно, учитывая значительные отличия технологии изготовления указанных горшков (развитая форма, полный обжиг в восстановительной среде, отсутствие орнамента) в сравнении с остальной керамикой.

Во-вторых, городищенские сосуды, выполненные из светложгущихся глин, вопреки высказанным ранее предположениям [4; 48], вероятно, не являются продуктом ремесла новгородских мастеров и, как выяснилось, ореховецких гончаров также. Частичное наложение полей маркеров светложгущейся керамики Новгорода, Орешка и древнекарельских городищ (диаграмма Nb-Zr, рис. 1), по-видимому, следует связывать с влиянием контаминации химического состава глины материалом дресвы. Более того, проведенный ранее микронзондовый анализ выявил сходство примесного компонента в пробах светлоглиняных горшков городищ Северо-Западного Приладожья и новгородского горшка из ожелезненной глины [4; 48].

В-третьих, к сожалению, полученные данные не позволяют достоверно идентифицировать источник сырья для производства привозных изделий и, следовательно, место их изготовления.

При визуальном анализе диаграмм (рис. 1) возникает закономерный вопрос, связанный с расположением маркеров проб теста горшков из ожелезненной глины в поле I, где находятся фигуративные точки образцов сосудов местного производства из Северо-Западного Приладожья. Тем не менее наглядна периферийность маркеров теста новгородской и ореховецкой керамики внутри поля I. Укрупнение масштаба диаграмм Ti-Li, Ti-U, Ti-Zr до значений 6500 ppm по оси Ti позволяет сконцентрировать внимание на интересующем нас объекте – поле I (рис. 2). При

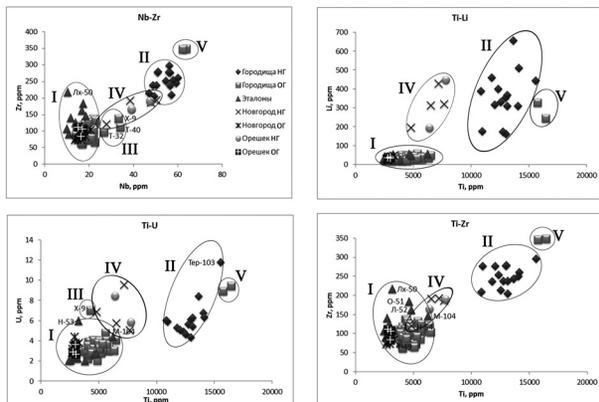


Рис. 1. Бинарные диаграммы Nb-Zr, Ti-Li, Ti-U, Ti-Zr (ppm). I – сосуды из ожелезненной глины (Тиверск, Хямеенлахти-Линнавуори, Терву-Линнасаари, Соскуа-Линнамяки, Паасо); II – сосуды из слабо- и нежелезненной глины (Тиверск, Паасо, Терву-Линнасаари); III – привозные изделия из ожелезненной глины; IV – белоглиняная керамика Новгорода и Орешка; V – керамика из ожелезненной глины (Лопотти)

увеличении видно, что маркеры городищенских горшков и сосудов из Новгорода и Орешка образуют две отдельные области, что исключает ошибочную интерпретацию результатов на диаграммах рис. 1, где гончарную керамику Новгорода и Орешка можно принять за местную продукцию древнекарельских ремесленников.

Примечательна приуроченность фигуративных точек образцов теста сосудов Орешка и Новгорода в одной компактной зоне (поле *a*), однако имеющиеся данные не позволяют однозначно объяснить подобное обстоятельство. Кроме того, эталонный образец материковой глины Новгорода (заметим, как и пробы глин из Северо-Западного Приладожья) не обязательно попадает в область маркеров новгородской керамики (эталонный образец сырья для ореховецкой керамики еще не получен). Отчужденность эталонных проб глин от зон фигуративных точек образцов формовочных масс керамики (поле *b*), должно быть, обусловлена присутствием минеральной примеси в последних, что привело к изменению химического состава исследуемого объекта в целом. Учитывая взаимное расположение маркеров теста привозной керамики группы III и сосудов новгородско-ореховецкой группы на диаграммах Nb-Zr, Ti-U (рис. 2), можно констатировать некоторое сходство их химических составов, однако вывод о принадлежности привозных изделий к продукции гончарного производства Новгорода или Орешка кажется преждевременным. На диаграммах Ti-U появляется маркер горшка из Паасо (П-74), перекрытый фигуративной точкой ореховецкого сосуда. Оба изделия выполнены из ожелезненной глины. Горшок из Паасо типологически не определен<sup>5</sup>, так как обладает специфической морфологией, нехарактерной для керамики городищ. Сосуд

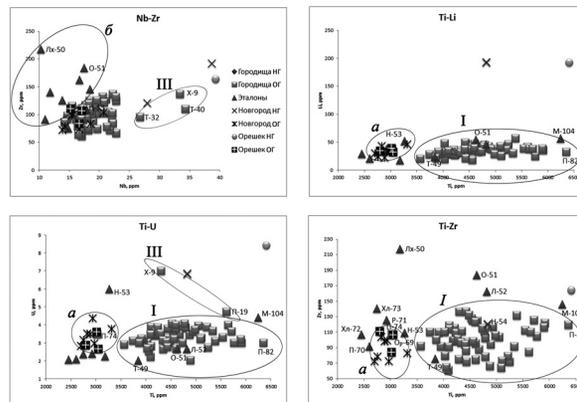


Рис. 2. Бинарные диаграммы Nb-Zr, Ti-Li, Ti-U, Ti-Zr (ppm) с увеличением масштаба до 40 ppm по оси Nb для диаграммы Nb-Zr и 6500 ppm по оси Ti для диаграмм Ti-Li, Ti-U, Ti-Zr. I – сосуды памятников Северо-Западного Приладожья из ожелезненной глины; II – сосуды из слабо- и нежелезненной глины (Тиверск, Паасо, Терву-Линнасаари); III – привозные изделия из ожелезненной глины; *a* – группа новгородской и ореховецкой керамики из ожелезненной глины; *b* – эталонные образцы проб глин

выделяется профилировкой венчика, напоминающей горизонтально отраженную латинскую S. Для древнекарельских данная форма единична, однако встречается в керамике Орешка<sup>7</sup> XIV–XV веков, что свидетельствует в пользу «ореховецкого» происхождения сосуда, обнаруженного при раскопках Паасо.

Принимая во внимание данные второй серии осуществленного масс-спектрометрического исследования и анализа обобщенных материалов, необходимо заключить следующее. Наиболее успешно по источникам сырья классифицируются керамические изделия из слабожелезненных и нежелезненных, нежели чем из ожелезненных глин. Рассматривая различие химических составов формовочных масс светлоглиняной керамики древнекарельских городищ и посуды Новгорода и Орешка, следует полагать, что их происхождение из одного гончарного центра маловероятно. При этом химический состав теста сосудов древнего Новгорода и Орешка идентичен, что требует специальных исследований, которые выходят за рамки задач настоящей работы.

Предполагаемая близость составов глинистых основ формовочных масс изделий из ожелезненных глин изучаемых памятников затрудняет их четкое разделение на виды, соотносимые с источниками сырья. Тем не менее частично определен центр производства привозных сосудов. Установлено, что горшок из Паасо (П-74), не вошедший в типологию керамики Северо-Западного Приладожья, по-видимому, изготовлен ореховецким гончаром. Фигуративные точки привозных горшков из ожелезненной глины (X-9, T-32, T-40) расположены вблизи маркеров белоглиняной керамики Новгорода и Орешка, что трудно объяс-

нить ввиду малого объема данных по геохимии образцов теста новгородской и ореховецкой посуды. Резко отличающаяся от остальной гончарной утвари по геохимическим характеристикам керамика Лопотти обоснованно исключена из типичной продукции гончарного ремесла древних карелов.

Трудности, возникшие при анализе и интерпретации результатов, связаны с технологической особенностью древнего гончарного производства, когда в процессе смешивания глин с минеральным отощителем получалась многокомпонентная масса с усредненным химическим составом. Располагая информацией о химическом и минералогическом составех глинистой основы и примесей небольшой серии образцов, исследованных микронзондовым (SEM) анализом, авторы не имеют возможности соотнести их с результатами масс-спектрометрии (104 образца), чтобы отследить влияние химического состава дресвы на валовый состав объекта.

В связи с этим при использовании метода ICP-MS анализа в дальнейшем исследовании необходимо осуществить детальное изучение факторов влияния различных компонентов формовочных масс на геохимические маркеры. Для этого требуется определить содержание редких и редкоземельных элементов как отдельно в различных видах глинистого сырья и примесных фракциях – песках и дресве, так и в искусственных эталонах (экспериментальные образцы формовочных масс). Затем данные геохимии следует преобразовать в эталонные тренды, отражающие колебания маркирующих элементов в химическом составе объекта в зависимости

от вида глины и концентрации в ней примесной фракции, чтобы использовать их в качестве стандартов.

Альтернативным решением является применение масс-спектрометрии с локальным лазерным отбором проб (метод лазерной абляции LA-ICP-MS) для прецизионного изучения химического состава тонкозернистой глинистой фракции в керамических образцах. При этом предпочтительно использовать комплексный подход, сочетающий качественный и количественный анализ глин и примесей в образцах теста методом электронно-зондовой микроскопии (SEM) и ICP-MS анализ, предоставляющий данные о генетической близости или различии исследуемых объектов.

В заключение отметим, что новизна и инновационный характер разрабатываемого направления приводят к возникновению новых проблем, требующих тщательной отработки методик отбора объектов исследования, инструментального анализа и интерпретации данных.

Авторы выражают благодарность сотрудникам аналитической лаборатории Института геологии КарНЦ РАН В. Л. Утицыной и А. С. Парамонову за оказание помощи в проведении ICP-MS анализа, искреннюю признательность доктору исторических наук С. И. Кочкуркиной (Институт языка, литературы и истории КарНЦ РАН) за ценные рекомендации к статье, а также гончарам В. Леонтьеву (г. Олонец) и О. Учень (г. Сортавала) за любезно предоставленные образцы глин.

\* Статья выполнена при финансовой поддержке РГНФ и Правительства Республики Карелия в рамках проекта проведения научных исследований («Гончарное производство и сырьевая база на территории Карелии (эпоха каменного века – Средневековье)», проект № 14-11-10002).

#### ПРИМЕЧАНИЯ

<sup>1</sup> Измельченная горная порода, для Северо-Запада России чаще крошка пород гранито-гнейсового состава.

<sup>2</sup> Обожженная глиняная крошка, полученная в результате дробления черепков боя глиняной посуды.

<sup>3</sup> В легенде указаны сокращения «НГ» и «ОГ», что следует понимать как сосуды из нежелезистой или слабожелезистой глины и сосуды из ожелезистой глины соответственно.

<sup>4</sup> Об особенностях подобного распределения будет сказано далее.

<sup>5</sup> В коллекции керамики древнекарельских городищ типологически неопределенных сосудов крайне мало – не более десятка из 169 горшков.

<sup>6</sup> Группа не отражена на диаграмме ввиду расположения маркеров за пределами области построения.

<sup>7</sup> Подобные изделия обнаружены в материалах раскопок Орешка 1968 (О-68/46), 1973 (О-73/647, О-73/733, О-73/853) и 1979 годов (О-79/637).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобринский А. А. Гончарство Восточной Европы. Источники и методы изучения. М.: Наука, 1978. 275 с.
2. Кочкуркина С. И. Древнекарельские городища эпохи Средневековья. Петрозаводск: ИЯЛИ КарНЦ РАН, 2010. 264 с.
3. Поташева И. М., Светов С. А. Геохимические исследования в археологии: ICP-MS анализ образцов круговой керамики древнекарельских городищ // Труды Карельского научного центра РАН. 2013. № 3. С. 136–142.
4. Поташева И. М., Чаженгина С. Ю., Светов С. А. Возможности применения микронзондового анализа образцов круговой керамики к изучению технологии древнего гончарства карелов в эпоху Средневековья // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2013. № 8 (137). С. 44–50.
5. Цетлин Ю. Б. Древняя керамика. Теория и методы историко-культурного подхода. М.: ИА РАН, 2012. 384 с.

**Potasheva I. A.**, Institute of Linguistics, Literature and History,  
Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

**Svetov S. A.**, Institute of Geology,  
Karelian Research Centre of RAS, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

### ICP-MS ANALYSIS OF ANCIENT CERAMICS AS IDENTIFICATION METHOD OF CLAY SOURCES AND POTTERY PRODUCTION AREA

The paper is concerned with the results of ICP-MS analysis of the wheel-thrown ceramic paste specimens from medieval Karelian hillforts (North-Western Priladozhje), ancient Novgorod, Noteburg (the Oreshek fortress) and clay samples obtained from unidentified sources. Mass-spectrometric (ICP-MS) analysis of ceramic shard clays involving 48 pottery ware samples and four specimens of clay deposits helped to reveal three groups of vessels within the pottery set found in the area of Karelian hillforts. The majority of ceramics is presented by local pottery made of red-burning clay. A group of white-burning clay ceramics from unidentified production centers and imported ware of red-burning clay were distinguished. The obtained data determined subsequent necessity to continue research to identify the place of imported and indigenous white-burning clay pottery production. Realization of the 2nd series of analysis (52 samples: 46 – paste specimens, 6 – raw material specimens) helped to expand the base of the reference samples and to include ceramic items from the nearest production centers characterized by developed pottery craft – Novgorod and Oreshek.

Key words: mass-spectrometry, ICP-MS, wheel-thrown pottery, ancient Karelian hillforts, North-Western Priladozhje, Middle Ages

#### REFERENCES

1. Bobrinskiy A. A. *Goncharstvo Vostochnoy Evropy. Istochniki i metody izucheniya* [Pottery of Eastern Europe]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 275 p.
2. Kochkurkina S. I. *Drevnekarel'skie gorodishcha epokhi Srednevekov'ya* [Medieval hillforts of ancient Karelians]. Petrozavodsk, ILLH KRC RAS Publ., 2010. 264 p.
3. Potasheva I. M., Svetov S. A. Geochemical research in archaeology: ICP-MS analysis of wheel-thrown pottery samples found in ancient Karelian hillforts [Geokhimicheskie issledovaniya v arkhologii: ICP-MS analiz obraztsov krugovoy keramiki drevnekarel'skikh gorodishch]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Writings of the Karelian research centre of the Russian Academy of Sciences]. 2013. № 3. P. 136–142.
4. Potasheva I. M., Chazhengina S. Yu., Svetov S. A. Possibilities of using scanning electron microscopy (SEM) analysis of wheel-thrown pottery samples in study of ancient Karelian pottery production technology used in Middle Ages [Vozmozhnosti primeneniya mikrozonodovogo analiza obraztsov krugovoy keramiki k izucheniyu tekhnologii drevnego goncharstva karelov v epokhu Srednevekovyaya]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences]. 2013. № 8 (137). P. 44–50.
5. Tsetlin Yu. B. *Drevnyaya keramika. Teoriya i metody istoriko-kul'turnogo podkhoda* [Ancient ceramics. Theory and methods of historical-and-cultural approach]. Moscow, IA RAS Publ., 2012. 384 p.

Поступила в редакцию 19.05.2014

**ЮРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ КАРПЕЧКО**доктор географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*karp@nwpi.krc.karelia.ru***НАДЕЖДА АЛЕКСАНДРОВНА МЯСНИКОВА**гидролог, Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*gold\_dream@mail.ru***ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЛИСТОВОГО АППАРАТА  
И ТРАНСПИРАЦИИ ХВОЙНОГО ДРЕВОСТОЯ\***

Транспирация древостоем составляет большую часть суммарного испарения лесом. Ее определение для участка леса представляет собой сложную задачу. Процесс потребления древостоем воды из почвы тесно связан с минеральным питанием и формированием листового аппарата. Следовательно, рассмотрение взаимосвязи развития листового аппарата, транспирации и минерального питания древостоя различного возраста и произрастающего в различных лесорастительных условиях представляет интерес для уточнения расчета испарения. Целью работы является изучение влияния плодородия почв на формирование хвои и транспирацию древостоем. Статья подготовлена на основе анализа исследований различных авторов. Установлено, что с улучшением бонитета увеличивается концентрация азота в потребляемой древостоем из почвы воде. Повышение плодородия почв сопровождается снижением удельной массы хвои. Влияние продуктивности древостоя на массу хвои всего леса и на транспирацию зависит от класса бонитета и возраста. Для молодого и средневозрастного древостоя с улучшением бонитета повышается масса хвои и, следовательно, транспирация. Для спелого и перестойного древостоя эта тенденция может нарушаться. Предложен метод расчета массы хвои сосняков и ельников по запасу стволовой древесины и ее приросту.

Ключевые слова: класс бонитета, масса хвои, транспирация, минеральное питание

Функционирование лесных биогеоценозов определяется множеством взаимосвязанных процессов, к которым относится и транспирация древостоем. Транспирация составляет значительную часть суммарного испарения с леса, поэтому достоверность результатов при решении различных водохозяйственных и экологических задач во многом зависит от точности определения этой величины. К сожалению, установление транспирации при решении практических задач в большинстве случаев основывается на расчетных методах, поэтому при отсутствии возможностей экспериментального определения большую уверенность в достоверности вычисления для различных условий можно получить при анализе факторов, обуславливающих особенности ее формирования. С этой точки зрения рассмотрение взаимосвязи развития листового аппарата, транспирации и минерального питания древостоя различного возраста и произрастающего в различных лесорастительных условиях, чему посвящена данная работа, представляет несомненный интерес.

**ЛИСТОВОЙ АППАРАТ И МИНЕРАЛЬНОЕ ПИТАНИЕ**

Большинство существующих в настоящее время методов определения транспирации древостоем с участка леса основываются на массе

листвы (хвои) [5]. В частности, для определения среднемноголетней величины транспирации за год используется формула, убедительно обоснованная многими исследователями:

$$E_{tr} = k_{tr} m, \quad (1)$$

где  $E_{tr}$  – транспирация воды древостоем, мм;  $m$  – масса листвы (хвои) в свежем виде, т/га;  $k_{tr}$  – коэффициент транспирационной активности, равный для сосны, ели и березы 19, 8,5 и 35 мм/т соответственно [5].

Вследствие того что листовой аппарат играет определяющую роль в формировании транспирации, изучение особенностей формирования листвы (хвои) дает возможность хотя бы качественно оценить расход воды лесом, произрастающим в различных условиях и на различных этапах его роста и развития.

Зависимость массы листвы (хвои) от условий произрастания древостоя вытекает из следующих рассуждений. Расход влаги на прирост единицы фитомассы, исходя из формулы (1), можно представить в следующем виде:

$$E_{tr1} = k_{tr} m_1, \quad (2)$$

где  $E_{tr1}$  – расход воды для осуществления прироста единицы фитомассы;  $m_1$  – количество листвы (хвои), необходимое для осуществления всех процессов при построении единицы фитомассы.

Одной из функций транспирации, как известно, является снабжение растений минеральными веществами. Потребляемые растением из почвы в виде раствора минеральные вещества затрачиваются на рост. Очевидным свидетельством роста древостоя является увеличение его фитомассы. Наличие связи между транспирацией и приростом различных характеристик фитомассы показано в [7]. Количество влаги, необходимой для прироста единицы фитомассы, можно выразить следующим равенством:

$$E_{тр1} = P_{i1} / C_i, \quad (3)$$

где  $P_{i1}$  – количество  $i$ -го минерального вещества, необходимого для построения единицы фитомассы и лимитирующего в данных условиях рост растения;  $C_i$  – концентрация лимитирующего рост растения  $i$ -го минерального вещества в водном растворе, потребляемом растением из почвы.

Уравнение (3) справедливо для тех минеральных веществ, которые лимитируют рост растений в конкретных природных условиях. Из этого уравнения следует, что с уменьшением концентрации питательных веществ в потребляемом растением почвенном растворе должны возрастать затраты воды на прирост единицы фитомассы.

На основании уравнений (2) и (3) можно написать следующее равенство:

$$k_{tr} m_1 = P_{i1} / C_i. \quad (4)$$

Коэффициент транспирационной активности, как это показано многими исследователями, является постоянной величиной. Также можно утверждать, что для построения единицы фитомассы конкретной породы древостоя требуется определенное количество  $i$ -го минерального вещества. Это указывает на наличие между  $m_1$  и  $C_i$  (равенство (4)) тесной связи, когда уменьшение концентрации вещества, лимитирующего рост растения, обуславливает увеличение количества листы (хвои), необходимого для построения единицы фитомассы, и наоборот, увеличение концентрации минерального вещества в растворе определяет снижение удельного количества листы.

Очевидно, что концентрация питательных веществ в почвенном растворе меняется в зависимости от плодородия почв, в качестве количественной характеристики которого служит класс бонитета. Улучшение бонитета (понижение класса бонитета) обуславливается повышением количества питательных веществ в почве. По мнению Н. Г. Федорца, О. Н. Бахмета [12], в условиях Карелии лимитирующим рост растений фактором является наличие доступных для растений соединений азота в почве.

Данные выводы подтверждаются следующим анализом. В [2], [3] приводятся величины годового поглощения минеральных веществ из почвы практически одновозрастными сосня-

ками (45–66 лет) и ельниками (37–45 лет), произрастающими на различных по плодородию почвах. Наличие этой информации позволяет получить концентрацию азота в потребляемой древостоем воде по формуле:

$$C_i = 100P_i / E_{tr}, \quad (5)$$

где  $C_i$  – концентрация  $i$ -го минерального вещества в потребляемой растением из почвы воде, мг/л;  $P_i$  – годовой вынос  $i$ -го минерального вещества из почвы на формирование прироста всей фитомассы, кг/га.

Транспирация воды древостоем определялась по (1), а необходимая для расчета масса хвои принималась измеренная из [2], [3]. Для удобства выполнения анализа классы бонитета нами преобразованы в показатели классов бонитета. Принятые обозначения Ia, I, ..., V, Va заменены на арабские цифры 7, 6, ..., 2, 1 [5].

Между концентрацией азота в расходуемой растением воде и показателем класса бонитета получены достаточно тесные связи, о чем свидетельствуют следующие оценки: изменчивость концентрации азота на 71 % для сосняка и на 93 % для ельника определяется вариацией класса бонитета. Надежность связей подтверждается и их графическим изображением (рис. 1). Все это свидетельствует о зависимости класса бонитета от наличия азота в почве и, соответственно, является подтверждением лимитирующей роли соединений азота в росте древостоя.

Повышение концентрации азота в поглощаемой из почвогрунтов сосняками и ельниками влаге с улучшением бонитета (снижением класса бонитета и увеличением показателя класса бонитета) в рассматриваемых пределах изменений классов бонитета (от Va-V до II) происходит по линейному закону. На построение единицы фитомассы ельником расходуется больше азота, что и показано на рис. 1. Улучшение условий роста на один класс бонитета соответствует увели-

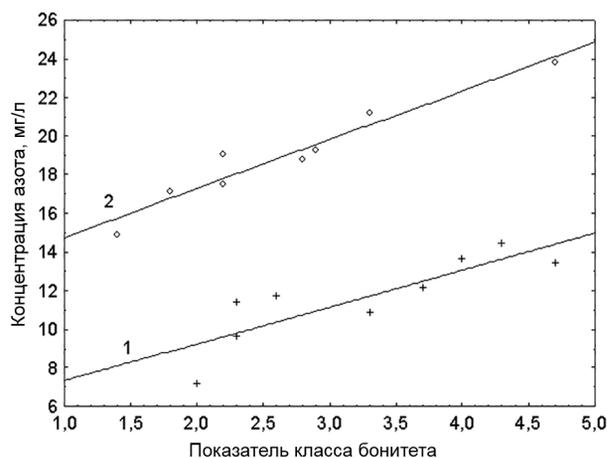


Рис. 1. Зависимость концентрации азота в потребляемой из почвы древостоем воде от показателя класса бонитета (1 – сосняк, 2 – ельник)

чению концентрации азота в потребляемой растением из почвы воде на 1,9 мг/л для сосняков и на 2,5 мг/л для ельников.

Некоторым подтверждением зависимостей (см. рис. 1) служат результаты исследований, приведенные в [9]. Авторами показано, что в вересковом сосняке, наиболее продуктивном из исследуемых древостоев (III,7 класс бонитета), концентрация азота в ксилемном соке составляла в разные годы 41,4 и 42,5 мг/л. В менее продуктивных сосняках – кустарничково-долгомошном (IV,4 класс бонитета) и лишайниковом (IV,4 класс бонитета) – ее значения составляли соответственно 28,6 и 31,7 мг/л.

Наличие линейных зависимостей, приведенных на рис. 1, предполагает существование связи не только между концентрацией азота в потребляемом древостоем почвенном растворе и массой хвои в соответствии с формулой (4), но и между этой массой хвои и показателем класса бонитета. Проверка этого вывода производилась также с использованием данных, приведенных в [2], [3]. При построении зависимости использовалась удельная масса хвои, полученная как частное от деления всей измеренной величины хвои на прирост общей фитомассы. Эта величина несколько отличается от количества хвои, необходимого для построения единицы фитомассы, так как прирост не является мерилем всех функций, осуществляемых листовым аппаратом. Однако в молодых и средневозрастных деревьях относительная доля прироста фитомассы достаточно велика и прирост играет значительную роль в функционировании всего древостоя, следовательно, можно полагать, что для этих возрастных категорий результаты анализа, полученные с использованием рассчитанной таким образом массы хвои, не будут противоречить уравнению (4).

Зависимости удельной массы хвои сосняков и ельников от показателя класса бонитета приведены на рис. 2. Данные зависимости можно принимать в качестве надежных свидетельств влияния условий роста леса и плодородия почв на удельную величину массы хвои. Зависимости на рис. 1 и 2 с конкретными параметрами относятся только к определенной возрастной категории. Однако общие характеристики трендов, по-видимому, являются справедливыми для всех возрастных категорий.

При этом нужно отметить, что при снижении удельной массы хвои с улучшением бонитета (повышение плодородия почв) тренд всей массы хвои в целом для лесного участка может иметь обратное направление. В наибольшей степени такое положение касается молодого и средневозрастного древостоя. Это объясняется тем, что улучшение условий роста древостоя сопровождается увеличением прироста и в целом фитомассы.

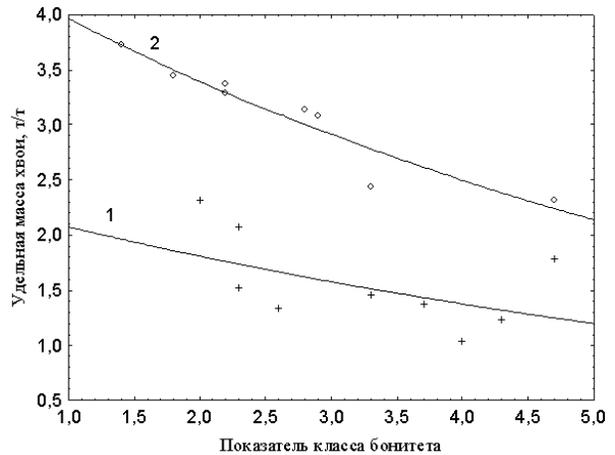


Рис. 2. Зависимость удельной массы хвои (отношение массы хвои к приросту фитомассы древостоя) от показателя класса бонитета (1 – сосняк, 2 – ельник)

Возрастная динамика прироста фитомассы и всех ее частей зависит от плодородия почв. Более интенсивный прирост наблюдается в высокопродуктивных лесах, в которых его наибольшее значение и максимальная величина хвои достигается в 50–70 лет. В худших условиях роста максимальная величина прироста фитомассы отмечается позже и увеличение массы хвои здесь продолжается до 100 лет и более.

Особенности развития сосняков в различных условиях их роста отмечены в [2]. Так, в наиболее продуктивном сосняке черничном (II–III классы бонитета) увеличение массы хвои происходит до 50 лет, а в сосняке брусничном (III–IV классы бонитета) такая тенденция отмечается до 80–90 лет. Эта особенность развития древостоя подтверждается и Э. П. Галенко [1], по мнению которой интенсивный прирост древесины в суровых северных условиях роста и развития древостоя наблюдается до 80–120 лет.

Снижение прироста в спелых и перестойных древостоях сопровождается снижением листового аппарата. Поскольку этот процесс в высокопродуктивных лесах начинается раньше, то при соответствующих условиях в спелых или перестойных лесах масса листьев (хвои) в них может быть ниже, чем в низкопродуктивных. Зависимостью роста и развития сосняков от условий произрастания объясняют тот факт, что абсолютная масса хвои до 100 лет больше в наиболее продуктивном сосняке черничном, а после 100 лет – в сосняке брусничном [2].

#### РАСЧЕТ МАССЫ ХВОИ СОСНЯКОВ И ЕЛЬНИКОВ

При отмечаемом снижении общей массы хвои в спелом и перестойном древостое удельные ее величины (отношение массы хвои к приросту фитомассы), как показывают расчеты на основании данных из [2], [3] для сосняков черничного и брусничного и ельника черничного, увеличиваются. Эти увеличения связаны с наличием

у листового аппарата других, кроме обеспечения прироста фитомассы, функций, роль которых увеличивается с возрастом. Такое положение позволяет рассматривать массу листового аппарата древостоя, усредненную для различных погодных условий и для конкретного возраста, как сумму из величин, пропорциональных общему количеству фитомассы и ее приросту. Данную сумму можно представить в следующем виде:

$$m = a_{\Sigma} \Sigma P + b_{\Sigma} \Sigma dP, \quad (6)$$

где  $\Sigma P$  – фитомасса древостоя;  $a_{\Sigma}$  – удельное количество листы (хвои), соответствующее общей фитомассе древостоя;  $\Sigma dP$  – текущий прирост фитомассы древостоя;  $b_{\Sigma}$  – удельная масса листы (хвои), соответствующая приросту всей фитомассы древостоя.

Под удельным количеством листового аппарата в данном случае понимается масса листы (хвои), приходящаяся на единицу массы всей фитомассы древостоя в первом слагаемом, и масса листы (хвои), приходящаяся на единицу массы прирастающей фитомассы древостоя во втором слагаемом.

Решение уравнения (6) с целью проверки адекватности расчетных величин массы листы (хвои) измеренным значениям возможно при наличии данных о фитомассе древостоя и ее приросте, а также при возможности определения параметров  $a_{\Sigma}$  и  $b_{\Sigma}$ . Следует отметить, что фитомасса древостоя и ее прирост определяются только при специальных исследованиях, поэтому количество этих данных ограничено. Значительно больше данных о запасе стволовой древесины и его приросте. Поскольку большая часть фитомассы древостоя и ее прироста представлена стволовой древесиной, то и связи между соответствующими значениями можно рассматривать как достаточно тесные и прямо пропорциональные. Подтверждение тесноты связи между общей фитомассой древостоя и запасом стволовой древесины приводится, в частности, в [6]. Следовательно, вместо уравнения (6) можно использовать следующее уравнение:

$$m = a M + b dM, \quad (7)$$

где  $a$  – коэффициент, характеризующий удельную массу листы (хвои), пропорциональную запасу стволовой древесины;  $M$  – запас стволовой древесины;  $dM$  – текущий прирост запаса стволовой древесины;  $b$  – коэффициент, характеризующий удельную массу (листвы) хвои, пропорциональную приросту стволовой древесины.

Данные о запасе стволовой древесины и его приросте имеются в таксационных описаниях участков леса, поэтому для решения уравнения (7) необходимо только разработать метод определения коэффициентов  $a$  и  $b$ . Основой при разработке этого метода является равенство (4). Поскольку с ухудшением плодородия почв снижается удельная масса листового аппарата

древостоя в целом, то можно предполагать, что такая же тенденция имеет место и для частей массы листы (хвои), одна из которых пропорциональна запасу стволовой древесины, а другая – приросту его запаса.

Поиск зависимостей для сосняков и ельников между характеристиками удельной массы хвои (коэффициентами  $a$  и  $b$ ) и бонитетом проводился в следующей последовательности. Из литературных источников были собраны данные о массе хвои, о запасе и приросте стволовой древесины сосняков и ельников, произрастающих в различных природных условиях. Основным источником информации являются работы В. А. Усольцева [10], [11]. Для каждой породы данные по запасу, приросту стволовой древесины и массе хвои были распределены по бонитетам (класс бонитета определялся по таблицам М. М. Орлова [8]). Ряд каждого  $i$ -го класса бонитета состоит не менее чем из 10 членов. Для каждого из  $i$ -х классов бонитета с использованием уравнения (7) определялись коэффициенты  $a$  и  $b$ . Сделано допущение, что для конкретного класса бонитета возраст древостоя не влияет на значения коэффициентов  $a$  и  $b$ . Это допущение не в полной мере соответствует действительности. Однако, как показывают оценки, возрастные тренды этих коэффициентов имеют различные направления. Значение коэффициента  $a$  с возрастом несколько снижается, а  $b$  – увеличивается, что снижает влияние принятого допущения на конечные результаты. Кроме того, нужно иметь в виду, что наибольшие отклонения средних значений коэффициентов возможны только для молодого древостоя, для всех остальных возрастных категорий это допущение не должно повлиять на точность расчетов.

По полученным значениям были построены зависимости коэффициентов от показателей классов бонитета (рис. 3, 4). На этих рисунках показано, что с улучшением бонитета сосняков

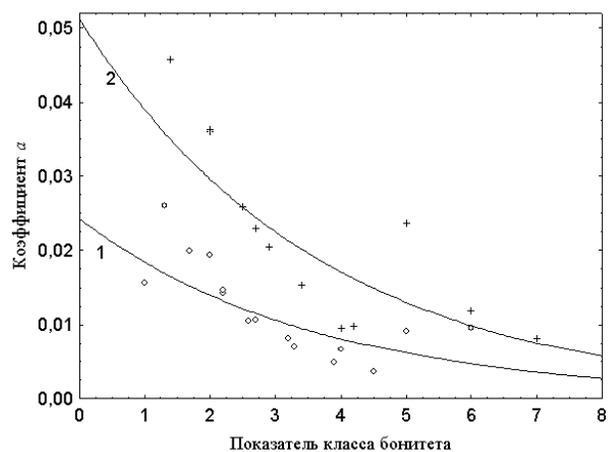


Рис. 3. Зависимость коэффициента, характеризующего удельную массу хвои, пропорциональную запасу стволовой древесины, от показателя класса бонитета (1 – сосна, 2 – ель)

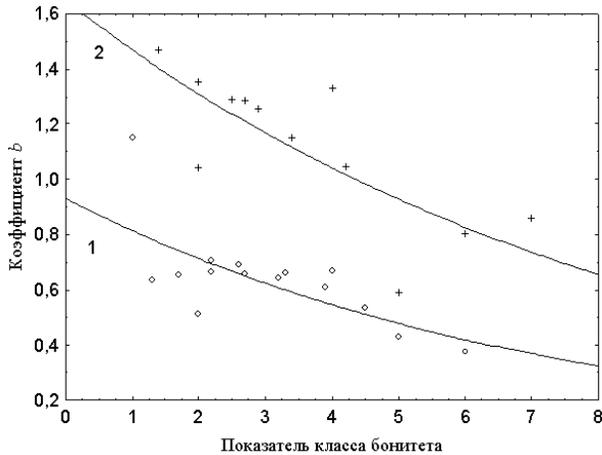


Рис. 4. Зависимость коэффициента, характеризующего удельную массу хвои, пропорциональную приросту стволовой древесины, от показателя класса бонитета (1 – сосна, 2 – ель)

и ельников коэффициенты, характеризующие удельную массу хвои, пропорциональную как запасу стволовой древесины, так и его приросту, снижаются и эта тенденция вполне удовлетворительно, учитывая точность определения массы хвои, описывается экспоненциальными уравнениями:

$$a = c \exp(-d Kl), \quad (8)$$

$$b = k \exp(-l Kl), \quad (9)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $k$  и  $l$  – коэффициенты регрессии, равные для сосняков соответственно 0,024, 0,275, 0,930, 0,133, для ельников – 0,051, 0,274, 1,650, 0,115;  $Kl$  – показатель класса бонитета.

С использованием системы уравнений (7)–(9) можно определять массу сухой хвои сосняков и ельников. Переход от массы сухой хвои к свежесрубленной осуществляется по зависимости:

$$m_{fr} = m_d / k, \quad (10)$$

где  $m_{fr}$  – масса свежесрубленной хвои, т/га<sup>-1</sup>;  $m_d$  – масса сухой хвои, т/га<sup>-1</sup>;  $k$  – коэффициент, показывающий долю сухого вещества в свежесрубленной хвое.

Значения коэффициента  $k$  для хвои рекомендуется принимать равными для сосны 0,48, для ели 0,46 [8].

Сравнение полученных по уравнению (7) результатов с данными, измеренными и рассчитанными по рекомендациям, приведенным в [8] (рис. 5), позволяет оценивать рассматриваемый подход к расчету количества листового аппарата положительно. Расчеты свидетельствуют, что для 96 % из 75 данных среднеквадратическое отклонение между измеренными и рассчитанными по (7) величинами для сосняка составляет 1,1 т/га, для 88 % из 66 данных для ельника – 3,3 т/га. Относительное отклонение для сосняка – 7 %, для ельника – 3 %.

По мере увеличения данных по запасу, приросту стволовой древесины и соответствующей

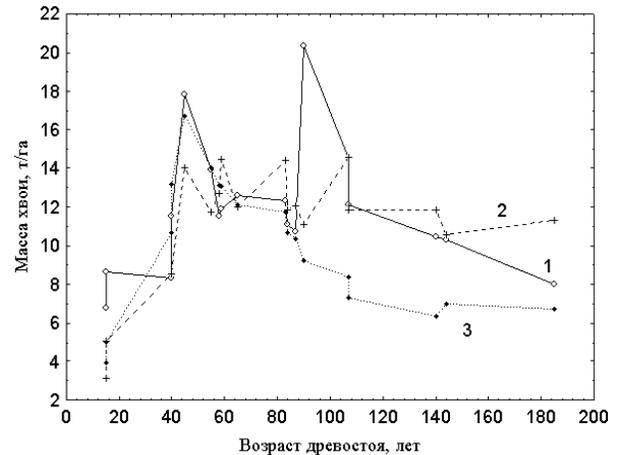


Рис. 5. Динамика измеренной (1) и рассчитанной (2) и (3) соответственно по предложенному уравнению (7) и по рекомендациям из [8] массы хвои сосняка черничного

щей им массе хвои параметры  $a$  и  $b$  необходимо уточнять.

Приведенные результаты анализа уравнения (7) подтверждают возможность использования предложенного в [4] метода для определения среднего значения значения транспирации древостоя, в основу которого положен аналогичный подход разделения на две части всей воды, которая расходуется древостоем.

Анализ уравнения (7) позволяет сделать некоторые выводы о влиянии условий роста на формирование хвои и, следовательно, транспирации. Значение коэффициента  $b$  значительно больше, чем  $a$ , и эта разница увеличивается при улучшении условий роста. В частности, при переходе от класса бонитета Va к Ia превышение коэффициента  $b$  над коэффициентом  $a$  возрастает в три раза. Наряду с этим роль второго слагаемого из (7) увеличивается также при данных условиях и за счет роста интенсивности прироста стволовой древесины. Следовательно, возрастная динамика массы хвои высокопродуктивного древостоя в большей степени, чем низкопродуктивного, соответствует динамике прироста фитомассы, поэтому интенсивность как возрастания, так и снижения массы хвои с возрастом в высокопродуктивном древостое будет выше, чем в низкопродуктивном.

Из всего вышеизложенного вытекает, что в молодом и средневозрастном древостое масса хвои, а также транспирации будет увеличиваться с ростом продуктивности лесов. Поскольку в высокопродуктивном древостое масса хвои достигает максимальных значений раньше, чем в низкопродуктивном, и в дальнейшем с возрастом снижается достаточно интенсивно, то в спелых и перестойных древостоях следует ожидать изменения соотношения массы хвои. При этом расчеты для древостоев полноты единицы показывают, что соотношения масс хвои и транспирации с возрастом

меняются, как правило, в высоко- и среднепродуктивных древостоях (до III–IV классов бонитета). В древостоях, продуктивность которых ниже V класса бонитета, вероятность изменения соотношения масс хвои с возрастом меньше, что объясняется низкими значениями прироста фитомассы в течение периода роста и развития и малыми величинами амплитуды его изменения.

## ВЫВОДЫ

Существует линейная зависимость между концентрацией азота в потребляемой древостоем из почвы воде и классом бонитета. Улучшение бонитета леса соответствует уве-

личению концентрации азота. С улучшением бонитета леса удельная масса хвои (отношение всей массы хвои к приросту фитомассы) уменьшается, при этом изменение количества всей массы хвои древостоя зависит в значительной степени от его возраста. Для молодого и средневозрастного древостоя характерно увеличение массы хвои и, следовательно, транспирации с повышением продуктивности леса. В спелом и перестойном высоко- и среднепродуктивном древостое эта тенденция может нарушаться. Предложено уравнение для расчета массы хвои, основанное на ее зависимости как от прироста стволовой древесины, так и от ее запаса.

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 13-05-98803.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галенко Э. П. Фитоклимат и энергетические факторы продуктивности хвойного леса Европейского Севера. Л.: Наука, 1983. 128 с.
2. Казимиров Н. И., Волков А. Д., Зябченко С. С. и др. Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера. Л.: Наука, 1977. 304 с.
3. Казимиров Н. И., Морозова Р. М. Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии. Л.: Наука, 1973. 176 с.
4. Карпечко Ю. В. Расчетный метод определения транспирации древостоев // Лесоведение. 2010. № 5. С. 65–71.
5. Карпечко Ю. В., Бондарик Н. Л. Гидрологическая роль лесохозяйственных и лесопромышленных работ в таежной зоне Европейского Севера России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 225 с.
6. Карпечко Ю. В., Мясникова Н. А. Расчет фитомассы древостоя // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2012. № 4 (125). С. 77–81.
7. Крестовский О. И. Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 118 с.
8. Лесотаксационный справочник. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 288 с.
9. Сазонова Т. А., Придача В. Б., Колосова С. В. О содержании элементов минерального питания в ксилемном соке // Растительные ресурсы. 2009. Вып. 1. Т. 45. С. 113–171.
10. Усольцев В. А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 635 с.
11. Усольцев В. А. Формирование банков данных о фитомассе лесов. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 541 с.
12. Федорев Н. Г., Бахмет О. Н. Экологические особенности трансформации соединений углерода и азота в лесных почвах. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. 240 с.

**Karpechko Yu. V.**, Institute of Northern Water Problems Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Myasnikova N. A.**, Institute of Northern Water Problems Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

## CHARACTERISTIC FEATURES OF LEAF APPARATUS FORMATION AND TRANSPIRATION OF CONIFEROUS STAND

Transpiration of forest stand makes up a large fraction of the total forest evapotranspiration. Its estimation for a particular forest area is a challenging task. Consumption of the soil water by the forest stand is closely related to mineral nutrition and foliage formation. Therefore, a study of the relationship among foliage development, mineral nutrition, and transpiration of stands of different age and different growing conditions is needed for more accurate estimations of evapotranspiration. The aim of this work is to study the influence of soil fertility on the needles' formation and transpiration of forest stands. This work is based on the analysis of other studies. It is shown that, as bonitet improves, concentration of nitrogen in the soil water consumed by stands increases. The increase of soil fertility is accompanied by the reduction of specific mass in needles. The influence of the stand productivity on the total mass of needles and on the transpiration of the forest depends on the bonitet class and age. For a young and middle-aged stand the mass of needles, and thus transpiration, increases as bonitet improves. This tendency may not persist for mature and overmature stands. The method of calculation of pine and spruce needle mass using the stem volume and its increment is proposed.

Key words: bonitet class, mass of needles, transpiration, mineral nutrition

## REFERENCES

1. Galenko E. P. *Fitoklimat i energeticheskie faktory produktivnosti khvoynogo lesa Evropeyskogo Severa* [Phytoclimate and Energy Factors of the Coniferous Forest of the European North]. Leningrad, Nauka Publ., 1983. 128 p.
2. Kazimirov N. I., Volkov A. D., Zybchenko S. S. et al. *Obmen veshchestv i energii v sosnovykh lesakh Evropeyskogo Severa* [Exchange of Substances and Energy in the Pine Forests of the European North]. Leningrad, Nauka Publ., 1977. 304 p.

3. Kazimirov N. I., Morozova R. M. *Biologicheskij krugovorot veshchestv v el'nikakh Karelii* [Biological Circulation of Substances in Spruce Forests of Karelia]. Leningrad, Nauka Publ., 1973. 176 p.
4. Karpechko Yu. V. Calculation Method of Definition Transpiration of Stands [Raschetnyy metod opredeleniya transpiratsii drevostoev]. *Lesovedenie* [Forestry]. 2010. № 5. P. 65–71.
5. Karpechko Yu. V., Bondarik N. L. *Gidrologicheskaya rol' lesokhozyaystvennykh i lesopromyshlennykh rabot v taezhnoy zone Evropeyskogo Severa Rossii* [Hydrological role of forest management and forest industry activities in the taiga zone of Russian European North]. Petrozavodsk, KarNTs RAN Publ., 2010. 225 p.
6. Karpechko Yu. V., Myasnikova N. A. Calculation of Forest Phytomass [Raschet fitomassy drevostoya]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences]. 2012. № 4 (125). P. 77–81.
7. Krestovskiy O. I. *Vliyaniye vyrubok i vosstanovleniya lesov na vodnost' rek* [Effect of Forest Cutting and Regeneration on the Water Content of Rivers]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986. 118 p.
8. *Lesotaksatsionnyy spravochnik* [Directory of Forest Inventory]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 288 p.
9. Sazonova T. A., Pridacha V. B., Kolosova S. V. On the Content of Mineral Elements in Xylem Sap [O sodержanii elementov mineral'nogo pitaniya v ksilemnom soke]. *Rastitel'nye resursy*. 2009. № 1. Vol. 45. P. 113–171.
10. Usol'tsev V. A. *Biologicheskaya produktivnost' lesov Severnoy Evrazii: metody, baza dannykh i ee prilozheniya* [Biological Productivity of Forests of Northern Eurasia: Methods, Database and its Applications]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2007. 635 p.
11. Usol'tsev V. A. *Formirovaniye bankov dannykh o fitomasse lesov* [Formation of Databases on the Phytomass of Forest]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 1998. 541 p.
12. Fedorets N. G., Bakhmet O. N. *Ekologicheskkiye osobennosti transformatsii soedineniy ugleroda i azota v lesnykh pochvakh* [Ecological Features of Transformation of Carbon and Nitrogen Connections in Forest Soils]. Petrozavodsk, KarNTs RAN Publ., 2003. 240 p.

Поступила в редакцию 11.12.2013

АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ АНДРЕЕВ

аспирант кафедры механики строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
AAA.07.04.1989@ya.ru

ГЕННАДИЙ НИКОЛАЕВИЧ КОЛЕСНИКОВ

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
kgn@petsu.ru

### О РАЦИОНАЛЬНОМ СООТНОШЕНИИ КОЛИЧЕСТВА ОПИЛОК И СТРУЖКИ В ДРЕВЕСНО-ЦЕМЕНТНОМ КОМПОЗИТЕ\*

Экспериментально исследован древесно-цементный композит, содержащий опилки, стружку, добавки жидкого стекла и сульфата алюминия. В экспериментах на одноосное сжатие определена прочность этого композита с наполнителем в виде только стружки (0,22 МПа) и только опилок (0,84 МПа). При соотношении этих компонентов по массе 0,2:0,8 прочность возросла до 1,76 МПа. Эффект повышения прочности может быть использован в целях совершенствования технологии производства древесно-цементных материалов для малоэтажного строительства с применением отходов лесопромышленного комплекса.

Ключевые слова: опилки, стружка, древесно-цементный композит, прочность, одноосное сжатие

Как известно [5], Р. Б. Фуллер, независимо от основателя синергетики Г. Хакена [6], определил синергетические эффекты как поведение целого, которое нельзя предсказать на основе изучения отдельных его частей. В качестве примера Р. Б. Фуллер привел хромоникелевый сплав, который при растяжении демонстрирует прочность, превышающую прочность каждого из его компонентов. Эти данные позволяют сформулировать предположение о латентном существовании других проявлений синергетического эффекта, имеющих перспективу технического применения.

В данной работе на эмпирическом уровне рассматривается композитный материал с наполнителем в виде смеси древесных частиц, различающихся формой и размерами. Эти частицы объединены связующим, изготовленным на основе цемента с добавками жидкого стекла и сульфата алюминия. Из подобных материалов производят теплоизоляционные и конструкционные блоки для малоэтажного строительства [1]. Несмотря на большой объем многолетних исследований [3], [4], [7] некоторые проблемы в данной области остаются недостаточно изученными. К их числу относится проблема рационального использования отходов переработки древесного сырья и, как следствие, вопрос о количественном соотношении опилок и стружки в древесно-цементной смеси. Поиск ответа на эти вопросы является целью данной работы.

В качестве объекта исследования приняты образцы в форме куба с ребром 10 см, изготов-

ленные из древесно-цементной смеси и различающиеся только соотношением количества опилок и стружки. Предмет исследования – влияние количественного соотношения стружки и опилок на прочность образцов при сжатии. Были изготовлены образцы с соотношениями стружки и опилок (по массе): 1:0; 0,8:0,2; 0,5:0,5; 0,2:0,8; 0:1. Гранулометрический состав опилок и стружки определен ситовым методом (см. таблицу).

Гранулометрический состав компонентов

Ячейка сита, мм	Опилки, %	Стружка, %
10	0,13	7,02
7	0,49	15,38
5	2,51	15,72
3	11,55	23,41
2	29,67	16,05
1	53,49	17,39
0,5	1,71	1,07
0,25	0,32	2,41
Поддон	0,13	1,54
Всего	100	100

Использовалась смесь при следующем соотношении компонентов в единицах массы: портландцемент (М400D20): 100; смесь опилок и стружки: 100; жидкое стекло (натриевое, по ГОСТ 13078-81): 15; сульфат алюминия (по ГОСТ 30515-97): 7. Наиболее однородная структура материала имеет место при соот-

ношении опилок и стружки (по массе) 0,8:0,2. Инструментальное подтверждение различий в прочности получено при испытаниях на сжатие [1], [2]. Образцы в возрасте 28 суток испытывались на испытательной машине SHIMADZU AG50kNX (рис. 1).

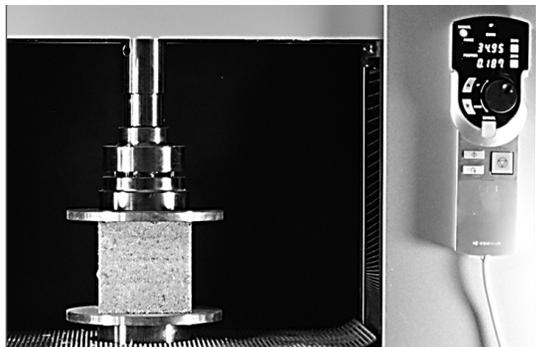


Рис. 1. Образец в испытательной машине

Экспериментальные данные показаны маркерами на рис. 2. Уравнение линии тренда  $y = -47,97x^4 + 89,95x^3 - 51,35x^2 + 10,01x + 0,22$ .

Обозначим  $C_1$  и  $C_2 = 1 - C_1$  массовую долю наполнителя вида 1 (стружка) и вида 2 (опилки) соответственно.  $R_1$  и  $R_2$  – прочность композита с наполнителем только вида 1 и только вида 2 соответственно. Тогда по правилу аддитивности [3] прочность композита  $R_0 = R_1C_1 + R_2C_2$  (пунктир на рис. 2). В этой формуле игнорируется взаимовлияние армирующих элементов 1 и 2.

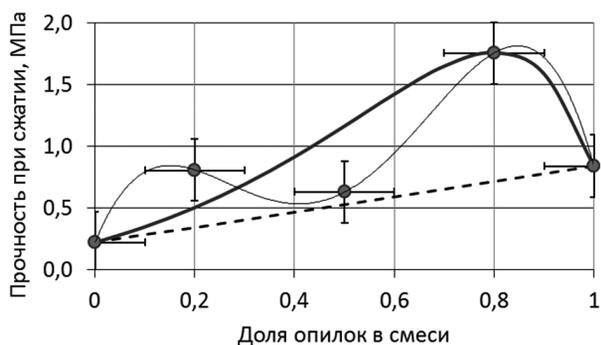


Рис. 2. Прочность композита без учета (пунктир) и с учетом синергии. Экспериментальные данные обозначены маркерами

Для оценки взаимовлияния армирующих элементов на прочность композита при сжатии  $R$  может быть использовано соотношение [1]:

$$R = R_1C_1 \exp(a_2C_2) + R_2C_2 \exp(a_1C_1), \quad (1)$$

где  $a_1 = ak_1$ ;  $a_2 = ak_2$ ;  $a = (R_2 - R_1) / (R_2 + R_1)$ ;  $0 < R_1 \leq R_2$ . Для композита с наполнителями 1 и 2 по таблице эмпирически определено:  $R_1 = 0,22$  МПа;  $R_2 = 0,84$  МПа;  $k_1 = -1,58$ ;  $k_2 = 11,07$ . Результаты вычислений  $R$  (1) и экспериментальные данные показаны на рис. 2 сплошной линией и маркерами соответственно.

Разрушение сопровождалось разрывом нитевидных связей между частицами композита (рис. 3). Микрофотография получена на сканирующем электронном микроскопе SU-1510.

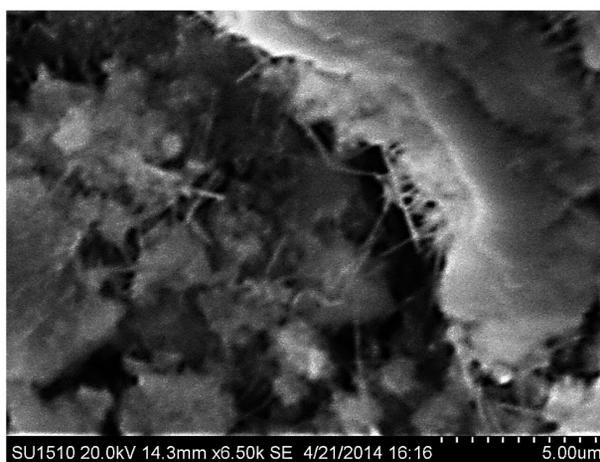


Рис. 3. Разрыв нитевидных связей между частицами композита ( $\times 6500$ )\*\*

Таким образом, установлено, что применение смеси стружки и опилок при определенном их соотношении (0,2:0,8 для исследованного композита) позволяет существенно увеличить прочность при сжатии, что может быть использовано для совершенствования технологии производства древесно-цементных материалов для малоэтажного строительства с применением отходов деревообрабатывающих предприятий.

\* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

\*\* Микрофотография получена на сканирующем электронном микроскопе SU-1510: В. П. Чугин, кафедра информационно-измерительных систем и физической электроники (зав. кафедрой профессор Г. Б. Стефанович), Центр коллективного пользования научным оборудованием ПетрГУ (директор центра А. С. Штыков).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев А. А. Влияние гранулометрического состава измельченной древесины для древесно-цементного материала на его прочность // Технические науки – от теории к практике. 2014. № 32. С. 71–76.
2. Андреев А. А., Васильев С. Б., Колесников Г. Н., Сютёв В. С. Влияние новой полимерно-минеральной добавки на прочность древесно-цементного материала для малоэтажного строительства // Сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика». 2014. № 2–2 (7–2). С. 292–296.
3. Баранов Е. В., Незнамова О. М., Чернышов Е. М., Пустовгар А. П. Исследование рациональных составов композита из древесной щепы на основе силикатного и цементного связующего для стеновых панелей быстрозводимых малоэтажных зданий // Вестник МГСУ. 2012. № 11. С. 131–139.

4. Бобрышев А. Н., Козомазов В. Н., Бабин Л. О., Соломатов В. И. Синергетика композитных материалов. Липецк: НПО ОРИУС, 1994. 154 с.
5. Наумова Ю. А. Синергизм и синергические эффекты в технологии переработки полимеров // Вестник МИТХТ им. М. В. Ломоносова. 2013. № 3. С. 76–86.
6. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 404 с.
7. Aigbomian E. P., Fan M. Development of Wood-Crete from Hardwood and Softwood Sawdust // Open Construction and Building Technology Journal. 2013. Vol. 7. P. 108–117.

**Andreev A. A.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Kolesnikov G. N.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

## ON EFFICIENT RATIO OF SAWDUST AND SHAVINGS IN WOOD-CEMENT COMPOSITE

Wood-cement composite comprising sawdust, shavings, sodium silicate, and additive of aluminum sulfate were investigated experimentally. The compressive strength of this composite consisting of shavings only (0,22 MPa) and consisting only of sawdust (0,84 MPa) was determined. When the weight ratio of these components reached 0,2:0,8, the compressive strength increased to 1,76 MPa. This effect can be considered to improve technology utilizing waste timber to produce wood-cement materials for low-rise building.

Key words: sawdust, shavings, wood-cement composite, strength, uniaxial compression

### REFERENCES

1. Andreev A. A. Influence of granulometric composition of chopped wood for wood-crete material on its strength [Vliyanie granulometricheskogo sostava izmel'chennoy drevesiny dlya drevesno-tsementnogo materiala na ego prochnost']. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike* [Engineering – from theory to practice]. 2014. № 32. P. 71–76.
2. Andreev A. A., Vasil'ev S. B., Kolesnikov G. N., Syunev V. S. Influence of new polymer-mineral additive on strength of wood-cement material for low-rise building [Vliyanie novoy polimerno-mineral'noy dobavki na prochnost' drevesno-tsementnogo materiala dlya maloetazhnogo stroitel'stva]. *Sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhdunarodnoy zaochnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy: teoriya i praktika"*. 2014. № 2–2 (7–2). С. 292–296.
3. Baranov E. V., Neznamova O. M., Chernyshov E. M., Pustovgar A. P. Research into rational compositions of a composite material that comprises wood chips, silicate and cement binders used in the manufacturing of wall panels of pre-fabricated low-rise buildings [Issledovanie ratsional'nykh sostavov kompozita iz drevesnoy shchepy na osnove silikatnogo i tsementnogo svyazuyushchego dlya stenovykh paneley bystrovozvodimykh maloetazhnykh zdaniy]. *Vestnik MGSU*. 2012. № 11. P. 131–139.
4. Bobryshev A. N., Kozomazov V. N., Babin L. O., Solomatov V. I. *Sinergetika kompozitnykh materialov* [Synergetics of composite materials]. Lipetsk, NPO Orius Publ., 1994. 154 p.
5. Naumova Yu. A. Synergism and synergic effects in polymer processing technology [Sinergizm i sinergicheskie efekty v tekhnologii i pererabotke polimerov]. *Vestnik MITKhT* [Fine Chemical Technologies]. 2013. № 3. P. 76–86.
6. Haken G. *Sinergetika* [Synergetics]. Moscow, Mir Publ., 1980. 404 p.
7. Aigbomian E. P., Fan M. Development of Wood-Crete from Hardwood and Softwood Sawdust // Open Construction and Building Technology Journal. 2013. Vol. 7. P. 108–117.

Поступила в редакцию 03.03.2014

**АНТОН ПАВЛОВИЧ СОКОЛОВ**

кандидат технических наук, доцент кафедры тяговых машин лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*a\_sokolov@psu.karelia.ru*

**ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ СЮНЁВ**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тяговых машин лесоинженерного факультета, проректор по научно-исследовательской работе, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*siounev@psu.karelia.ru*

## ЛОГИСТИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА\*

Представлена логистическая концепция организации лесозаготовительного производства. Лесозаготовительное предприятие (ЛЗП) рассматривается как логистическая система, функционирующая на макро- и микроуровне. При этом используются все основополагающие общие логистические принципы, но вместе с тем отмечается, что ЛЗП обладают целым рядом существенных особенностей, которые требуют корректировки стандартного подхода. Эти особенности в основном связаны с характером входящего в логистическую систему материального потока, а также с пространственным размещением самого производства.

Ключевые слова: логистика, лесозаготовки, лесозаготовительные предприятия, управление материальным потоком

### ВВЕДЕНИЕ

Рост масштабов применения логистического подхода в практике хозяйственной деятельности во многом вызван переходом от рынка продавца к рынку покупателя, что требует от производственных систем способности гибко реагировать на изменение приоритетов потребителей, а также других факторов рынка. Это в полной мере относится к лесозаготовительному производству, которое за последние несколько десятилетий изменилось до неузнаваемости. Появился целый ряд новых технологий, видов машин и их систем, значительно диверсифицировался ассортимент производимой продукции, выросли требования к ее качеству, условиям производства работ, уровням негативного воздействия на окружающую среду и т. д.

Потребительский рынок продукции лесозаготовок в России в настоящее время далек от стабильного состояния. Его характеристики быстро и разнонаправленно изменяются: появляются и исчезают игроки, образуются холдинги, в ряде регионов (обычно приграничных) заметна роль привлекаемых иностранных инвестиций. В этих регионах существенное влияние на рынок оказывают изменения в экспортно-импортной политике государства. Происходят и другие изменения. В таких условиях целью логистики следует полагать не только оптимальную организацию материальных потоков в лесном комплексе, но она должна дать инструмент для эффективного оперативного реагирования на

изменяющуюся ситуацию. Поэтому целью настоящей работы стал анализ существующих логистических подходов к организации лесозаготовительного производства в современных условиях.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

ЛЗП представляет собой логистическую систему (ЛС), которая может быть рассмотрена как на макро-, так и микроуровне [2], [3], [12], [14].

На макроуровне лесозаготовительное производство выступает в качестве одного из важнейших звеньев макрологической системы, которая может быть обозначена как лесной комплекс (ЛК) региона или страны в целом [1], [10]. В ЛК принято включать лесозаготовительные, деревообрабатывающие, целлюлозно-бумажные, лесотранспортные и другие смежные и вспомогательные производства, тесно связанные между собой материальными, информационными и финансовыми потоками. Лесозаготовки располагаются в самом начале материальных потоков макрологических систем ЛК и обеспечивают их сырьем. На макроуровне микрологистические системы связываются между собой на базе товарно-денежных отношений. Отдельные подсистемы внутри микрологистических систем также тесно связаны друг с другом. Однако в данном случае основа их взаимодействия бестоварная.

На макроуровне логистическая система ЛЗП выполняет следующие основные логистические функции:

- Формирование хозяйственных связей по закупкам материальных ресурсов и поставкам производимой продукции.
- Прогнозирование потребности в производимой продукции.
- Поставка готовой продукции потребителям в заданных объемах и номенклатуре надлежащего качества и в определенные сроки.

На микроуровне лесозаготовительное предприятие является самостоятельной логистической системой, состоящей из ряда взаимосвязанных подсистем, которые обеспечивают вхождение материального потока в систему, прохождение внутри нее и выход из системы в виде материальных продуктов (лесоматериалов, щепы, топливной древесины, транспортных и дорожно-строительных услуг и т. п.). При этом концепция логистики предполагает, что построение производственных логистических систем должно обеспечивать возможность постоянного согласования и взаимной корректировки планов и действий служб снабжения, производства и сбыта внутри предприятия.

На микроуровне логистическая система ЛЗП выполняет следующие основные логистические функции:

- Стратегическое и тактическое планирование лесозаготовительного, лесохозяйственного, дорожно-строительного производства, выполнения транспортных услуг, а также процессов ТО и Р, включая выбор технологий, типов и марок машин, возможностей аутсорсинга и т. д.
- Оперативно-календарное планирование лесозаготовительного, лесохозяйственного, дорожно-строительного производства и выполнения транспортных услуг.
- Оперативное управление технологическими процессами ТО и Р машин и оборудования.
- Управление арендной лесосырьевой базой.
- Все виды планирования объемов поставок материалов, запасных частей, топлива и других видов материальных ресурсов.
- Организация внутрипроизводственного складского хозяйства.
- Контроль и управление запасами материальных ресурсов на уровнях внутрипроизводственной складской системы и в технологическом процессе.
- Внутрипроизводственное физическое распределение материальных ресурсов.
- Информационно-техническое обеспечение процессов управления материальными ресурсами.
- Автоматизация и компьютеризация управления внутрипроизводственными материальными, информационными и финансовыми потоками.

Основополагающим понятием в логистике выступает понятие «материальный поток». Материальные потоки образуются в результате выполнения логистических операций, таких как транспортировка, погрузка, разгрузка, складирование, обработка, упаковка и другие материальные операции с сырьем, полуфабрикатами и готовой продукцией – от первичного источника сырья (для ЛЗП это лес) до конечного потребителя.

Управление материальным потоком требует сбора, обработки и передачи необходимой для этого информации, поэтому материальный поток неразрывно связан с соответствующим информационным потоком. Обеспечение движения материального потока требует затрат финансовых ресурсов, поэтому материальный поток сосуществует с финансовым потоком. Финансовые ресурсы в виде выходящего финансового потока из ЛС замещаются на материальный поток, входящий в данную систему.

Движение материальных, информационных и финансовых ресурсов обеспечивается интеллектуальным и трудовым потенциалом кадров – участников логистического процесса. Соответственно наряду с материальным, информационным и финансовым потоками выделяется кадровый поток.

Общая схема логистической системы на микроуровне представлена на рис. 1.

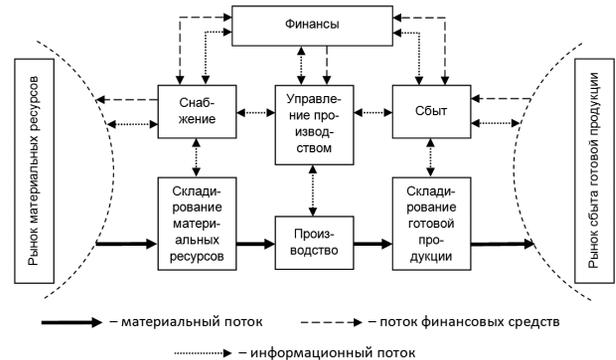


Рис. 1. Общая схема логистической системы на микроуровне

Для достижения поставленной цели внутри логистической системы выполняются логистические функции. Логистическая функция – это укрупненная группа логистических операций. Основные функции микрологистических систем или внутрипроизводственных ЛС следующие:

- Оперативно-календарное планирование с детальным расписанием выпуска продукции.
- Оперативное управление технологическими процессами производства и контроль качества готовой продукции.
- Стратегическое и оперативное планирование объемов поставок сырья, материалов, других видов материальных ресурсов.

- Организация внутрипроизводственного складского хозяйства.
- Прогнозирование, планирование и нормирование расхода материальных ресурсов.
- Организация работы внутрипроизводственного транспорта.
- Контроль и управление запасами материальных ресурсов и готовой продукции на уровнях внутрипроизводственной складской системы и в технологическом процессе производства.
- Информационное и техническое обеспечение процессов управления материальными потоками.
- Автоматизация и компьютеризация управления внутрипроизводственными материальными, информационными и финансовыми потоками.

К ЛЗП как микрологистическим системам относятся все приведенные выше общие положения. Однако ЛЗП обладают также и целым рядом существенных особенностей, которые требуют корректировки стандартного подхода. Эти особенности в основном связаны с характером входящего в логистическую систему материального потока, а также с пространственным размещением самого производства.

Общий материальный поток, входящий в ЛС ЛЗП, включает два довольно четко обособленных друг от друга потока, которые можно назвать основным и вспомогательным. Основной поток – это собственно лесные ресурсы (на корню), обрабатываемые в ЛС. Вспомогательный поток образуется закупками топлива, смазочных материалов, машин, запасных частей, подвижного состава, материалов для дорожного строительства и т. д. Необходимость выделения этих двух потоков обусловлена тем, что они имеют разные источники. Источником вспомогательного потока служит рынок материальных ресурсов, тот самый, который в общем случае микрологистической системы является единственным источником всего входящего потока (см. рис. 1). Основным материальный поток, входящий в ЛС ЛЗП, имеет в качестве своего источника лес, который, с одной стороны, является природным самовоспроизводящимся объектом, с другой стороны, в России лесные земли и ресурсы, с ними связанные, принадлежат государству.

Вторая особенность ЛС ЛЗП – это распределенный в пространстве характер производства. В этом смысле лес является одновременно местом осуществления производства, средством труда, предметом труда и источником входящего материального потока. Таким образом, место осуществления производственных функций ЛС ЛЗП может занимать площадь, измеряемую сотнями тысяч гектаров. Эту территорию принято называть лесосырьевой базой ЛЗП. При этом

в каждый конкретный момент времени активная производственная деятельность происходит на очень малых, по отношению к общей площади лесосырьевой базы, участках. По завершении лесозаготовительных или лесохозяйственных работ на одном участке производственные ресурсы меняют дислокацию и переходят на другой участок, который может отстоять от первого на десятки и даже сотни километров. В результате понятие основного входящего материального потока ЛС ЛЗП вообще теряет свой смысл. Действительно, материальные ресурсы не доставляются к подсистемам ЛС, как это имеет место в обычном случае, а наоборот, производственные ресурсы доставляются к месту расположения входящих материальных объектов.

Таким образом, логистические функции снабжения, хранения, складирования объектов основного входящего потока отсутствуют, зато в состав функций управления производством дополнительно включаются функции управления лесосырьевой базой.

С учетом всего вышесказанного принципиальная схема ЛС ЛЗП примет следующий вид (рис. 2).

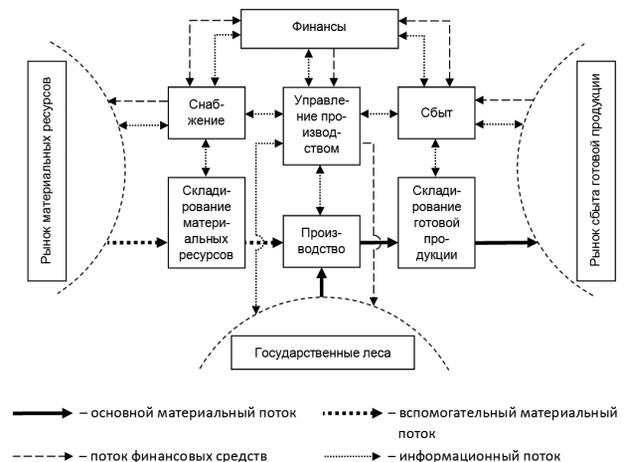


Рис. 2. Принципиальная схема микрологистической системы ЛЗП

Осуществление функций снабжения вспомогательными материальными ресурсами ЛЗП является предметом заготовительной логистики [6]. Движение материальных и связанных с ними финансовых, информационных и кадровых потоков внутри ЛЗП в ходе производства продукции – предмет внутрипроизводственной логистики лесозаготовок. Реализация готовой продукции ЛЗП – предмет распределительной логистики [7]. Заготовительная, внутрипроизводственная и распределительная логистика ЛЗП – это три части одного целого, функциональной логистики лесозаготовок, то есть управления материальными потоками внутри ЛЗП, создающих материальные блага или оказывающих материальные услуги. При этом

к материальным услугам относятся работы, увеличивающие стоимость ранее созданных благ, например транспортировка, хранение, укладка и т. д.

ЛС ЛЗП представляет собой целостную совокупность тесно связанных и взаимодействующих друг с другом подсистем, таких как:

*Закупка* – обеспечивает поступление материальных ресурсов в ЛЗП.

*Лесосырьевая база* – обеспечивает воспроизводство ресурсов леса, является местом осуществления производства, средством и предметом труда, а также источником основного входящего материального потока.

*Управление лесосырьевой базой* – выполняет логистические операции по учету, контролю и развитию лесосырьевой базы ЛЗП.

*Склады* – площадки, где временно размещаются и хранятся материальные запасы, преобразуемые материальные потоки.

*Запасы* – материалы, которые позволяют обеспечить надежность и бесперебойность работы ЛЗП.

*Парк машин и оборудования* – лесохозяйственные, лесозаготовительные, лесотранспортные, лесопогрузочные и другие машины и оборудование, участвующие в производстве продукции и услуг.

*Обслуживание производства* – отвечает за обслуживание и ремонт машин и оборудования.

*Сбыт* – занимается реализацией готовой продукции ЛЗП.

*Информация* – обеспечивает информационную связь между элементами микрологистической системы, контролирует выполнение логистических операций.

*Кадры* – организационный персонал, занятый выполнением логистических операций и функций.

*Финансы* – обеспечивают циркуляцию денежных средств, необходимых для управления материальными потоками ЛС ЛЗП.

В подсистемах «закупки», «склады», «запасы» решаются задачи заготовительной логистики ЛЗП. «Парк машин и оборудования» и «обслуживание производства» участвуют в решении задач внутрипроизводственной логистики. Задачи распределительной логистики решаются в подсистеме «сбыт», а задачи ресурсной логистики – в подсистемах «лесосырьевая база», «управление лесосырьевой базой», «информация», «кадры» и «финансы».

Все подсистемы ЛС ЛЗП являются совместимыми, что обеспечивается единством цели – удовлетворение потребности в продукции лесозаготовительного производства (в лесоматериалах, древесном топливе, лесохозяйственных и дорожно-строительных услугах и др.) необходимого качества, в указанном месте, в нужном количестве, в заданное время и с минимальными затратами.

При формулировании логистической концепции организации производства в ЛЗП необходимо учитывать современный уровень логистики как таковой и те достижения в решении отдельных логистических задач, которые доступны в настоящее время.

Эволюция логистики тесно связана с несколькими логистическими парадигмами, сложившимися исторически [4], [5], [11]: *аналитической, технологической, маркетинговой, интегральной*. Вокруг этих парадигм на Западе сформировались свои научные школы, группы исследователей и логистические сообщества.

*Аналитическая* парадигма является самой ранней по времени и заключается в первоначальном классическом подходе к логистике как теоретической науке, занимающейся проблемами управления материальными потоками в производстве и обращении.

*Технологическая* парадигма возникла в 1960-х годах и тесно связана с бурным развитием информационно-компьютерных технологий. В рамках этой парадигмы считается, что, во-первых, можно сформулировать общую проблему управления материальным потоком логистического объекта и, во-вторых, создать информационно-компьютерное обеспечение для решения этой проблемы. Практическим примером применения технологической парадигмы являются популярные системы MRP/DRP, решающие задачи внутрифирменного планирования, управления запасами и закупками, а также поставками готовой продукции потребителям. Наряду с этим решается целый ряд задач оптимизации, например определение оптимальной партии поставки, уровней запасов продукции и т. п.

В начале 1980-х годов в ряде западных стран появилась *маркетинговая* парадигма. Целью моделей в рамках этой парадигмы является описание и объяснение отношений между ЛС и возможностями фирмы в конкурентной борьбе. Научной базой являются в основном экономические и социальные дисциплины. Модели внутри этой парадигмы часто являются в определенной степени абстрактными, имеют большую размерность, что затрудняет получение простых аналитических решений.

Основные предпосылки *интегральной* парадигмы следующие [8], [9], [12]:

- Есть новое понимание механизмов рынка и логистики как стратегического элемента в конкурентных возможностях фирмы.
- Имеется много перспектив интеграции логистических партнеров в рамках новых организационных (структурных) отношений.
- Технологические возможности, например, в области гибких производств и информационно-компьютерных технологий радикально изменились и открыли новые горизонты контроля и управления во всех

сферах производства и обращения продукции.

Таким образом, интегральная парадигма делает логистику наиболее мощным и эффективным инструментом. Она рассматривает ее в качестве синтетического инструмента менеджмента, интегрированного материальным потоком для достижения целей бизнеса.

Современная логистическая концепция организации производства ЛЗП должна базироваться на интегральной парадигме и заключаться в реализации следующих основных положений:

- Отказ от избыточных запасов материальных ресурсов.
- Отказ от завышенного времени на выполнение лесозаготовительного и лесотранспортного процесса, а также времени на обеспечение технической готовности машин и оборудования.
- Реализация машин, оборудования и подвижного состава, на услуги которых нет заказа покупателей.
- Максимальное сокращение простоя технически исправных машин и оборудования.
- Устранение и отказ от нерациональных методов и технологий осуществления лесозаготовительного, лесохозяйственного, дорожно-строительного и других процессов.
- Устранение и отказ от нерациональных подходов к развитию инфраструктуры (дорожной) и маршрутов перевозок грузов.
- Превращение поставщиков материалов и органов государственного контроля в сфере лесного хозяйства из противостоящей стороны в доброжелательных партнеров.

Таким образом, логистика ЛЗП представляет собой совокупность алгоритмов и технологий, позволяющих реализовать сформулированные выше положения логистической концепции или логистический подход [13]. Собственно, реализация логистической концепции состоит в разработке и внедрении логистических систем управления материальными и соответствующими информационными потоками, которые базируются на логистических методах и моделях.

Достичь высокой эффективности применения методов и моделей в логистике возможно, если будет выполнен определенный ряд условий:

- Системный подход к решению рассматриваемой проблемы.
- Научная обоснованность самих методов и моделей.
- Адекватность модели самой системе, объективный учет взаимосвязи подсистем.
- Гибкая многовариантность, то есть согласование материальных, транспортных, информационных и других потоков.
- Формирование и оптимизация модели реальной системы во взаимосвязи обеспе-

чения, производства и сбыта готовой продукции.

- Непрерывность процесса внедрения модели.

При модельном представлении задач логистики ЛЗП необходимо принимать во внимание, что показатели развития любой производственно-экономической системы зависят от двух ее взаимосвязанных характеристик: состояния и функционирования.

*Состояние системы* характеризуется прежде всего ее величиной и структурой, то есть размерами и характерными, с точки зрения назначения системы, свойствами отдельных ее элементов. Состояние ЛЗП характеризуется величиной и характеристиками лесосырьевой базы, списочным количеством машин и оборудования, их надежностью и т. д.

*Функционирование системы* – это текущая реализация в конкретных условиях внешней среды, представляемых данным состоянием возможностей для осуществления функций системы, ради которых она создана.

Существование этих двух взаимосвязанных характеристик ЛЗП привело к разделению соответствующих математических методов на методы, используемые для решения частных задач функционирования, и методы, которые позволяют оптимизировать состояние ЛЗП.

При моделировании развития промышленных предприятий как в части состояния, так и в сфере функционирования наметились два подхода: детерминистско-оптимальный и вероятностно-адаптивный.

*Детерминистско-оптимальный подход* к принятию управленческих решений в большинстве случаев обеспечивает значительный экономический эффект. При этом широко используются экономико-математические модели, позволяющие выбирать варьируемые показатели плана из условий экстремума принятого критерия эффективности (например, максимизация прибыли, минимизация затрат и т. д.). Решить задачу развития ЛЗП с помощью одной модели невозможно. Обычно ее расчлениют на ряд локальных подзадач логистики, которые решаются отдельно.

К числу недостатков детерминистско-оптимального подхода можно отнести следующее:

- Практический отказ от решения тех проблем, которые в настоящее время не могут быть математически формализованы.
- Отказ от анализа и совершенствования организационных структур.
- Пассивное участие разработчиков экономико-математических моделей в их реализации и т. д.

К основным особенностям вероятностно-адаптивного подхода относятся:

- Включение всех достоинств детерминистско-оптимального подхода.

- Создание человеко-машинных систем планирования, позволяющих более полно и эффективно использовать в процессе планирования опыт и интуицию специалистов-плановиков.
- Учет неопределенности знаний о будущем, обуславливающий выбор наиболее адаптивных вариантов планов.
- Рассмотрение плана как системы взаимосвязанных решений.
- Решение организационных проблем.

Разработка и внедрение *вероятностно-адаптивного подхода* могут обеспечить реализацию основных условий эффективного использования методов и моделей в логистике лесозаготовок, а также методологических принципов анализа и синтеза логистических систем, таких как системность, надежность, адаптивность, устойчивость и др.

Модели, методы и алгоритмы, которые могут применяться для решения логистических задач ЛЗП, классифицируются в работе [4] следующим образом (рис. 3).

2-й класс: С учетом конкуренции		
1-й класс: Без учета конкуренции		
Вид	Группа	
	А	Б
1. Модели, охватывающие отдельные логистические функции и операции	Без оптимизации	С использованием оптимизационных процедур
2. Модели, охватывающие две или более логистические функции или операции	Однокритериальные задачи	Многокритериальные задачи
3. Модели логистических систем (каналов, цепей и сетей)	Анализ систем	Синтез систем (проектирование)

Рис. 3. Классификация моделей, применяемых для решения логистических задач ЛЗП

Все модели разделены на два класса: первый класс – модели и методы без учета конкуренции, второй – в условиях конкуренции. Каждый класс, в свою очередь, делится на три вида, внутри которых предусмотрено деление на группы (подгруппы). Деление на виды определяется сте-

пенью учета в анализируемой модели логистических операций и функций, тогда как деление на группы – сложностью моделей, в частности, использованием специальных процедур, например оптимизации.

Так, к первой группе первого вида отнесены модели, охватывающие отдельные операции (выбор логистического посредника, прогнозирование параметров, выделение номенклатурных групп и др.). Вторую группу первого вида составляют модели, использующие оптимизационные процедуры (транспортные задачи, задачи маршрутизации, задачи оптимизации сетей и т. п.).

Ко второму виду отнесены модели, охватывающие две и более логистические операции или функции. Как правило, модели второго вида формируются с использованием моделей первого вида. Деление на группы производится следующим образом: к первой группе относятся модели, в которых отсутствуют оптимизационные процедуры или используется один критерий оптимизации; вторую группу составляют многокритериальные оптимизационные модели.

### ВЫВОДЫ

Таким образом, можно заключить, что к ЛЗП как макро- и микрологистическим системам относятся все общие логистические подходы. Однако ЛЗП обладают также и целым рядом существенных особенностей, которые требуют корректировки стандартного подхода. Эти особенности в основном связаны с характером входящего в логистическую систему материального потока (лесные ресурсы на корню), а также с пространственным размещением самого производства.

Кроме того, современный логистический подход к управлению ЛЗП должен основываться на интегральной парадигме, вероятностно-адаптивном подходе к принятию управленческих решений и целом спектре взаимосвязанных моделей и алгоритмов исследования операций, реализуемых в системах поддержки принятия решений, которые призваны обеспечивать комплексное решение различных практических задач на стратегическом, тактическом и оперативном уровнях.

\* Работа выполнена при поддержке проекта «Новые трансграничные решения в области интенсификации ведения лесного хозяйства и повышения степени использования топливной древесины в энергетике», выполняемого в соответствии с программой добрососедства и партнерства KARELIA ENPI CBC в рамках Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 гг.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асламов С. В. Отдельные аспекты системного анализа развития лесного комплекса // Известия Иркутской государственной экономической академии. 2007. № 5. С. 62–65.
2. Герасимов Ю. Ю., Костюкевич В. М. Логистика в лесном комплексе: управление снабжением, транспортом и запасами: Учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2001. 108 с.
3. Гребенюк А. Л. Логистический подход в лесозаготовительном производстве // Труды Братского государственного университета. Сер.: «Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири». 2010. Т. 2. С. 255–258.
4. Логистика автомобильного транспорта: учеб. пособие для студентов, обучающихся по спец. «Экономика и управление на предприятии транспорта» / В. С. Лукинский и др. М.: Финансы и статистика, 2004. 367 с.

5. Логистика автомобильного транспорта: концепция, методы, модели / В. С. Лукинский и др. М.: Финансы и статистика, 2002. 278 с.
6. Николайчук В. Е. Заготовительная и производственная логистика. СПб.; М.; Харьков; Минск: ПИТЕР, 2001. 155 с.
7. Николайчук В. Е. Логистика в сфере распределения. СПб.; М.; Харьков; Минск: ПИТЕР, 2001. 158 с.
8. Плотников В. В. Горизонты логистической интеграции. М.: Компания Спутник+, 2002. 63 с.
9. Плотников В. В. Эффект логистической интеграции. М.: Научная книга, 2002. 103 с.
10. Салминен Э. О., Борозна А. А., Тюрин Н. А. Лесопромышленная логистика. СПб.: ПРОФИ-ИНФОРМ, 2005. 264 с.
11. Сергеев В. И. Логистика: Учеб. пособие. СПб.: СПбГИЭА, 1995. 131 с.
12. Сергеев В. И. Менеджмент в бизнес-логистике. М.: ФИЛИНЪ, 1997. 772 с.
13. Уваров С. А. Логистика: общая концепция, теория и практика. СПб.: Инвест-НП, 1996. 235 с.
14. Alternative logistics concepts fitting different wood supply situations and markets / J.-F. Audy, M. P. Moreira, K. Westlund, S. D'Amours, L. LeBel, M. Rönnqvist. Montreal: CIRRELT, 2012. 348 p.

**Sokolov A. P.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

**Syunev V. S.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

### LOGISTIC CONCEPT OF WOOD HARVESTING OPERATIONS

A logistic concept of wood harvesting operations is described in the article. A wood vesting enterprise is considered as a logistic system at both macro and micro levels. It uses all fundamental principles of logistics. However, it is noted that wood harvesting enterprises also have a number of significant features that need correction of the standard approach. These features are mainly related to the character of material flow input into the logistic system, as well as to the spatial distribution of production operations.

Key words: logistics, wood harvesting, wood harvesting enterprises, material flow management

#### REFERENCES

1. Aslamov S. V. Selected aspects of system analysis of forest sector development [Otdel'nye aspekty sistemnogo analiza razvitiya lesnogo kompleksa]. *Izvestiya Irkutskoy gosudarstvennoy ekonomicheskoy akademii* [Izvestiya of Irkutsk State Economics Academy]. 2007. № 5. P. 62–65.
2. Gerasimov Yu. Yu., Kostyukevich V. M. *Logistika v lesnom komplekse: upravlenie snabzheniem, transportom i zapasami* [Logistics in the forest complex: supply management, transportation and inventory]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2001. 108 p.
3. Grebenyuk A. L. Logistic approach in the wood harvesting operations [Logisticheskiy podkhod v lesozagotovitel'nom proizvodstve]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i inzhenernye nauki – razvitiyu regionov Sibiri"* [Proceeding of Buryat State University. Ser. "Natural and engineering sciences for development of Siberia Regions"]. 2010. Vol. 2. P. 255–258.
4. *Logistika avtomobil'nogo transporta: Ucheb. posobie dlya studentov, obuchayushchikhsya po spets. "Ekonomika i upravlenie na predpriyatii transporta"* [Motor transport logistics] / V. S. Lukinskiy i dr. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2004. 367 p.
5. *Logistika avtomobil'nogo transporta: kontseptsiya, metody, modeli* [Motor transport logistics: concept, methods, models] / V. S. Lukinskiy i dr. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2002. 278 p.
6. Nikolaychuk V. E. *Zagotovitel'naya i proizvodstvennaya logistika* [Procuring and production logistics]. St. Petersburg; Moscow; Har'kov; Minsk: PITER Publ., 2001. 155 p.
7. Nikolaychuk V. E. *Logistika v sfere raspredeleniya* [Distribution logistics]. St. Petersburg; Moscow; Har'kov; Minsk: PITER Publ., 2001. 158 p.
8. Plotnikov V. V. *Gorizonty logisticheskoy integratsii* [Horizons of logistical integration]. Moscow, Kompaniya Sputnik+ Publ., 2002. 63 p.
9. Plotnikov V. V. *Effekt logisticheskoy integratsii* [Effect of logistical integration]. Moscow, Nauchnaya kniga Publ., 2002. 103 p.
10. Salminen E. O., Borozna A. A., Tyurin N. A. *Lesopromyshlennaya logistika* [The wood Industries' logistics]. St. Petersburg, PROFI-INFORM Publ., 2005. 264 p.
11. Sergeev V. I. *Logistika: Ucheb. posobie* [Logistics]. St. Petersburg: SPbGIEA Publ., 1995. 131 p.
12. Sergeev V. I. *Menedzhment v biznes-logistike* [Management in business-logistics]. Moscow, FILIN Publ., 1997. 772 p.
13. Uvarov S. A. *Logistika: obshchaya kontseptsiya, teoriya i praktika* [Logistics: general concept, theory and practice]. St. Petersburg, Invest-NP Publ., 1996. 235 p.
14. Alternative logistics' concepts fitting different wood supply situations and markets / J.-F. Audy, M. P. Moreira, K. Westlund, S. D'Amours, L. LeBel, M. Rönnqvist. Montreal: CIRRELT, 2012. 348 p.

Поступила в редакцию 10.02.2014

**ВИКТОР МИХАЙЛОВИЧ ЛУКАШЕВИЧ**

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*lvm-dov@mail.ru*

### МЕЖОПЕРАЦИОННЫЕ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ В СКВОЗНЫХ ПРОЦЕССАХ ЛЕСОЗАГОТОВОК\*

Представлены пути повышения эффективности процесса лесозаготовок за счет оптимизации межоперационных приемов. Операция каждой машины, задействованной внутри сквозного процесса лесозаготовок, делится на основные и дополнительные приемы. К основным относятся приемы, обязательные для выполнения, чтобы достичь цели операции. К дополнительным – приемы, направленные на повышение эффективности либо рассматриваемой машины, либо последующей в сквозной цепочке лесозаготовительного процесса. Приведены примеры основных и дополнительных приемов для сквозного процесса заготовки сортиментов системой машин в составе харвестера и форвардера. Моделирование каждого приема из основной и дополнительной групп позволит получить рекомендации по наиболее оптимальной организации всего сквозного технологического процесса лесозаготовок.

Ключевые слова: подготовительные работы, сквозные процессы лесозаготовок, харвестер, форвардер

Главная цель подготовительных работ связана с созданием оптимальных условий для выполнения последующих основных работ лесозаготовительного производства [12]. Для повышения эффективности системы лесопроизводства и производства на лесозаготовительном предприятии необходимо осуществлять научно обоснованное проектирование подготовительных работ с учетом современного лесного законодательства, а также их места в сквозных процессах лесозаготовок, включающих технологические операции от заготовки деловой и энергетической древесины на лесосеке до ее первичной обработки и поставки потребителям [10], [11], [12].

Для обоснования оптимальных сквозных технологий освоения лесосек различными системами машин предлагается выделять межоперационные подготовительные работы. Основным критерием формирования систем машин в рамках оптимальных сквозных технологических процессов лесозаготовок является увязка последовательно используемых в этих процессах машин по производительности. Повышение производительности как отдельных машин, так и всей системы в сквозном процессе можно обеспечить тогда, когда на каждой предыдущей операции сквозного технологического процесса и до выполнения последующей операции будет обеспечено качественное осуществление межоперационных подготовительных работ. Определение всех возможных вариантов выполнения каждой лесозаготовительной операции позволит найти такой вариант, при котором сквозной технологический процесс будет оптимальным.

Исходя из этого сквозной процесс лесозаготовок необходимо организовывать таким образом, чтобы приемы предшествующих лесозаготови-

тельных машин или другие виды подготовительных работ способствовали лучшей работе последующих машин в системе.

Рассмотрим наиболее популярную в настоящее время систему машин в составе харвестера и форвардера [1]. В данном сквозном процессе образуются четыре операции. Первая операция включает в себя подготовку лесосек к рубке, вторая – это заготовка сортиментов харвестером, третья – трелевка и формирование штабелей сортиментов форвардером, четвертая – погрузка и вывозка сортиментов автопоездом. Внутри каждой операции приемы делятся на две группы (основные и дополнительные) и анализируются на предмет возможной оптимизации. К основным относятся приемы, направленные на выполнение основной работы, которые обязательно должны быть выполнены, чтобы достичь цели операции. К дополнительным относятся приемы, которые может использовать оператор машины для повышения эффективности своей работы (дополнительные приемы первой степени) или работы последующей машины (дополнительные приемы второй степени) в сквозном процессе лесозаготовок. Они могут использоваться только в определенных условиях при желании оператора либо вообще быть неустраиваемыми. Выбор приемов из каждой группы и качество выполнения будут влиять на эффективность работы как текущей машины, так и последующей.

*Первая операция* – подготовка лесосек к рубке. К основным приемам относятся установка деляночных столбов, закрепление и выделение границ лесосеки на местности, таксация, составление технологической карты и др. Для повышения эффективности отводов лесосек в ка-

честве дополнительных приемов первой степени возможно использование современных средств навигации, лесосчетных инструментов, оборудования и программного обеспечения. Например, использование навигаторов и электронных мерных вилок позволит существенно упростить такие виды работ, как промер линий, измерение углов, геодезическую привязку к квартальным просекам, таксационным визирам или другим постоянным ориентирам, закладку пробных площадей и перечет деревьев. Развитие автоматизации документооборота также является одним из приемов повышения эффективности лесозаготовительного производства на стадии подготовки. В настоящее время существуют программные средства, позволяющие вычерчивать абрис по координатам навигатора, составлять материально-денежную оценку и др., которые уже успешно работают на предприятиях отечественного ЛПК. Также идут разработки программного обеспечения по проектированию технологических карт с учетом природно-производственных условий лесосеки.

К дополнительным приемам второй степени при подготовке лесосек к рубке, направленным на повышение работы машин в сквозном процессе, относятся сбор как можно большей информации о природно-производственных условиях лесосеки и проектирование технологических карт с применением методов оптимизации. Большинство информации может быть получено при использовании навигатора (координаты расположения границ лесосеки, неэксплуатационных площадей, опасных мест, крутых склонов, ключевых биотопов, семенных куртин и др.). В перспективе возможна разработка методов и средств по анализу проб грунта, определение координат отдельных деревьев и их свойств для предварительного отбора при выборочной рубке или рубке ухода. База данных координат перечисленных объектов может быть использована для проектирования объектов инфраструктуры лесосеки (расположение погрузочного пункта, его площадь, размещение волоков, их нагруженность и др.) заблаговременно с применением методов оптимизации [2], [4], [5]. Чем больше информации будет получено при отводе, тем более качественно можно спланировать последующие работы. Эта информация может быть передана операторам харвестера и форвардера, на основании чего они будут планировать свою работу либо разрабатывать рекомендации по освоению лесосек (например, технологическая карта с учетом слабых грунтов и др.).

*Вторая операция* – работа харвестера. К основным обязательным приемам харвестера относятся: переезд к месту работы, наводка харвестерной головки на дерево, захват, срезание и валка дерева, протаскивание и обрезка сучьев, раскряжевка, сортировка и формирование пачек. Для повышения эффективности работы

харвестера некоторые основные приемы можно совмещать. Например, переезд на новую стоянку и наводка харвестерной головки на дерево; валка дерева и частичное его протаскивание при переносе к месту раскряжевки, что также можно отнести к дополнительным приемам первой степени. Важно чтобы оператор провел предварительную оценку запроектированной технологической карты, ознакомился с расположением магистрального волока, лично прошел границы лесосеки, отметил места слабых грунтов, крупных уклонов, наличие водоема и др. При обнаружении несоответствий или замечаний нужно сообщить об этом ответственному на предприятии и внести при необходимости корректировки в проектную документацию.

К дополнительным приемам второй степени можно отнести укладку порубочных остатков на слабые участки лесосеки для повышения проходимости форвардера. О таких участках необходимо предупреждать оператора форвардера, который будет планировать уменьшение объема воза, количества перемещений или концентрацию дровяной древесины вблизи опасных мест. Несколько дополнительных приемов второй степени связаны с формированием пачек сортиментов на пасеке. При раскряжевке оператор должен следить, чтобы деловые сортименты не попадали на волок и не перекрывали путь форвардеру. При обрезке сучьев необходимо стремиться к тому, чтобы порубочные остатки не затеняли торцы сортиментов, а при большой высоте снежного покрова лесоматериалы были уложены на подкладочное дерево. Это позволит оператору форвардера оценивать качество и параметры сортиментов по торцам и более эффективно загружать их за счет рационального размещения в грузовой платформе. Для этих же целей можно оснастить харвестерную головку дополнительными функциями (цветовая маркировка, покрытие пней жидкостью). При формировании пачек сортиментов оператор харвестера должен стремиться выравнивать торцы, чтобы оператор форвардера тратил на это меньше времени. Дополнительным приемом можно считать начало разработки лесосеки с разубки площади под погрузочный пункт. Это позволит оператору форвардера формировать подштабельные места, пока оператор харвестера разрабатывает пасеку. При этом возможно частичное оставление растущих деревьев при расчистке места под погрузочную площадку (для будущей подпорки штабеля с последующей их рубкой). Отбойные деревья можно оставлять и при выборочных рубках, чтобы устранить повреждения оставляемых для дальнейшего роста деревьев при перемещениях форвардера.

*Третья операция* связана с работой форвардера, основными приемами являются сбор сортиментов, трелевка их на погрузочную площадку, формирование штабеля, порожний ход за но-

выми сортами. Одним из важных дополнительных приемов первой степени является выбор оптимальной полезной нагрузки на рейс. Оператор форвардера должен начинать работу при наличии необходимого запаса сортиментов в разработанных пасаках на полную загрузку с учетом безопасного расстояния от харвестера. В то же время возможно осуществлять трелевку с меньшей нагрузкой при работе на слабых грунтах, в периоды распутицы, при снегопаде и др., чтобы избежать образования глубокой колеи и застревания трактора. Оператор форвардера должен следить за состоянием волока, при необходимости укрепить его дровяными сортами (сделать сплошной настил). Оператор должен стремиться осуществлять трелевку с минимальным количеством перемещений и сбор сортиментов начинать с дальнего конца волока в сторону погрузочной площадки, чтобы уменьшить расстояние трелевки в груженом состоянии. При большом расстоянии трелевки и большом запасе сортиментов желательно иметь возможность использовать второй форвардер. Следующим дополнительным приемом первой степени является осуществление рационального размещения сортиментов в грузовой платформе. Желательно планировать набор пачки с учетом видов сортиментов, их количества в пасаках, наличия свободных мест в штабелях и др. В первую очередь необходимо загружать сортименты одного вида, затем, при наличии свободного пространства в грузовой платформе, другие. В дальнейшем это позволит ускорить разгрузку в штабеля на погрузочной площадке. При трелевке нельзя переезжать деловые лесоматериалы, так как снижается их последующее качество. К дополнительным приемам первой степени можно отнести постоянную трелевку нескольких неделовых сортиментов. При работе на заболоченной местности их можно будет использовать для укладки при увязании в слабом грунте, а при работе на склонах и выборочных рубках их укладка у комля оставляемого дерева позволит образовать буфер между деревом и колесом на ширину диаметра сортимента, позволяющий снизить повреждение растущего дерева при соскальзывании машины.

Дополнительные приемы второй степени связаны с формированием штабеля сортиментов на погрузочной площадке. Оператору форвардера необходимо планировать работу таким образом, чтобы повысить эффективность работы водителя автопоезда. Например, формировать плотные и высокие штабеля, выравнивать комли сортиментов, что позволит осуществлять загрузку с одной стоянки либо с минимальными переездами вдоль штабеля. При формировании подштабельных мест необходимо качественно уложить прокладки, чтобы будущие штабеля не рассыпались и не просели; при разгрузке и формировании штабеля создавать карманы, чтобы штабель был высоким

и прочным. Если лесозаготовка осуществляется зимой и точно известно, что сортаменты не залежатся, то для сокращения времени формирования штабеля возможно на земле. Разгрузку сортиментов желательно осуществлять у колонны манипулятора, тогда сортаменты будут укладываться перпендикулярно дороге и будет обеспечен хороший обзор. Оператору форвардера также необходимо планировать перемещения при формировании штабеля (например, создавать обходные пути, что позволит уменьшить простои либо автопоезда, либо форвардера при совпадении времени их работ на погрузочном пункте). При расположении лесовозного уса внутри границ лесосек нужно стремиться уменьшать количество переездов через дорогу. При заезде форвардера на дорогу между штабелями увеличивается вероятность ее разрушения до степеней, когда автопоезд не сможет подъехать к штабелю, а также увеличивается расстояние трелевки. Канавы желательно заложить неделовыми сортами с последующей обязательной их очисткой.

Приведем несколько примеров межоперационной оптимизации в других технологических процессах лесозаготовок. Например, заготовка деревьев валочно-пакетирующими машинами (ВПМ) и последующая их трелевка скиддерами. ВПМ с одной стоянки формирует пачки небольшого объема, и для повышения производительности оператор скиддера может использовать дополнительный прием – сдвигание пачек, что позволит увеличить полезную нагрузку на один груженный ход скиддера. С другой стороны, при больших расстояниях трелевки возможна ситуация, когда производительность скиддера будет меньше производительности ВПМ. Тогда оператор ВПМ может использовать дополнительный прием, направленный на увеличение объема пачки для скиддера за счет переноса спиленных деревьев с текущей стоянки к пачке, сформированной на предыдущей стоянке. В этом случае уменьшается время технологического цикла скиддера за счет исключения времени на сдвигание, и, следовательно, повышается его производительность. Поэтому для повышения эффективности сквозного процесса по заготовке деревьев ВПМ и скиддером необходима оптимизация приемов между операциями.

Рассмотрим другой пример при разработке лесосек вальщиками и трелевке сортиментов форвардером. При заготовке сортиментов вальщиками может выполняться вспомогательный прием по окучиванию сортиментов. Это позволяет оператору форвардера быстрее загрузить пространство грузовой платформы сортами. Но это увеличивает трудозатраты вальщика и снижает его производительность. Поэтому при небольшом количестве вальщиков для ускорения их работы можно использовать следующий вспомогательный прием оператором форвардера. При валке дерева (особенно удаленного от центральной оси

волока) вальщик первый рез при раскряжке делает не полностью и получается длинный сдвоенный сортимент (например, два шестиметровых сортимента, соединенных недопилом). Затем оператор форвардера с помощью манипулятора подтягивает к себе этот сортимент, обламывает его в месте среза и загружает в форвардер. Представленный вспомогательный прием позволяет освободить вальщика от тяжелого труда по окучиванию (особенно первых сортиментов) и увеличить ширину пасаки (уменьшить количество волоков на лесосеке). Оптимизация этих приемов позволит повысить эффективность технологического процесса по заготовке сортиментов вальщиками и их трелевке форвардерами.

Моделирование каждого приема из основной и дополнительной групп позволит получить рекомендации по наиболее оптимальной организации всего сквозного технологического процесса лесозаготовок [4], [5], [8], [9], [15]. Для проведения пооперационной оптимизации сквозного технологического процесса необходимо:

- сформировать перечень всех возможных приемов по операциям [1], [3], [5];
- оценить их значимость внутри операции и во всем сквозном процессе [1], [3], [13], [14];
- определить количественные показатели каждого приема и провести их математическую обработку (построить функцию распределения приема; определить математическое ожидание, дисперсию, пределы; построить модели и зависимости и т. п. по каждому приему) [5];
- сформулировать рекомендации по оптимизации сквозного технологического процесса [6], [7], [8], [9].

Критериями оптимизации могут быть: производительность, прибыль, уменьшение затрат (в т. ч. трудозатрат), снижение ручного труда, экологизация, повышение эффективности лесовосстановления, снижение объемов нарушений, минимум простоев или их совокупность. При этом можно отсортировать критерии по значимости либо выработать комплексный критерий.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования РФ в рамках реализации Программы стратегического развития Петрозаводского государственного университета (ПетрГУ) на 2012–2016 гг. «Университетский комплекс ПетрГУ в научно-образовательном пространстве Европейского Севера: стратегия инновационного развития».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будник П. В., Демчук А. В. Исследование системы заготовки сортиментов с использованием комплекса машин «харвестер + форвардер» // Перспективы науки. 2012. № 8 (35). С. 88–90.
2. Воронова А. М., Воронов Р. В., Пискунов М. А. Моделирование схемы волоков при помощи покрытия гиперсети взвешенным корневым деревом // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2012. № 2 (123). С. 114–117.
3. Галактионов О. Н., Кузнецов А. В. Исследование взаимосвязи технологической проходимости лесозаготовительных машин с параметрами лесной среды // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1145>
4. Морозов Е. В., Шегельман И. Р. О применении вероятностного моделирования для анализа некоторых технологических процессов лесозаготовок // Глобальный научный потенциал. 2011. № 9. С. 67–71.
5. Суханов Ю. В., Селиверстов А. А., Соколов А. П., Сяунёв В. С. Имитационное моделирование работы харвестера: алгоритмы и реализация // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2012. № 8 (129). Т. 2. С. 49–51.
6. Шегельман И. Р. Анализ сквозных процессов заготовки биомассы дерева и ее переработки на щепу // Современные проблемы развития лесопромышленных производств: научные труды. 2001. № 6. С. 13–23.
7. Шегельман И. Р. Концепция развития технологических процессов лесозаготовок с комплексным использованием древесины // Труды лесоинженерного факультета Петрозаводского государственного университета. 2001. № 3. С. 102–104.
8. Шегельман И. Р. Функционально-технологический анализ: метод формирования инновационных технических решений для лесной промышленности. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2012. 96 с.
9. Шегельман И. Р., Щеголева Л. В., Пономарев А. Ю. Математическая модель выбора сквозных потоков заготовки, транспортировки и переработки древесного сырья // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2005. № 172. С. 32–36.
10. Шегельман И. Р., Будник П. В. Классификация сквозных технологий заготовки биомассы дерева // Перспективы науки. 2012. № 4 (31). С. 90–92.
11. Шегельман И. Р., Васильев А. С. Потенциал совмещения операций очистки деревьев от сучьев и коры в рамках сквозных технологий лесопромышленных производств // Инженерный вестник Дона. 2013. Т. 25. № 4. С. 52 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1744>
12. Шегельман И. Р., Лукашевич В. М. Трансформация системы лесосырьевой и технологической подготовки в организации лесопользования // Фундаментальные исследования. 2012. № 3 (3). С. 739–743 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://search.rae.ru/>
13. Шегельман И. Р., Скрыпник В. И., Кузнецов А. В. Анализ показателей работы и оценка эффективности лесозаготовительных машин в различных природно-производственных условиях // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. № 4 (109). С. 66–75.
14. Шегельман И. Р., Щеголева Л. В., Пономарев А. Ю., Щуккин П. О. Экспертная оценка факторов, характеризующих сквозные технологии лесозаготовок // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2009. № 189. С. 89–95.
15. Щеголева Л. В., Лукашевич В. М. Задача формирования парка машин и оборудования для проведения лесозаготовительных работ при разделении лесосеки на зоны летней и зимней вывозки // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2009. № 4. С. 119–121.

Lukashevich V. M., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

## INTEROPERATIONAL PREPARATORY WORKS IN THROUGH PROCESSES OF FOREST LOGGING

A set of credible ways increasing productive efficiency of the forest logging process by means of optimization of interoperational methods are presented in the article. The operation of each machine enabled in the chain process of forest logging consists of the main and additional methods. The main methods are those that are obligatory to execute in order to reach the goal of the operation. The additional methods are those that are intended to increase efficiency of either the machine under consideration or the following machine employed in the through process of forest work. The article gives examples of the main and additional methods for the through process of short log operations by the system of machines represented by a harvester and a forwarder. Modeling of each method from the main and additional groups will allow receiving recommendations on the most optimal organization of the whole technological process of forest logging works.

Key words: preparatory works, through processes of forest logging, harvester and forwarder

### REFERENCES

1. Budnik P. V., Demchuk A. V. The study of the logging system with complex machinery "harvester + forwarder" [Issledovanie sistemy zagotovki sortimentov s ispol'zovaniem kompleksa mashin "kharvester + forvarder"]. *Perspektivy nauki* [Science prospects]. 2012. № 8 (35). P. 88–90.
2. Voronova A. M., Voronov R. V., Piskunov M. A. Skid trail network simulation by means of hypernetwork covered with weighted rooted tree [Modelirovanie skhemy volokov pri pomoshchi pokrytiya gipersemi vzveshennym kornevym derevom]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2012. № 2 (135). P. 114–117.
3. Galaktionov O. N., Kuznetsov A. V. Research of the relationship between technological possibility of forest machines and parameters of forest environment [Issledovanie vzaimosvyazi tekhnologicheskoy prokhodimosti lesozagotovitel'nykh mashin s parametrami lesnoy sredy]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Inzhenernyy vestnik Dona (Rus)]. 2012. № 4. Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1145>
4. Morozov E. V., Shegel'man I. R. On Application of Probabilistic Modeling to the Analysis of Some Timber Harvesting Technology Processes [O primeneni veroyatnostnogo modelirovaniya dlya analiza nekotorykh tekhnologicheskikh protsessov lesozagotovok]. *Global'nyy nauchnyy potentsial* [Global scientific potential]. 2011. № 9. P. 67–71.
5. Sukhanov Yu. V., Seliverstov A. A., Sokolov A. P., Syunev V. S. Simulation modeling of harvester's work: algorithm and realization [Imitatsionnoe modelirovanie raboty kharvestera: algoritmy i realizatsiya]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2012. № 8 (129). P. 49–51.
6. Shegel'man I. R. Analysis of through processes of biomass of wood and its processing on chips [Analiz skvoznykh protsessov zagotovki biomassy dereva i ee pererabotki na shchepu]. *Sovremennye problemy razvitiya lesopromyshlennykh proizvodstv: nauchnye trudy* [Modern problems of timber processing manufacture development: scientific works]. 2001. № 6. P. 13–23.
7. Shegel'man I. R. The concept of development processes of forest logging and integrated forest utilization [Konceptsiya razvitiya tekhnologicheskikh protsessov lesozagotovok s kompleksnym ispol'zovaniem drevesiny]. *Trudy lesoinzhenernogo fakul'teta Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Research Reports of Forest Engineering Faculty of Petrozavodsk State University]. 2001. № 3. P. 102–104.
8. Shegel'man I. R. *Funktsional'no-tekhnologicheskii analiz: metod formirovaniya innovatsionnykh tekhnicheskikh resheniy dlya lesnoy promyshlennosti* [Engineering and technical analysis: method of formation of innovative technical solutions for the forest industry]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2012. 96 p.
9. Shegel'man I. R., Shchegoleva L. V., Ponomarev A. Yu. Mathematical model determining optimal technological chain processes of wood resources extraction, transporting and processing [Matematicheskaya model' vybora skvoznykh potokov zagotovki, transportirovki i pererabotki drevesinogo syr'ya]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Proceedings of Saint Petersburg State Forest Technical Academy]. 2005. № 172. P. 32–36.
10. Shegel'man I. R., Budnik P. V. Classification of Through Technologies of Wood Biomass Preparation [Klassifikatsiya skvoznykh tekhnologiy zagotovki biomassy dereva]. *Perspektivy nauki* [Science prospects]. 2012. № 4 (31). P. 90–92.
11. Shegel'man I. R., Vasil'ev A. S. Potential of combination of wood barking and branches cutting within through technologies of timber industries [Potentsial sovmeshcheniya operatsiy ochistki derev'ev ot such'ev i kory v ramkakh skvoznykh tekhnologiy lesopromyshlennykh proizvodstv]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Inzhenernyy vestnik Dona (Rus)]. 2013. Vol. 25. № 4. P. 52. Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1744>
12. Shegel'man I. R., Lukashevich V. M. Transformation of the system of raw and technological preparation in organization of forest exploitation [Transformatsiya sistemy lesosyr'evoy i tekhnologicheskoy podgotovki v organizatsii lesopol'zovaniya]. *Fundamental'nye issledovaniya* [The Fundamental researches]. 2012. № 3 (3). P. 739–743. Available at: <http://search.rae.ru/>
13. Shegel'man I. R., Skrypnik V. I., Kuznetsov A. V. Performance analysis and evaluation of forest machines in various natural and industrial environments [Analiz pokazateley raboty i otsenka effektivnosti lesozagotovitel'nykh mashin v razlichnykh prirodno-proizvodstvennykh usloviyakh]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2010. № 4 (109). P. 66–75.
14. Shegel'man I. R., Shchegoleva L. V., Ponomarev A. Yu., Shchukin P. O. Expert estimation of factors, characterizing through technologies of timber cuttings [Ekspertnaya otsenka faktorov, kharakterizuyushchikh skvoznye tekhnologii lesozagotovok]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Proceedings of Saint Petersburg State Forest Technical Academy]. 2009. № 189. P. 89–95.
15. Shchegoleva L. V., Lukashevich V. M. A problem of creation of a set of logging machine and equipment in conditions of cutting area division into winter and summer periods of tree hauling [Zadacha formirovaniya parka mashin i oborudovaniya dlya provedeniya lesozagotovitel'nykh rabot pri razdelenii lesoseki na zony letney i zimney vyvozki]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Herald of Moscow State Forest University – the Forest Bulletin]. 2009. № 4. P. 119–121.

Поступила в редакцию 05.09.2013

## ПАВЕЛ ПЕТРОВИЧ МЕДВЕДЕВ

кандидат архитектуры, доцент, заведующий кафедрой систем автоматизированного проектирования и инженерной графики строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*pmedvedev@petsu.ru*

## МОРФОЛОГИЯ ТРАДИЦИОННЫХ СЕЛЬСКИХ ПОСЕЛЕНИЙ АРХАНГЕЛЬСКОГО ПРИМОШЬЯ\*

Представлены результаты исследования морфологии традиционных сельских поселений Архангельского Приморья – одного из специфических историко-архитектурных субрегионов Российского Севера, расположенного в юго-западной части Архангельской области. В исследовании было задействовано 24 объекта и по 10 ведущим архитектурно-типологическим параметрам прослежена вариативность их объемно-планировочных решений.

Ключевые слова: Российский Север, Архангельское Приморье, морфология традиционных сельских поселений

Далее в процессе изучения особенностей функционального зонирования внутриселенческой ткани архангельско-приморских населенных пунктов поселения, отнесенных ко второй группе, удалось дифференцировать их на три варианта: «Г2/1» – поселения с выделением зоны общественного центра (42,86 %), «Г2/2» – поселения с выделением жилой и хозяйственной зон (28,57 %) и «Г2/3» – поселения с выделением жилой, хозяйственной и общественной зон (28,57 %). Нельзя не заметить, что населенные пункты всех трех выделенных вариантов согласно коэффициенту «типичности-уникальности», для трех признаков-атрибутов равному 9,76 % [8; 92], [9; 41], могут считаться вполне типичными для Архангельского Приморья, а само их бытование позволяет наметить эволюционную цепочку перехода от полифункциональных поселений типа «Г1» к населенным пунктам со сложным функциональным зонированием типа «Г2/3» по двум эволюционным ветвям – через варианты «Г2/1» и «Г2/2».

К числу поселений типа «Г2/1», обладающих специально выделенными зонами общественного центра, помимо упоминавшейся ранее деревни Заозерье (Козьминская-Кузьминская) [6; 84, рис. 5б], относится деревня Ивановская, находящаяся в юго-восточной части Няндомского района (рис. 1а). Она расположена на левом берегу в излучине реки Лим и является составным элементом Лимской групповой системы населенных мест [1; 88, № 2464], [7; 12, рис. 5], [11; № 3536]. На период 1991 года в деревне Ивановской насчитывалось восемнадцать жилых и шесть полуразрушенных домов, хотя ранее, по сведениям местных жителей, в деревне имелось 32 жилых дома. В центре деревни на возвышенности небольшого холма стоит деревянная Дмитриевская часовня, благодаря чему

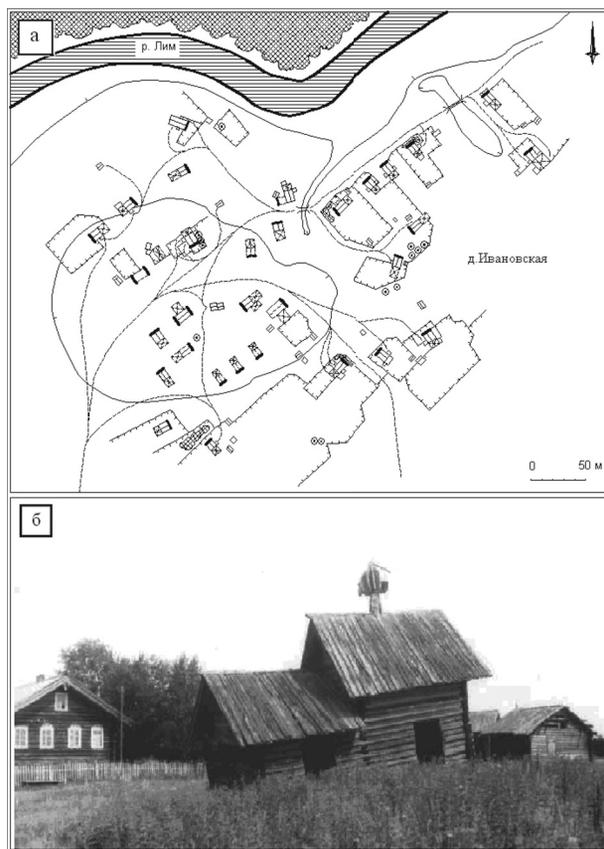


Рис. 1. Деревня Ивановская (а) и Дмитриевская часовня (фото П. П. Медведева, 1991 г.) (б)

поселение относится к подвиду центрально-акцентированных населенных пунктов (рис. 1б).

К числу поселений типа «Г2/2» с выделением жилой и хозяйственной зон, помимо упоминавшейся ранее деревни Климовская [6; 83, рис. 3б], может быть отнесена деревня Икса (Икса верхняя), находящаяся в юго-восточной части Ня-

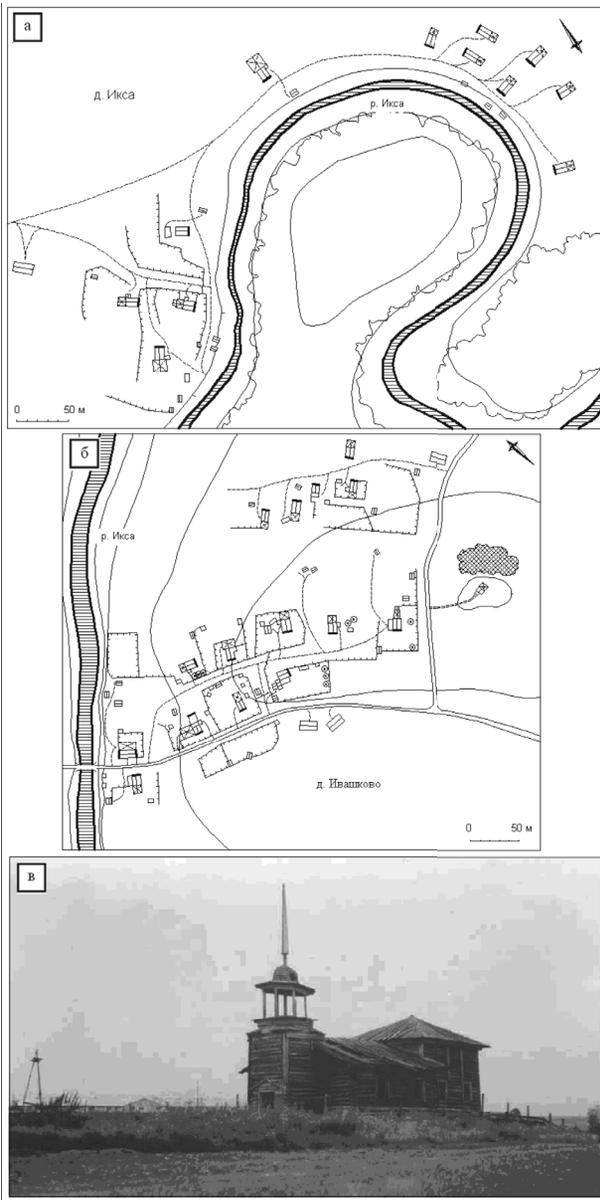


Рис. 2. Деревня Икса (Икса верхняя) (а), деревня Ивашково (Ивашковская-Артемовская) (б) и часовня, кон. XIX в. (фото П. П. Медведева, 1991 г.) (в)

домского района (рис. 2а). Она расположена на правом берегу реки Икса, впадающей в реку Мошу у северной оконечности Мошинского озера, и является составным элементом Мошинской групповой системы населенных мест, на период 1991 года в ней насчитывалось двенадцать жилых домов [1; 89, № 2491], [7; 12, рис. 6], [11; № 3470].

Примером сельского поселения типа «Г2/3», в планировочной структуре которого одновременно наличествуют сразу три отделенные друг от друга функциональные зоны (жилая, хозяйственная и общественная), может служить деревня Ивашково (Ивашковская-Артемовская), находящаяся в юго-восточной части Архангельского Приморья (рис. 2б). Она расположена на

правом берегу реки Икса, недалеко от берега озера Мошинское, является составным элементом Мошинской групповой системы населенных мест, и на период 1991 года в ней насчитывалось пятнадцать жилых домов [1; 88, № 2490], [7; 12, рис. 6], [11; № 3461]. На северо-западной окраине деревни, на возвышенности, размещается деревянная часовня, построенная в конце XIX века, благодаря чему поселение относится к подвиду периферийно-акцентированных населенных пунктов (рис. 2в).

Говоря о поселениях с дифференциацией поселенческой ткани на жилую и хозяйственную зоны, необходимо сказать, что применительно к территории Архангельского Приморья поселения типа «Г2/2» и «Г2/3» оказались обладающими хозяйственно-бытовыми зонами, представленными в большинстве случаев отдельными стоящими банями и рыбными амбарами, приближенными к берегам рек и озер, или колхозно-совхозными скотными дворами.

Вполне закономерен и высокий процент населенных пунктов с выделением зоны общественного центра – поселений типа «Г2/1» и «Г2/3», в сумме составляющих 71,43 %. К их числу в итоге были отнесены населенные пункты, обладавшие в прошлом своими церквями и часовнями, что лишний раз свидетельствует о важной роли архитектурных доминант в территориально-пространственной организации внутриселенческой ткани.

Вместе с тем нельзя не отметить, что сам факт отсутствия или наличия функциональной дифференциации внутриселенческой ткани еще не дает представления об ее территориально-пространственной целостности. С учетом этой особенности на уровне подвариантов групп населенных пунктов была проанализирована степень расчлененности застройки поселений сельскохозяйственными угодьями или непригодными для земледелия участками леса и болот. В конечном счете на этом этапе анализа в исследовании было задействовано 26 архангельско-примошских поселений, которые по вышеупомянутому признаку удалось дифференцировать на три подварианта.

В итоге анализа основная масса населенных пунктов Архангельского Приморья оказалась представленной населенными пунктами с нерасчлененной застройкой («Г (3)» – 84,62 %), которые, согласно коэффициенту «типичности-уникальности», при трех признаках-атрибутах равному 9,76 % [8; 92], [9; 41], можно считать наиболее типичными.

К поселениям подобного типа относятся ранее упоминавшиеся деревни Анташинская, Большое Матюзеро, Боровская, Будринская, Верховье, Заболотье, Заозерье [6; 81–84, рис. 1а–в, 3а, 4а–б и 5б] и Ивашково (рис. 2б), а также деревня Ильинский Остров (Исаковская), находящаяся в юго-восточной части Нядомского

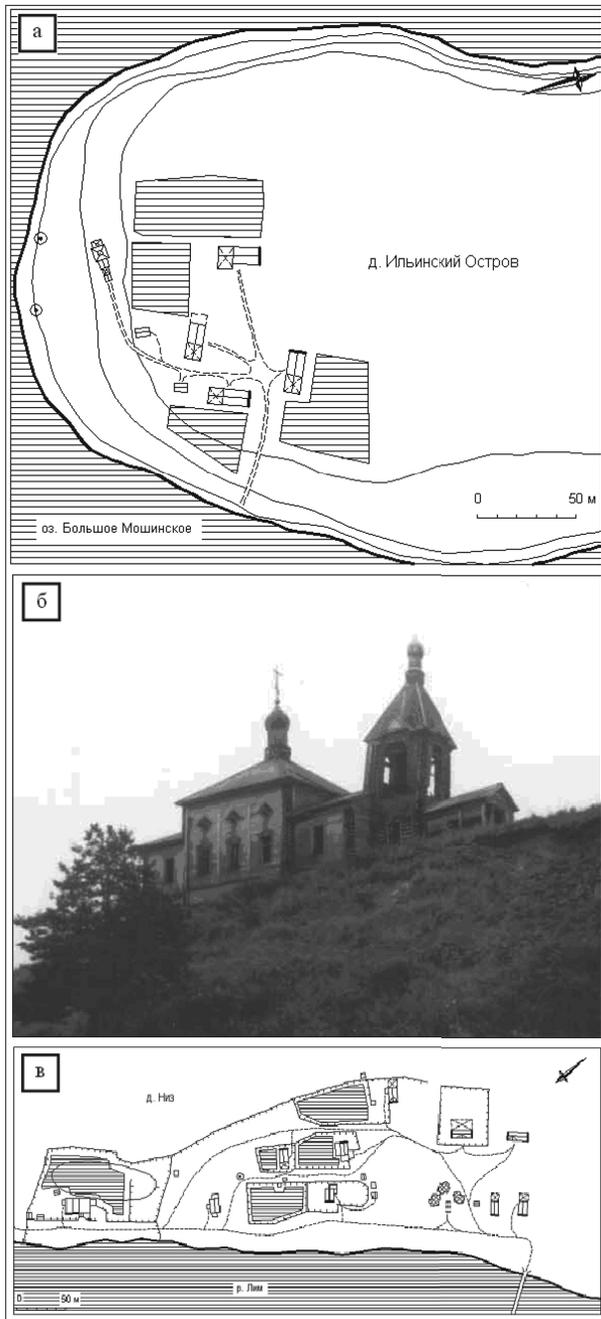


Рис. 3. Деревня Ильинский Остров (Исаковская) (а), Ильинская церковь, 1-я пол. XIX в. (фото П. П. Медведева, 1991 г.) (б) и деревня Низ (Парфеновская) (в)

района и входящая в состав Мошинской групповой системы населенных мест (рис. 3а) [1; 89, № 2492], [6; 12, рис. 6], [11; № 3499]. Она расположена на крутом берегу в южной части озера Мошинское, и на период 1991 года в ней насчитывалось четыре жилых дома, а на северной окраине деревни на крутом берегу размещалась деревянная Ильинская церковь, построенная в первой половине XIX века (рис. 3б). Благодаря наличию церкви деревня Ильинский Остров по характеру акцентировки относится к подвиду периферийно-акцентированных поселений

с расположением одного акцента в направлении главной композиционной оси поселения, позади и сбоку жилых домов.

Вторую по численности группу составили поселения с застройкой, расчлененной сельскохозяйственными угодьями или непригодными для земледелия участками леса и болот («Г (1)» – 11,54 %). Причем по значению упомянутого выше коэффициента «типичности-уникальности» их также можно считать вполне типичными. К числу населенных пунктов подобного типа относится, к примеру, упоминавшаяся ранее деревня Икса (рис. 2а). В то же время населенные пункты с вклинившимися в застройку сельскохозяйственными угодьями и непригодными для земледелия участками леса и болот («Г (2)»), составившие в итоге 3,85 %, для архангельско-примошской территории могут рассматриваться в качестве уникальных. Встречаются они не в чистом виде, а в качестве поселений смешанного подварианта типа «Г (3: [1+2])». К подобному типу населенных пунктов относится, в частности, деревня Низ (Парфеновская), находящаяся в юго-восточной части Няндомского района (рис. 3в). Она расположена на правом берегу реки Лим, является составным элементом Лимской групповой системы населенных мест, и на период 1991 года в ней насчитывалось десять жилых домов [1; 88, № 2467], [7; 12, рис. 6], [11; № 3535]. Не обладая архитектурными доминантами, деревня Низ относится к подвиду нейтральных поселений. Однако, по сведениям, полученным от местных жителей, в прошлом на берегу реки Лим почти в центре деревни в ряд с жилыми домами стояла деревянная часовня.

Наряду с изучением специфики функционального зонирования внутриселенческой ткани несомненный интерес для исследования представляют композиционные особенности взаимосвязи поселений с внешней транспортной инфраструктурой. По этому поводу можно сказать, что из шести известных на территории Российского Севера вариантов в границах Приморья в результате обследования было выявлено бытование поселений пяти типологических подгрупп.

При полном отсутствии приморских («Г4») населенных пунктов, встречающихся, к примеру, на территории Беломорского Поморья, в границах Архангельского Приморья было зафиксировано бытование бездорожных («ПГ1»), приречных («ПГ2») и приозерных («ПГ3») поселений (соответственно 8,33; 8,33 и 16,67 %), а также придорожных («ПГ5») и комбинированных («ПГ6») населенных пунктов (соответственно 8,33 и 58,33 %). Причем, согласно коэффициенту «типичности-уникальности», при пяти признаках-атрибутах равному 5,86 % [8; 92], [9; 41], поселения всех пяти выявленных подгрупп применительно к архангельско-примошскому

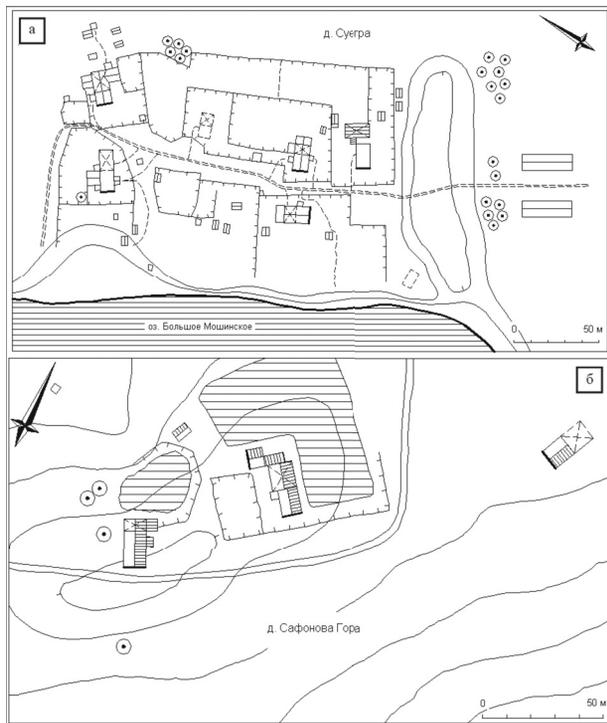


Рис. 4. Деревня Суегра (Плясуновская) (а), деревня Сафонова Гора (Софонова Гора) (б)

субрегиону могут рассматриваться в качестве достаточно типичных примеров.

Полученный результат вполне закономерен в силу специфики гидрографических условий Архангельского Приморья и особенностей исторического освоения его территории [1], [2], [3], [5], [11], [12], [13], [14]. Так, благодаря наличию большого числа озер и развитой системе множества связывающих их рек и речушек, движение переселенцев на архангельско-примозских землях во времена новгородской колонизации происходило преимущественно по этим природным транспортным артериям. Впоследствии по ним же осуществлялось движение «торговых» и «промышленных» людей, стремившихся в легендарное Заволочье и выходивших далее к берегам Белого и Баренцева морей [4], [10], [12]. А с появлением колесного транспорта необходимые для его передвижения грунтовые дороги наиболее легко и быстро удавалось устраивать именно по скелету уже сложившихся, хорошо знакомых и давно освоенных торговых путей. В частности, по территории Архангельского Приморья в прошлом проходил торговый тракт, связывавший города Каргополь и Вельск [5].

Примером бездорожного поселения (населенного пункта типа «ПГ1») на территории Архангельского Приморья может служить упоминавшаяся ранее деревня Заболотье [6; 84, рис. 4б]. К числу приречных поселений типа «ПГ2» относятся деревни Икса и Низ (рис. 2а, 3в), а в группу приозерных населенных пунктов типа «ПГ3», помимо деревень Будринская

[6; 83, рис. 3а] и Ильинский Остров (рис. 3а), вошла деревня Суегра (Плясуновская), находящаяся в юго-западной части Няндомского района и входящая в состав Мошинской групповой системы населенных мест (рис. 4а) [1; 90, № 2530], [7; 12, рис. 6], [11; № 3526]. Она расположена на пологом восточном берегу озера Мошинское, и на период 1991 года в ней насчитывалось пять жилых домов. По сведениям, полученным от местных жителей, на южной окраине деревни в прошлом стояла небольшая деревянная часовня. Таким образом, деревня Суегра по характеру акцентировки ранее относилась к подвиду периферийно-акцентированных поселений с расположением одного акцента в направлении главной композиционной оси поселения и перед фронтом жилых домов.

Примером придорожных населенных пунктов типа «ПГ5» является уже упоминавшаяся ранее деревня Заозерье [6; 84, рис. 5б]. К этому же типу поселений относится и деревня Сафонова Гора (Софонова Гора), находящаяся в юго-западной части Няндомского района и входящая в состав Андреевской групповой системы населенных мест (рис. 4б) [1; 87, № 2409], [7; 12, рис. 5], [11; № 2705]. Она расположена на пологом склоне холма, плавно спускающегося к северному берегу озера Боровое, и на период 1991 года в ней насчитывалось два жилых дома-комплекса и один заброшенный дом с утраченным двором-сараем.

Наконец, к числу комбинированных населенных пунктов типа «ПГ6» относятся уже упоминавшиеся ранее деревни Анташинская, Большое Матъозеро, Боровская, Климовская, Верховье, Кулемиха [6; 81–84, рис. 1а–в, 3б, 4а и 5а], Ивановская и Ивашково (рис. 1а и 1б), а также деревня Малое Матъозеро (Малое Матъозеро, Сушинно-Мадзеро), находящаяся в юго-восточной части Архангельского Приморья (рис. 5а) [1; 88, № 2474], [7; 12, рис. 6], [11; № 3516]. Расположена эта деревня на пологом западном берегу Матъозера, входит в состав Матъозерской групповой системы населенных мест, и на период 1991 года в ней насчитывалось девять жилых домов. По сведениям, полученным от местных жителей, в прошлом на северной окраине деревни на берегу Матъозера стояла небольшая деревянная часовня. Таким образом, ранее деревня Малое Матъозеро относилась к подвиду периферийно-акцентированных поселений с одной доминантой, расположенной вне пятна застройки и находящейся в направлении главной композиционной оси поселения, а также перед фронтом и позади жилых домов.

В процессе дальнейшего анализа морфологии обследованных сельских населенных пунктов после разложения поселений комбинированной подгруппы на чистые варианты оказалось, что относительное число населенных пунктов с естественными транспортными коммуникациями

(поселения типа «ПГ2» и «ПГ3»), в сумме составившее 55,00 %, хотя и незначительно, но все же больше, чем аналогичный показатель для поселений с искусственной транспортной инфраструктурой («ПГ5» – 40,00 %).

Вместе с тем из сложившегося соотношения видно, что в условиях Архангельского Приморья в процессе выбора месторасположения поселений в качестве естественных транспортных путей-артерий в большей мере использовались озера («ПГ3» – 24,83 %) и в меньшей степени – реки («ПГ2» – 15,00 %). Это вполне согласуется со спецификой природно-топографических и гидрографических условий Приморского края – наличием крупных озер, соединенных не очень густой сетью рек [2], [7; 12, рис. 5–6].

Уточнить степень влияния транспортных коммуникаций на процесс формирования субрегиональной поселенческой ткани в границах Архангельского Приморья позволяют данные о характере взаиморасположения населенных пунктов и транспортных путей, зафиксированные на уровне вариантов подгрупп. В частности, в процессе анализа особенностей пространственного расположения поселений по отношению к транспортным магистралям в конечном итоге оказалось, что наиболее типичными для исследуемой территории являются населенные пункты, примыкающие к коммуникациям («ПГ/2» – 55,26 %). На втором месте населенные пункты, расположенные вблизи от коммуникаций на расстоянии до 1,0 км («ПГ/1» – 23,68 %), а третье место заняли поселения, пересекаемые коммуникациями («ПГ/3» – 18,42 %).

Применительно к исследуемой территории Архангельского Приморья поселения всех трех упомянутых вариантов могут рассматриваться в качестве вполне типичных, согласно коэффициенту «типичности-уникальности», при четырех признаках-атрибутах равному 7,32 % [8; 92], [9; 41]. Наконец, в единственном числе оказался населенный пункт, отнесенный к смешанному варианту («ПГ/4: [2+3]» – 2,63 %).

К числу поселений, пятно жилой застройки которых примыкает к транспортным коммуникациям (типа «ПГ/2»), относятся населенные пункты, расположенные на берегах рек (в их числе деревни Верховье [6; 83, рис. 4а], Ивановская, Икса, Ивашково и Низ (рис. 1а, 2а–б и 3в)) и озер (в их числе деревни Анташинская, Большое Матъозеро, Боровская, Погост, Будринская, Климовская, Кулемиха [6; 81–84, рис. 1а–в, 2а, 3а–3б и 5а], Ильинский Остров, Суегра и Малое Матъозеро (рис. 3а, 4а и 5а)), а также поселения, примыкающие к дорогам (деревня Ивашково (рис. 2б)).

В свою очередь в группу населенных пунктов, расположенных вблизи от коммуникаций на расстоянии до 1,0 км (поселений типа «ПГ/1»), входят деревни Икса и Ивашково (рис. 2а и 2б), расположенные вблизи рек, и деревни Анташин-

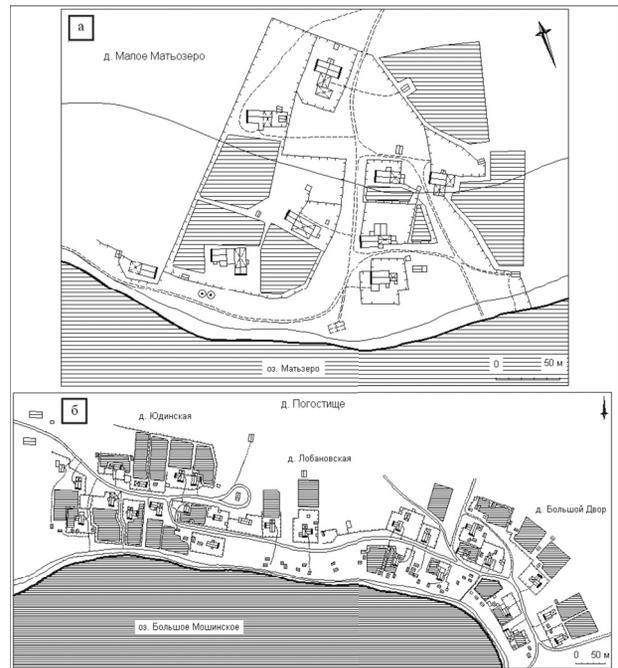


Рис. 5. Деревня Малое Матъозеро (Малое Матъозеро, Сушинино-Мадзеро) (а) и деревня Погостище (дд. Юдинская-Галашева, Лобановская-Васюка-толстаго и Большой Двор-Аксентовская) (б)

ская, Большое Матъозеро, Боровская, Кулемиха [6; 81–84, рис. 1а–в и 5а], Ивановская и Малое Матъозеро (рис. 1а и 4в), расположенные поблизости от дорог.

Наконец, из числа поселений, пересекаемых коммуникациями и относящихся к группе населенных пунктов типа «ПГ/3», могут быть упомянуты деревни Климовская, Верховье, Заозерье [6; 83–84, рис. 3б, 4а и 5б] и Сафонова Гора (рис. 4б), а также деревня Погостище (дд. Юдинская-Галашева, Лобановская-Васюка-толстаго и Большой Двор-Аксентовская), находящаяся в юго-восточной части Няндомского района (рис. 5б). Деревня расположена на пологом восточном берегу озера Мошинское, является составным элементом Мошинской групповой системы населенных мест, и на период 1991 года в ней насчитывалось двадцать жилых домов [1; 88–90, № 2535, 2506, 2473], [11; № 3530, 3529, 3528].

Не обладая на момент обследования какими-либо архитектурными доминантами, деревня Погостище относилась к подвиду нейтральных поселений. Вместе с тем необходимо отметить, что согласно сведениям, полученным от местных жителей, ранее в центре деревни Лобановская-Васюка-толстаго имелась деревянная церковь, которая одновременно стояла в направлении главной композиционной оси поселения, перед фронтом и позади жилых домов, а также в ряд с домами.

Однако следует заметить, что с точки зрения изучения роли и степени влияния того или ино-

го типа транспортных коммуникаций на процесс объемно-планировочной организации внутрипоселенческой ткани простого упоминания о характере территориально-пространственной взаимосвязи поселений с транспортными путями-артериями явно не достаточно. В этой связи несомненный интерес для осмысления эволюционных закономерностей формирования и последующего развития объемно-планировочных структур архангельско-приморских населенных пунктов представляют результаты сопоставительного анализа парных сочетаний охарактеризованных ранее типологических подгрупп и их вариантов.

Согласно полученным результатам применительно к территории Архангельского Приморья в подгруппе приречных поселений основную массу составили населенные пункты, примыкающие к рекам («ПГ2/2» – 82,33 %), хотя в роли не менее типичных образцов для исследуемой территории предстали поселения, пересекаемые реками («ПГ2/3»), составившие в итоге 16,67 %. В свою очередь в подгруппе приозерных населенных пунктов, на фоне явно типичного второго варианта («ПГ3/2» – 92,75 %), весьма существенную долю заняли поселения первого варианта, расположенные вблизи от озера на расстоянии до 1,0 км («ПГ3/1» – 6,25 %).

В то же время по отношению к придорожным населенным пунктам соотношение упомянутых выше вариантов предстало в следующем виде. Так, в отличие от приозерно-приречных поселений наиболее типичными в этой группе населенных пунктов оказались поселения, расположенные вблизи от дорог на расстоянии до 1,0 км («ПГ5/1» – 50,00 %). Лишь незначительно им уступили населенные пункты, пересекаемые дорогами («ПГ5/3» – 37,50 %). Кроме того,

в отличие от двух первых подгрупп в подгруппе придорожных населенных пунктов были выявлены поселения, примыкающие к дорогам («ПГ5/2»), и поселения смешанного варианта («ПГ5/4»), на долю каждого из которых пришлось по 6,25 %. Применительно к территории Архангельского Приморья поселения первого и третьего вариантов с полным правом могут рассматриваться в качестве вполне типичных населенных пунктов, в то время как поселения второго и четвертого вариантов явно уникальны [8; 92], [9; 41].

Наконец, на уровне подвариантов подгрупп был проведен анализ типов коммуникационных систем, предназначенных для движения колесного транспорта, и в этой связи на уровне вариантов подгрупп поселений выделено четыре типологических вариации. Согласно сложившемуся распределению наиболее широко распространенными на территории Архангельского Приморья являются поселения с проселочными транзитными дорогами («ПГ (2)» – 75,00 %), а на втором месте населенные пункты с поселковыми дорогами в виде ответвлений и тупиков («ПГ (1)» – 18,75 %). Оба упомянутых варианта согласно коэффициенту «типичности-уникальности», для трех признаков-атрибутов равному 9,76 % [8; 92], [9; 41], с полным основанием могут считаться вполне типичными для приморской территории, в то время как населенный пункт с шоссеиной дорогой-трактом («ПГ (3)» – 6,25 %) выглядит явно уникальным.

В своих последующих статьях автор планирует продолжить изложение результатов проведенного исследования морфологии традиционных сельских поселений Архангельского Приморья и уже в заключение представить окончательные выводы.

\* Окончание статьи, начало в журнале «Ученые записки Петрозаводского государственного университета». Сер. «Естественные и технические науки». 2014. № 2 (139). С. 80–86.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского гуманитарного научного фонда (грант РГНФ, 2013–2014 гг., № 13–04–12008в, «Создание многоцелевой образно-графической и текстовой базы данных по памятникам народной архитектуры Северного Поонежья для сети Интернет»).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архангельская область. Административно-территориальное деление (По состоянию на 1 января 1984 года). Архангельск: Сев.-Зап. кн. изд-во, 1984. 174 с.
2. Архангельская область. Масштаб 1:1500000. Карта составлена и подготовлена к печати фабрикой № 5 в 1986 г. М.: ГУГК при Совете Министров СССР, 1987. 1 л.
3. Да ш к о в В. А. Описание Олонецкой губернии в историческом, статистическом и естественном отношениях. СПб., 1842. 222 с.
4. Е ф и м е н к о П. Е. Заволочья Чудь. Архангельск: Губернская типография, 1869. 131 с.
5. Материалы для географии и статистики России, собранные офицерами генерального штаба. Архангельская губерния. Составил генерального штаба капитан Н. Козлов. СПб.: Печатано в типографии Э. Веймара, 1865. 342 с.
6. М е д в е д е в П. П. Морфология традиционных сельских поселений Архангельского Приморья // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2014. № 2 (139). С. 80–86.
7. М е д в е д е в П. П., Г а ш к о в И. И. Субрегиональные системы расселения Российского Севера // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2009. № 7 (101). С. 7–17.
8. М е д в е д е в П. П., Е ф л о в В. Б. Историко-архитектурная статистика как новая предметно-методологическая область исследований объектов и систем (К постановке проблемы) // Деревянное зодчество: Сб. науч. тр. Петрозаводск, 1992. С. 85–103.
9. М е д в е д е в П. П., Р а т ь к о в а Е. И. Мера оценки типичности и уникальности в историко-архитектурных исследованиях // Международная науч.-практ. конф. «Реконструкция-Санкт-Петербург-2005», 19–21 октября 2005 г.: Сб. докл. Ч. 1. СПб.: Изд-во СПбГАСУ, 2005. С. 37–41.

10. Неволин К. А. О пятинах и погостах новгородских в XVI веке, с приложением карты // Записки императорского географического общества. Кн. VIII. СПб., 1853. 650 с.
11. Олонецкий сборник. Материалы для истории, географии, статистики и этнографии Олонецкого края. Вып. 3. Издание Олонецкого Губернского Статистического Комитета. Сост. Секр. Ком. Благовещенским. Петрозаводск: Типография Губернского Правления, 1894. 556 с.
12. Платонов С. Прошлое русского Севера: Очерки по истории колонизации Поморья. Пг.: Время, 1923. 80 с.
13. Плечко Л. А. Старинные водные пути. М.: Физкультура и спорт, 1985. 104 с.
14. Томилов Ф. С. Север в далеком прошлом: Краткий исторический очерк. Архангельск: ОГИЗ, Архангельское изд-во, 1947. 97 с.

Medvedev P. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

## MORPHOLOGY OF TRADITIONAL RURAL SETTLEMENTS IN ARKHANGELSK PRIMOSH'YA

Research results on morphology of traditional rural settlements in Arkhangelsk Primosh'ya are presented in the article. Arkhangelsk Primosh'ya, located in the southwestern part of Arkhangelsk region, is a specific historical and architectural subregion of the Russian North. In the process of the research 24 objects were studied. Variability of their space-planning decisions was tracked with the use of ten leading architectural and typological parameters.

Key words: Russian North, Arkhangelsk Primosh'ye, morphology of traditional rural settlements

### REFERENCES

1. *Arkhangel'skaya oblast'. Administrativno-territorial'noe delenie (Po sostoyaniyu na 1 yanvarya 1984 goda)* [Arkhangelsk region. Administrative-territorial division (Lay out of January 1, 1984)]. Arkhangelsk, Sev.-Zap. kn. izd-vo Publ., 1984. 174 p.
2. *Arkhangel'skaya oblast'. Masshtab 1:1500000. Karta sostavlena i podgotovlena k pechati fabrikoi № 5 v 1986 g.* [Arkhangelsk region. Scale 1:1500000. The map is made and prepared for publishing by factory № 5 in 1986]. Moscow, GUGK pri Sovete ministrov SSSR Publ., 1987.
3. Dashkov V. A. *Opisanie Olonetskoj gubernii v istoricheskom, statisticheskom i estestvennom otnosheniyakh* [A description of the Olonets Province from historical, statistical and natural point of view]. St. Petersburg, 1842. 222 p.
4. Efimenko P. E. *Zavoloch'skaya Chud'*. [Zavolochskaya Chud]. Arkhangelsk, Provincial publishing house, 1869. 131 p.
5. *Materialy dlya geografii i statistiki Rossii, sobrannye ofitserami general'nogo shtaba. Arkhangel'skaya guberniya. Sostavil general'nogo shtaba kapitan N. Kozlov* [Materials for geography and statistics of Russia put together by general-staff officers. Arkhangelsk province. The captain of the General Staff N. Kozlov made]. St. Petersburg, 1865. 342 p.
6. Medvedev P. P. Morphology of traditional rural settlements of Arkhangelsk Primosh'ye [Morfologiya traditsionnykh sel'skikh poseleniy Arkhangel'skogo Primosh'ya]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences]. 2014. № 2 (139). P. 80–86.
7. Medvedev P. P., Gashkov I. I. Subregional systems of the Russian North resettlements [Subregional'nye sistemy rasseleniya Rossiyskogo Severa]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences]. 2009. № 7 (101). P. 7–17.
8. Medvedev P. P., Eflov V. B. Historical and architectural statistics as a new methodological area of research of objects and systems (To problem statement) [Istoriko-arkhitekturnaya statistika kak novaya predmetno-metodologicheskaya oblast' issledovaniy ob'ektov i sistem (K postanovke problemy)]. *Derevyannoe zodchestvo: Sb. nauch. tr.* [Wooden architecture: Collection of scientific works]. Petrozavodsk, 1992. P. 85–103.
9. Medvedev P. P., Rat'kova E. I. Assessment measure for typicality and uniqueness in historical-architectural research [Mera otsenki tipichnosti i unikal'nosti v istoriko-arkhitekturnykh issledovaniyakh]. *Mezhdunarodnaya nauch.-prakt. konf. "Rekonstruktsiya-Sankt-Peterburg-2005", 19–21 oktyabrya 2005 g. Sb. dokl. Ch. 1.* [International scientific and practical conference «Rekonstruktsiya-Sankt-Peterburg-2005», on October 19–21, 2005 Collection of reports. Part 1]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2005. P. 37–41.
10. Nevolin K. A. On the pyatinakh and country churchyards of Novgorod in the XVI century, the map is enclosed [O pyatinakh i pogostakh novgorodskikh v XVI veke, s prilozheniem karty]. *Zapiski imperatorskogo geograficheskogo obshchestva. Kn. VIII* [Notes of imperial geographical society. B. VIII]. St. Petersburg, 1853. 650 p.
11. *Olonetskiy sbornik. Materialy dlya istorii, geografii, statistiki i etnografii Olonetskogo kraja. Vyp. 3.* [Olonets collection. Materials for history, geography, statistics, and ethnography of Olonets area. Release 3]. Petrozavodsk, Tipografiya Gubernskogo Pravleniya Publ., 1894. 556 p.
12. Pлатонов С. *Proshloe russkogo Severa: Ocherki po istorii kolonizatsii Pomor'ya* [Past of the Russian North: Sketches on stories of colonization of Pomorye]. Petrograd, Vremya Publ., 1923. 80 p.
13. Плечко Л. А. *Starinnye vodnye puti* [Ancient waterways]. Moscow, Fizkul'tura i sport Publ., 1985. 104 p.
14. Томилов Ф. С. *Sever v dalekom proshlom: Kratkiy istoricheskiy ocherk* [North in distant past: Short historical sketches]. Arkhangelsk, OGIЗ, Arkhangelskoe izdatel'stvo Publ., 1947. 97 p.

Поступила в редакцию 04.06.2013

АНДРЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ ПАНЬКОВ

доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры механики композиционных материалов и конструкций аэрокосмического факультета, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, Российская Федерация)  
 mkmk\_pr@pstu.ru

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ КОМПОЗИТА С УЧЕТОМ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ СТРУКТУРЫ И МАКСВЕЛЛ-ВАГНЕРОВСКОЙ РЕЛАКСАЦИИ\*

Получено уточненное аналитическое решение для тензора эффективных проницаемостей композита с разупорядоченной полидисперсной структурой в виде разложения через известные решения для базовых структур и приведенный коэффициент корреляции, рассчитываемый на основе анализа корреляционных функций структур. Точность решения проиллюстрирована на примере расчета эффективных диэлектрических проницаемостей композита с разупорядоченной полидисперсной структурой. Проведен численный расчет и анализ влияния с учетом максвелл-вагнеровской релаксации на действительную и мнимую части эффективной диэлектрической проницаемости композита полимер/феррит с различными полидисперсными структурами величины наполнения ферритовыми волокнами и частоты приложенного электрического поля.

Ключевые слова: композит, эффективные свойства, диэлектрическая проницаемость, максвелл-вагнеровская релаксация

### ВВЕДЕНИЕ

Гетерогенные радиотехнические материалы благодаря своим уникальным физико-механическим свойствам находят широкое применение в различных областях науки и техники. Композиты находят применение в тех случаях, когда традиционные материалы: кристаллы, керамика, сплавы – не обеспечивают необходимого комплекса требуемых характеристик. Возможность оптимизации и управления структурой композитов открывает путь к созданию новых материалов с наперед заданными свойствами. В результате взаимодействия на микроуровне элементов структуры на макроуровне композита возникают качественно новые эффекты по сравнению с однородными материалами. Эффективные свойства композита определяются из условия, чтобы однородное тело с такими свойствами взаимодействовало с приложенным, например, электромагнитным полем на макроуровне так же, как микронеоднородное тело той же формы из композита. Нерегулярный характер реальных структур композитов обуславливает необходимость решения этой задачи в вероятностной постановке.

### 1. Корреляционные функции полидисперсных структур

Рассмотрим нормированные корреляционные функции для разупорядоченной полидисперсной структуры [3] на рис. 1б

$$k_{11}(\mathbf{p}) = \frac{1}{D_{11}} \langle i_1'(\mathbf{r}) i_1'(\mathbf{r}_1) \rangle \quad (1)$$

и для вспомогательных структур на рис. 1а, в соответствии

$$k_{11}^p(\mathbf{p}) = \frac{1}{D_{11}^p} \langle i_1^{p'}(\mathbf{r}) i_1^{p'}(\mathbf{r}_1) \rangle, \quad (2)$$

$$k_{11}^{sc}(\mathbf{p}) = \frac{1}{D_{11}^s} \langle i_1^{sc'}(\mathbf{r}) i_1^{sc'}(\mathbf{r}_1) \rangle, \quad (3)$$

где начальные значения:  $k_{11}(0) = k_{11}^p(0) = k_{11}^{sc}(0) = 1$ , дисперсии:

$$D_{11} = D_{11}^p = D_{11}^{sc} = v_1 (1 - v_1) \quad (4)$$

с учетом равенств  $v_1 = v_1^p = v_1^{sc}$  объемных долей волокон во всех трех структурах,  $\langle \dots \rangle$  – оператор осреднения по представительной области композита  $V$  с учетом статистической однородности и эргодичности [2] структур, вектор разности

$$\mathbf{p} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}; \quad (5)$$

здесь и далее верхние индексы  $p, sc$  указывают на принадлежность к вспомогательным полидисперсным структурам на рис. 1а и рис. 1в соответственно.

Распределение размеров радиусов поперечных сечений однотипных цилиндрических ячеек варьируется в широком диапазоне, включающем и бесконечно малые значения. Считаем, что точка  $\mathbf{r}$  случайным образом лежит внутри некоторой фиксированной цилиндрической ячейки с радиусом поперечного сечения  $R$  и радиус поперечного сечения содержащегося в ней волокна  $r_0$  для полидисперсной структуры на рис. 1а

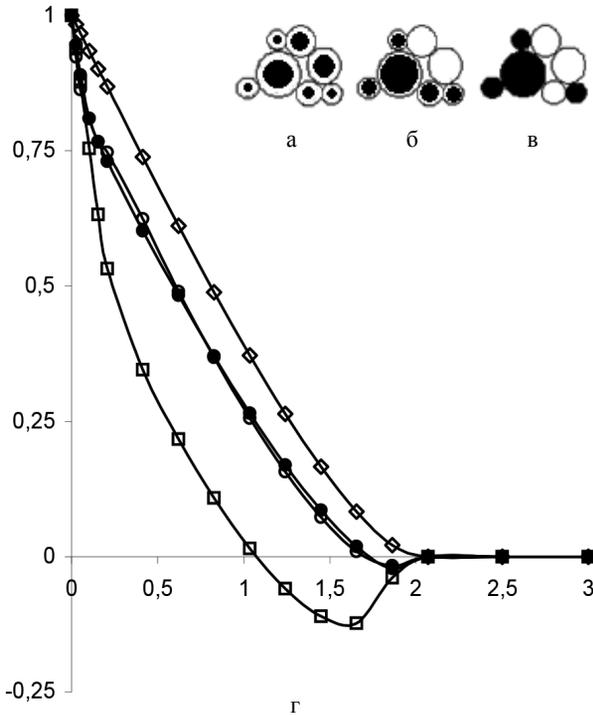


Рис. 1. Фрагменты (а)–(в), нормированные корреляционные функции  $\langle \gamma \rangle$  полидисперсных структур

$r_v = R\sqrt{v_1}$  и для структуры на рис. 1б  $r_v = \frac{R}{1+\delta}$ , где заданная величина относительной толщины прослойки матрицы  $\delta = \frac{R-r_v}{r_v}$ . В произвольных ячейках полидисперсной структуры на рис. 1а волокна расположены в них с вероятностью  $p_0 = 1$ , для структуры на рис. 1в – с вероятностью  $p_0 = v_1$ , для структуры на рис. 1б – с вероятностью  $p_0 \in (v_1; 1)$ . Для структуры на рис. 1б величина относительной толщины прослойки матрицы  $\delta$  может быть рассчитана  $\delta = \sqrt{\frac{p_0}{v_1}} - 1$  через заданные значения величин вероятности  $p_0$  и относительной объемной доли волокон  $v_1 \in (1; v_{1\max})$ . Максимальное значение объемной доли волокон в композите  $v_{1\max} = p_0$ , и для этого предельного случая (рис. 1в) прослойка  $\delta = 0$ .

Численный расчет двухточечных корреляционных функций (1)–(3) проведем на основе алгоритма, изложенного в [10], [12]. На рис. 1г представлены результаты расчета нормированных корреляционных функций:  $k_{11}(\rho)$  (●) для структуры на рис. 1б при  $p_0 = 0,8$ ,  $k_{11}^p(\rho)$  (□) для структуры на рис. 1а,  $k_{11}^{sc}(\rho)$  (◇) для структуры на рис. 1в, расстояние между точками  $\rho = |\mathbf{p}|$  (9). Дополнительно на рис. 1г приведен результат

аппроксимации (○) нормированной корреляционной функции

$$k_{11}(\rho) \approx p \cdot k_{11}^p(\rho) + (1-p) \cdot k_{11}^{sc}(\rho) \quad (6)$$

через функции  $k_{11}^p(\rho)$  (□),  $k_{11}^{sc}(\rho)$  (◇) и аппроксимирующий коэффициент  $p$  – приведенный коэффициент корреляции.

Рассмотрим метод корреляционных составляющих на примере вычисления тензора эффективных диэлектрических проницаемостей  $\lambda^*$  композита с разупорядоченной полидисперсной структурой (см. рис. 1б) через известные решения для базовых структур (см. рис. 1а, в) на основе разложения (6) нормированной корреляционной функции.

## 2. Метод корреляционных составляющих

*Постановка задачи.* Для микро неоднородной представительной области  $\mathbf{V}$  уравнение непрерывности и краевые условия

$$[\lambda_{ij}(\mathbf{r})\phi_{,i}(\mathbf{r})]_{,j} = 0, \quad \phi_{,\Gamma} = -\hat{E}_{\Gamma}^* r_i \quad (7)$$

относительно искомого поля электрического потенциала  $\phi(\mathbf{r})$ , где коэффициенты

$$\lambda(\mathbf{r}) = \sum_{f=1}^2 i_f(\mathbf{r}) \lambda_f \quad (8)$$

дифференциального оператора – это быстро осциллирующие функции координат  $\mathbf{r}$ ; индикаторная функция  $i_f(\mathbf{r}) = 1, \mathbf{r} \in \mathbf{V}_f$ ;  $i_f(\mathbf{r}) = 0, \mathbf{r} \notin \mathbf{V}_f$ ;  $\lambda_f$  – тензор диэлектрических проницаемостей  $f$ -й фазы и  $\mathbf{V}_f$  – область  $f$ -й фазы в  $\mathbf{V} = \bigcup_{f=1}^2 \mathbf{V}_f$  (считаем, что  $f = 1$  для волокон и  $f = 2$  для матрицы композита);  $\langle i_f \rangle = v_f$  – относительное объемное содержание фазы  $f$  в композите,  $\hat{\mathbf{E}}^* = \langle \hat{\mathbf{E}} \rangle$  – заданный вектор однородной напряженности электрического поля или «макронапряженности» композита. На межфазных поверхностях выполняются условия идеального контакта: непрерывность потенциала и нормальной к поверхности составляющей индукции электрического поля.

Решение для поля перемещений

$$\phi(\mathbf{r}) = (-r_i + h_i(\mathbf{r})) \hat{E}_i^* \quad (9)$$

и для тензора эффективных диэлектрических проницаемостей  $\lambda^*$  композита

$$\lambda_{ij}^* = \langle \lambda_{ij} \rangle - \langle \lambda'_{in} h_{j,n} \rangle \quad (10)$$

сводится к поиску решения для поля  $\mathbf{h}(\mathbf{r})$ . Искомый тензор  $\lambda^*$  входит в определяющие соотношения

$$\langle \hat{D}_i \rangle = \lambda_{ij}^* \langle \hat{E}_j \rangle \quad (11)$$

на макроуровне композита.

Эффективные диэлектрические проницаемости. Для наглядности ограничимся в традиционном решении [2], [4], [9] для пульсаций электрического потенциала

$$\phi'(\mathbf{r}) = h_i(\mathbf{r})\widehat{E}_i^* \quad (12)$$

лишь «корреляционным приближением» или первым членом ряда

$$h_i(\mathbf{r}) = \int_{\mathbf{v}} G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) [\lambda'_{ij}(\mathbf{r}_1)]_{,j} d\mathbf{r}_1 + \dots; \quad (13)$$

пульсации напряженностей

$$\widehat{E}'_n(\mathbf{r}) \equiv -\phi'_{,n}(\mathbf{r}) = -h_{i,n}(\mathbf{r})\widehat{E}_i^*,$$

где

$$h_{i,n}(\mathbf{r}) = \int_{\mathbf{v}} G_{,n}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) [\lambda'_{ij}(\mathbf{r}_1)]_{,j} d\mathbf{r}_1 + \dots \quad (14)$$

с учетом (12), (13); функция Грина  $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1)$  является решением уравнения

$$g_{ij} G_{,ij}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) = -\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1) \quad (15)$$

и вместе со своими производными обращается на бесконечности в ноль,  $\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1)$  – обобщенная дельта-функция Дирака,  $\mathbf{g}$  – тензор диэлектрических проницаемостей «среды сравнения» [9].

Уточненное решение для тензора  $\lambda^*$  получим на основе аппроксимации (6) нормированной корреляционной функции  $k_{11}(\mathbf{p})$ . Для этого домножим со сверткой по двум парам индексов левую и правую части уравнения (14) на пульсации  $\lambda'(\mathbf{r})$  и осредним

$$\langle \lambda'_{kn} \widehat{E}'_n \rangle = - \int_{\mathbf{v}} G_{,n}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) \langle \lambda'_{kn}(\mathbf{r}) \lambda'_{ij}(\mathbf{r}_1) \rangle_{,j} d\mathbf{r}_1 \widehat{E}_i^* + \dots \quad (16)$$

Выражение в левой части (16) представим в виде

$$\langle \lambda'_{kn} \widehat{E}'_n \rangle = (\lambda_{ki}^* - \langle \lambda_{ki} \rangle) \widehat{E}_i^* \quad (17)$$

через искомый тензор эффективных диэлектрических проницаемостей  $\lambda^*$  композита с разупорядоченной полидисперсной структурой. В полученном уравнении

$$\begin{aligned} & (\lambda_{ki}^* - \langle \lambda_{ki} \rangle) \widehat{E}_i^* = \\ & = -v_1(1-v) \overline{\lambda}_{ij} \overline{\lambda}_{kn} \overline{C}_{ksmn} \int_{\mathbf{v}} G_{,n}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) \frac{\partial}{\partial r_{(1)s}} k_{11}(\mathbf{p}) d\mathbf{r}_1 \widehat{E}_i^* + \dots \end{aligned} \quad (18)$$

используем аппроксимацию (6) нормированной корреляционной функции  $k_{11}(\mathbf{p})$  через корреляционные функции  $k_{11}^p(\mathbf{p})$ ,  $k_{11}^{sc}(\mathbf{p})$  традиционных полидисперсных структур (рис. 1а, в). Таким образом, из (18) получим

$$\begin{aligned} & (\lambda_{ki}^* - \langle \lambda_{ki} \rangle) \widehat{E}_i^* = \\ & = p \cdot \left[ -v_1(1-v) \overline{\lambda}_{ij} \overline{\lambda}_{kn} \overline{C}_{ksmn} \int_{\mathbf{v}} G_{,n}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) \frac{\partial}{\partial r_{(1)s}} k_{11}^p(\mathbf{p}) d\mathbf{r}_1 \widehat{E}_i^* + \dots \right] + \\ & + (1-p) \cdot \left[ -v_1(1-v) \overline{\lambda}_{ij} \overline{\lambda}_{kn} \overline{C}_{ksmn} \int_{\mathbf{v}} G_{,n}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) \frac{\partial}{\partial r_{(1)s}} k_{11}^{sc}(\mathbf{p}) d\mathbf{r}_1 \widehat{E}_i^* + \dots \right] \end{aligned}$$

или

$$\lambda^* - \langle \lambda \rangle = p \cdot (\lambda^{p*} - \langle \lambda \rangle) + (1-p) \cdot (\lambda^{sc*} - \langle \lambda \rangle). \quad (19)$$

В результате из (19) получим искомое уточненное решение

$$\lambda^* = p \cdot \lambda^{p*} + (1-p) \cdot \lambda^{sc*} \quad (20)$$

для тензора  $\lambda^*$  эффективных диэлектрических проницаемостей композита с разупорядоченной полидисперсной структурой (рис. 1б), приведенный коэффициент корреляции  $P$  учитывает реальный вид корреляционных функций случайной структуры (6). Известные решения  $\lambda^{p*}$ ,  $\lambda^{sc*}$  в (20) могут быть получены как частные случаи обобщенного сингулярного приближения [9], в котором тензор  $\mathbf{g}$  (15) диэлектрических проницаемостей среды сравнения последовательно приравнен к тензорам  $\lambda_2$ ,  $\lambda^{sc*}$  соответственно. Учет проводимостей  $\gamma_f$  фаз  $f = 1, 2$  и частоты  $\omega$  приложенного электрического поля через комплексную форму записи [1], [5], [6], [7], [8], [11]

$$\lambda_f = \lambda'_f - i \frac{\gamma_f}{\omega} \quad (21)$$

тензоров диэлектрических проницаемостей  $\lambda_f$  фаз с действительными частями  $\lambda'_f$  приводит к комплексному виду

$$\lambda^* = \lambda'^* - i \frac{\gamma^*}{\omega} \quad (22)$$

тензора эффективных диэлектрических проницаемостей композита  $\lambda^*$  и, как следствие, к возникновению на макроуровне композита дисперсии и энергетических потерь в переменных электрических полях, известных под названием «максвелл-вагнеровская релаксация».

Отметим, что решение (20) является уточнением известной формулы

$$\lambda^* = p\lambda^{p*} + (1-p)\lambda^{sc*}, \quad (23)$$

полученной ранее [4] в обобщенном сингулярном приближении с учетом лишь одноточечных моментов различных порядков разупорядоченных (квазипериодических [4]) случайных структур, где коэффициент корреляции (периодичности)

$$p \equiv \frac{v_{11} - v_1^2}{v_1(1-v_1)} \quad (24)$$

рассчитывается через корреляционный момент  $v_{11} = \langle i_1 i_1^p \rangle$ , геометрический смысл которого – относительное объемное содержание области пересечения включений при мысленном наложении разупорядоченной структуры на неразупорядоченную (периодическую) структуру.

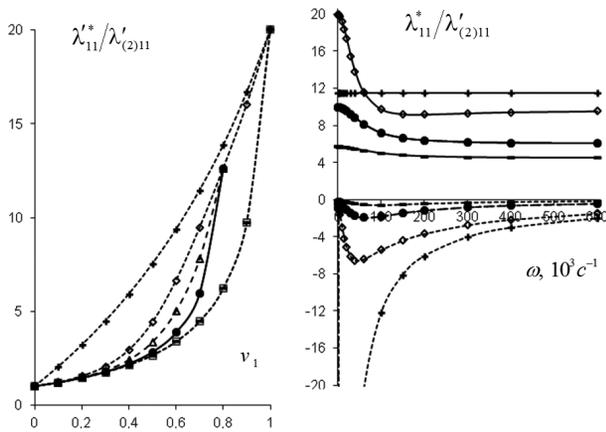


Рис. 2. Концентрационные (а) и частотные (б) зависимости действительной  $\lambda'_{11}$  и мнимой  $\lambda''_{11}$  частей эффективной диэлектрической проницаемости

### 3. Численный расчет

На рис. 2 представлены результаты расчета действительных  $\lambda'_{11}$  и мнимых  $\lambda''_{11}$  частей эффективной диэлектрической проницаемости  $\lambda_{11}$  в плоскости изотропии  $r_1 r_2$  композита – полиэтилен с ферритовыми волокнами с разупорядоченной полидисперсной структурой (рис. 1в) (○) по формуле (20) с использованием приведенного коэффициента корреляции  $P$  в зависимости от относительного объемного содержания  $v_1$  керамических волокон в полимерной матрице (рис. 2а) и в зависимости от частоты  $\omega$  электрического поля (рис. 2б) в сравнении с точным решением (●) по «трехфазной модели» [3]: волокно с прослойкой матрицы в эффективной среде для заданного численного значения параметра  $p_0 = 0,8$ . На рис. 2б частотные зависимости действительной  $\lambda'_{11}$  и мнимой  $\lambda''_{11}$  частей обозначены соответственно сплошной и пунктирной линиями. Диэлектрическая проницаемость  $\lambda'_{(2)11} = 0,5\lambda_0$  и проводимость  $\gamma_{(2)11} = 10^{-10}$  (Ом×м)<sup>-1</sup> полиэтилена [7], для феррита:  $\gamma_{(1)11} = 10^{-5}$  (Ом×м)<sup>-1</sup> [5],  $\lambda'_{(1)11} = 10\lambda_0$ , где диэлектрическая проницаемость вакуума  $\lambda_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м. Графики на рис. 2а построены для предельного случая  $\omega \rightarrow \infty$  и здесь мнимая часть  $\lambda''_{11} \rightarrow 0$  (22), на рис. 2б – для объемной доли волокон  $v_1 = 0,7$ . Дополнительно на рис. 2а для сравнения приведены результаты расчета (△) (23) с использованием коэффициента корреляции  $p$  (24) и для базовых полидисперсных структур на рис. 1а (□) и рис. 1б (◇). Нижняя граница (–) Хашина – Штрикмана [1] совпадает с базовым решением (□), а верхняя граница (+)

совпадает при инверсии свойств фаз композита с нижней границей (–).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен метод корреляционных составляющих для решения стохастической краевой задачи стационарного процесса протекания, например, электро- и магнитопроницаемости, тепло- и электропроводности, диффузии в композите со случайной структурой, заданной через разупорядочивание некоторой начальной «более простой» случайной структуры. На основе анализа корреляционных функций искомое решение краевой задачи представлено через расчет соответствующих отклонений от считающегося известным решения для неразупорядоченной, в частном случае периодической, случайной структуры. Получено уточненное аналитическое решение для тензора эффективных проницаемостей композита с разупорядоченной полидисперсной структурой в виде разложения через известные решения для базовых структур и введенный коэффициент корреляции, рассчитываемый на основе анализа корреляционных функций случайной структуры. Точность решения проиллюстрирована на примере расчета эффективных диэлектрических проницаемостей композита с разупорядоченной полидисперсной структурой. Проведен численный расчет и анализ влияния с учетом максвелл-вагнеровской релаксации на действительную  $\lambda'_{11}$  и мнимую  $\lambda''_{11}$  части эффективной диэлектрической проницаемости  $\lambda_{11}$  композита полимер/феррит с различными полидисперсными структурами величины наполнения ферритовыми волокнами  $v_1$  и частоты  $\omega$  приложенного электрического поля. Мнимая часть  $\lambda''_{11}$  эффективной диэлектрической проницаемости обусловлена учетом проводимостей  $\gamma_{(f)11}$  фаз композита и в пределе:  $\lambda''_{11} \rightarrow 0$ , когда  $\gamma_{(f)11} \rightarrow 0$  или  $\omega \rightarrow 0$ . Для частотных зависимостей  $\lambda_{11}^*(\omega)$  полидисперсного композита характерна глубокая нормальная релаксация, обусловленная тем, что на высоких частотах не успевает накапливаться объемный заряд вблизи межфазных границ [6], [7], [8]. При нормальной релаксации абсолютное значение действительной части  $\lambda'_{11}$  монотонно уменьшается с ростом частоты, тогда как для мнимой части характерен четко выраженный релаксационный экстремум (см. рис. 2б) и могут быть рассчитаны время релаксации  $\tau_k$  и релаксационная частота  $\omega_k = 1/\tau_k$ , соответствующая экстремуму мнимой части  $\lambda''_{11}$  эффективной диэлектрической проницаемости.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-01-96004 p\_урал\_a.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов А. П. Электродинамика композитных материалов. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 208 с.
2. Волков С. Д., Ставров В. П. Статистическая механика композитных материалов. Минск: Изд-во Белорус. гос. ун-та, 1978. 208 с.
3. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. М.: Мир, 1982. 334 с.
4. Паньков А. А. Механика пьезокомпозитов. Электро- и магнитоупругость неоднородных сред. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 476 с.
5. Петров В. М., Бичурин М. И., Srinivasan G. Максвелл-вагнеровская релаксация в магнитоэлектрических композиционных материалах // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. № 8. С. 81–87.
6. Соцков В. А. Экспериментальная оценка концентрационной зависимости действительной части диэлектрической проницаемости в неупорядоченной макросистеме парафин-графит // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. № 12. С. 1–5.
7. Турик А. В., Радченко Г. С. Гигантский пьезоэлектрический эффект в слоистых композитах сегнетоэлектрик-полимер // Физика твердого тела. 2003. Т. 45. № 9. С. 1676–1679.
8. Турик А. В., Радченко Г. С., Чернобабов А. И., Турик С. А. Диэлектрическая проницаемость полимерных матриц, содержащих изолированные включения: гигантское диэлектрическое усиление вместо коллективного резонанса // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 79. № 9. С. 512–514.
9. Шермергор Т. Д. Теория упругости микroneоднородных сред. М.: Наука, 1977. 399 с.
10. Monetto I., Drugan W. J. A micromechanics-based nonlocal constitutive equation for elastic composites containing randomly oriented spheroidal heterogeneities // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2004. Vol. 52. P. 359–393.
11. Pan'kov A. A. Maxwell-wagner relaxation in fibrous polydisperse magnetoelectric piezocomposites // Mechanics of Composite Materials. 2013. Vol. 49. № 1. P. 45–50.
12. Torquato S., Stell G. Microstructure of two-phase random media. I. The n-point probability functions // Journal of Chemical Physics. 1982. Vol. 77. № 4. P. 2071–2077.

---

Pan'kov A. A., State National Research Politechnical University of Perm (Perm, Russian Federation)

**COMPOSITE'S DIELECTRIC PERMEABILITY INCLUSIVE OF ITS CORRELATED STRUCTURAL FUNCTION AND MAXWELL-WAGNER RELAXATION**

The specified analytical decision for the tensor of effective dielectric permeability of a composite with a disordered polydisperse structure in the form of decomposition through known decisions for basic structures and the specified coefficient of correlation is received. The correlation coefficient was obtained on the basis of the analysis of structures' correlation functions. The calculation accuracy is illustrated on the example of calculation of effective dielectric permeability of the composite with disordered polydisperse structure. Numerical calculations and the influence analysis taking into account Maxwell-Wagner relaxation on the real and imaginary parts of effective dielectric permeability of the polymer/ferrite composite with various polydisperse structures filled up by different volumes of ferrite fibers and frequencies of enclosed electric fields are carried out.

Key words: composite, effective properties, dielectric permeability, Maxwell-Wagner relaxation

## REFERENCES

1. Vinogradov A. P. *Elektrodinamika kompozitnykh materialov* [Electrodynamics of composite materials]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2001. 208 p.
2. Volkov S. D., Stavrov V. P. *Statisticheskaya mekhanika kompozitnykh materialov* [Statistical mechanics of composite materials]. Minsk, Izd-vo Belorus. gos. un-ta, 1978. 208 p.
3. Kristensen R. *Vvedenie v mekhaniku kompozitov* [Introduction into mechanics of composites]. Moscow, Mir Publ., 1982. 334 p.
4. Pan'kov A. A. *Mekhanika p'ezokompozitov. Elektro- i magnitoupugost' neodnorodnykh sred* [Mechanics of piezocomposites. Electro- and magnetoelasticity of non-uniform environments]. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 476 p.
5. Petrov V. M., Bichurin M. I., Srinivasan G. Maxwell-Wagner relaxation in magnetoelectric composite materials [Maksvell-vagnerovskaya relaksatsiya v magnitoelektricheskikh kompozitsionnykh materialakh]. *Pis'ma v ZhTF* [JETP Letters]. 2004. Vol. 30. № 8. P. 81–87.
6. Sotskov V. A. Experimental assessment of concentration dependence of the real part of dielectric permeability in the disordered macrosystem of paraffin-graphite [Eksperimental'naya otsenka kontsentratsionnoy zavisimosti deystvitel'noy chasti dielektricheskoy pronitsaemosti v neuporyadochennoy makrosisteme parafin-grafit]. *Pis'ma v ZhTF* [JETP Letters]. 2004. Vol. 30. № 12. P. 1–5.
7. Turik A. V., Radchenko G. S. Huge piezoelectric effect in layered composites of ferroelectric material-polymer [Gigantskiy p'ezoelektricheskiiy effekt v sloistyykh kompozitakh segnetoelektrik-polimer]. *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State]. 2003. Vol. 45. № 9. P. 1676–1679.
8. Turik A. V., Radchenko G. S., Chernobabov A. I., Turik S. A. Dielectric permeability of the polymeric matrices containing isolated inclusions: huge dielectric strengthening instead of collective resonance [Dielektricheskaya pronitsaemost' polimernykh matrits, sodержashchikh izolirovannye vklucheniya: gigantskoe dielektricheskoe usilenie vmesto kolektivnogo rezonansa]. *Pis'ma v ZhTF* [JETP Letters]. 2004. Vol. 79. № 9. P. 512–514.
9. Shermergor T. D. *Teoriya uprugosti mkroneodnorodnykh sred* [Theory of elasticity of micro non-uniform media]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 399 p.
10. Monetto I., Drugan W. J. A micromechanics-based nonlocal constitutive equation for elastic composites containing randomly oriented spheroidal heterogeneities // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2004. Vol. 52. P. 359–393.
11. Pan'kov A. A. Maxwell – Wagner relaxation in fibrous polydisperse magnetoelectric piezocomposites // Mechanics of Composite Materials. 2013. Vol. 49. № 1. P. 45–50.
12. Torquato S., Stell G. Microstructure of two-phase random media. I. The n-point probability functions // Journal of Chemical Physics. 1982. Vol. 77. № 4. P. 2071–2077.

Поступила в редакцию 30.10.2013

**АЛЕКСАНДР РОМОЛДОВИЧ УРБАН**

магистр прикладной математики и информатики, программист, Центр ПетрГУ-Метсо Систем Автоматизации, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*alexrurban@gmail.com*

**ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ КУЗНЕЦОВ**

доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*kuznetsov@psu.karelia.ru*

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ УЧЕТА СРОКОВ ПРОДУКЦИИ В ЗАДАЧЕ РАСКРОЯ ТАМБУРОВ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИН

Представлено описание комплекса математических моделей и методов для решения задачи учета директивных сроков отгрузки продукции при раскросе съемов тамбуров бумагоделательных машин, направленной на экономное использование и сокращение потерь материальных ресурсов, снижение объема (доли) бракованной продукции, повышение оперативности и качества управления производством.

Ключевые слова: раскрой бумажного полотна, динамическое программирование, линейное программирование

### ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваемая задача относится к классу ставших классическими задач раскроя съемов тамбура бумажного полотна на рулоны требуемых форматов [1]. Она может быть сформулирована как задача поиска множества планов раскроя, обеспечивающего выработку всей продукции в требуемых количествах с наименьшими отходами в форме кромок материала. В рамках исследования предусмотрен расчет оптимальной загрузки оборудования и распределения работ между различными бумагоделательными машинами (БДМ) с учетом плотности, диаметра и качества продукции, объемов выработки и возможных планов раскроя. План раскроя тамбура представляет собой некоторый набор одновременно выкраиваемых форматов. При этом сумма длин рулонов должна быть меньше ширины полотна на величину кромки, определяющую долю потерь. Важной особенностью выполненной разработки является наиболее полный учет ряда производственных и технологических ограничений, в число которых входят требования к качеству и плотности бумаги, определенные радиусы рулонов разных заказов, отклонения объемов поставок, сроки выработки продукции и т. д. [6].

Сложность задачи распределения заказов между БДМ с учетом их спецификаций, производственных возможностей оборудования, размеров тамбура и возможных планов раскроя обусловлена ее комбинаторными особенностями: планирование выработки десятка форматов на 2–4 машинах допускает тысячи вариантов планов раскроя

и еще больше – их комбинаций, обеспечивающих нужные объемы продукции [6].

Известны системы планирования раскроев, выполняющие расчеты с учетом некоторых из перечисленных факторов, в отличие от разработанных авторами системы, которая реализует все перечисленные требования и обеспечивает оптимизацию планов за сравнительно малое время. Так, с использованием методов решения задач планирования производства предприятий лесопромышленного комплекса и целлюлозно-бумажной промышленности преподавателем кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета ПетрГУ Р. В. Вороновым была создана и внедрена программная система планирования производства бумаги. Данная система учитывает большинство требуемых технологических параметров и является достаточно мощным инструментом для составления требуемых планов раскроя [2].

Также необходимо уделить внимание разработкам института растительных полимеров по созданию подобных систем. Конечно, их разработки направлены больше на химико-технологические особенности производства бумаги (например, «Химия мокрой части бумагоделательных машин»), однако у них есть опыт по созданию и внедрению систем оптимизации раскроя бумажного полотна [8].

В основном на предприятиях преобладают самописные программы (во многом на базе Excel) и учетные системы (R3, Ахарта). В данных системах никакой речи об оптимизации не идет, все раскрои делаются «ручкой на листоч-

ке». Редко, но встречаются крупные системы, такие как HoneyWell или Tietoenator, но даже они не учитывают ряд важных ограничений (массовость производства, возможность склейки рулонов и т. д.), также серьезным минусом является сильная ориентированность систем на их оборудование.

### СОДЕРЖАНИЕ ЗАДАЧИ

Рассмотрим основные характеристики рассматриваемых в задаче объектов: продукции, заказов, бумагоделательных машин и планов раскроя.

Требования к продукции характеризуются следующими параметрами:

- Формат продукции (рулона) (см).
- Диаметр – диапазон (см).
- Минимальный и максимальный объемы (т).
- Стандартная масса ( $г/м^2$ ).
- Объемная плотность ( $т/м^3$ ).
- Край/Не край – определяет положение рулона с краю или в середине полотна.
- Список БДМ, на которых может вырабатываться продукция данного заказа.
- Дата (директивный срок) готовности.

Согласно условиям договора заказы определяют объем и номенклатуру необходимой продукции, причем заказ может включать один или несколько форматов. Однако, не умаляя общности, заказу удобно сопоставить один определенный формат, а более сложный, комплексный заказ рассматривать как совокупность элементарных. Многие считают нецелесообразным указание объемов поставки продукции нижней и верхней границами, справедливо полагая, что заказ все равно предстоит выполнить полностью. В связи с этим необходимо отметить, что подобная форма описания заказа полезна не только ввиду возможности определенных отклонений объемов поставки продукции, но и при подборе форматов, полезных для дополнения планов раскроя. Подобным образом можно использовать ходовые форматы или форматы несрочных заказов, полагая нижнюю границу объема заказа равной нулю. Выпуск такой продукции будет запланирован лишь в том случае, когда ее формат удачно дополнит какой-либо из планов раскроя [3], [4].

В рамках модели характеристики бумагоделательных машин таковы:

- Ширина полотна (тамбура) (см).
- Максимальная кромка (максимальное отклонение ширины раскроя от ширины полотна) (см).
- Диаметр гильзы – диаметр цилиндра, на который наматывается бумажное полотно рулона (см).
- Производительность (тонн в сутки).
- Количество ножей продольно-резательной машины.

- Минимальная и максимальная (в %) загруженности от номинальной производительности.

Перечислим характеристики раскроя:

- Ширина раскроя не должна превосходить ширину тамбура соответствующей БДМ.
- Следует учитывать, что все форматы в составе раскроя характеризуются одинаковой плотностью, одинаковым диаметром.

Управляемые параметры объектов связаны рядом соотношений, регламентирующих работу агрегатов и выпуск продукции:

- В составе планов раскроя могут присутствовать только допустимые виды продукции для данной БДМ.
- Соответствие интенсивностей планов раскроя БДМ ресурсам ее производительности. Допускается планирование работы БДМ с различной производительностью и определение времени ее работы указанием нижней и верхней границ.
- Соответствие объемов производства продукции.

В качестве критерия эффективности выберем согласованные по объемам выработки планы раскроя для каждой бумагоделательной машины, обеспечивающие минимальные отходы для вторичной переработки [5].

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ

Для построения математической модели введем следующие обозначения. В первую очередь определим индексные множества:

$N$  – множество заказов продукции,  $i \in N$ ;  
 $M$  – множество бумагоделательных машин,  $j \in M$ ;  
 $T$  – множество периодов времени,  $t \in T$ .  
 Определяется на основании множества директивных сроков готовности продукции следующим образом. Пусть  $D = \{D_i, i \in N\}$  – множество директивных сроков продукции. Тогда отсортируем и удалим одинаковые элементы из данного множества, получив такую последовательность индексов  $\{i_1, i_2, \dots, i_r\}$ , что  $D_{i_1} < D_{i_2} < \dots < D_{i_r}$ . На основании этого определим искомое множество периодов времени:

$P = \{[P_0, D_q], q = i_r, t \in T\}$ , где  $P_0$  – дата начала планирования;

$K$  – множество способов раскроя бумажного полотна,  $k \in K$ ;

$K_j$  – множество способов раскроя бумажного полотна, выполняемых на бумагоделательной машине с индексом  $j$ ;

$K_{jt}$  – множество способов раскроя бумажного полотна, выполняемых на бумагоделательной машине с индексом  $j$  в период времени  $t$ .

$$K = \bigcup_{j \in M} K_j, K_j = \bigcup_{t \in T} K_{jt}.$$

Введем параметры задачи:

$b''_{jt}$ ,  $B''_{jt}$  – минимальная и максимальная выработки (в тоннах) бумагоделательной машины

с индексом  $j$  в течение периода  $t$  с учетом минимальной и максимальной загруженности от номинальной производительности БДМ;

$a_{ik}$  – доля выработки продукции заказа с индексом  $i$  при использовании раскроя с индексом  $k$ ;

$e_{jtk}$  – признак выработки раскроя с индексом  $k$  на бумагоделательной машине с индексом  $j$  в течение периода  $t$  ( $e_{jtk} \in \{0, 1\}$ );

$p_j$  – производительность бумагоделательной машины с индексом  $j$ ;

$b'_i, B'_i$  – минимальный и максимальный объемы выработки заказа с индексом  $i$ ;

$v_k, V_k$  – минимальный и максимальный объемы выработки одного наката, соответствующего раскрою с индексом  $k$ , с учетом минимального и максимального диаметров;

$c_k$  – доля потерь полотна при использовании раскроя с индексом  $k$  (в виде кромки);

$c'_i, C'_i$  – оценки убытка предприятия в случае недопоставки и перевыполнения соответственно для заказа с индексом  $i$ ;

$c''_{jt}, C''_{jt}$  – оценки убытка предприятия в случае отклонения от минимальной и максимальной загруженности БДМ соответственно с индексом  $j$  в течение периода  $t$ ;

$c^z$  – оценка убытка предприятия в случае невыполнения условия равномерной загрузки бумагоделательных машин.

Введем неизвестные задачи:

$f'_i, F'_i$  – объемы недопоставки и перевыполнения (отклонение объема выработки от минимального и максимального объемов выпуска продукции) для заказа с индексом  $i$ ;

$f''_{jt}, F''_{jt}$  – отклонения от минимальной и максимальной загруженности БДМ с индексом  $j$  в течение периода  $t$ ;

$x_k$  – объем выработки раскроя с индексом  $k$ ;

$z$  – ограничивающая переменная, используемая для равномерной загруженности бумагоделательных машин.

Модель имеет вид:

$$\sum_{k \in K} c_k x_k + \sum_{i \in N} (c'_i f'_i + C'_i F'_i) + \sum_{j \in M} \sum_{t \in T} (c''_{jt} f''_{jt} + C''_{jt} F''_{jt}) + c^z z \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$b'_i - f'_i \leq \sum_{k \in K} a_{ik} x_k \leq B'_i + F'_i, \quad i \in N; \quad (2)$$

$$b''_{jt} - f''_{jt} \leq \sum_{k \in K_{jt}} e_{jtk} x_k \leq B''_{jt} + F''_{jt}, \quad j \in M, \quad t \in T; \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K_j} \frac{x_k}{p_j} \leq z, \quad j \in M; \quad (4)$$

$$x_k \in \bigcup_{p \in Z^+} [p \cdot v_k, p \cdot V_k], \quad k \in K; \quad (5)$$

$$x_k \geq 0, \quad k \in K; \quad (5')$$

$$f'_i \geq 0, F'_i \geq 0, f''_{jt} \geq 0, F''_{jt} \geq 0, z \geq 0, \quad (6)$$

$$i \in N, j \in M, t \in T$$

### ОБ АЛГОРИТМЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задачу (1)–(5), (6) назовем основной, ее ослабление (1)–(4), (5'), (6) – вспомогательной задачей линейного программирования. Решение вспомогательной задачи производится посредством алгоритма симплекс-метода. Дальнейшая корректировка решения для соблюдения ограничения (5), соответствующего условию допустимости объемов выработки съемов при целом количестве накатов, выполняется с помощью авторских методов исследования операций, которым будет посвящена отдельная статья.

Важно отметить, что в приведенной модели учитываются ограничения (3), (4), (5), что является отличительной особенностью данной разработки. Это приводит к существенному росту размерности задачи и необходимости использования специальных методов ее решения. Также стоит сказать о связи ограничений (2) и (3). Для некоторого раскроя с индексом  $k$  и бумагоделательной машины с индексом  $j$ , на которой данный раскрой выполняется, будет иметь место следующее соотношение:

$$\forall i \in N : a_{ik} > 0, \forall t \in T : e_{jtk} = 1 \Rightarrow D_i \leq D_j, \quad (7)$$

$$k \in K, j \in M.$$

Соотношение (7) определяет учет директивных сроков отгрузки продукции.

Большая размерность матрицы и сложная структура являются важнейшими отличительными особенностями модели, требующими использования алгоритма генерации столбцов. В рамках алгоритма генерации столбцов производится решение задачи линейного раскроя на основе двойственной задачи к (1)–(4), (5'), (6). Именно в ней учитываются основные технологические ограничения (такие как учет максимальной кромки, максимальное количество рулонов в одном раскрое, максимальное количество различных форматов в одном раскрое и т. д.), решение производится посредством методов динамического программирования и используется на каждой итерации симплекс-метода для выбора базисного столбца. Подробное описание решения задачи линейного раскроя для тамбуров бумагоделательных машин будет представлено в следующей статье.

Перечислим отличительные особенности алгоритма симплекс-метода для решения вспомогательной задачи [7]:

- Использование зоны мультипликаторов для хранения обратной матрицы задачи;
- Метод повторения для очистки зоны мультипликаторов;
- Настройка различных схем выбора оптимального столбца, таких как правило Бленда, метод барьера и т. д.;

- Алгоритмический учет верхних и нижних границ переменных;
- Возможность «дорешивания» задачи с существующим базисным планом при изменении границ переменных или границ ограничений.

## ВЫВОДЫ

Математическая модель и представленные методы решения задачи являются основой комплекса программных средств, разработанных

в IT-парке ПетрГУ в рамках планово-стратегического развития ПетрГУ. Программная система установлена на реальное предприятие ЦБП (ОАО «Кондопога») и испытана в условиях производственного процесса. В ходе испытаний было установлено, что уменьшение отхода – 1–2 %, а это является существенной экономией в рамках объемов крупного предприятия. Указанная оптимизация стала возможной благодаря разработке и использованию математического аппарата теории исследования операций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булатов А. Ф., Воронин А. В., Кузнецов В. А. и др. Оптимизация в планировании и управлении предприятиями регионального лесопромышленного комплекса. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2001. 228 с.
2. Воронин Р. В. Математические модели и методы автоматизированных систем планирования производства бумаги: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18. Петрозаводск, 2004.
3. Воронин А. В., Кузнецов В. А. Математические модели и методы в планировании и управлении предприятием ЦБП. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2000. 254 с.
4. Воронин А. В., Кузнецов В. А. Прикладные оптимизационные задачи в целлюлозно-бумажной промышленности. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2000. 152 с.
5. Канторович Л. В., Романовский И. В. Математические методы в управлении экономикой. М.: Знание, 1977. 337 с.
6. Кузнецов В. А. Задачи раскроя в целлюлозно-бумажной промышленности. СПб.: Изд-во СПбЛТА, 2000. 132 с.
7. Романовский И. В. Алгоритмы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1977. 352 с.
8. Швецов Ю. Н., Смирнова Э. А. Расчет основных параметров бумаго- и картоноделательных машин. СПб.: Изд-во СПбГТУРП, 2009. 64 с.

**Urban A. R.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Kuznetsov V. A.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

## MATHEMATICAL MODELS AND METHODS OF OUTPUT PRODUCTION TIMELINE CONSIDERATION IN CUTTING REELS OF PAPER MACHINE

A complex of mathematical models and methods for solving the problem of timeline consideration in the process of product shipment during paper machine reels' cutting is presented. The purpose of the complex is to facilitate in the economic use of material resources resulting in reduction of industrial wastes, to reduce the volume of defective products, and to increase efficiency and quality of industrial management.

Key words: cutting the reels of paper machine, dynamic programming, linear programming

## REFERENCES

1. Bulatov A. F., Voronin A. V., Kuznetsov V. A. i dr. *Optimizatsiya v planirovanii i upravlenii predpriyatiyami regional'nogo lesopromyshlennogo kompleksa* [Optimization in planning and management of enterprises belonging to regional timber industry]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2001. 228 p.
2. Voronov R. V. *Matematicheskie modeli i metody avtomatizirovannykh sistem planirovaniya proizvodstva bumagi: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Mathematical models and methods for automated paper production planning: author's thesis of PhD tech. sci. diss.]. Petrozavodsk, 2004.
3. Voronin A. V., Kuznetsov V. A. *Matematicheskie modeli i metody v planirovanii i upravlenii predpriyatiem tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti* [Mathematical models and methods in the enterprise planning and management]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2000. 254 p.
4. Voronin A. V., Kuznetsov V. A. *Prikladnye optimizatsionnye zadachi v tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti* [Applied optimization problems in pulp and paper industry]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2000. 152 p.
5. Kantorovich L. V., Romanovskiy I. V. *Matematicheskie metody v upravlenii ekonomikoy* [Mathematical methods in managing economy]. Moscow, Znanie Publ., 1977. 337 p.
6. Kuznetsov V. A. *Zadachi raskroya v tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti* [Cutting tasks in the pulp and paper industry]. St. Petersburg, SPbLTA Publ., 2000. 132 p.
7. Romanovskiy I. V. *Algoritmy resheniya ekstremal'nykh zadach* [Algorithms for solving extreme problems]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 352 p.
8. Shvetsov Yu. N., Smirnova E. A. *Raschet osnovnykh parametrov bumago- i kartonodelatel'nykh mashin* [The calculation of the basic parameters of paper and board machines]. St. Petersburg, 2009. 64 p.

Поступила в редакцию 01.07.2013

**ЕВГЕНИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ ИВАШКО**

кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН, старший преподаватель кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*ivashko@krc.karelia.ru*

**МАРИЯ СЕРГЕЕВНА ИЦКАРЬ**

студент 4-го курса математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*ickar@cs.karelia.ru*

**МАРИЯ ВЛАДИМИРОВНА КОЛЧИНА**

студент 4-го курса математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*kolchina@cs.karelia.ru*

## ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРИЛОЖЕНИЯ ПО АНАЛИЗУ ДАННЫХ НА БАЗЕ VOINC-ГРИД\*

Представлены результаты тестирования производительности программного обеспечения (ПО), предназначенного для нахождения ассоциативных правил в больших наборах данных с помощью VOINC-грид. Приведены результаты экспериментов по выявлению зависимости времени выполнения вычислений от количества подзаданий. Для класса задач обработки больших наборов данных описана структура накладных временных расходов, привносимых VOINC при организации вычислительного процесса.

Ключевые слова: тестирование, производительность, VOINC

### ВВЕДЕНИЕ

Стремительный научно-технический прогресс, развитие информационных технологий, появление электронной коммерции и социальных сетей, а также развитие технологий записи и хранения данных привели к бурному росту объемов собираемой и анализируемой информации. В связи с этим наблюдается повышенный интерес к технологиям класса Big Data. Согласно [3], Big Data – это серия подходов, инструментов и методов обработки структурированных и неструктурированных данных огромных объемов и значительного многообразия для получения воспринимаемых человеком результатов. Накопленная информация для многих организаций является важным активом, однако обрабатывать ее и извлекать из нее пользу с каждым днем становится все сложнее и дороже.

Для целей интеллектуальной обработки данных были разработаны специальные алгоритмы и подходы, объединенные термином Data Mining. Data Mining – это процесс обнаружения в сырых данных ранее неизвестных, нетривиальных, практически полезных и доступных интерпретации знаний, необходимых для принятия решений в различных сферах человеческой деятельности [6]. Одним из популярных методов Data Mining является нахождение ассоциативных правил. Ассоциативные правила позволяют

выявлять скрытые закономерности между связанными событиями.

Анализ больших объемов данных требует привлечения специальных технологий и средств выполнения высокопроизводительных вычислений. Одним из таких средств является VOINC. VOINC – это открытая программная платформа для организации систем распределенных вычислений, разработанная в университете Беркли [9]. Платформа VOINC отличается простотой в установке, настройке и администрировании, а также обладает хорошими возможностями по масштабируемости, простоте подключения вычислительных узлов, использованию дополнительного ПО, интеграции с другими грид-системами и др.

Платформа VOINC имеет архитектуру «клиент-сервер», при этом клиентская часть может работать на компьютерах с различными аппаратными и программными характеристиками. Ключевым объектом системы является проект – автономная сущность, в рамках которой производятся распределенные вычисления. VOINC-сервер поддерживает одновременную работу большого числа независимых проектов; каждый вычислительный узел может одновременно выполнять вычисления для нескольких VOINC-проектов [2].

При расчетах на BOINC большое внимание уделяется оптимизации приложений, так как эффект масштаба на большом числе вычислительных узлов приводит к большим потерям производительности неоптимизированных BOINC-приложений. Вынужденные потери производительности связаны также с необходимостью дублирования подзаданий для обеспечения достоверности результатов, а также со сложностью планирования подзаданий.

Вопросам планирования подзаданий посвящены, например, статьи [7] и [8]. В работе [8] рассматриваются три подхода к выбору ресурсов, которые позволяют достичь наилучшей производительности: приоритизация ресурсов, исключение ресурсов и дублирование заданий. В частности, было выявлено, что установка приоритетов в использовании ресурсов является малоэффективным подходом. Более действенным методом оказывается дублирование подзаданий. Данный подход позволяет исключить из вычислений ненадежные хосты, которые часто являются причиной задержки расчетов.

В работе [7] представлены сочетания четырех политик планирования ресурсов:

- планирование ресурсов центрального процессора: какие из подзаданий запустить на расчет в первую очередь;
- запрос подзаданий: когда запрашивать у проекта новые подзадания, у какого проекта их запрашивать и как много;
- отправка подзаданий: какие подзадания серверу следует отправлять клиенту в ответ на запрос;
- оценка времени завершения: как оценить время, оставшееся для расчета подзадания.

В результате были выявлены наиболее эффективные из них: например, при определенном сочетании политик планирования можно добиться снижения на 90 % накладных расходов, связанных с запросом подзадания.

В статье [10] представлены результаты тестирования платформы RT-BOINC, предназначенной для проведения вычислений в режиме реального времени. На примере игр (шахматы и го) было показано, что данная платформа превосходит BOINC по показателям времени отклика и масштабируемости. Успех достигается с помощью установки таймера дедлайна и создания механизма контроля входных данных. Благодаря специальным политикам и планированию процесса выполнения подзаданий достигается снижение накладных расходов, привносимых BOINC для организации процесса расчетов. Однако изучению структуры и объемов этих накладных расходов не уделяется большого внимания.

В современном мире ПО играет огромную роль практически во всех сферах человеческой деятельности, будь то наука, образование, медицина или промышленность. Как правило, для

широко используемых программ, обрабатывающих большие объемы данных или имеющих требования к срокам получения результата, проводится оценка (или тестирование) производительности. Цель тестирования производительности – определить, как быстро работает система или ее часть под определенной нагрузкой. Данный вид тестирования служит для проверки и подтверждения таких качеств системы, как:

- масштабируемость;
- надежность;
- потребление ресурсов [4].

Тестирование позволяет выявлять и устранять причины потерь производительности, что особенно важно для высокомасштабируемых программ, выполняемых в рамках грид.

Представленная статья посвящена исследованию накладных расходов, привносимых платформой BOINC при организации процесса вычислений. За основу взята работа [2], в которой описано приложение по анализу больших массивов данных в гетерогенной Desktop Grid на базе BOINC: описана реализация алгоритма, предназначенного для использования в распределенной среде, и представлены результаты экспериментов по оценке производительности разработанного ПО на тестовых наборах данных. Задача представленного исследования – провести тестирование производительности программной системы, оценить время нахождения ассоциативных правил при различных характеристиках наборов данных и вычислительных узлов, а также определить структуру накладных расходов.

## ОПИСАНИЕ ТЕСТИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ

Тестируемая программная система представляет собой ПО, реализующее алгоритм Partition на базе грид-платформы BOINC. Данный алгоритм предназначен для решения задачи поиска ассоциативных правил [1].

Работа алгоритма проходит в три этапа, два из которых выполняются параллельно на вычислительных узлах грид-сети. На завершающем этапе происходит объединение промежуточных результатов. На рис. 1 представлена общая схема выполнения алгоритма Partition в BOINC.

Рассмотрим работу алгоритма Partition в BOINC подробнее.

Этап I. Программа получает на входе исходный файл транзакций (например, записей за определенный период о покупках клиентов в супермаркете или платежах в банке). Файл разбивается на заданное количество частей (подзаданий), затем планировщик BOINC-сервера распределяет подзадания клиентам (вычислительным узлам) BOINC-грид. Затем каждый BOINC-клиент загружает с сервера входные файлы подзаданий, находит часто встречающиеся наборы в имеющихся исходных данных, после чего загружает выходные файлы на сервер и отчитывается о выполнении подзадания.

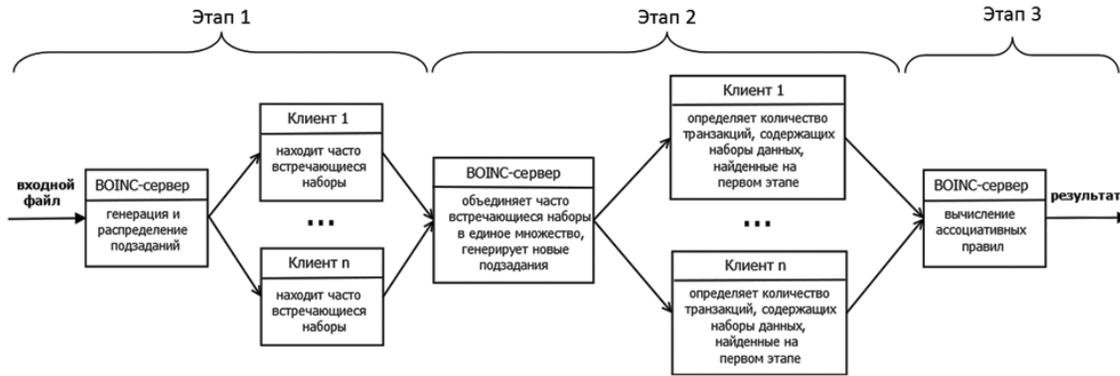


Рис. 1. Алгоритм Partition в VOINC

Этап II. Выходные файлы проверяются сервером, а затем все полученные часто встречающиеся наборы объединяются в единое множество. На основе этого множества формируются новые подзадания, которые снова распределяются между клиентами. Клиенты, в свою очередь, определяют количество транзакций, содержащих наборы данных, найденные на первом этапе, и отправляют результаты на сервер.

Этап III. На основе результатов, полученных от клиентов, на сервере вычисляются ассоциативные правила.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Задача тестирования заключалась в оценке времени нахождения ассоциативных правил при различных характеристиках наборов данных и вычислительных узлов и определении структуры накладных расходов. Соответственно тестирование проводилось в два этапа.

### 1. Зависимость времени выполнения от количества подзаданий.

Увеличение числа подзаданий позволяет повысить масштабируемость приложения. Кроме того, увеличение числа подзаданий приводит к уменьшению размеров исходных данных, а значит, снижается время обработки одного подзадания, что помогает нивелировать разницу в производительности узлов гетерогенной грид. Однако с ростом числа подзаданий увеличивается доля накладных расходов, привносимых VOINC при организации процесса вычислений. На данном этапе тестирования была поставлена задача определения характера зависимости производительности приложения от того, на сколько частей разбивается исходный файл (то есть от количества подзаданий).

Эксперименты проводились на одном вычислительном узле (клиенте). В качестве исходных данных использовались файлы различного объема: 1 Гб, 5 Гб и 10 Гб. Каждый файл был разбит на фиксированное количество частей – от 10 до 70. Результаты экспериментов представлены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что с увеличением числа подзаданий увеличивается время, необходимое для выполнения расчетов. Причем в зависимости от

размера исходного файла это увеличение поначалу незначительно, но при достижении некоторого порога начинает расти достаточно быстро. Происходит это из-за того, что при увеличении числа подзаданий все более существенными становятся накладные расходы, которые платформа VOINC вносит для организации вычислений. Таким образом, увеличивать число подзаданий необходимо в соответствии с масштабом сети и размером исходного файла транзакций.

### 2. Оценка накладных расходов.

Второй этап тестирования связан с оценкой накладных расходов времени, требуемых для организации процесса вычислений в грид-сети. Для этого прежде всего необходимо определить, из чего складываются накладные расходы.

Расчет подзадания со стороны клиента состоит из следующих этапов:

- запрос подзадания от сервера;
- время ожидания (от ответа планировщика до начала скачивания подзадания);
- загрузка подзадания;
- проведение расчетов;
- время ожидания (от окончания расчетов до начала загрузки результата);
- отправка результата на сервер;
- время ожидания (от окончания отправки результата до ответа планировщика о получении результата).

Для того чтобы выяснить, сколько времени занимает каждый из этапов, был проведен ряд экспериментов. Вычисления проводились на

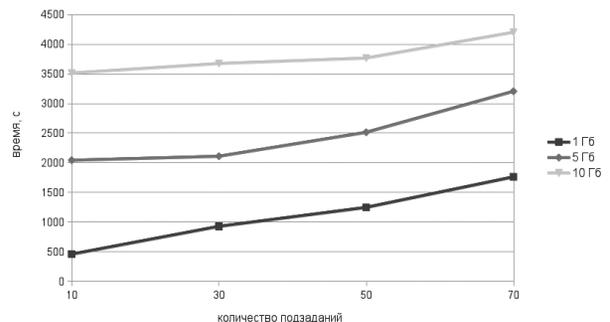


Рис. 2. Время расчета подзаданий

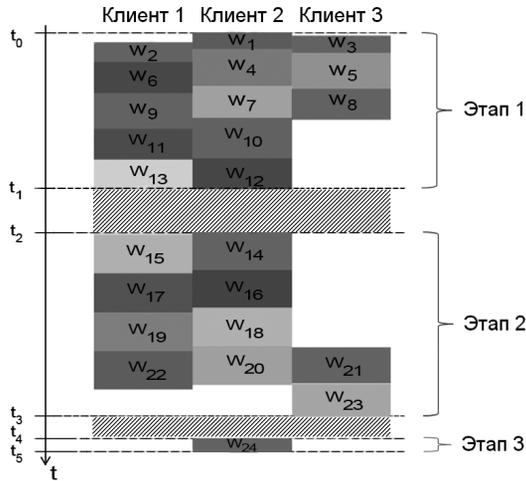


Рис. 3. Хронометраж расчета подзаданий тремя клиентами

трех вычислительных узлах (клиентах). В качестве исходных данных использовался файл объемом 1 Гб, разделенный на 10 частей (подзаданий). На рис. 3 представлен результат анализа лог-файлов клиентов. Каждый блок обозначает отдельное подзадание, штриховкой выделен этап генерации новых подзаданий на сервере. Так как исходный файл делился на 10 частей, в итоге должно было получиться 21 подзадание. Но из-за того, что на первом этапе результаты расчетов некоторых подзаданий были утеряны и рассчитывались повторно, в общей сложности получилось 24 подзадания.

Оценка структуры накладных расходов также проводилась на основе анализа лог-файлов клиентов, для чего была разработана специальная программа. Результаты представлены на рис. 4. На рисунке видно, что основное время выполнения анализа данных занимают непосредственно расчеты, но значительную часть составляет время, затрачиваемое на загрузку подзаданий и ожидание ответа планировщика о принятом результате.

На рис. 5а показана структура накладных расходов в процентном соотношении. Как показали дальнейшие эксперименты, при увели-

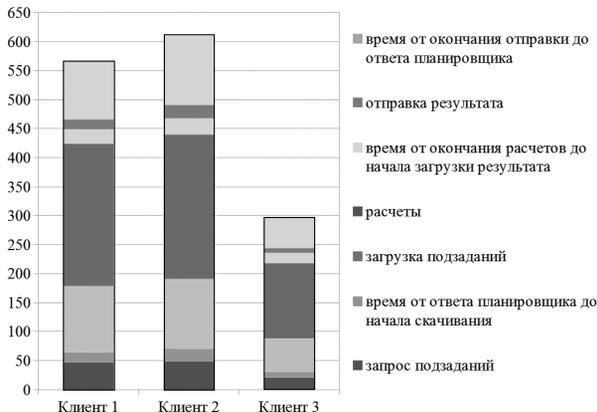


Рис. 4. Структура накладных расходов

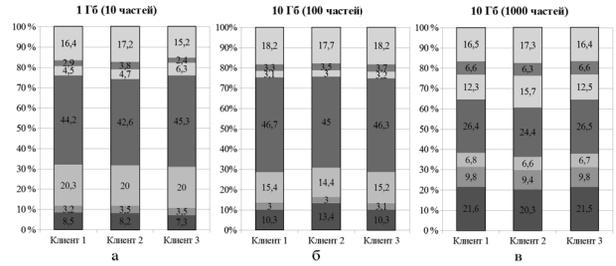


Рис. 5. Структура накладных расходов в процентном выражении

чения на порядок и размера файла (до 10 Гб), и количества подзаданий (до 100) структура накладных расходов сохраняется (см. рис. 5б), так как размер каждого подзадания остается тем же, что и на рис. 5а.

В следующем эксперименте исходный файл объемом 10 Гб был разделен уже на 1000 частей (то есть по сравнению с предыдущим экспериментом объем файла остался неизменным, а количество подзаданий увеличилось в 10 раз). Эксперимент показал, что при увеличении числа подзаданий структура накладных расходов изменяется довольно существенно. Структуру накладных расходов, полученную в результате проведенного эксперимента, можно увидеть на рисунке 5в.

На основании проведенных экспериментов был сделан вывод о том, что в структуре накладных расходов существенную часть занимает время, затрачиваемое на взаимодействие клиента и сервера. При этом при пропорциональном увеличении как объема файла, так и числа подзаданий структура накладных расходов сохраняется.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В работе представлены результаты тестирования производительности программного обеспечения, предназначенного для нахождения ассоциативных правил в больших наборах данных с помощью BOINC-грид. При расчетах на BOINC большое внимание уделяется оптимизации приложений, так как эффект масштаба на большом числе вычислительных узлов приводит к большим потерям производительности неоптимизированных BOINC-приложений. Увеличение числа подзаданий позволяет повысить масштабируемость приложения. Кроме того, оно приводит к уменьшению размеров исходных данных, а значит, снижается время обработки одного подзадания, что помогает нивелировать разницу в производительности узлов гетерогенной грид. Однако с ростом числа подзаданий увеличивается доля накладных расходов, привносимых BOINC при организации процесса вычислений.

В ходе работы было проведено тестирование, направленное на выявление зависимости времени выполнения вычислений от количества подзаданий. С увеличением числа подзаданий уве-

личивается время, необходимое для выполнения расчетов, что обусловлено ростом накладных временных расходов. Представлена структура накладных расходов для класса задач обработки

больших наборов данных. В структуре накладных расходов существенную часть занимает время, затрачиваемое на взаимодействие клиента и сервера BOINC.

\* Работа выполнена в рамках Программы стратегического развития ПетрГУ и поддержана грантами РФФИ 12-07-31147 «мол\_а» и 13-07-00008 «а».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головин А. С. Реализация алгоритмов Data Mining в гетерогенной грид на базе платформы BOINC: Дис. ... магистра прикладной математики и информатики / Петрозаводский государственный университет. Петрозаводск, 2012. 42 с.
2. Ивашко Е. Е., Головин А. С. Вычислительная эффективность BOINC-GRID // Proceedings of 2nd International Conference on High Performance Computing HPC-UA. 2012. С. 183–187.
3. Термины и определения [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.ipiran.ru/niap/index\\_3.html](http://www.ipiran.ru/niap/index_3.html)
4. Тестирование и анализ производительности с помощью сервера приложений WebSphere [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.ibm.com/developerworks/ru/library/wes-1208\\_hare](http://www.ibm.com/developerworks/ru/library/wes-1208_hare)
5. Шнайер Б. Секреты и ложь. Безопасность данных в цифровом мире. СПб.: Питер, 2003. 368 с.
6. Data Mining – добыча данных [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.basegroup.ru/library/methodology/data\\_mining](http://www.basegroup.ru/library/methodology/data_mining)
7. Kondo D., Anderson D. P., McLeod J. Performance Evaluation of Scheduling Policies for Volunteer Computing // E-SCIENCE '07 Proceedings of the Third IEEE International Conference on e-Science and Grid Computing. 2007. P. 415–422.
8. Kondo D., Chien A. A., Casanova H. Resource Management for Rapid Application Turnaround on Enterprise Desktop Grids // ACM/IEEE Conf. Supercomputing (SC '04). 2004. P. 17–19.
9. Open-source software for volunteer computing and grid computing [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://boinc.berkeley.edu>
10. Yi S., Jeannot E., Kondo D., Anderson D. P. Towards Real-Time, Volunteer Distributed Computing // CCGRID-2011. P. 154–163.

**Ivashko E. E.**, Institute of Applied Mathematical Research, Karelian Research Centre of RAS, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Itskar' M. S.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Kolchina M. V.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

#### PERFORMANCE TESTING OF BOINC-BASED DATA ANALYSIS SOFTWARE

Results of the software performance testing designed for finding association rules in large data sets using BOINC-grid are presented. The results of experiments detecting computing runtime dependent on the number of sub-tasks are presented. The structure of temporary overhead costs brought by BOINC during computing processing is described for the class of large data sets aimed at processing problems.

Key words: testing, performance, BOINC

#### REFERENCES

1. Golovin A. S. *Realizatsiya algoritmov Data Mining v geterogennoy grid na baze platformy BOINC. Diss. ... magistra tekhnicheskikh nauk* [Implementation of Data Mining algorithms in a heterogeneous grid based on a BOINC platform]. Petrozavodsk, 2012. 42 p.
2. Ivashko E. E., Golovin A. S. Computational efficiency of BOINC-GRID [Vychislitel'naya effektivnost' BOINC-GRID]. *Proceedings of 2nd International Conference on High Performance Computing HPC-UA*. 2012. P. 183–187.
3. *Terminy i opredeleniya* [Terms and definitions]. Available at: [http://www.ipiran.ru/niap/index\\_3.html](http://www.ipiran.ru/niap/index_3.html)
4. *Testirovanie i analiz proizvoditel'nosti s pomoshch'yu servera prilozheniy WebSphere* [Testing and analysis using an application server WebSphere]. Available at: [http://www.ibm.com/developerworks/ru/library/wes-1208\\_hare](http://www.ibm.com/developerworks/ru/library/wes-1208_hare)
5. Shnayer B. *Sekrety i lozh'. Bezopasnost' dannykh v tsifrovom mire* [Secrets and lies. Digital security in a networked world]. St. Petersburg, Piter Publ., 2003. 368 p.
6. *Data Mining – dobycha dannykh* [Data mining]. Available at: [http://www.basegroup.ru/library/methodology/data\\_mining/](http://www.basegroup.ru/library/methodology/data_mining/)
7. Kondo D., Anderson D. P., McLeod J. Performance Evaluation of Scheduling Policies for Volunteer Computing // E-SCIENCE '07 Proceedings of the Third IEEE International Conference on e-Science and Grid Computing. 2007. P. 415–422.
8. Kondo D., Chien A. A., Casanova H. Resource Management for Rapid Application Turnaround on Enterprise Desktop Grids // ACM/IEEE Conf. Supercomputing (SC '04). 2004. P. 17–19.
9. Open-source software for volunteer computing and grid computing. Available at: <http://boinc.berkeley.edu>
10. Yi S., Jeannot E., Kondo D., Anderson D. P. Towards Real-Time, Volunteer Distributed Computing // CCGRID-2011. P. 154–163.

Поступила в редакцию 09.01.2014



29 апреля 2014 года исполнилось 85 лет профессору кафедры архитектуры, строительных конструкций и геотехники Петрозаводского государственного университета, основателю и руководителю петрозаводской этноархитектурной научной школы, директору НИИ историко-теоретических проблем народного зодчества ПетрГУ, действительному члену Российской академии архитектуры и строительных наук, члену редакционного совета нашего журнала *Вячеславу Петровичу Орфинскому*.

## **ВЯЧЕСЛАВ ПЕТРОВИЧ ОРФИНСКИЙ**

### **К 85-летию со дня рождения**

Профессиональная и общественная деятельность В. П. Орфинского неразрывно связана с изучением и бескомпромиссным отстаиванием ценностей культурного наследия. Результатом многолетних исследований архитектурного наследия стало создание нового научного направления – этноархитектуроведения, направленного на выявление и изучение региональных, этнических и локальных особенностей народного деревянного зодчества.

Потомственный педагог, В. П. Орфинский стал проводником в мир деревянного зодчества для многих ныне успешно работающих специалистов, реставраторов и исследователей архитектурного наследия Русского Севера. Непреходящая актуальность педагогических инициатив ученого подтверждается временем. Сегодня как никогда востребованы квалифицированные кадры в области реставрации памятников деревянного зодчества, которых в 1987–1996 годах выпускал строительный факультет ПетрГУ по уникальной программе специализации, разработанной ученым.

В последние годы В. П. Орфинский стал неформальным лидером общественного градозащитного движения в Петрозаводске. Он инициирует включение в государственный реестр памятников истории и культуры, выступает против чужеродной застройки в исторической части города, разрушения и искажения объектов культурного наследия.

Многогранная деятельность В. П. Орфинского получила общественное признание и высокую профессиональную оценку. Он заслуженный деятель науки Карельской АССР, трижды лауреат государственных премий Республики Карелия, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, почетный член ВООПИК.

В. П. Орфинский отмечен несколькими творческими наградами Союза архитекторов России: медалью Российского союза исторических городов и регионов «За вклад в наследие народов России» (2002), медалью РААСН за монографию «Типология деревянного культового зодчества Русского Севера» (2005), премией им. акад. Д. С. Лихачева за выдающийся вклад в сохранение историко-культурного наследия России в номинации «Сохранение памятников истории и культуры» (2007), медалью РААСН за монографию «Традиционный карельский дом» (2011), премией имени Алексея Комеча «За общественно значимую гражданскую позицию в деле защиты и сохранения культурного наследия России» (2014). В разные годы В. П. Орфинский был удостоен пяти правительственных наград, последней – ордена Дружбы – в 2010 году.



22 апреля 2014 года исполнилось 50 лет доктору медицинских наук, доценту, заведующему кафедрой факультетской терапии, инфекционных болезней и эпидемиологии медицинского факультета Петрозаводского государственного университета *Татьяне Юрьевне Кузнецовой*.



30 мая 2014 года исполнилось 70 лет доктору технических наук, профессору кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесоинженерного факультета Петрозаводского государственного университета *Александру Максимовичу Цыпку*.

### **ТАТЬЯНА ЮРЬЕВНА КУЗНЕЦОВА**

#### **К 50-летию со дня рождения**

Т. Ю. Кузнецова после окончания медицинского факультета Петрозаводского государственного университета обучалась в клинической ординатуре на кафедре факультетской терапии ПетрГУ, затем в целевой очной аспирантуре по кардиологии в Институте хирургии им. А. В. Вишневского РАМН (Москва). В 1992 году защитила кандидатскую диссертацию на тему «Значение сопутствующей артериальной гипертензии у больных ишемической болезнью сердца при отборе к хирургическому лечению»; в 2009 году – докторскую на тему «Клинико-генетические факторы предрасположенности к артериальной гипертензии и поражению органов-мишеней». С 2000 года – доцент кафедры госпитальной терапии медицинского факультета ПетрГУ. Имеет высшую врачебную категорию по терапии и кардиологии, сертификаты специалиста по специальностям «Терапия» и «Кардиология». Является главным внештатным кардиологом МЗ и СР РК, членом правления Российского кардиологического общества, членом Европейского общества кардиологов, председателем региональных обществ специалистов по сердечной недостаточности, артериальной гипертензии, атеросклерозу. Автор 185 печатных работ, из них 28 статей в журналах ВАК, иностранных изданиях, 17 учебно-методических работ. Награждена почетной грамотой МО РФ.

### **АЛЕКСАНДР МАКСИМОВИЧ ЦЫПУК**

#### **К 70-летию со дня рождения**

А. М. Цыпук большое внимание уделяет прикладным аспектам деятельности лесного комплекса, его модернизации и реорганизации, повышению эффективности восстановления лесов Карелии. Результаты деятельности впечатляют – свыше 180 печатных работ и больше двух десятков патентов на изобретения. Под руководством и при непосредственном участии А. М. Цыпука выполнены научные разработки регионального, отраслевого и федерального значения, посвященные созданию и совершенствованию комплекса лесохозяйственных машин, включающего лункообразователь Л-2УС для посадки и посева леса на вырубках, сеялку СВ-1,2 и корнеподрезчик ПК-1,2 для лесных питомников. Александр Максимович постоянный участник международных, российских и региональных конференций, симпозиумов и съездов, активно и успешно сотрудничает с научными, педагогическими и общественными коллективами. Под руководством А. М. Цыпука подготовлено значительное количество специалистов лесного комплекса, защищено несколько кандидатских диссертаций.

**Поздравляем юбиляров и желаем дальнейших профессиональных успехов!**

## УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

**Обращаем ваше внимание, что с 1 января 2013 года изменились требования к оформлению статей, прежде всего это касается аннотации и списка литературы.**

**Аннотация (объем от 120 до 250 слов)** является кратким резюме большей по объему работы. Аннотация может публиковаться самостоятельно и, следовательно, должна быть понятной без обращения к самой публикации. Она является основным источником информации в отечественных и зарубежных информационных системах и базах данных, индексирующих журнал. Структура аннотации должна повторять структуру статьи и включать введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение (выводы). Результаты работы описывают предельно точно и информативно. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье. Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации. Следует избегать лишних фраз (например, «автор статьи рассматривает...»), не включать несущественные детали, применять значимые слова из текста статьи. Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения в аннотации не приводятся. В тексте аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций. Аннотация предназначается для компетентной аудитории, включая международную, поэтому можно использовать техническую (специальную) терминологию дисциплины. Текст аннотации должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т. д. («consequently», «moreover», «for example», «the benefits of this study», «as a result» etc.), либо разрозненные излагаемые положения должны логично вытекать один из другого. Необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т. е. «The study tested», но не «It was tested in this study».

**Список литературы** должен быть представлен на отдельных листах в 2 вариантах: 1) на русском языке в соответствии с ГОСТ 7.1-84 «Библиографическое описание документа. Общие требования и правила составления». Цитируемая в статье литература (автор, название, место, издательство, год издания и страницы (от и до или общее количество) приводится в алфавитном порядке, сначала отечественные, затем зарубежные авторы; 2) список литературы должен быть записан на языке оригинала латинскими буквами (References). Если русскоязычная статья была переведена на английский язык и опубликована в английской версии, то необходимо указывать ссылку из переводного источника. Как правило, библио-

графические описания российских публикаций составляются в следующей последовательности: авторы (транслитерация), перевод названия статьи на английский язык, название статьи в транслитерированном варианте в квадратных скобках, название источника (транслитерация, курсив), выходные данные с обозначениями на английском языке. На сайте <http://www.translit.ru/> можно бесплатно воспользоваться программой транслитерации русского текста в латиницу. Для этого, выбрав вариант системы **Board of Geographic Names (BGN)**, мы получаем изображение всех буквенных соответствий.

**Таблицы** – каждая печатается на отдельной странице, нумеруется соответственно первому упоминанию ее в тексте и снабжается заголовком. Таблицы предоставляются в текстовом редакторе Microsoft Word (формат.doc). **Иллюстрации** (рисунки, фотографии, схемы, диаграммы) нумеруются, снабжаются подписями и предоставляются в виде отдельных растровых файлов (в формате .tif, .bmp). В бумажной версии на обороте каждой иллюстрации ставится номер и пометка «верх», «низ». В тексте статьи указывается место таблицы или рисунка. Таблиц и иллюстраций не должно быть более 5.

**Правила предоставления иллюстраций.** Растровые форматы: рисунки и фотографии, должны иметь разрешение не менее 300 dpi, формата TIF, без LZW уплотнения, градации серого. Векторные форматы: рисунки, должны иметь толщину линий не менее 0,2 мм, текст в них может быть набран шрифтом Times New Roman или Arial.

**Правила предоставления диаграмм и графиков.** Графики и диаграммы должны быть созданы в табличном процессоре Excel и присылаться вместе с исходными численными данными в одном файле с расширением xls. При создании графиков использовать черный, белый цвета и градации серого, избегать применения трехмерной графики, градиентных заливок и т. д. Все надписи и числа на графиках желательно делать, используя «жирный» шрифт ArialCyr, размер 14. На самом графике не должно быть названия, оно должно быть отражено в подрисуночной подписи. В виде растрового изображения могут быть представлены графики, полученные с помощью специальных программ статистической обработки.

**Требования к математическим формулам.** Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation (присутствует в составе Word) или символьным шрифтом (надстрочные и подстрочные символы, меню «Вставка», «Символ»). Вставки формул в виде картинок любого формата не принимаются.

**Правила оформления дублируются на сайте журнала: [uchzap.petsu.ru](http://uchzap.petsu.ru)**

## CONTENTS

### BIOLOGY

- Vasilevskaya N. V., Petrova N. V.*  
Morphological variability of pollen of *Pinus sylvestris* L. in conditions of industrial town (Russia, Monchegorsk) . . . . . 7
- Shklyarevich G. A.*  
Recovery of *Zostera marina* L. thickets in Kandalaksha bay, White Sea . . . . . 13
- Galibina N. A., Terebova E. N.*  
Physical-chemical properties of *Betula pendula* Roth trunk tissue cell walls . . . . . 19
- Rokhlova E. L.*  
Herbaceous introduced plants of South Karelia . . . . . 25
- Andreev V. P., Sobolev P. S., Lebedeva N. Sh.*  
Coordination of Zn-TPhP with weak bases / nucleophiles. Method of “approximation algorithm” . . . . . 28

### MEDICAL SCIENCE

- Ayzikov D. L., Yunash V. D., Lotosh T. A., Matveeva Yu. P., Vinogradova I. A.*  
Influence of different illumination modes on reproductive activity and rates of physiological development in rats’ offspring . . . . . 36
- Antonen E. G., Hyanikyaynen I. V.*  
Somatoform autonomous dysfunction as predictor of chronic cerebral ischemia . . . . . 43
- Lozovik I. P., Barakat M. F., Mel'tser R. I., Ivanov D. V.*  
Comprehensive assessment of severity damages with open segmental tibia fractures . . . . . 49
- Melent'eva A. A., Barysheva O. Yu., Kheyfets L. M., Zuev A. V., Strategopulo V. A., Malysheva I. E.*  
New biomarkers of mineral bone disorders in chronic kidney disease – focus on FGF23 and factor Klotho . . . . . 52
- Tsitsyura A. P., Fetyukov A. I., Mariev A. I., Kovchur O. I.*  
Combined groin hernia surgeries . . . . . 57

### EARTH SCIENCE

- Svetova E. N., Svetov S. A.*  
Agate mineralization in effusives of Suysar complex located in Central Karelia . . . . . 61

- Kuleshevich L. V., Dmitrieva A. V., Khazov R. A.*  
Ba-Sr-P-Ti-TR-feldspar raw materials of Ele-senvaara alkaline complex, Karelia: geochemistry and mineralogy of rare-earth elements . . . . . 67
- Potasheva I. A., Svetov S. A.*  
ICP-MS analysis of ancient ceramics as identification method of clay sources and pottery production area . . . . . 71

### AGRICULTURAL SCIENCE

- Karpechko Yu. V., Myasnikova N. A.*  
Characteristic features of leaf apparatus formation and transpiration of coniferous stand . . . . . 78

### ENGINEERING SCIENCE

- Andreev A. A., Kolesnikov G. N.*  
On efficient ratio of sawdust and shavings in wood-cement composite . . . . . 85
- Sokolov A. P., Syuney V. S.*  
Logistic concept of wood harvesting operations . . . . . 88
- Lukashevich V. M.*  
Interoperational Preparatory works in through processes of forest logging . . . . . 95
- Medvedev P. P.*  
Morphology of traditional rural settlements Arkhangelsk Primoshya . . . . . 100

### PHYSICS AND MATHEMATICS

- Pan'kov A. A.*  
Composite’s dielectric permeability inclusive of its correlated structural function and Maxwell-wagner relaxation . . . . . 107
- Urban A. R., Kuznetsov V. A.*  
Mathematical models and methods of output production timeline consideration in cutting reels of paper machine . . . . . 112
- Ivashko E. E., Itskar’ M. S., Kolchina M. V.*  
Performance testing of boinc-based data analysis software . . . . . 116

### Jubilation

- To the 85th birthday anniversary of V. P. Orfinskiy . . . . . 121
- To the 50th birthday anniversary of T. Yu. Kuznetsova . . . . . 122
- To the 70th birthday anniversary of A. M. Tsypuk . . . . . 122

- Info for the authors** . . . . . 123