

---

Министерство образования и науки  
Российской Федерации

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

№ 8 (121). Декабрь, 2011

---

**Серия: Естественные и технические науки**

---

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

Зам. главного редактора  
*Н. В. Доршакова*, доктор медицинских наук, профессор  
*Э. К. Зильбер*, доктор медицинских наук, профессор  
*Э. В. Ивантер*, доктор биологических наук, профессор,  
член-корреспондент РАН

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. Каб. 272.  
Тел. (8142) 76-97-11  
E-mail: [uchzap@mail.ru](mailto:uchzap@mail.ru)

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

---

Редакционный совет

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

Редакционная коллегия серии  
«Естественные и технические науки»

- |  |   |
|--|---|
| <b>А. Е. БОЛГОВ</b><br>доктор сельскохозяйственных наук,<br>профессор (Петрозаводск)                     | <b>Е. И. РАТЬКОВА</b><br>ответственный секретарь серии (Петрозаводск)                   |
| <b>В. В. ВАПИРОВ</b><br>доктор химических наук, профессор (Петрозаводск)                                 | <b>А. А. РОГОВ</b><br>доктор технических наук, профессор (Петрозаводск)                 |
| <b>Е. Ф. МАРКОВСКАЯ</b><br>доктор биологических наук, профессор (Петрозаводск)                           | <b>В. И. СЫСУН</b><br>доктор физико-математических наук,<br>профессор (Петрозаводск)    |
| <b>Н. Н. НЕМОВА</b><br>доктор биологических наук,<br>профессор, член-корреспондент<br>РАН (Петрозаводск) | <b>В. С. СЮНЁВ</b><br>доктор технических наук,<br>профессор (Петрозаводск)              |
| <b>В. И. ПАТЯКИН</b><br>доктор технических наук, профессор (Санкт-Петербург)                             | <b>В. В. ЩИЩОВ</b><br>доктор геолого-минералогических наук,<br>профессор (Петрозаводск) |

---

Ministry of Education and Science  
of the Russian Federation

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

**№ 8 (121). December, 2011**

---

**Natural & Engineering Sciences**

---

Chief Editor

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

Chief Deputy Editor

*Natalia V. Dorshakova*, Doctor of Medical Sciences, Professor

*Elmira K. Zilber*, Doctor of Medical Sciences, Professor

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

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

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

Editorial Board of the Series  
“Natural & Engineering Sciences”

- A. BOLGOV**  
Doctor of Agricultural Sciences,  
Professor (Petrozavodsk)
- V. VAPIROV**  
Doctor of Chemistry, Professor (Petrozavodsk)
- E. MARKOVSKAYA**  
Doctor of Biological Sciences, Professor (Petrozavodsk)
- N. NEMOVA**  
Doctor of Biological Sciences,  
the RAS Corresponding Member,  
Professor (Petrozavodsk)
- V. PATYAKIN**  
Doctor of Technical Sciences, Professor (St. Petersburg)
- E. RAT'KOVA**  
Series Executive Secretary (Petrozavodsk)
- A. ROGOV**  
Doctor of Technical Sciences, Professor (Petrozavodsk)
- V. SISUN**  
Doctor of Physical-Mathematical Sciences,  
Professor (Petrozavodsk)
- V. SYUNEV**  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor (Petrozavodsk)
- V. SCHIPTSOV**  
Doctor of Geological-Mineralogical Sciences,  
Professor (Petrozavodsk)

## СОДЕРЖАНИЕ

## БИОЛОГИЯ

- Фокина Н. Н., Руоколайнен Т. Р., Фомина О. В., Лесонен Н. В., Шкляревич Г. А., Немова Н. Н.  
Липидный состав литоральных мидий *Mytilus edulis* L. из различных биотопов Кандалакшского залива Белого моря . . . . . 7
- Василевская Н. В., Лукина Ю. М.  
Влияние техногенного загрязнения на динамику роста и мезоструктуру листьев *Betula czererpanovii* Orlova (Мурманская область) . . . . . 14
- Тыркин И. А., Щуров И. Л., Широков В. А., Гайда Р. В.  
Состояние искусственного и естественного воспроизводства пресноводного лосося *Salmo salar* L. (Salmonidae, Salmoniformes) в притоках Онежского озера . . . . . 19
- Яковлева Г. А., Лебедева Д. И., Иешко Е. П.  
Эхиностоматиды птиц Карелии . . . . . 24
- Сергиенко Л. А.  
Эколого-динамические ряды приморской растительности на Поморском и Карельском берегах Белого моря . . . . . 29

## МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

- Жестяников А. Л., Доршакова Н. В., Каранетян Т. А.  
Некоторые особенности сезонных изменений микроэлементного статуса у проживающих в Карелии доноров крови . . . . . 33
- Мейгал А. Ю., Потемина А. М., Шегельман И. М.  
Нейромышечный статус человека при острой и хронической иммерсии в холодной воде . . . . . 37
- Сандугей А. В., Хрусталева О. А., Баранова Н. С., Низовцева Л. А., Пахомова Ю. А.  
Трудности клинической диагностики лайм-боррелиоза . . . . . 42
- Скопец И. С., Везикова Н. Н., Марусенко И. М., Малыгин А. Н.  
Острый коронарный синдром: оценка отдаленных последствий . . . . . 47
- Щеглов Э. А., Везикова Н. Н., Хейфец И. В., Кондричина С. Н.  
Ультразвуковая и рентгенологическая картина при сочетании хронической венозной недостаточности и остеоартроза коленных суставов . . . . . 50

## СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

- Коновалов М. П., Болгов А. Е.  
Оценка племенных качеств быков айрширской породы по передающей способности . . . . . 55
- Егоров А. А., Бурцев Д. С., Орлова Л. В., Николаева М. А.  
Продуктивность видов и внутривидовых таксонов *Picea abies*, *P. fennica*, *P. obovata* в географических культурах на Северо-Западе России . . . . . 59
- Никифоров А. А., Жукова А. И.  
Расчет урожайности и анализ пространственного размещения съедобных грибов с применением ГИС-технологий (на примере Лисинского учебно-опытного лесхоза) . . . . . 64

- Тришкин М. Н., Лопатин Е. В., Гаврилова О. И.  
Оценка устойчивости ведения лесного хозяйства на основе анализа временных серий данных дистанционного зондирования . . . 70
- Черкашина А. И.  
Информационное обеспечение землеустроительной и кадастровой деятельности в регионе . . . . . 74

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Герасимов Ю. Ю., Селиверстов А. А., Суханов Ю. В., Сюньев В. С.  
Основные факторы планирования производства древесного топлива из древесной биомассы . . . . . 77
- Галактионов О. Н., Кузнецов А. В.  
Формирование структуры лесотранспортных путей лесосеки на лесотипологической основе . . . . . 81
- Крупко А. М., Белый Е. К.  
Математическая модель управления производственными мощностями лесотранспортного предприятия . . . . . 85
- Панов Н. Г., Рожков С. С., Питухин А. В.  
Повышение водостойкости трехслойных древесно-стружечных плит на основе карбамидоформальдегидной смолы при введении наноразмерного шунгитового наполнителя в связующее . . . . . 88
- Шатино В. Я., Григорьев И. В., Гулько А. Е.  
Анализ методов расчета параметров и обоснование математической модели разрушения коры при групповой окорке древесины . . . . . 92
- Шиловский В. Н., Кильпельяйнен С. А., Кьяльвияйнен В. А.  
О методах оценки эксплуатационной технологичности лесозаготовительных машин . . . 97
- Васильев В. В.  
Эксплуатационные показатели сплоченной единицы стабилизированной плавучести . . . . . 100

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Заика Ю. В., Костинова Е. К.  
Параметрическая идентификация модели термодесорбции водорода . . . . . 103
- Сидоров Ю. В., Кириков П. В., Рогов А. А.  
Сравнение дендрограмм с равным числом вершин . . . . . 108
- Печников А. А., Чирков А. В., Чуйко Ю. В.  
Исследование связности научно-образовательного Веба . . . . . 111
- Алешина Л. А., Люханова И. В., Будаева В. В., Золотухин В. Н., Митрофанов Р. Ю., Сакович Г. В.  
Результаты рентгеноструктурного анализа недревесных целлюлоз . . . . . 114
- Пергамент А. Л., Болдин П. А., Колчигин В. В., Стефанович Т. Г.  
Бистабильное переключение и эффекты памяти в оксидах переходных металлов . . . 118
- Научная информация . . . . . 121
- Contents . . . . . 122

**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**

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

Учредитель: ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет»

Редактор Г. А. Мехралиева. Корректор С. Л. Смирнова. Переводчик Н. К. Дмитриева. Верстка Е. В. Бобкова.

Подписано в печать 12.12.2011. Формат 60x90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
10 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. (1-й завод – 180 экз.) Изд. № 240.

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 НИКОЛАЕВНА ФОКИНА**

кандидат биологических наук, научный сотрудник Института биологии, Карельский научный центр РАН  
*fokinann@gmail.com*

**ТАТЬЯНА РУДОЛЬФОВНА РУКОЛАЙНЕН**

кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Института биологии, Карельский научный центр РАН  
*truok@krc.karelia.ru*

**ОЛЬГА ВИКТОРОВНА ФОМИНА**

кандидат биологических наук, заместитель директора по развитию научной деятельности, государственный природный заповедник «Кивач»  
*ofomina@onego.ru*

**НАТАЛЬЯ ВАЛЕРЬЕВНА ЛЕСОНЕН**

студентка 5-го курса эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*crystal@drevlanka.ru*

**ГАЛИНА АНДРЕЕВНА ШКЛЯРЕВИЧ**

доктор биологических наук, профессор кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*gash@psu.karelia.ru*

**НИНА НИКОЛАЕВНА НЕМОВА**

доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, директор Института биологии, Карельский научный центр РАН  
*nemova@krc.karelia.ru*

## ЛИПИДНЫЙ СОСТАВ ЛИТОРАЛЬНЫХ МИДИЙ *MYTILUS EDULIS* L. ИЗ РАЗЛИЧНЫХ БИОТОПОВ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ

Исследован липидный состав литоральных мидий *Mytilus edulis* L., собранных из некоторых биотопов Кандалакшского залива Белого моря. Показано, что состав общих липидов, отдельных фракций фосфолипидов и жирнокислотный спектр суммарных липидов пищеварительной железы (гепатопанкреаса) и жабр у *Mytilus edulis* L. зависят от экологического состояния и гидрологических условий в акваториях данных биотопов. Обсуждается возможность использования результатов исследований жирнокислотного состава некоторых органов мидий (жабр и пищеварительной железы) при дополнительной индикации неблагоприятного влияния факторов среды обитания, а также при определении трофических взаимоотношений в морском сообществе.

Ключевые слова: мидии *Mytilus edulis*, липиды, фосфолипиды, жирные кислоты, влияние факторов окружающей среды

### ВВЕДЕНИЕ

Литоральные двустворчатые моллюски, как и большинство прибрежных морских организмов, подвергаются комплексному воздействию абиотических и антропогенных факторов среды, в том числе резкой смене температуры, перепадам солености, краткосрочной аноксии, действию загрязняющих веществ. Отдельные участки Кандалакшского залива значительно отличаются друг от друга не только температурно-солевым режимом и другими гидрологическими характеристиками, но и антропогенной нагрузкой. Акватория залива характеризуется наличием ряда таких антропогенных факторов, как бытовые стоки, промышленные отходы и др., которые влекут за собой загрязнение морской воды различными поллютантами, в частности тяжелыми металлами и нефтепродуктами [15].

Первичный ответ организма на воздействие различных факторов среды обитания наблюдается на биохимическом, молекулярном и клеточном уровнях, то есть обнаруживается до появления

физиологических и морфологических нарушений [21]. Изменения биохимических показателей отражают состояние обмена веществ и зачастую свидетельствуют о развитии компенсаторного ответа организма на воздействие неблагоприятных факторов окружающей среды [8]. Так, модификации в составе мембранных липидов отражают негативное действие факторов на целостность и проницаемость липидного бислоя [6]; в то же время альтерации в количестве запасных липидных фракций свидетельствуют об изменениях в энергетическом обмене организма в ответ на действие окружающей среды [7]. Колебания в количестве физиологически активных липидных компонентов могут свидетельствовать о развитии регуляторных механизмов, способствующих адаптации организма на уровне всего метаболизма в целом к действию различных факторов среды обитания [2], [5].

С целью выявления специфических особенностей в составе липидов двустворчатых моллюсков, вызванных воздействием комплекса факторов окружающей среды, в настоящей ра-

боте исследован липидный состав пищеварительной железы (гепатопанкреаса) и жабр мидий *Mytilus edulis* L., обитающих на литорали некоторых биотопов Кандалакшского залива Белого моря, различающихся между собой по гидродинамическим условиям, температурно-солевому режиму и антропогенной нагрузке.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Сбор *Mytilus edulis* L. осуществлялся на участках литорали с различных биотопов охраняемой территории ФГУ ГПЗ «Кандалакшский» во время отлива. Средний возраст моллюсков составлял 6–8 лет. Мидий собирали во второй половине июля, когда большинство *Mytilus edulis* уже отнерестились. Пол исследованных моллюсков не учитывался, поскольку его определение в полевых условиях у отнерестившихся особей не представляется возможным [25]. Экстракцию липидов из жабр и пищеварительной железы *Mytilus edulis* L. проводили смесью хлороформ / метанол (2:1, по объему) по методу Фолча [23]. Состав общих липидов, отдельных фракций фосфолипидов и жирнокислотный спектр суммарных липидов анализировали методами тонкослойной высокоэффективной жидкостной и газожидкостной хроматографии [10], [22], [14], [19]. Достоверность различий состава общих липидов, фракций фосфолипидов и отдельных жирных кислот в жабрах и гепатопанкреасе мидий, обитающих в разных биотопах Кандалакшского залива Белого моря, оценивали с помощью непараметрического критерия Вилкоксона – Манна – Уитни. Условное разделение исследуемых биотопов Кандалакшского залива на отдельные группы проводилось с помощью кластерного анализа стандартизированных данных о температурно-солевом режиме, некоторых физико-географических характеристиках и содержании загрязняющих веществ в морской воде акватории районов исследования.

Химический анализ воды из разных участков акватории Кандалакшского залива проводила Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, филиал федерального государственного учреждения «Центр лабораторного анализа и технических измерений по Северо-Западному федеральному округу» – «Центр лабораторного анализа и технических измерений по Республике Карелия».

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведено исследование состава общих липидов, отдельных фракций фосфолипидов и спектра жирных кислот суммарных липидов в пищеварительной железе и жабрах мидий *Mytilus edulis* L., обитающих на литорали в различных биотопах Кандалакшского залива Белого моря. Исследуемые места обитания мидий отличаются не только физико-географическими характе-

ристиками [15], но и содержанием в морской воде различных загрязняющих веществ (в частности, нефтепродуктов и тяжелых металлов) (табл. 1, 2).

Таблица 1

Содержание некоторых тяжелых металлов и нефтепродуктов в морской воде (мг/дм<sup>3</sup>), взятой в исследуемых биотопах Кандалакшского залива Белого моря

Название биотопа	Нефтепродукты	Железо	Медь	Цинк	Марганец	Свинец
Турий мыс	3,00	0,02	0,08	0,00	0,00	0,00
Порья губа	0,56	0,02	0,07	0,00	0,00	0,00
Воронья губа	0,14	0,02	0,06	0,03	0,00	0,00
О. Ряшков	0,38	0,02	0,07	0,02	0,00	0,00
Корга между островами Олений и Телячий	0,06	0,02	0,04	0,01	0,00	0,00
ПДК для морских вод	0,05	0,05	0,01	0,05	0,05	0,01

Таблица 2

Некоторые физико-географические и температурно-солевые характеристики исследуемых биотопов Кандалакшского залива Белого моря

Название биотопа	Прибойность (волновая активность)	Течения	Опреснение	Соленость (‰)	Температура (°C)
Турий мыс	+	+	–	21,2	13,8
Порья губа	+	+	–	20,3	12,9
Воронья губа	±	–	+	20,7	12,1
О. Ряшков	–	–	+	14,8	12,1
Корга между островами Олений и Телячий	–	–	+	10,5	13,3

Кластерный анализ стандартизированных данных о температурно-солевом режиме исследуемых биотопов Кандалакшского залива Белого моря, а также данных о некоторых физико-географических характеристиках и о содержании загрязняющих веществ в морской воде позволил условно разделить их на две группы (рис. 1). Первая группа включает коргу между островами Телячий и Олений (далее – о. Олений), литораль острова Ряшков и Вороньей губы. Данные места обитания характеризуются относительно спокойными условиями окружающей среды, однако для них характерны периодические опреснения морской воды. Вторая группа объединяет биотопы, которые отличаются нестабильными условиями обитания, вызванными, в частности, высокой волновой активностью, сильными течениями, – прибрежная акватория Турьего мыса и Порьей

губы. Следует отметить, что во всех исследованных районах Кандалакшского залива зарегистрированы повышенные концентрации меди и нефтепродуктов, особенно это характерно для акваторий Турьего мыса, Порьей губы и о. Ряшков.

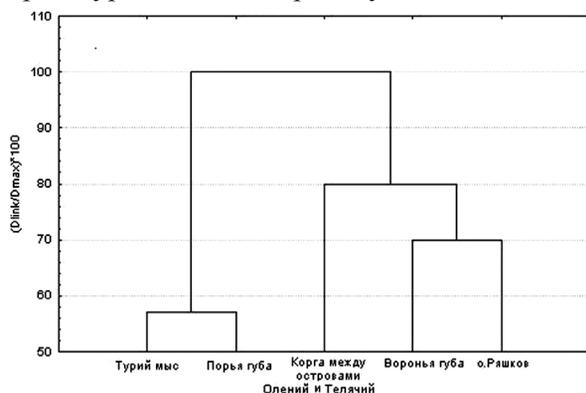


Рис. 1. Дендрограмма различий между исследуемыми местами обитания мидий *Mytilus edulis* L. в Кандалакшском заливе Белого моря

У литоральных мидий, обитающих на островных биотопах (острова Олений и Ряшков), в гепатопанкреасе отмечалось преобладание запасных липидов, главным образом основного источника метаболической энергии – триацилглицеринов (ТАГ). В то же время у моллюсков, взятых из прибрежной акватории Вороньей губы, Турьего мыса и Порьей губы, напротив, наблюдалось доминирование структурных липидных компонентов (холестерина и фосфолипидов) над запасными фракциями (табл. 3). Исследуемые островные биотопы характеризуются относительно благоприятными условиями обитания, в частности, доступностью кормовых объектов, о чем также свидетельствует высокая плотность популяции мидий *Mytilus edulis* L. на их литорали [16]. Следует отметить, что подобные особенности в распределении липидных фракций также наблюдались в гепатопанкреасе основного хищника беломорских мидий – морской звезды *Asterias rubens*, обитающей на данных биотопах Кандалакшского залива [12].

Обращает на себя внимание высокое содержание холестерина в гепатопанкреасе мидий, собранных с литорали Турьего мыса. Повышенный синтез этого компонента мембран, вероятно, необходим моллюскам для поддержания необходимой жидкости и проницаемости бислоя в условиях повышенной антропогенной нагрузки (высокие концентрации меди и нефтепродуктов) и нестабильного гидродинамического режима в акватории Турьего мыса (табл. 1, 2). Высокий уровень холестерина отмечался также у черноморских двустворчатых моллюсков *Mytilus galloprovincialis* в условиях интоксикации тяжелыми металлами [29]. Известно, что благодаря особенностям своей химической структуры этот стерол снижает проницаемость плазматической мембраны, уменьшая тем са-

мым губительное влияние поллютантов на организм [29]. Напротив, у беломорских мидий *Mytilus edulis* в условиях аквариального эксперимента по влиянию высоких концентраций тяжелых металлов (кадмия и меди), а также нефтепродуктов отмечалось значительное понижение содержания холестерина [20], [27]. Вместе с тем показано, что низкие концентрации ионов меди в морской воде, схожие с таковыми в настоящей работе, оказывают обратный эффект на содержание этого стерола у моллюсков, то есть отмечался рост его уровня [27]. Вероятно, повышенное содержание холестерина в гепатопанкреасе, где накапливаются и обезвреживаются все поступающие ксенобиотики, способствует адаптации мидий, обитающих на литорали Турьего мыса, к негативному воздействию окружающей среды, в частности, к загрязнению морской воды тяжелыми металлами.

Во фракционном составе фосфолипидов гепатопанкреаса мидий из всех исследуемых районов Кандалакшского залива отмечалось характерное доминирование фосфатидилхолина (ФХ) (табл. 3), а также отсутствие достоверных изменений в составе отдельных фракций ФЛ в зависимости от местообитания моллюсков. У *Mytilus edulis* в гепатопанкреасе – центральном органе, в котором происходят процессы метаболической регуляции, детоксикации и выведения ксенобиотиков [28], биохимические механизмы адаптации в ответ на действие экологических факторов развиваются в основном на уровне основного компонента мембран – холестерина, не затрагивая при этом состав отдельных фосфолипидов.

Липидный состав **жабр** – наиболее чувствительного органа у двустворчатых моллюсков, который прежде всех тканей подвергается частому негативному воздействию окружающей среды [28], индивидуален для литоральных мидий из каждой исследуемой точки сбора в Кандалакшском заливе. Наиболее схожи между собой низким содержанием структурных липидов жабры моллюсков, обитающих на литорали Порьей губы и о. Олений (табл. 4). Вместе с тем соотношение основных компонентов мембран ХС / ФЛ у них смещено в сторону преобладания холестерина, тогда как уровень фосфолипидов значительно ниже, главным образом за счет основного компонента бислоя – ФХ (табл. 4). Вероятно, повышенное содержание ХС в жабрах мидий, обитающих на литорали данных биотопов, указывает на неспецифические модификации липидного состава в ответ на разные экологические условия обитания моллюсков: частые опреснения на литорали острова Олений и нестабильные гидродинамические условия, а также загрязнения медью и нефтепродуктами акватории Порьей губы.

Состав липидов жабр *Mytilus edulis*, обитающих на литорали Турьего мыса, характеризуется высоким содержанием как холестерина, так

и фосфолипидов. Соотношение ХС / ФЛ в жабрах данных мидий равно 1,0 (табл. 4). Вероятно, особые условия обитания и повышенное содержание загрязняющих веществ в акватории Турьего мыса (табл. 1 и 2) способствуют активации синтеза холестерина (также было отмечено высокое содержание ХС в гепатопанкреасе данных мидий) и фосфолипидов у моллюсков, что, в свою очередь, приводит к созданию оптимального физического состояния мембран в ответ на негативное действие указанных факторов среды обитания.

Липидный спектр жабр у мидий, собранных на литорали Вороньей губы, отличается низкими концентрациями холестерина и повышенным уровнем его запасной формы – эфиров холестерина (ЭХС) (табл. 4). Поскольку образование эфиров ХС представляет собой один из путей выведения из метаболических превращений избытка свободных жирных кислот [1], [7], повышенное содержание ЭХС может свидетельствовать о достаточном поступлении питательного материала мидиям, обитающим в прибрежной зоне Вороньей губы.

Таблица 3

Липидный состав (% сухой массы) гепатопанкреаса литоральных мидий *Mytilus edulis* L. Кандалакшского залива Белого моря

Название биотопа	Корга между островами Олений и Телячий	О. Ряшков	Турий мыс	Порья губа	Воронья губа
Структурные липиды					
Холестерин	3,5	2,6	4,7	3,4	2,8
Фосфолипиды:	8,0	7,9	5,8	6,2	6,0
ФХ	3,1	2,4	2,0	2,7	2,6
ФЭА	0,4	0,2	0,4	0,3	0,2
ХС / ФЛ	0,4	0,3	0,8	0,5	0,5
Запасные липиды					
ТАГ	6,4	10,2	2,2	3,7	2,5
ЭХС	6,1	3,7	1,1	3,3	1,5
Структурные / запасные липиды	0,9	0,8	3,1	1,4	2,2

Примечание. ФХ – фосфатидилхолин; ФЭА – фосфатидилэтанолламин; ХС – холестерин, ФЛ – фосфолипиды; ТАГ – триацилглицерины, ЭХС – эфиры холестерина.

Высокие концентрации ТАГ – универсального источника метаболической энергии, отмеченные в жабрах моллюсков, собранных с литорали острова Ряшков, также указывают на благоприятные кормовые условия данного биотопа. Схожий липидный состав был установлен у мидий из этого района исследования при изучении спектра липидов тканей гепатопанкреаса. Вместе с тем у мидий, обитающих в акватории данного острова, наблюдалось примерно равное соотношение запасных и структурных липидных компонентов, а также основных мембранных фракций – холестерина и фосфолипидов. Ве-

роятно, благоприятные кормовые условия и относительно стабильный гидрологический режим данного местообитания приводят к сбалансированному липидному составу в жабрах у исследуемых моллюсков.

Таблица 4

Липидный состав (% сухой массы) жабр литоральных мидий *Mytilus edulis* L. Кандалакшского залива Белого моря

Название биотопа	Корга между островами Олений и Телячий	О. Ряшков	Турий мыс	Порья губа	Воронья губа
Структурные липиды					
Холестерин	5,1	5,2	7,7	4,0	3,1
Фосфолипиды:	3,5	6,5	7,6	3,0	4,9
ФХ	1,8	2,4	2,5	1,6	2,6
ФЭА	0,09	0,09	0,14	0,09	0,09
ХС / ФЛ	1,5	0,8	1,0	1,3	0,6
Запасные липиды					
ТАГ	2,7	5,7	0,5	2,1	1,7
ЭХС	1,1	2,3	0,0	0,6	2,5
Структурные / запасные липиды	2,3	1,5	30,6	2,6	1,9

Жирнокислотный состав является биохимическим маркером для определения трофических связей в морских сообществах [3]. Кроме того, некоторые особенности в спектре жирных кислот могут свидетельствовать о негативном воздействии факторов среды обитания на исследуемый организм [6]. Например, повышенная антропогенная нагрузка на окружающую среду приводит к снижению концентрации арахидоновой кислоты у гидробионтов [11], в то время как у моллюсков влияние различных абиотических факторов (в частности, солености и/или краткосрочной аноксии) приводит к увеличению уровня арахидоновой кислоты, а также кислот с необычной структурой, таких как неметиленразделенных жирных кислот и n-9 ПНЖК [13].

В составе жирных кислот гепатопанкреаса беломорских мидий, обитающих на литорали островов Олений и Ряшков, а также Вороньей губы, наблюдается заметное доминирование моноеновых жирных кислот, в частности пальмитолеиновой 16:1n-7 и олеиновой 18:1n-9 (табл. 5). Это указывает на преобладание детрита и различных микроорганизмов (а именно бактерий и цианобактерий) в пищевом рационе этих моллюсков, поскольку известно, что данные кислоты являются маркерами бактерий и детрита [26], [24]. Более того, у данных моллюсков отмечены низкие концентрации полиеновых жирных кислот, в частности n-3 ПНЖК, которые, как известно, имеют фитопланктонное происхождение [18], [30], [33], [31].

Спектр жирных кислот гепатопанкреаса мидий, собранных с биотопов Турьего мыса и Порьей губы, наоборот, отличается высокими

концентрациями полиеновых жирных кислот, а именно кислот n-3 семейства, а также сравнительно низким уровнем моноеновых кислот (16:1 и 18:1) (табл. 5). Данные особенности в спектре жирных кислот указывают на доступность фитопланктонного пищевого материала для моллюсков, обитающих в этих биотопах. Литораль Турьего мыса и Порьей губы постоянно промывается морской водой, в которой находится большое количество фитопланктона.

В то же время для биотопов островов Олений и Ряшков, а также Вороньей губы нехарактерны сильные течения и высокая волновая активность, которые обеспечивают достаточное промывание литорали и доступность фитопланктонных организмов, поэтому здесь детрит составляет основной пищевой рацион моллюсков. Необходимо отметить, что для липидного состава гепатопанкреаса мидий из биотопов Турьего мыса и Порьей губы, а также Вороньей губы характерно повышенное содержание кислот n-6 ряда (в частности, арахидоновой 20:4 кислоты и ее метаболитического предшественника – линолевой 18:2 кислоты), которые участвуют в синтезе биологически активных веществ – эйкозаноидов [9]. Высокие концентрации полиеновых жирных кислот у мидий, обитающих на литорали данных районов исследования в Кандалакшском заливе, могут быть также связаны с возникновением повышенного риска окислительного повреждения мембран в условиях негативного воздействия комплекса факторов, характерных для данных мест обитаний. Известно, что увеличение ненасыщенности жирных кислот является одним из адаптивных механизмов у морских беспозвоночных в ответ на действие факторов среды, вызывающих повреждение мембран [17]. Более того, у данных мидий в составе общих липидов наблюдается повышенное содержание n-9 ПНЖК и метиленазделенных жирных кислот (НМРЖК), которые вследствие особенностей своей структуры обеспечивают целостность и устойчивость липидного бислоя к негативному воздействию факторов окружающей среды, вызывающих окислительное разрушение мембран [3]. По-видимому, необходимость в высоких концентрациях полиеновых жирных кислот, биологически активных молекулах – эйкозаноидах, а также в жирных кислотах с необычной структурой появляется у мидий в связи с обитанием в биотопах с нестабильным гидродинамическим режимом и повышенным уровнем загрязняющих веществ по сравнению с относительно спокойными участками литорали на островах Олений и Ряшков.

Жирнокислотный спектр жабр моллюсков из исследуемых районов в Кандалакшском заливе можно условно разделить на две группы. Первая группа объединяет моллюсков, обитающих на литорали о. Ряшков, Турьего мыса и Вороньей губы, вторая – о. Олений и Порьей губы.

Таблица 5

Жирнокислотный состав (% суммы жирных кислот) гепатопанкреаса и жабр литоральных мидий *Mytilus edulis* L. Кандалакшского залива Белого моря

Название биотопа	Корга между островами Олений и Телячий	О. Ряшков	Турый мыс	Порья губа	Воронья губа
Гепатопанкреас					
16:0	15,3	14,1	16,7	14,9	8,1
Сумма НЖК	26,4	24,0	30,1	26,8	15,5
16:1n-7	18,7	23,6	13,4	10,7	3,4
18:1n-9	8,9	15,4	4,3	8,6	34,5
Сумма МНЖК	35,3	46,7	26,07	27,9	47,9
18:3n-3	3,4	1,3	2,1	2,7	1,2
20:5n-3	8,2	10,1	9,4	10,2	8,9
22:6n-3	7,4	3,9	8,5	8,9	6,8
Сумма n-3 ПНЖК	23,3	18,2	24,9	29,2	19,9
18:2n-6	2,4	3,1	3,9	4,2	5,3
20:4n-6	1,7	1,2	3,3	1,8	2,7
Сумма n-6 ПНЖК	7,1	6,7	10,7	8,8	12,9
Сумма n-9 ПНЖК	1,9	2,3	2,4	2,6	1,3
Сумма НМРЖК	0,6	0,8	0,9	0,9	0,3
Сумма ПНЖК	37,7	28,9	43,1	44,4	35,6
Жабры					
16:0	16,5	11,5	9,8	16,7	12,5
Сумма НЖК	26,4	20,3	17,5	26,3	20,2
16:1n-7	4,8	5,2	3,9	3,1	2,1
18:1n-9	4,6	40,8	41,2	5,1	25,7
Сумма МНЖК	18,4	54,8	54,1	18,7	40,1
18:3n-3	0,9	0,6	0,7	0,9	0,6
20:5n-3	11,1	2,8	4,4	10,4	5,5
22:6n-3	11,6	4,1	4,7	12,6	8,7
Сумма n-3 ПНЖК	27,2	9,4	11,0	27,1	17,4
18:2n-6	1,5	5,8	6,4	2,2	1,7
20:4n-6	5,6	2,2	3,1	6,1	5,3
Сумма n-6 ПНЖК	15,9	11,8	13,3	15,6	15,3
Сумма n-9 ПНЖК	5,7	2,7	5,9	4,9	2,3
Сумма НМРЖК	0,7	0,7	0,9	1,5	0,9
Сумма ПНЖК	54,5	23,9	27,7	54,1	38,3

Примечание. НЖК – насыщенные жирные кислоты; МНЖК – мононенасыщенные жирные кислоты; ПНЖК – полиненасыщенные жирные кислоты.

Преобладание моноеновых кислот (в частности, олеиновой 18:1n-9 кислоты) в составе общих липидов жабр мидий, собранных из биотопов первой группы, указывает на наличие в морской воде из данных мест обитаний бактерий и

микроводорослей, богатых данной жирной кислотой [32]. Жирнокислотный спектр жабр мидий из второй группы характеризуется высокими концентрациями полиеновых жирных кислот, в частности, за счет доминирующих кислот n-3 семейства – эйкозапентаеновой 20:5 и докозагексаеновой 22:6. Это указывает на доминирование фито-планктона в пище моллюсков, поскольку известно, что данные жирные кислоты являются маркерами для большинства микроводорослей [18], [30], [33], [31]. Кроме того, высокие концентрации полиеновых жирных кислот в составе фосфолипидов мембран, по-видимому, компенсирует отмеченное превалирующее содержание ХС в жабрах данных мидий, обеспечивая тем самым необходимую жидкость и проницаемость липидного бислоя.

Необходимо отметить, что жирнокислотный состав жабр у литоральных моллюсков, собранных со всех исследуемых биотопов Кандалакшского залива, характеризуется повышенным содержанием полиеновых кислот n-6 семейства (главным образом арахидоновой 20:4 и линолевой 18:2). Данные кислоты не только участвуют в синтезе биологически активных молекул (так называемых эйкозаноидов), но и благодаря особенностям своей структуры обеспечивают прочность и целостность биологических мембран [6], подверженных частым негативным воздействиям со стороны окружающей среды. Необходимо уточнить, что данная особенность в составе жирных кислот жабр отмечалась не только у литоральных беломорских мидий, но также у моллюсков, обитающих на искусственных субстратах марикультуры [13]. Повышенный уровень арахидоновой кислоты в жабрах мидий, обитающих на литорали островов Олений и Ряшков, а также Вороньей губы, может быть также связан с частым опреснением морской воды в акватории данных мест обитаний. В аквариальных экспериментах на беломорских мидиях было показано значительное повышение концентрации данной кислоты при снижении солености морской воды [13]. Помимо n-6 ПНЖК, важную роль в поддержании структурной целостности биологических мембран при неблагоприятных воздействиях среды обитания играют НМРЖК [4], содержание которых было также повышено в жабрах у мидий из всех исследуемых точек сбора.

Органоспецифические особенности в липидном и жирнокислотном спектре у литоральных мидий, обитающих во всех исследуемых биотопах Кандалакшского залива, вероятно, связаны с функцией, выполняемой гепатопанкреасом и жабрами у морских двустворчатых моллюсков. Состав липидов и жирных кислот гепатопанкреаса у прикрепленных морских моллюсков, вероятно, свидетельствует о хроническом действии всего комплекса факторов среды обитания, то

есть он отражает адаптивные особенности метаболизма липидов и жирных кислот у мидий, вызванные постоянным действием факторов, характерных для данных мест обитаний (гидродинамическими характеристиками, температурно-солевым режимом и др.). В то же время липидный и жирнокислотный состав жабр – органа, который в первую очередь подвергается воздействиям внешней среды, отражает условия обитания моллюска в момент сбора биологического образца (например, функциональные изменения, связанные с приливо-отливным циклом), а также тот спектр пищевого материала, который поступил в организм моллюска непосредственно до его изъятия из среды обитания.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что состав общих липидов, отдельных фракций фосфолипидов и жирнокислотный спектр суммарных липидов пищеварительной железы (гепатопанкреаса) и жабр у литоральных мидий *Mytilus edulis* L. зависят от экологического состояния и гидрологического режима акваторий данных биотопов Кандалакшского залива Белого моря. В частности, для мидий, обитающих на относительно благоприятных участках литорали островов Ряшков и Олений, характерно доминирование запасных липидных компонентов в составе общих липидов жабр и гепатопанкреаса, а именно одной из универсальных запасных форм – триацилглицеринов. Наоборот, спектр липидов у моллюсков, собранных из биотопов с нестабильными условиями окружающей среды (Турий мыс, Порья губа и Воронья губа), характеризуется преобладанием структурных липидных компонентов и полиеновых кислот, а также метиленазделенных жирных кислот, которые вследствие особенностей своей структуры обеспечивают целостность и стабильность биологических мембран при негативном влиянии факторов окружающей среды.

Показано, что жирнокислотный состав является важным биохимическим маркером не только для индикации негативного воздействия факторов окружающей среды, но и для определения трофических взаимоотношений в сообществе. Так, были выявлены специфические особенности в жирнокислотном составе гепатопанкреаса и жабр мидий, свидетельствующие о разных условиях питания моллюсков, обитающих в исследуемых биотопах Кандалакшского залива Белого моря, различающихся по гидродинамическим и температурно-солевыми условиям, а также антропогенной нагрузке.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (08-04-01140-а), Программы Президента РФ «Ведущие научные школы» (НШ-3731.2010.4) и Программы Президиума РАН «Биологическое разнообразие».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грибанов Г. А. О метаболических взаимоотношениях липидов // Успехи современной биологии. 1979. Т. 87. Вып. 1. С. 16–33.
2. Дятловицкая Э. В., Безуглов В. В. Липиды как биоэффекторы. Введение // Биохимия. 1998. Т. 63. Вып. 1. С. 3–5.
3. Жукова Н. В. Жирные кислоты морских организмов: таксономические и трофические маркеры: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Владивосток, 2009. 49 с.
4. Захарцев М. В., Науменко Н. В., Челомин В. П. Неметиленразделенные жирные кислоты в фосфолипидах мембран мидии *Crenomytilus grayanus* // Биология моря. 1998. Т. 24. № 3. С. 183–186.
5. Когтева Г. С., Безуглов В. В. Ненасыщенные жирные кислоты как эндогенные биорегуляторы. Обзор // Биохимия. 1998. Т. 63. Вып. 1. С. 6–15.
6. Крепс Е. М. Липиды клеточных мембран. Эволюция липидов мозга. Адаптационная функция липидов. Л., 1981. 339 с.
7. Лапин В. И., Шатуновский М. И. Особенности состава, физиологическое и экологическое значение липидов рыб // Успехи современной биологии. 1981. Вып. 3(6). Т. 92. С. 380–394.
8. Немова Н. Н., Высоцкая Р. У. Биохимическая индикация состояния рыб. М.: Наука, 2004. 215 с.
9. Сергеева М. Г., Варфоломеева А. Т. Каскад арахидоновой кислоты. М.: Народное образование, 2006. 256 с.
10. Сидоров В. С., Лизенко Е. И., Болгова О. М., Нефедова З. А. Липиды рыб. 1. Метода анализа // Лососевые (Salmonidae) Карелии. Вып. 1. Экология. Паразитофауна. Биохимия. Петрозаводск: КФАН СССР, 1972. С. 150–163.
11. Тойвонен Л. В., Нефедова З. А., Сидоров В. С., Шарова Ю. Н. Адаптационные изменения в спектрах жирных кислот тканевых липидов сига *Coregonus lavaretus* L. при влиянии антропогенных нагрузок // Прикладная биохимия и микробиология. 2001. Т. 37. № 3. С. 364–368.
12. Фокина Н. Н., Лесонен Н. В., Руоколайнен Т. Р., Нефедова З. А., Фомина О. В., Шкляревич Г. А., Немова Н. Н. Липидный состав гепатопанкреаса *Asterias rubens* L. Кандалакшского залива Белого моря // Современные проблемы физиологии и биохимии водных организмов. Т. I. Экологическая физиология и биохимия водных организмов // Сборник статей III Междунар. конф. с элементами школы для молодых ученых, аспирантов и студентов. 22 июня – 26 июня 2010 года. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. С. 291–296.
13. Фокина Н. Н., Нефедова З. А., Немова Н. Н. Липидный состав мидий *Mytilus edulis* L. Белого моря. Влияние некоторых факторов среды обитания. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 243 с.
14. Цыганов Э. П. Метод прямого метилирования липидов после ТСХ без элюирования с силикагелем // Лабораторное дело. 1971. № 8. С. 490–493.
15. Шкляревич Г. А. Водоросли и беспозвоночные животные мелководий Порьей губы. Апатиты: КНЦ РАН, 1999. 70 с.
16. Шкляревич Г. А., Фомина О. В. Характеристика некоторых особенностей биологии морской звезды *Asterias rubens* L. на мелководьях Кандалакшского залива Белого моря // Труды Петрозаводского государственного университета. Сер. «Биология». Вып. 2: Вопросы популяционной экологии. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. С. 248–256.
17. Abele D., Puntarulo S. Formation of reactive species and induction of antioxidant defence systems in polar and temperate marine invertebrates and fish // Comp. Biochem. Physiol. A. 2004. Vol. 38. P. 405–415.
18. Ackman R. G., Epstein S., Kelleher M. A composition of lipids and fatty acids of the ocean quahog, *Arctica islandica*, from Nova Scotia and New Brunswick // J. fish. res. board Can. 1974. Vol. 31(11). P. 1803–1811.
19. Arduini A., Peschechera A., Dottori S., Sciarroni A. F., Serafini F., Calvani M. High performance liquid chromatography of long-chain acylcarnitine and phospholipids in fatty acid turnover studies // Journal of Lipid Research. 1996. Vol. 37. P. 684–689.
20. Bakhmet I. N., Fokina N. N., Nefedova Z. A., Nemova N. N. Physiological-biochemical properties of blue mussel *Mytilus edulis* adaptation to oil contamination // Environ. Monit. and Ass. 2009. Vol. 155. № 1–4. P. 581–591.
21. Bertoli E., Ambrosini A., Zolese G., Gabbianelli R., Fedeli D., Falcioni G. Biomembrane perturbation induced by xenobiotics in model and living system // Cell boil. Mol. lett. 2001. Vol. 6. is 2A. P. 334–339.
22. Engelbrecht F. M., Mari F., Anderson J. T. Cholesterol determination in serum. A rapid direction method // S. A. Med. J. 1974. Vol. 48. № 7. P. 250–256.
23. Folch J., Lees M., Sloan-Stanley G. H. A simple method for the isolation and purification of total lipids animal tissue (for brain, liver and muscle) // J. Biol. Chem. 1957. Vol. 226. P. 497–509.
24. Freitas L., Fernandez-Reiriz M. J., Labarta U. Fatty acid profiles of *Mytilus galloprovincialis* (Lmk) mussel of subtidal and rocky shore origin // Comp. Biochem. Physiol. B Biochem Mol Biol. 2002. Vol. 132. № 2. P. 453–461.
25. Hines A., Yeung W. H., Craft J., Brown M., Kennedy J., Bignell J., Stentiford G. D., Viant M. R. Comparison of histological, genetic, metabolomics, and lipid-based methods for sex determination in marine mussels. // Anal. Biochem. 2007. Vol. 369. № 2. P. 175–186.
26. Kharlamenko V. I., Zhukova N. V., Khotimchenko S. V., Svetashev V. I., Kamenev G. M. Fatty acids as markers of food sources in a shallow-water hydrothermal ecosystem (Kraternaya Bight, Yankich Island, Kurile Islands) // Mar. ecol. prog. ser. 1995. Vol. 120. P. 231–241.
27. Lesonen N. V., Fokina N. N., Nemova N. N. Lipid content of mussels, *Mytilus edulis*, as a biomarker of marine environment heavy metal pollution // Current problems of physiology and biochemistry of aquatic organisms. Vol. II. Arctic and Sub-Arctic biological resources – potential for biotechnology. Proceedings of the first international seminar and PhD workshop (6–9 September, 2010). Petrozavodsk: Karelian research centre RAS, 2010. P. 47–49.
28. Marigomez I., Soto M., Cajaraville M. P., Angulo E., Giamberini L. Cellular and subcellular distribution of metals in mollusks // Microscopy research and technique. 2002. Vol. 56. P. 358–392.
29. Nechev J., Stefanov K., Popov S. Effect of cobalt ions on lipid and sterol metabolism in the marine invertebrates *Mytilus galloprovincialis* and *Actinia equina* // Comp. Biochem. and Physiol. A. 2006. Vol. 144. P. 112–118.
30. Pollero R. T., Remaria E., Brenner R. R. Seasonal changes of the lipids of the mollusk *Chlamys tehuetcha* // Comp. Biochem. and Physiol. 1979. Vol. A64. № 2. P. 257–263.
31. Ramos C. S., Parrish C. C., Quibuyen T. A. O., Abrajano T. A. Molecular and carbon isotopic variations in lipids in rapidly settling particles during a spring phytoplankton bloom // Organic geochemistry. 2003. Vol. 34. P. 195–207.
32. Viso A. C., Marty J. C. Fatty acids from 28 marine microalgae // Phytochemistry. 1993. Vol. 34. № 6. P. 1521–1533.
33. Zhukova N. V., Aizdaicher N. A. Fatty acid composition of 15 species of microalgae // Phytochemistry. 1995. Vol. 39. P. 351–356.

**НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА ВАСИЛЕВСКАЯ**

доктор биологических наук, профессор кафедры биологии и химии факультета естествознания, физической культуры и безопасности жизнедеятельности, Мурманский государственный гуманитарный университет  
n.v.asilevskaya@gmail.com

**ЮЛИЯ МИХАЙЛОВНА ЛУКИНА**

аспирант кафедры биологии и химии факультета естествознания, физической культуры и безопасности жизнедеятельности, Мурманский государственный гуманитарный университет  
yulialukina@gmail.com

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ДИНАМИКУ РОСТА И МЕЗОСТРУКТУРУ ЛИСТЬЕВ *BETULA CZEREPANOVII* ORLOVA (Мурманская область)**

Изучено влияние техногенного загрязнения медно-никелевого комбината «Североникель» на показатели роста и анатомическую структуру листа *Betula czerepanovii* Orlova. Установлено, что тяжелые металлы вызывают ингибирование апикального и маргинального роста листьев. Выявлены количественные изменения показателей мезоструктуры листа.

Ключевые слова: тяжелые металлы, береза Черепанова, рост, лист, мезоструктура

Техногенное загрязнение среды лимитирует продукционный процесс, что приводит к нарушению метаболизма растений, торможению их роста и развития, снижению продуктивности и продолжительности вегетации. Для оценки антропогенного воздействия с 60-х годов XX века начали использовать методы фитоиндикации [10], [14]. Накоплен большой фактический материал мониторинга техногенной среды с использованием различных критериев, таких как интенсивность физиологических процессов, уровень развития морфологических и анатомических структур растений [9], [10], [23], [25], [34].

Мурманская область является одним из центров цветной металлургии на Северо-Западе России. Вокруг медно-никелевых комбинатов «Североникель» и «Печенганикель» проводится регулярный мониторинг состояния наземных экосистем, растительных популяций и сообществ, их продукционных характеристик [17], [18], [20], [21], [32], [36]. В то же время работы по изучению антропогенного воздействия на фотосинтетический аппарат листа, в частности его анатомическую структуру, немногочисленны и выполнены в основном на хвойных [8], [29], [30].

Цель исследования – анализ влияния техногенного загрязнения на динамику роста и анатомическую структуру листьев березы Черепанова (*Betula czerepanovii* Orlova) в окрестностях комбината «Североникель».

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Исследование роста и развития листьев *Betula czerepanovii* проводили в полевой сезон 2006 года в окрестностях медно-никелевого комбина-

та «Североникель» (г. Мончегорск). Основными загрязняющими веществами при переработке сырья являются диоксид серы и пыль, содержащая тяжелые металлы (Ni, Cu, Co). В 2006 году валовые выбросы загрязняющих веществ в атмосферу превысили 46 492 т. Выбросы сернистого ангидрида (SO<sub>2</sub>) в 2006 году составили 40,3 т, никеля – 456,5 т, меди – 599,6 т [7]. Техногенная пустыня, где доля погибших деревьев составляет более 80 %, протянулась на 10 км в южном направлении от комбината и на 15 км – в северном [32]. Исследования проводили на пробных площадях, расположенных по градиенту загрязнения в юго-западном направлении от комбината. Экспериментальные площадки заложены в растительных сообществах, находящихся на разных стадиях деградации: техногенная пустошь (3 км – ПП<sub>1</sub>), техногенное редколесье (8 км – ПП<sub>2</sub>), дефолирующие леса (20 км – ПП<sub>3</sub>, 30 км – ПП<sub>4</sub>), фоновая зона (60 км – ПП<sub>5</sub>). На каждой площадке маркировали по 10 деревьев *B. czerepanovii*, близких по габитусу, с диаметром ствола 10–15 см, высотой 3–5 м. Исследования динамики роста листьев проводили в течение июня – июля 2006 года по стандартной методике [12]. Замеры листьев (длины и ширины) проводили каждые 10 суток. Для проведения анатомических исследований в начале августа 2006 года с маркированных деревьев на каждой площадке собрано и зафиксировано по 20 листьев. В качестве фиксатора использован FAA [2]. Изучение мезоструктуры листьев *B. czerepanovii* проводили на поперечных срезах под световым микроскопом Биомед С-2 с помощью окулярмикрометра. Исследованы следующие

показатели: число слоев, длина и ширина клеток палисадной и губчатой ткани, толщина палисадного и губчатого мезофилла и листовой пластинки. Объем выборки составил 100 измерений по каждому параметру. Микрофотосъемку проводили при помощи цифровой фотокамеры «Canon Ixus 800 IS» на микроскопе Биомед С-2.

Концентрацию тяжелых металлов (медь, никель) в листьях *B. czerepanovii* определяли методом атомно-адсорбционной спектрофотометрии в лаборатории наземных экосистем Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. В качестве контроля концентрации тяжелых металлов в листьях березы использованы данные по содержанию никеля и меди, полученные на фоновой площади в пос. Алакуртти (250 км от г. Мончегорска), которая соответствует критериям, принятым в международной практике [24] (табл. 1). Для статистической обработки данных использован пакет программ Microsoft Excel-2000.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### Содержание тяжелых металлов в листьях.

В результате проведения анализа на содержание в листьях *B. czerepanovii* ионов никеля и меди показано, что концентрация тяжелых металлов значительно увеличивается по градиенту загрязнения (табл. 1).

Таблица 1

Содержание меди и никеля в листьях *Betula czerepanovii* в окрестностях комбината «Североникель» (2006 год)

№ пробной площади	Ni (мг/кг)	Cu (мг/кг)
ПП <sub>1</sub>	191,61	39,393
ПП <sub>2</sub>	169,33	50,156
ПП <sub>3</sub>	79,581	28,603
ПП <sub>4</sub>	45,626	19,00
ПП <sub>5</sub>	26,887	12,911
Контроль	4,51	4,98

Максимальное содержание ионов никеля в листьях березы выявлено в зонах техногенного редколесья (ПП<sub>2</sub>) и техногенной пустоши (ПП<sub>1</sub>), где превышение составляет 38 и 42 раза соответственно (табл. 1). Концентрация меди в фотосинтезирующих органах на данных площадках значительно меньше и превышает контрольные значения в 8 и 10 раз. Полученные данные согласуются с результатами других авторов [1], [4], [17], [18], [19], [27], проводивших химический анализ листьев различных видов растений, которые подвергались воздействию техногенного загрязнения комбината «Североникель», и выявивших в них многократное увеличение содержания ионов никеля и меди.

**Рост и развитие листьев.** В ходе исследований установлено, что высокие концентрации ни-

келя и меди в листьях *B. czerepanovii* влияют на процессы роста и развития. Так, на пробных площадках в фоновой зоне (ПП<sub>5</sub>) и зоне дефолирующих лесов (ПП<sub>3</sub>, ПП<sub>4</sub>) развертывание листьев началось на 5 суток ранее (22.05.2006), чем у деревьев, произрастающих на площадках в окрестностях комбината (ПП<sub>2</sub>, ПП<sub>1</sub>). Нарушение динамики развития на ранних этапах онтогенеза листа свидетельствует о токсичном воздействии тяжелых металлов на процессы дифференцировки меристематических клеток. В условиях техногенной нагрузки выявлено ингибирование апикального (рис. 1) и маргинального роста листовых пластинок *B. czerepanovii* (рис. 2). Если в зоне дефолирующих лесов (ПП<sub>4</sub>) показатели длины листа незначительно отличаются от фоновых значений (ПП<sub>5</sub>), то в окрестностях комбината эффект ингибирования усиливается на экспериментальных площадках ПП<sub>3</sub>, ПП<sub>2</sub>, ПП<sub>1</sub> (рис. 1), особенно в первые дни вегетации. Длина листовых пластинок в зонах техногенного редколесья (ПП<sub>2</sub>) и пустоши (ПП<sub>1</sub>) в начале их развертывания (31.05.2006) на 40 % меньше, чем в фоновой зоне (ПП<sub>5</sub>). Через 20 дней после начала вегетации эти различия на всех площадках снижаются до 20–30 % и сохраняются в течение дальнейшего периода роста листьев.

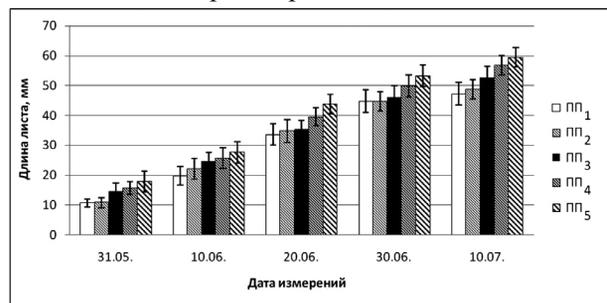


Рис. 1. Влияние техногенного загрязнения на апикальный рост (длину листовой пластинки) *B. czerepanovii* в окрестностях комбината «Североникель» (мм) в вегетационный сезон 2006 года

Установлено, что высокая концентрация ионов никеля и меди в листьях *B. czerepanovii* вызывает большее ингибирование маргинального роста листовых пластинок, чем апикального, особенно на ранних этапах онтогенеза (рис. 2). В начале развертывания ширина листа в зоне техногенного редколесья (ПП<sub>2</sub>) составляет 40 % (31.05.2006) и 20 % (10.06.2006) от фоновых значений, на техногенной пустоши (ПП<sub>1</sub>) этот показатель равен 45 и 38 % соответственно.

Как показывают исследования многих авторов [6], [22], [23], [31], фотосинтетический аппарат очень чувствителен к повышению содержания тяжелых металлов в окружающей среде, что проявляется в нарушении многих параметров его функционирования. Согласно нашим данным, ингибирование апикального и маргинального роста листьев *B. czerepanovii* в окрестностях комбината «Североникель» прежде всего

обусловлено высокими концентрациями ионов никеля и меди. Полученные результаты подтверждают исследования других авторов [11], [16], [23], [28], [35], [37], [38], которые также показали, что повышение концентрации тяжелых металлов в среде приводит к значительному уменьшению длины, ширины и площади листовой пластинки, что является одной из причин снижения интенсивности процесса фотосинтеза.

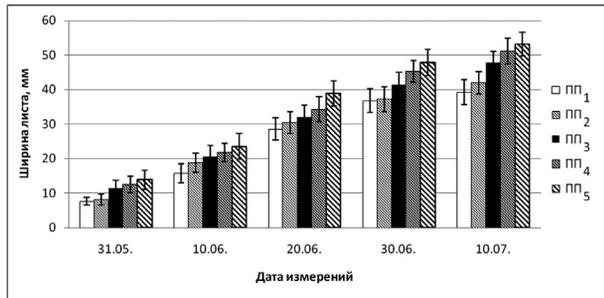


Рис. 2. Влияние техногенного загрязнения на маргинальный рост (ширину листовой пластинки) *B. czerepanovii* в окрестностях комбината «Североникель» (мм) в вегетационный сезон 2006 года

Особый интерес представляет высокий уровень ингибирования роста листа в начале его онтогенеза. Этот эффект может быть вызван токсичным воздействием ионов никеля, которые подавляют дифференциацию клеток меристем, функционирующих в первые 10 дней развития листа, то есть в период начала формирования листовой пластинки [26]. При этом, как показали наши данные, наиболее выражено ингибирование маргинального роста, что, по-видимому, объясняется более токсичным воздействием тяжелых металлов на деление клеток маргинальных меристем, чем апикальных. По мнению Б. Р. Васильева, длина и ширина листовой пластинки изменяются независимо друг от друга, что свидетельствует об отсутствии сопряженности между апикальным и маргинальным ростом зачатка листа, а также о слабой выраженности диффузного роста в процессе развития листа древесных растений [3].

**Мезоструктура листа.** В результате исследований анатомической структуры листьев *B. czerepanovii* выявлено, что в условиях фоновой зоны лист имеет крупноклеточную эпидерму с сильно утолщенной наружной клеточной оболочкой (рис. 3). Отчетливо выражена дифференциация мезофилла на палисадную и губчатую ткани. Палисадный мезофилл состоит из одного ряда вытянутых узких клеток. Очень рыхлая, с крупными межклетниками губчатая ткань состоит из 5–6 рядов клеток изодиаметрической формы. Клетки нижней эпидермы сильно различаются между собой по форме и размеру, их клеточные стенки несколько утолщены.

В листьях *B. czerepanovii*, произрастающей в условиях техногенной нагрузки, число слоев палисадной ткани варьирует по градиенту загряз-

нения от 1 до 2. Индекс палисадности мезофилла листьев на всех экспериментальных площадках, кроме техногенной пустоши, варьирует от 0,6 до 0,7 (табл. 2), тогда как на площадке ПП<sub>1</sub> этот показатель имеет максимальное значение – 0,9.

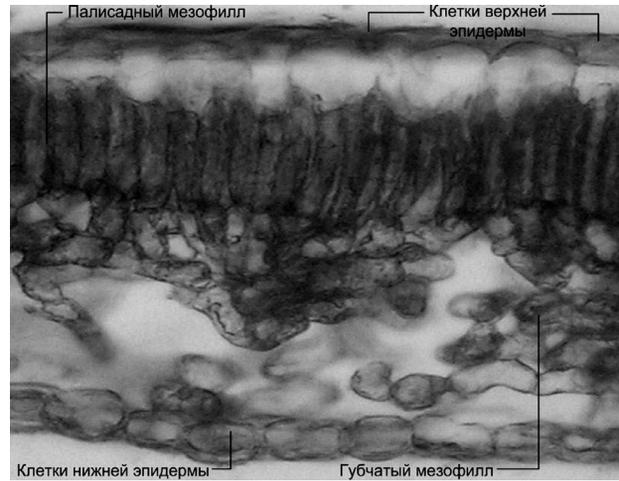


Рис. 3. Анатомическая структура листа *B. czerepanovii* на техногенной пустоши в окрестностях комбината «Североникель»

Палисадные клетки листа значительно удлиняются по мере увеличения концентрации тяжелых металлов (в зоне дефолирующих лесов (ПП<sub>3</sub>, ПП<sub>4</sub>) – на 45 %, техногенного редколесья (ПП<sub>2</sub>) – на 60 %, техногенной пустоши (ПП<sub>1</sub>) – на 100 %) и уменьшаются в диаметре. Соотношение длины палисадной клетки к ее ширине возрастает по градиенту загрязнения от 1,9 (ПП<sub>5</sub>, ПП<sub>4</sub>) до 3 (ПП<sub>3</sub>), 4,2 (ПП<sub>2</sub>) и 6,6 (ПП<sub>1</sub>). Толщина палисадного мезофилла листьев также увеличивается за счет роста клеток в длину (табл. 2).

Число слоев губчатой ткани листа *B. czerepanovii*, произрастающей в зоне техногенного воздействия комбината, варьирует в пределах ошибки от 5 до 6 (табл. 2). В то же время изменяются количественные параметры клеток губчатого мезофилла. Длина губчатых клеток листьев березы в зоне дефолирующих лесов увеличивается на 48 % (ПП<sub>3</sub>), техногенного редколесья (ПП<sub>2</sub>) – на 38 %, техногенной пустоши (ПП<sub>1</sub>) – на 55 % по сравнению с фоновыми значениями (табл. 2). Достоверно уменьшается диаметр клеток губчатого мезофилла листьев березы, находящихся в непосредственной близости к комбинату (ПП<sub>2</sub>, ПП<sub>1</sub>). За счет удлинения губчатых клеток увеличивается толщина губчатого мезофилла по градиенту загрязнения (табл. 2).

По мере возрастания техногенной нагрузки и увеличения концентрации ионов никеля и меди увеличивается толщина листовой пластинки. Если в зоне дефолирующих лесов (ПП<sub>4</sub>) этот показатель изменяется незначительно, то в зонах техногенного редколесья (ПП<sub>2</sub>) и пустоши (ПП<sub>1</sub>) происходит утолщение листа на 65 % по сравнению с фоновой зоной.

Таблица 2

Влияние аэротехногенного загрязнения на анатомическую структуру листьев *Betula czerepanovii* в окрестностях комбината «Североникель» (2006 год)

Параметры (n = 50)	ПП <sub>1</sub>	ПП <sub>2</sub>	ПП <sub>3</sub>	ПП <sub>4</sub>	ПП <sub>5</sub>
Толщина листовой пластинки (мкм)	25,89 ± 1,69	25,63 ± 1,52	23,54 ± 1,43	18,36 ± 1,09	16,93 ± 1,74
Толщина палисадного мезофилла (мкм)	9,79 ± 1,40	7,73 ± 1,52	7,10 ± 1,06	5,58 ± 0,96	5,89 ± 0,76
Число слоев палисадного мезофилла	1,76 ± 0,34	1,39 ± 0,31	1,45 ± 0,36	1,32 ± 0,27	1,29 ± 0,23
Толщина губчатого мезофилла (мкм)	11,15 ± 1,64	10,96 ± 1,62	10,28 ± 1,06	8,91 ± 1,02	8,67 ± 1,62
Число слоев губчатого мезофилла	5,03 ± 0,84	5,57 ± 0,76	5,96 ± 0,58	5,24 ± 0,65	5,57 ± 0,82
Длина палисадной клетки (мкм)	4,59 ± 0,86	3,76 ± 0,65	2,93 ± 0,64	2,20 ± 0,52	2,27 ± 0,47
Диаметр палисадной клетки (мкм)	0,70 ± 0,2	0,90 ± 0,36	0,95 ± 0,22	1,13 ± 0,35	1,22 ± 0,46
Длина губчатой клетки (мкм)	2,33 ± 0,34	2,07 ± 0,46	2,22 ± 0,46	1,89 ± 0,49	1,51 ± 0,38
Диаметр губчатой клетки (мкм)	0,92 ± 0,33	1,18 ± 0,29	1,33 ± 0,36	1,35 ± 0,28	1,42 ± 0,39
Индекс палисадности	0,9	0,7	0,7	0,6	0,7
ДПП/ШПП*	6,56	4,2	3	1,9	1,9

\*Соотношение длины клетки палисадного мезофилла к ширине клетки.

Тяжелые металлы, в частности никель, вызывают анатомические изменения органов растений [26]. Существуют различные представления о том, какие именно ткани листа подвержены наибольшему воздействию. По мнению одних авторов, это палисадная паренхима [11], по мнению других – губчатая [13]. Согласно полученным нами данным, ионы никеля и меди вызывают более значительную модификацию палисадных клеток листьев *B. czerepanovii*, выражающуюся в их удлинении, уменьшении диаметра, увеличении индекса палисадности, усилении периклиналильных делений. В меньшей степени изменяется величина губчатых клеток. Аналогичные данные получены И. В. Серегиным и А. Д. Кожевниковой [26] в лабораторных условиях на видах *Triticum aestivum*, *Brassica oleracea*.

Значительное утолщение листовых пластинок *B. czerepanovii* в окрестностях комбината

«Североникель» может быть вызвано интегральным воздействием тяжелых металлов. Имеются данные, что ионы меди обуславливают 5 % увеличение средней суммарной толщины листьев [15]. При этом изменения как в апикальной, так и в срединной и базальной частях происходят за счет увеличения толщины столбчатой и губчатой паренхимы. Значительный рост листа в толщину при уменьшении площади поверхности выявлен также у *Vaccinium myrtillus* в окрестностях завода по переработке твердых бытовых отходов г. Мурманска [33].

Увеличение размеров клеток мезофилла и толщины листа, по-видимому, является неспецифической реакцией *B. czerepanovii* на техногенное загрязнение среды и, в частности, высокую концентрацию ионов никеля и меди. Аналогичные данные получены Ю. В. Гамалеем [5] для рода *Betula* в экстремальных условиях произрастания, что, по нашему мнению, свидетельствует о неспецифической реакции ассимиляционного аппарата берез на действие стрессовых факторов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Техногенное загрязнение комбината «Североникель», в частности высокое содержание ионов никеля и меди в листьях *B. czerepanovii*, приводит к ингибированию их апикального и маргинального роста, особенно в первые дни вегетации. Установлено, что маргинальные меристемы листа более подвержены воздействию тяжелых металлов, чем апикальные. Тяжелые металлы вызывают более значительную модификацию клеток палисадного мезофилла листьев *B. czerepanovii*, чем губчатого, что выражается в их удлинении, уменьшении диаметра, увеличении индекса палисадности и соотношения длины палисадной клетки к ее ширине, усилении периклиналильных делений. В зонах техногенного редколесья и пустоши длина клеток палисадного мезофилла листьев *B. czerepanovii* увеличивается на 60 и 100 % соответственно, при этом уменьшается их диаметр. По мере возрастания техногенной нагрузки листовая пластинка *B. czerepanovii* при общем снижении фотосинтетической поверхности значительно утолщается в большей степени в связи с увеличением объема палисадного мезофилла. Возможно, что в условиях стресса достигается компенсационный эффект за счет увеличения внутренней фотосинтетической поверхности мезофилла листа.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории наземных экосистем Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН за проведение анализа листьев *B. czerepanovii* на содержание тяжелых металлов методом атомно-адсорбционной спектроскопии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баркан В. Ш. Загрязнение почвы никелем и медью от промышленного источника металлургических пылей // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2008. С. 46–50.
2. Барыкина Р. П. Справочник по ботанической микротехнике. Основы и методы. М.: Изд-во МГУ, 2004. 312 с.
3. Васильев Б. Р. Строение листа древесных растений различных климатических зон. Л.: Изд-во ЛГУ, 1988. 208 с.
4. Влияние промышленного атмосферного загрязнения на сосновые леса Кольского полуострова / Под ред. Б. Н. Норина и др. Л.: Изд-во БИН АН СССР, 1990. 195 с.
5. Гамалей Ю. В. Транспортная система сосудистых растений. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. 422 с.
6. Гетко Н. В. Растения в техногенной среде: структура и функции ассимиляционного аппарата. Минск: Наука и техника, 1989. 208 с.
7. Ежегодник Кольской горно-металлургической компании. М., 2006. 47 с.
8. Ефимова М. А. Биоморфологические особенности *Vaccinium myrtillus* L. и *V. vitis-idaea* L. в естественных и антропогенно нарушенных лесных сообществах Кольского полуострова: Дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2007.
9. Жиров В. В. Адаптации и возрастная изменчивость растений на Севере. Ч. 1/2. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2001. 355 с.
10. Жиров В. К., Голубеева Е. И., Говорова А. Ф., Хаитбаев А. Х. Структурно-функциональные изменения растительности в условиях техногенного загрязнения на Крайнем Севере. М.: Наука, 2007. 162 с.
11. Илькун Г. М. Загрязнители атмосферы и растения. Киев: Наукова думка, 1978. 246 с.
12. Кищенко И. Т. Методика изучения сезонного роста древесных растений // Методы полевых и лабораторных исследований растений и растительного покрова. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2001. С. 178–184.
13. Красинский Н. П. Дымоустойчивость растений и дымоустойчивые ассортименты. М.: Наука, 1950. С. 9–109.
14. Крючков В. В., Кондратович И. И., Андреев Г. Н. Красная Книга экосистем Кольского Севера. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1988. 102 с.
15. Кулагин А. А., Шагиева Ю. А. Древесные растения и биологическая консервация промышленных загрязнителей. М.: Наука, 2005. 190 с.
16. Лайдинен Г. Ф., Таланова В. В., Титов А. Ф., Казнина Н. М. Влияние свинца на рост и развитие *Setaria viridis* (L.) Beauv. // Растительные ресурсы. 2004. Т. 40. Вып. 3. С. 53–59.
17. Лукина Н. В., Никонов В. В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1996. Ч. 1–2. С. 36–47.
18. Лукина Н. В., Никонов В. В. Питательный режим лесов северной тайги: Природные и техногенные аспекты. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1998. 316 с.
19. Лянгузова И. В., Чертов О. Г. Химический состав растений при атмосферном и почвенном загрязнении // Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л.: Наука, 1990. С. 75–86.
20. Мазная Е. А. Сравнительная характеристика ценопопуляций *Vaccinium myrtillus* L. в условиях длительного атмосферного загрязнения (Кольский полуостров) // Растительные ресурсы. 2003. Т. 39. Вып. 4. С. 36–47.
21. Мазная Е. А., Лянгузова И. В. Параметры ценопопуляций и накопление тяжелых металлов *Vaccinium myrtillus* L. и *V. vitis-idaea* L. (Ericaceae) при разном уровне техногенной нагрузки // Растительные ресурсы. 2006. Вып. 1. С. 16–27.
22. Неверова О. А., Цандекова О. Л. Фотосинтетическая способность древесных растений как индикатор суммарного загрязнения атмосферного воздуха городской среды // Сибирский экологический журнал. 2010. Вып. 2. С. 193–196.
23. Николаевский В. С. Биологические основы газоустойчивости растений. Новосибирск: Наука, 1979. 280 с.
24. Отчет о НИР ИППЭС КНЦ РАН. Восстановление территорий, нарушенных антропогенным воздействием в окрестностях г. Мончегорска. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2003.
25. Сергейчик С. А. Устойчивость древесных растений к техногенной среде. Минск: Наука и техника, 1994. 280 с.
26. Серегин И. В., Кожевникова А. Д. Физиологическая роль никеля и его токсическое действие на высшие растения // Физиология растений. 2006. Т. 53. С. 285–308.
27. Сухарева Т. А. Многолетняя динамика содержания тяжелых металлов в листьях доминирующих растений бореальных лесов в условиях атмосферного загрязнения // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2008. С. 156–160.
28. Таланова В. В., Титов А. Ф., Боева Н. П. Влияние свинца и кадмия на проростки ячменя // Физиология и биохимия культурных растений. 2001. Т. 33. № 1. С. 33–34.
29. Федорков А. Л. Адаптация хвойных к стрессовым условиям Крайнего Севера. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1999. 97 с.
30. Федорков А. Л. Изменчивость признаков анатомического строения хвои сосны и ее устойчивость к техногенному и климатическому стрессу // Экология. 2002. № 1. С. 70–72.
31. Фролов А. К. Окружающая среда крупного города и жизнь растений в нем. СПб.: Наука, 1998. 328 с.
32. Черненко Т. В. Особенности прорастания семян сосны и ели при разной загрязненности почв тяжелыми металлами // Влияние промышленных предприятий на окружающую среду. М.: Наука, 1987. С. 168–182.
33. Яковлев А. П. Мониторинг роста и развития *Vaccinium myrtillus* L. в окрестностях завода по термической обработке твердых бытовых отходов г. Мурманска // Естественнонаучные проблемы Арктического региона. Мурманск, 2007.
34. Ярмишко В. Т. Сосна обыкновенная и ее сообщества в условиях атмосферного загрязнения на Европейском Севере: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб., 1994.
35. Kosobrukhov A., Knyazeva I., Mudrik V. Plantago major plants responses to increase content of lead in soil: Growth and photosynthesis // Plant growth Regul. 2004. Vol. 42. P. 145–151.
36. Kozlov M. V., Zvereva E. L. Reproduction of mountain birch along a strong pollution gradient near Monchegorsk, Northwestern Russia // Environmental Pollution. 2004. Vol. 132. P. 443–151.
37. Sandalio L. M., Dalurzo H. C., Gomes M., Romero-Puertas M. C., del Rio L. A. Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants // J. Exp. Bot. 2001. Vol. 52. № 364. P. 2115–2126.
38. Vassilev A., Berova M., Zlatev Z. Influence of Cd<sup>2+</sup> on growth, chlorophyll content, and water relations in young barley plants // Biol. Plant. 1998. Vol. 41. № 4. P. 601–606.

**ИГОРЬ АЛЕКСАНДРОВИЧ ТЫРКИН**

аспирант кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*igor7895@yandex.ru*

**ИГОРЬ ЛЬВОВИЧ ЩУРОВ**

кандидат биологических наук, заведующий лабораторией популяционной экологии лососевых рыб Северного научно-исследовательского института рыбного хозяйства, Петрозаводский государственный университет  
*shurov@research.karelia.ru*

**ВЯЧЕСЛАВ АНАТОЛЬЕВИЧ ШИРОКОВ**

заместитель директора по научной работе Северного научно-исследовательского института рыбного хозяйства, Петрозаводский государственный университет  
*shurov@research.karelia.ru*

**РОМАН ВЛАДИМИРОВИЧ ГАЙДА**

научный сотрудник лаборатории популяционной экологии лососевых рыб Северного научно-исследовательского института рыбного хозяйства, Петрозаводский государственный университет  
*shurov@research.karelia.ru*

## СОСТОЯНИЕ ИСКУССТВЕННОГО И ЕСТЕСТВЕННОГО ВОСПРОИЗВОДСТВА ПРЭСНОВОДНОГО ЛОСОСЯ *SALMO SALAR* L. (SALMONIDAE, SALMONIFORMES) В ПРИТОКАХ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Приводится информация о притоках Онежского озера, в которых происходит нерест «дикого» лосося. На нерестово-выростных участках (НВУ) проведен подсчет плотности заселения молоди лосося и прослежена динамика ее изменения. Описано расположение НВУ в притоках Онежского озера. Рассчитаны площади НВУ притоков. Проведен анализ использования общего фонда НВУ притоков Онежского озера.

Ключевые слова: притоки Онежского озера, атлантический лосось, плотность расселения, площадь НВУ

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время многие популяции пресноводного лосося испытывают сильное антропогенное воздействие, которое выражается в загрязнении рек при лесосплаве, гидростроительстве, вырубке лесов, мелиоративных и сельскохозяйственных работах, неконтролируемом вылове. Лесосплав на реках Карелии был прекращен в 70-х годах прошлого столетия, но его последствия ощущаются и в настоящее время. В последние десятилетия популяции лосося стали испытывать сильный прессинг со стороны любителей рыбной ловли.

Вследствие воздействия такого комплекса факторов многие нерестовые реки потеряли свой репродуктивный потенциал. Во многих реках наблюдается постепенная деградация НВУ лосося. Седиментация взвесей приводит к уплотнению грунта и последующему зарастанию. Этот процесс протекает намного быстрее при отсутствии производителей на нерестилищах. Через несколько лет производителям не представляется возможным отнереститься.

Онежское озеро находится на территории Европейского Севера России, оно вытянуто с северо-северо-запада на юго-юго-восток. Это один из крупнейших водоемов Российской Федерации, второй в Европе после Ладожского озера [5], [4].

В Онежское озеро впадают 52 реки протяженностью более 10 км [15], из них лососем использовались, по данным Н. Н. Пушкарева [10], 22 реки (с притоками): Лососинка, Шуя, Суна, Лижма, Уница, Кумса, Повенчанка, Немина, Пяльма, Туба, Водла, Андома, Вытегра, Мегра, Водлица, Шокша, Тамбица, Аржема, Возрица, Нелекса, Иссельга, Филиппа. Деградация естественного воспроизводства на основных притоках в бассейне Онежского озера происходила следующим образом: к концу XIX века лосось исчез в Лососинке, Шокше, Тамбице, Аржеме, Возрице, Нелексе, Филиппе; а к концу XX века – в Суне, Унице, Немине, Тубе. В настоящее время пресноводный лосось нерестится в 12 реках Онежского озера [13], [1]. По нашим данным, в некоторые из перечисленных рек (Лижма, Кумса, Суна, Немина, Андома, Мегра) лосось хотя и продолжает заходить для нереста, но численность производителей крайне низка и не превышает нескольких десятков особей.

Цель данной работы – исследовать состояние естественного воспроизводства лосося в некоторых притоках Онежского озера, произвести подсчет площади нерестово-выростных участков притоков Онежского озера, пригодных для воспроизводства и обитания молоди лосося, и оценить плотность их заселения.



Створ ГЭС расположен в 21 км от Шотозера выше по течению, или в 130,5 км от Онежского озера. После постройки ГЭС рыбохозяйственное значение верхней части бассейна Шуи, включая основное русло и наиболее крупные притоки первого порядка, было утрачено.

От устья Логмозера основные НВУ лосося расположены следующим образом: в 11,7 км расположен Нижнебесовецкий порог протяженностью 600 м; далее в 14,1 км – Бесовецкий порог протяженностью 850 м; в 28 км – Виданский порог протяженностью 5,5 км; в 45,1 км – порог Толли протяженностью 1,2 км; в 48,4 км – порог Юманишки протяженностью 1,1 км; в 51,9 км – порог Кутижменский протяженностью 2,3 км; в 69,5 км – порог Киндасовский протяженностью 4,1 км. На вышеперечисленных порогах дно сложено из крупного, среднего и мелкого валуна, а также гальки крупной и средней фракций. На участке от плотины ГЭС «Игнойла» до Шотозера имеются 5 небольших порожистых участков длиной 50–450 м, но нерестовых грунтов здесь практически нет. Дно сложено из скальных глыб и крупных валунов.

Общая площадь НВУ р. Шуи на участке от плотины Игнойльской ГЭС до устья составляет 1 262 000 м<sup>2</sup>, из них площадь нерестовых угодий – 393 900 м<sup>2</sup>. Пороги имеют разную репродуктивную ценность, наибольшей обладают Виданский и Бесовецкий, которые в сумме составляют 42 % общего фонда НВУ и 68 % нерестовых угодий реки.

Р. Шуя на протяжении существования лососевого промысла являлась основным нерестовым притоком, на ее долю приходилось 75 % уловов лосося по озеру [6], [12]. Уловы держались на стабильном уровне до 1960 года, затем постоянно снижались [13]. В связи с катастрофическим падением численности стада лосося его промысел был прекращен в 1993 году, в 1994 году на р. Шуде было установлено рыбоучетное заграждение (РУЗ) и начались работы по искусственному воспроизводству шуйского лосося [2].

До 1999 года численность молоди лосося в р. Шуде держалась на критически низком уровне. В последующем наблюдалось постепенное увеличение плотности заселения молодью НВУ р. Шуи. Начиная с 2005 года на облавливаемых нами порогах отмечаются стабильно высокие плотности молоди лосося в р. Шуде за весь период наблюдений (рис. 2).

Начиная с 1977 года на базе шуйской популяции осуществляется искусственное воспроизводство лосося. В реку ежегодно выпускают молодь лосося возраста 2+ (см. таблицу).

Количество заводской молоди, выпускаемой в р. Шуду за последние 2 года, снизилось почти в 3 раза. В дальнейшем это приведет к снижению численности нагульной популяции лосося в Онежском озере. По нашим данным, шуйская популяция лосося на 70–75 % состоит из особей заводского происхождения.

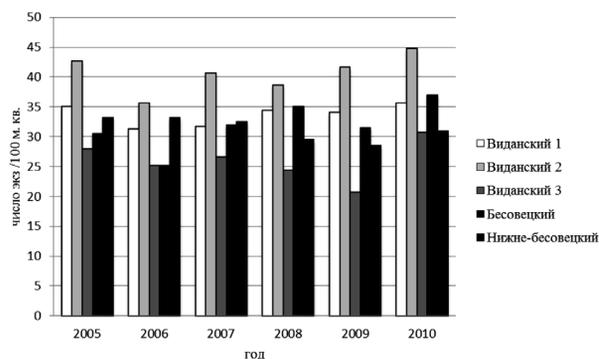


Рис. 2. Плотность расселения молоди на основных порогах р. Шуи в 2005–2010 годах, экз./100 м<sup>2</sup>

Выпуск заводской молоди лосося в р. Шуду в 2000–2010 годах (данные Карелрыбвода)

Год	Возраст молоди	Выпущено, тыс. экз.	Средний вес, г.
2000	2+	194,7	39,9
2001	2+	87,7	63
2002	2+	155,6	44,2
	3+	2,5	91,5
2003	2+	7,35	49,1
	3+	21,535	89,4
2004	2+	114,620	45,8
2005	2+	28,324	46,7
2006	2+	85,932	59,5
2007	2+	139,07	63,2
2008	2+	90,71	58
2009	2+	68,29	48,6
2010	2+	36,36	49,7

**Р. Пяльма.** Бассейн реки расположен на восточном побережье Онежского озера. Общая протяженность реки – 72 км, средний уклон – 0,53 ‰, коэффициент озерности – 1,7 %, падение – 125 м, площадь водосбора – 909 км<sup>2</sup> [11], [5]. Основные НВУ находятся в 2–7,3 км от устья. Также имеются подходящие грунты для нереста в притоке Жилая Тамбица (24–33 км от устья р. Пяльмы). По нашим подсчетам, общая площадь НВУ составляет 198 370 м<sup>2</sup>. Нами проводились обловы на порогах, расположенных в 2,1 км от устья, протяженностью 150 м, и в 5,6 км от устья, протяженностью 250 м. Результаты обловов представлены суммарно для обоих порогов (рис. 3).

Популяция пялемского лосося ранее была третьей по численности [13]. Ныне река утратила свое значение в общем популяционном фонде лосося. В 2005–2006 годах плотности расселения являлись низкими. Впрочем, с 2007 по 2010 год наблюдается положительная динамика плотности расселения молоди лосося (рис. 2).

**Р. Водла.** Бассейн реки расположен на восточном побережье Онежского озера. Общая протяженность реки – 149 км, средний уклон – 0,36 ‰, коэффициент озерности – 5,5 %, падение – 103 м, площадь водосбора – 13 700 км<sup>2</sup> [11], [5]. Площади

НВУ в р. Водле малочисленны, НВУ находятся выше, в 141 км от устья. Один расположен сразу после слияния рек Вама и Сухая Водла, его длина 430 м, площадь – около 55 150 м<sup>2</sup>, протяженность другого, расположенного ниже, – 390 м, площадь – 53 850 м<sup>2</sup>. Общая площадь НВУ реки составляет около 109 000 м<sup>2</sup>. На порогах плотности расселения молоди составили 10 экз./100 м<sup>2</sup> в 2008 году.

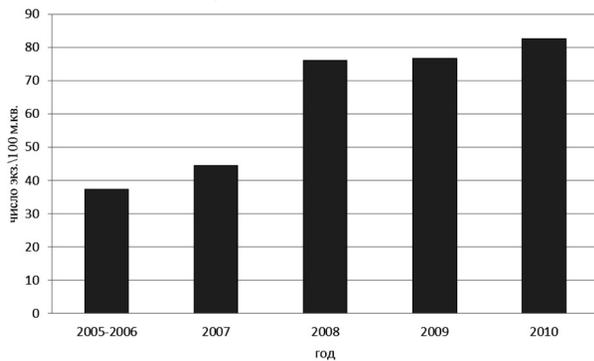


Рис. 3. Плотность расселения молоди на облавливаемых порогах р. Пяльмы в 2005–2010 годах, экз./100 м<sup>2</sup>

*Р. Сухая Водла* имеет протяженность 38 км, средний уклон – 1,31 ‰, площадь водосбора – 248 км<sup>2</sup> [11], [5]. В русле реки имеются пороги с грунтами, подходящими для нереста и обитания молоди лосося, но молодь обнаружена не была.

*Р. Вама*, длина – 25 км, средний уклон – 1,99 ‰, площадь водосбора – 5420 км<sup>2</sup> [11], [5]. У истока реки стоит плотина, которая ранее использовалась для нужд лесосплава. Ниже плотины имеются подходящие места для нереста, но молоди на них обнаружено не было. Возможно, сказывается негативное влияние плотины (регулировка стока). Первые сеголетки были обнаружены на пороге Островец (длиной 390 м, в 19,2 км от устья) – 10 экз./100 м<sup>2</sup> в 2008 году. На порогах ниже по течению молодь обнаружена, но плотности расселения крайне незначительны. Общая площадь НВУ реки – 162 650 м<sup>2</sup>.

*Р. Колода*, длина – 112 км, средний уклон – 1,30 ‰, площадь водосбора – 1330 км<sup>2</sup> [11], [5]. Облов проводили на порогах, расположенных в русле реки, протяженностью 17,4 км. Обследуемый участок русла расположен вниз по течению от п. Приречный до п. Озерки. Плотность расселения высокая, в 2008 году она составила 40 экз./100 м<sup>2</sup>. Сеголетки на порогах расселены равномерно. Ниже обследуемого участка имеются нерестовые грунты, которые занимают всю площадь порогов. В основном грунты представлены мелким и средним валуном, средней и крупной галькой. По нашим данным, общая площадь НВУ реки – 100 000 м<sup>2</sup>.

Общий нерестово-выростной фонд для р. Водлы с притоками составляет 368 650 м<sup>2</sup>.

*Р. Лижма*. Бассейн реки расположен на северо-западном побережье Онежского озера. Общая протяженность реки – 67 км, средний уклон –

1,75 ‰, коэффициент озерности – 19,4 %, падение – 114 м, площадь водосбора – 934 км<sup>2</sup> [11], [5]. Верхний участок р. Лижмы (Верхняя Лижма) расположен от истока до Лижмозера, его протяженность – 17 км. Суммарная протяженность НВУ лосося составляет 3400 м, площадь – 13 600 м<sup>2</sup>. Длина русла реки (Средняя Лижма) между Лижмозером и Кедрозером составляет 11,6 км. Порогов мало, площадь НВУ – около 4000 м<sup>2</sup>. Нижняя Лижма протяженностью 4,3 км состоит из двух участков. Участок русла между Кедрозером и Тарасмозером составляет 800 м и на всем протяжении представлен порогами, площадь НВУ лосося – около 20 000 м<sup>2</sup>. Ниже Тарасмозера участок русла протяженностью 2,8 км имеет три порога с общей площадью НВУ 18 000 м<sup>2</sup>. Общая площадь НВУ реки составляет 55 600 м<sup>2</sup>, из них действующих – 38 000 м<sup>2</sup>.

Ранее р. Лижма считалась одной из самых продуктивных лососевых рек. Вылов лосося в реке в 1916 году составлял около 2000 шт. [9]. В 1970-е годы численность нерестового стада оценивалась в 200 экз. [13], такой же она оставалась до 1990-х годов. В последние годы популяция лижменского лосося сильно пострадала из-за бесконтрольного лова; нерест осуществлялся единичными особями. В период 1987–2001 годов численность молоди сократилась более чем в 10 раз. На этом участке реки в 2007 году не было зафиксировано ни одного сеголетка лосося. Значит, в 2006 году лосось не смог отнереститься на порогах Верхней Лижмы.

В 2007 году был обследован порог на Верхней Лижме (6,5 км от устья Лижмозера), в результате не было зафиксировано ни одного сеголетка лосося. В 2008 году молодь была обнаружена, но только одной возрастной группы – 2+. Осенью 2005 года сложились благоприятные условия для успешного нереста лосося. Молодь генерации этого года и была нами обнаружена. Обследования этого порога в 2009–2010 годах показали низкую численность молоди лосося, всего 16 экз./100 м<sup>2</sup> суммарно для всех возрастных групп. Можно сказать, что в воспроизводстве лосося р. Лижмы на протяжении последних лет наблюдается положительная динамика.

*Р. Кумса*. Бассейн реки расположен на северо-западном побережье Онежского озера. Протекает через следующие озера: Кумчозеро, Матка, Кольозеро и 4 мелких озера без названия. Общая протяженность реки – 62 км, средний уклон – 2,03 ‰, коэффициент озерности – 8,5 %, падение – 126 м, площадь водосбора – 738 км<sup>2</sup> [11], [5]. Основные НВУ расположены в 4 км от устья на протяжении 3600 м, а также выше оз. Матка на протяжении 2000 м. В русле реки имеются пороги с грунтами, подходящими для нереста и обитания молоди лосося, выше от устья в 30 км. Облов проводился на пороге, расположенном в 14 км от устья (выше оз. Матка). Плотности молоди лосося на НВУ и ее возрастной состав остаются стабильными на протяжении последних лет (рис. 4).

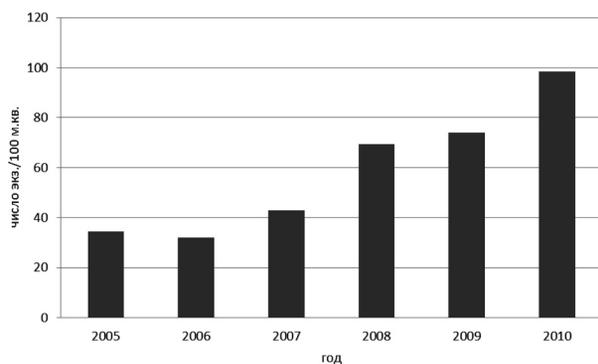


Рис. 4. Плотность расселения молоди на облавливаемом пороге р. Кумсы в 2005–2010 годах, экз./100 м<sup>2</sup>

Представленные данные свидетельствуют, что начиная с 2008 года наблюдается положительная динамика увеличения численности молоди лосося в реке. Это говорит о благоприятных условиях для нереста производителей лосося и обитания молоди в реке в последние годы.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лосось Онежского озера состоит из нескольких популяций. Каждая приурочена к определенной реке, в которой и нерестится. Суммарный нерестово-выростной фонд лосося в притоках Онежского озера составляет 2 230 000 м<sup>2</sup>, но лососем используется около 25 %. Остальные 75 %

фонда не используются в связи с отсутствием производителей или доступом производителей к НВУ. Численность производителей во всех реках намного ниже потенциально возможной. Относительно стабильное естественное воспроизводство сохранилось в реках Шуя, Кумса, Пяльма. В основном шуйская популяция поддерживается за счет искусственного воспроизводства. По нашим расчетам, суммарная продуктивность нерестовых притоков Онежского озера составляла 65–70 тыс. экз. покатников в год за период 1950–1960 годов (расчеты по литературным данным). В последние годы, по нашим подсчетам, величина покатников не превышает 15–20 тыс. экз. в год. Следовательно, численность молоди на НВУ водотоков снизилась за последние 20 лет в 10 раз и более.

До 1999 года численность молоди лосося в притоках Онежского озера держалась на критически низком уровне. С 2000 года численность молоди в реках немного увеличилась, но плотности расселения были низкими. В дальнейшем наблюдается постепенное увеличение численности молоди в притоках.

Основным фактором, определяющим численность лосося в Онежском озере, является его искусственное воспроизводство. Необходимо принимать меры для сохранения имеющихся и восстановления утраченных популяций путем защиты и восстановления НВУ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веселов А. Е., Калужин С. М. Экология, поведение и распределение молоди атлантического лосося. Петрозаводск: Карелия, 2001. 160 с.
2. Гайда Р. В., Щуров И. Л., Широков В. А. Характеристика, выживаемость и прогнозирование численности пресноводного атлантического лосося реки Шуя (бассейн Онежского озера) // Атлантический лосось: биология, охрана и воспроизводство. Петрозаводск, 2003. С. 117–121.
3. Есин Е. В. Сравнение разных методов количественного учета молоди лососевых рыб (Salmonidae) в малой реке Микочева (Западная Камчатка) // Вопросы ихтиологии. 2009. Т. 49. № 6. С. 800–808.
4. Карпечко В. А., Сало Ю. А. Водные ресурсы // Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. С. 15–22.
5. Каталог озер и рек Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 290 с.
6. Костылев Ю. В. Шуйский озерно-речной лосось как объект искусственного разведения // Биологические основы рационального использования рыбных ресурсов Онежского озера и повышение его рыбопродуктивности. Л.: Промрыбвод, 1984. С. 41–48.
7. Мартынов В. Г. Сбор и первичная обработка биологических материалов из промысловых уловов атлантического лосося (методические рекомендации). Сыктывкар, 1987. 36 с.
8. Маслов С. Е. Применение электроловов ранцевого типа в ихтиологических исследованиях на лососевых реках // Тез. докл. респ. конф. Петрозаводск, 1989. С. 22–28.
9. Петров В. В. Современное состояние Онежского рыболовства // Известия отделения прикладной ихтиологии. Л., 1926. Т. IV. Вып. 1.
10. Пушкарев Н. Н. Рыболовство на Онежском озере // Отчет министерства земледелия и гос. имущества. СПб., 1900.
11. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 2: Карелия и Северо-Запад. Л.: Гидрометиздат, 1972. 959 с.
12. Рыжков Л. П., Костылев Ю. В. Состояние запасов лосося в бассейне Онежского озера // Биологические основы рационального использования рыбных ресурсов Онежского озера и повышения его рыбопродуктивности. Вып. 216 / Под ред. В. В. Покровского. Л., 1984. С. 36–41.
13. Смирнов Ю. А. Лосось Онежского озера. Биология, воспроизводство, использование. Л.: Наука, 1971. 143 с.
14. Тыркин И. А., Щуров И. Л., Широков В. А. Состояние естественного воспроизводства пресноводного лосося в некоторых притоках Онежского озера // Материалы XXVIII Междунар. конф. «Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера». Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 573–578.
15. Швец П. Д. Водный баланс Онежского озера // Сб. работ Ленинградской гидрометеообсерватории. Вып. II. Л., 1977. С. 25–53.
16. Karlstrom O. Quantitative Methods in Electrical Fishings in Swedish Salmon Rivers // ZOOH. 1976. Vol. 4. P. 53–63.
17. Zippin C. An evaluation of removal method of estimating animal populations // Biometrics. 1956. Vol. 12. P. 163–169.

ГАЛИНА АНАТОЛЬЕВНА ЯКОВЛЕВА

ведущий биолог лаборатории паразитологии растений и животных Института биологии, Карельский научный центр РАН  
galina\_il87@mail.ru

ДАРЬЯ ИВАНОВНА ЛЕБЕДЕВА

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории паразитологии растений и животных Института биологии, Карельский научный центр РАН  
daryal78@googlegmail.com

ЕВГЕНИЙ ПАВЛОВИЧ ИЕШКО

доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией паразитологии растений и животных Института биологии, Карельский научный центр РАН  
ieshko@krc.karelia.ru

## ЭХИНОСТОМАТИДЫ ПТИЦ КАРЕЛИИ

Исследован видовой состав трематод семейства Echinostomatidae у птиц Карелии. Выявлено 14 видов паразитов. Одиннадцать видов отмечены впервые.

Ключевые слова: эхиностоматиды, паразиты птиц, зараженность, специфичность

Трематоды семейства Echinostomatidae включают паразитов, цикл развития которых характеризуется наличием одного и более хозяев, включающих разнообразные виды позвоночных и беспозвоночных животных [3], [10]. Типичным местом обитания представителей семейства Echinostomatidae является кишечник, желчные протоки печени млекопитающих, а также фабрициева сумка птиц [3].

Особое внимание к данной группе паразитов связано с их патогенностью, так как представители Echinostomatidae могут вызывать гельминтозы (эхиностоматидозы) птиц, служащих дефинитивными хозяевами трематод этого семейства. Даже невысокие значения интенсивности заражения водоплавающих птиц, особенно молодняка, приводят к их истощению и гибели [3], [13].

К настоящему времени опубликовано несколько работ, характеризующих трематодофауну птиц Карелии, в частности встречаемость эхиностоматид [1], [2], [4], [8], [9]. Однако в них в основном отражены сведения о паразитах птиц Беломорского побережья, тогда как внутренние пресные водоемы практически не охвачены исследованиями. В данной работе нами делается попытка дополнить сведения о видовом разнообразии эхиностоматид птиц Карелии, а также оценить характер зараженности хозяев отдельными видами гельминтов. Материалом исследований послужила коллекция спиртовых препаратов гельминтов водоплавающих птиц, добытых в ходе 319-й Союзной гельминтологической экспедиции в мае – ноябре 1958–1962 годов [11]. Были обследованы 142 экземпляра 24 видов 6 семейств птиц (табл. 1): гагаровые, утиные, ржанковые, кулики-сороки, бекасовые, чайковые из различных мест обитания на территории Карелии (см. табл. 1).

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Из всех исследованных птиц инвазированы трематодами семейства Echinostomatidae Looss, 1899 оказались 34 экз. 9 видов (табл. 2). Фауна эхиностоматид представлена 14 видами, относимися к 6 родам: *Echinoparyphium*, *Hypoderaeum*, *Echinostoma*, *Himasthla*, *Ignavia*, *Mesorchis*. Среди обнаруженных трематод 11 отмечены на территории Карелии впервые.

Ниже представлены общие сведения о встречаемости эхиностоматид, определение которых выполнено с использованием ключей [15], [16]. Систематика птиц приведена по Степаняну [14].

### Семейство Echinostomatidae Looss, 1899 Подсемейство Echinostomatinae Looss, 1899

#### Род *Echinoparyphium* Dietz, 1909

#### *Echinoparyphium aconiatum* Dietz, 1909

**Хозяин:** хохлатая черныш (*Aythya fuligula* L.), свиязь (*Anas penelope* L.), крякva (*Anas platyrhynchos* L.), обыкновенный гоголь (*Bucephala clangula* L.).

**Локализация:** двенадцатиперстная кишка, средний и задний отделы тонкой кишки, почки (случайный занос).

**Место обнаружения:** оз. Среднее Куйто (Кеккилакша, Алаозеро, Заламбино), оз. Верхнее Куйто (Ювалакша), Сегозеро (Сондальский остров).

#### *Echinoparyphium macrovitellatum* Oschmarin, 1947

**Хозяин:** чернозобая гагара (*Gavia arctica* L.).

**Локализация:** слепая кишка.

**Место обнаружения:** оз. Среднее Куйто (Кеккилакша).

#### *Echinoparyphium recurvatum* Linstow, 1873

(Syn.: *Distomum recurvatum* Linstow, 1873; *Echinostomum recurvatum* (Linstow, 1873) Stossich, 1892; *Echinoparyphium recurvatum vanelli* Yamaguti, 1939 [10], [12].)

Таблица 1

## Характеристика исследованного материала

Семейство	Вид птицы	Кол-во исследованных птиц, экз.	Район добычи птиц	Время добычи
гагаровые (Gaviidae J. A. Allen, 1897)	чернозобая гагара ( <i>Gavia arctica</i> L., 1758)	3	Онежское озеро, оз. Среднее Куйто	июнь, сентябрь
утиные (Anatidae Leach, 1820)	крякva ( <i>Anas platyrhynchos</i> L., 1758)	22	Сегозеро, Сямозеро, оз. Среднее Куйто, Онежское озеро, Белое море (побережье и острова)	июль, август, сентябрь
	чирок-свиистунок ( <i>Anas crecca</i> L., 1758)	12	Сегозеро, Онежское озеро, Белое море (побережье и острова)	июль, август, сентябрь
утиные (Anatidae Leach, 1820)	свиязь ( <i>Anas penelope</i> L., 1758)	5	оз. Среднее Куйто, Сегозеро, Белое море (побережье и острова)	июнь, июль, сентябрь
	широконоска ( <i>Anas clypeata</i> L., 1758)	1	оз. Среднее Куйто	август
	чохлая чернеть ( <i>Aythya fuligula</i> L., 1758)	4	оз. Верхнее Куйто, оз. Среднее Куйто	июнь, июль
	морьянка ( <i>Clangula hyemalis</i> L., 1758)	7	Онежское озеро, Белое море (побережье и острова)	май, октябрь, ноябрь
утиные (Anatidae Leach, 1820)	Обыкновенный гоголь ( <i>Vicephala clangula</i> L., 1758)	6	оз. Среднее Куйто, Онежское озеро, Белое море (побережье и острова)	май, июнь, июль, август
	обыкновенный турпан* ( <i>Melanitta fusca</i> L., 1758)	3	Сегозеро, Белое море (побережье и острова)	август, ноябрь
	длинноносый крохаль ( <i>Mergus serrator</i> L., 1758)	7	Белое море (побережье и острова)	июнь, сентябрь
	большой крохаль ( <i>Mergus merganser</i> L., 1758)	19	Сегозеро, Онежское озеро	июль, август, сентябрь, октябрь
ржанковье (Charadriidae Leach, 1820)	камнешарка ( <i>Arenaria interpres</i> L., 1758)	1	Белое море (побережье и острова)	август
кулики-сороки (Haematopodidae Bonaparte, 1838)	кулик-сорока ( <i>Haematopus ostralegus</i> L., 1758)	3	Белое море (побережье и острова)	июнь, август
бекасовые (Scolopacidae Rafinesque, 1815)	фифи ( <i>Tringa glareola</i> L., 1758)	1	Белое море (побережье и острова)	июль
бекасовые (Scolopacidae Rafinesque, 1815)	большой улит ( <i>Tringa nebularia</i> Gunnerus, 1767)	1	Сегозеро	июль
	перевозчик ( <i>Actitis hypoleucos</i> L., 1758)	4	Сегозеро, Белое море (побережье и острова)	июль, август
	турухтан ( <i>Philomachus pugnax</i> L., 1758)	3	Онежское озеро	июль
	вальдшнеп ( <i>Scolopax rusticola</i> L., 1758)	1	Онежское озеро	май
	большой кроншнеп ( <i>Numenius arquata</i> L., 1758)	1	Онежское озеро	июль
чайковье (Laridae Rafinesque, 1815)	клуша* ( <i>Larus fuscus</i> L., 1758)	19	Белое море (побережье и острова), Онежское озеро, оз. Среднее Куйто, оз. Сямозеро, оз. Сегозеро	июнь, июль, август, сентябрь
	серебристая чайка ( <i>Larus argentatus</i> Pontopp., 1763)	8	Белое море (побережье и острова)	июнь, июль, август, сентябрь
	сизая чайка ( <i>Larus canus</i> L., 1758)	9	Белое море (побережье и острова), оз. Сегозеро	июнь, июль, август, октябрь
	речная крачка ( <i>Sterna hirundo</i> L., 1758)	1	оз. Сямозеро	сентябрь
	полярная крачка ( <i>Sterna paradisaea</i> Pontopp., 1763)	1	Белое море (побережье и острова)	июнь
Всего птиц, экз.		142		

Примечание. \* – в настоящее время данные виды занесены в Красную книгу [7].

**Хозяин:** хохлатая чернеть (*Aythya fuligula* L.), свиязь (*Anas penelope* L.), кряква (*Anas platyrhynchos* L.), обыкновенный гоголь (*Bucephala clangula* L.), большой крохаль (*Mergus merganser* L.), серебристая чайка (*Larus argentatus* Pontopp.).

**Локализация:** тонкая и толстая кишка, двенадцатиперстная кишка.

**Место обнаружения:** оз. Среднее Куйто (Кеккилакша, Хейняламба, Заламбино), Онежское озеро (д. Вигово, оз. Остер), Сямозеро, Белое море (о-ва Кемь-Луды).

#### Род *Hypoderaeum* Dietz, 1909

##### *Hypoderaeum conoideum* Bloch, 1782

**Хозяин:** кряква (*Anas platyrhynchos* L.), обыкновенный гоголь (*Bucephala clangula* L.).

**Локализация:** кишечник, тонкая и прямая кишка, клоака.

**Место обнаружения:** оз. Сямозеро, Онежское озеро (оз. Остер, д. Вигово), оз. Среднее Куйто (Алаозеро, Заламбино), Сегозеро (Лисья губа).

##### *Hypoderaeum gnedini* Bashkirova, 1941

**Хозяин:** кряква (*Anas platyrhynchos* L.).

**Локализация:** тонкая кишка.

**Место обнаружения:** Сегозеро (Лисья губа), Онежское озеро (оз. Остер).

#### Род *Echinostoma* Rudolphi, 1809

##### *Echinostoma koisarensis* Ablasov et Ixanov, 1958

**Хозяин:** кряква (*Anas platyrhynchos* L.).

**Локализация:** прямая кишка.

**Место обнаружения:** Сямозеро.

##### *Echinostoma revolutum* Frölich, 1802

**Хозяин:** обыкновенный гоголь (*Bucephala clangula* L.).

**Локализация:** толстая кишка.

**Место обнаружения:** Онежское озеро (д. Вигово).

##### *Echinostoma robustum* Yamaguti, 1935

**Хозяин:** свиязь (*Anas penelope* L.), кряква (*Anas platyrhynchos* L.).

**Локализация:** средний и задний отделы тонкой кишки.

**Место обнаружения:** оз. Среднее Куйто (Алаозеро), Онежское озеро (оз. Остер).

#### Подсемейство *Himasthlinae* Odhner, 1910

##### Род *Himasthla* Dietz, 1909

##### *Himasthla elongata* (Mehlis, 1831) Dietz, 1909

**Хозяин:** серебристая чайка (*Larus argentatus* Pontopp.).

**Локализация:** кишечник.

**Место обнаружения:** Белое море (о. Горелка).

##### *Himasthla megacotyla* Yamaguti, 1939

**Хозяин:** камнешарка (*Arenaria interpres* L.).

**Локализация:** кишечник.

**Место обнаружения:** Белое море (о. Красный).

##### *Himasthla militaris* (Rudolphi, 1802)

**Хозяин:** клуша (*Larus fuscus* L.).

**Локализация:** тонкая кишка.

**Место обнаружения:** Белое море (о. Горелка).

#### Подсемейство *Ignaviinae* Yamaguti, 1958

##### Род *Ignavia* Freitas, 1948

##### *Ignavia aquilae* Oschmarin et Belous, 1951

**Хозяин:** клуша (*Larus fuscus* L.).

**Локализация:** почки.

**Место обнаружения:** Сегозеро (Лисья губа).

##### *Ignavia ardeae* Schewtschenko, 1954

(*Syn.*: *Nephroechinostoma ardeae* Schewtschenko, 1954 [10].)

**Хозяин:** клуша (*Larus fuscus* L.).

**Локализация:** кишечник, тонкая кишка.

**Место обнаружения:** Белое море (о. Горелка).

##### Род *Mesorchis* Dietz, 1909

##### *Mesorchis pseudoechinatus* Olsson, 1876

**Хозяин:** клуша (*Larus fuscus* L.), чернозобая гагара (*Gavia arctica* L.).

**Локализация:** толстая, прямая и слепая кишка.

**Место обнаружения:** оз. Среднее Куйто (Кеккилакша).

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Жизненный цикл обнаруженных видов трематод связан с широким кругом промежуточных хозяев – моллюски, водные беспозвоночные, рыбы, амфибии. В связи с этим данные по видовому разнообразию и интенсивности заражения эхиностоматидами являются экологическими показателями участия различных водных организмов в пищевом рационе околводных птиц.

**Семейство гагаровых.** Из представителей семейства была исследована чернозобая гагара, к сожалению, в небольшом количестве (табл. 1), которая была добыта и изучена в период гнездования [6].

Нахождение у чернозобой гагары большого числа трематод *Mesorchis pseudoechinatus* (табл. 2) объясняется тем, что рыба – основная составляющая в пищевом рационе этих птиц. Данный вид заражает окончательного хозяина именно через питание рыбой. Также в кишечнике был зарегистрирован *Echinoparyphium macrovitellatum*, заражение которым происходит через питание моллюсками (табл. 2). Оба вида впервые отмечены у гагар на территории Карелии.

**Семейство утиных.** Были исследованы 10 видов птиц этого семейства (табл. 1), из которых заражены эхиностоматидами только 5 – кряква, свиязь, хохлатая чернеть, обыкновенный гоголь и большой крохаль. Все птицы были добыты и изучены в период гнездования и осенней миграции [6]. Обнаруженные виды относятся к широко распространенным паразитам утиных Палеарктики [12].

Кряква – одна из самых многочисленных уток на территории Карелии. Некоторые данные по ее трематодофауне уже были опубликованы [1].

Фауна трематод уток была самой разнообразной по сравнению с остальными исследованными видами птиц. Из 6 обнаруженных нами видов эхиностоматид 2 (*Echinostoma koisarensis*,

*Hypoderaeum gnedini*) были отмечены только у кряквы, а остальные четыре встречались и у других хозяев (табл. 2). Для большинства видов паразитов была характерна единичная зараженность. Судя по видовому составу трематод и показателям интенсивности инвазии, значительную часть рациона кряквы составляют водные беспозвоночные, хотя, по литературным данным ее пища в почти равной мере состоит из растительных и животных кормов [5]. Все трематоды, выявленные у кряквы, – типичные паразиты утиных птиц.

У 3 связей из 5 исследованных особей были найдены 3 вида эхиностоматид, типичных паразитов гусиных и утиных птиц (табл. 2). Их заражение трематодами связано с участием в питании различных видов моллюсков, хотя в литературе указывается, что основную долю в питании связей составляет водная растительность [5]. Все три вида паразитов, обнаруженных у связи, регистрируются на территории Карелии в первый раз.

Изученные особи хохлатой чернети были добыты на пролете [5], когда они интенсивно питаются моллюсками, заражаясь через них парази-

тами. В результате исследования у них были зарегистрированы гельминты родов *Echinoparyphium recurvatum* и *E. aconiatum* (табл. 2). Оба вида – типичные паразиты чернети [3], [13].

У гоголя, несмотря на небольшую исследованную выборку, были обнаружены 4 вида эхиностоматид (*Echinoparyphium aconiatum*, *E. recurvatum*, *Echinostoma revolutum*, *Hypoderaeum conoideum*), что объясняется особенностями питания и рациона этих птиц. Указанные паразиты попадают в организм хозяина при поедании зараженных личинками трематод промежуточных хозяев – различных водных насекомых, личинок ручейников, поденок и стрекоз, рачков и мелких моллюсков. Из 4 видов паразитов 3 встречались и у кряквы, что свидетельствует о сходстве условий обитания и рациона питания этих видов птиц.

Вид *Echinostoma revolutum* нами был отмечен только у гоголя, хотя ранее на территории Карелии его регистрировали у сизой чайки [9].

Большой крохаль – типичный обитатель крупных водоемов Карелии, где в основном и был добыт весь материал. Однако, несмотря на значительную выборку, у данного вида птиц был

Таблица 2

Зараженность различных видов птиц эхиностоматидами

Вид паразита	Чернозобая гагара		Кряква		Связь		Хохлатая чернеть		Обыкновенный гоголь		Большой крохаль		Камнешарка		Клуша		Серебристая чайка	
	ЭИ, %	ИО, экз.	ЭИ, %	ИО, экз.	ЭИ, %	ИО, экз.	ЭИ, %	ИО, экз.	ЭИ, %	ИО, экз.	ЭИ, %	ИО, экз.	ЭИ, %	ИО, экз.	ЭИ, %	ИО, экз.	ЭИ, %	ИО, экз.
<i>Echinoparyphium aconiatum</i>	–	–	4,5	0,05	20	5	50	38,8	33,3	11,7	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>E. macrovitellatum</i>	33,3	2,7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>E. recurvatum</i>	–	–	13,6	6,5	20	5,4	50	39	33,3	5	5,3	5,4	–	–	–	–	12,5	4,6
<i>Echinostoma koisarensis</i>	–	–	4,5	1,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>E. revolutum</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	16,7	0,5	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>E. robustum</i>	–	–	4,5	1,5	20	2,8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Hypoderaeum conoideum</i>	–	–	31,8	11	–	–	–	–	16,7	4,8	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>H. gnedini</i>	–	–	9,1	0,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Ignavia aquilae</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	5,3	0,2	–
<i>I. ardeae</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	10,5	0,5	–
<i>Mesorchis pseudoechinatus</i>	33,3	11,3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	5,3	7,8	–	–
<i>Himasthla elongata</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	12,5	0,5
<i>H. megacotyla</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	100	5	–	–	–	–
<i>H. militaris</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	5,3	1,1	–	–
Всего видов трематод	2		6		3		2		4		1		1		4		2	
Вскрыто птиц, экз.	3		22		5		4		6		19		1		19		8	

Примечание. ЭИ – экстенсивность инвазии, %; ИО – индекс обилия, экз.; «–» – паразит не обнаружен.

отмечен всего один вид – *Echinoparyphium recurvatum*. Этот паразит является обычным для крохалея видом во многих других местах обитания [3], [13]. Кроме того, И. Е. Быховской-Павловской отмечены еще 5 видов эхиностоматид, характерных для этой утки [3]. Но большинство из них попадают в организм хозяина через моллюсков. По-видимому, в Карелии, где основой рациона крохалей является рыба, сокращается видовое разнообразие эхиностоматид, развивающихся через различных водных беспозвоночных.

**Семейство ржанковых.** Из птиц данного семейства был исследован один вид – камнешарка (табл. 1). У камнешарки обнаружена трематода *Himasthla megacotyla* (табл. 2). Представители этого рода – обычные гельминты данного вида. По имеющимся литературным данным [2], [3], у нее встречаются два других вида рода *Himasthla* – *H. militaris* – в Восточном Мурмане и *H. leptosoma* – на Белом море.

**Семейство чайковых.** Из 5 исследованных видов хозяев зараженными эхиностоматидами оказались 2 – клуша и серебристая чайка. Были найдены 6 видов трематод этого семейства, причем для каждого вида птиц они были специфичными (табл. 2).

Трематодофауна клуши представлена 4 видами эхиностоматид: *Ignavia aquila*, *I. ardeae*, *Mesorchis pseudoechinatus* и *Himasthla militaris*. Первые три вида впервые отмечены на террито-

рии Карелии. Однако, по имеющимся литературным данным [3], у клуши встречается другой вид рода *Mesorchis* – *M. denticulatus* – в Рыбинском водохранилище. *Himasthla militaris* же регистрируется как обычный паразит чайковых. Ранее он был отмечен у серебристой и сизой чаек Белого моря [8].

У серебристой чайки обнаружены *Himasthla elongata* и *Echinoparyphium recurvatum* (табл. 2). Оба вида отмечаются в Карелии впервые.

Характеризуя видовое разнообразие фауны трематод исследованных птиц, следует отметить, что ее основу составляют представители рода *Echinoparyphium* (6 видов). Эти паразиты встречаются у уток, куликов, чаек и гагар. Из 9 видов птиц, зараженных эхиностоматидами, у 7 были обнаружены трематоды рода *Echinoparyphium*. При этом наиболее часто встречался *E. recurvatum*, отмеченный у 6 видов хозяев, и *E. aconiatum*, найденный у 4 (табл. 2). С другой стороны, особенность фауны эхиностоматид исследованных птиц связана с тем, что 9 видов из 14 встречались только у одного хозяина (табл. 2).

Полученные материалы являются лишь первым шагом в изучении паразитов птиц Карелии. В дальнейшем планируется расширить круг исследуемых хозяев и мест сбора материала.

Исследование проведено при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (госконтракт № 1299).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева Г. А., Лебедева Д. И. Фауна трематод кряквы (*Anas platyrhynchos* Linnaeus, 1758) Карелии // Паразиты Голарктики. Петрозаводск: ПИН, 2010. С. 13–19.
2. Белопольская М. М. Трематоды куликов Белого моря // Труды ГЕЛАН СССР. 1966. Т. 17. С. 9–8.
3. Быховская-Павловская И. Е. Трематоды птиц СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1962. 407 с.
4. Гинецинская Т. А., Наумов Д. В. К гельминтофауне некоторых видов куликов Белого моря // Работы по гельминтологии к 80-летию акад. К. И. Скрябина. М.: Изд-во АН СССР, 1958. С. 99–108.
5. Зимин В. Б., Ивантер Э. В. Птицы. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2002. 288 с.
6. Зимин В. Б., Сазонов С. В., Лапшин Н. В., Хохлова Т. Ю., Артемьев А. В., Анненков В. Г., Яковлева М. В. Орнитофауна Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1993. 220 с.
7. Красная книга Республики Карелия. Петрозаводск: Карелия, 2007. 364 с.
8. Кулачкова В. Г., Кочетова И. В. Характерные особенности гельминтофауны чайковых птиц Кандалакшского залива // Ученые записки ЛГУ. Сер. «Биология». 1954. № 172. С. 48–56.
9. Мартыянов Р. С. Гельминтологические исследования *Larus canus*, *L. argentatus* и *Sterna hirundo* Онежского и Ладожского озер // Эколого-паразитологические исследования животных и растений Европейского Севера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. С. 96–99.
10. Мовсесян С. О., Чубарян Ф. А., Никогосян М. А. Трематоды фауны юга Малого Кавказа. М.: Наука, 2004. 279 с.
11. Мозговой А. А., Попова Т. И., Кулачкова В. Г., Шахматова В. И., Малахова Р. П. Работа 319-й Союзной гельминтологической экспедиции в Карелии 1961–1962 гг. // Гельминты животных северных районов СССР: Труды ГЕЛАН. 1966. Т. 17. С. 303–306.
12. Определитель трематод рыбоядных птиц Палеарктики (брахилаймиды, клиностомиды, циклоцелиды, фасциолиды, нотокотилиды, плагиорхиды, шистосоматиды). М.: Наука, 1985. 256 с.
13. Смогоржевская Л. А. Гельминты водоплавающих и болотных птиц фауны Украины. Киев: Наукова думка, 1976. 415 с.
14. Степанян Л. С. Конспект орнитологической фауны России и сопредельных территорий (в границах СССР как исторической области). М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. 808 с.
15. Keys to the Trematoda / Ed. by D. I. Gibson, A. Jones, A. Bray. London: CAB International and The Natural History Museum, 2002. Vol. 1. 521 p.
16. Keys to the Trematoda / Ed. by D. I. Gibson, A. Jones, A. Bray. London: CAB International and The Natural History Museum, 2005. Vol. 2. 745 p.

ЛЮДМИЛА АЛЕКСАНДРОВНА СЕРГИЕНКО  
кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники  
и физиологии растений эколого-биологического факультета,  
Петрозаводский государственный университет  
*saltmarsh@mail.ru*

## ЭКОЛОГО-ДИНАМИЧЕСКИЕ РЯДЫ ПРИМОРСКОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ПОМОРСКОМ И КАРЕЛЬСКОМ БЕРЕГАХ БЕЛОГО МОРЯ

Проведены мониторинговые исследования флоры и растительности побережий Белого моря. Показаны изменения во флористическом составе и в структуре приморских растительных сообществ.

Ключевые слова: приморские экосистемы, галофиты, эпидермис листовой пластинки, видообразование

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования многолетних изменений экосистем береговой зоны Арктики приобретают особую актуальность в связи с быстро развивающимися процессами трансформации климата и активным освоением берегов морей и океанов. Одним из следствий этих процессов является трансформация биоты приморских экосистем и значительное сокращение их площади на побережьях Западной Европы и Северной Америки. Берега Белого моря, в особенности его западное побережье, дают редкую возможность наблюдать как глобальные изменения климата, так и эвстатическое поднятие берега [3], [4], [11]. В последние годы в мире значительно усилилась тенденция к возвращению в научный оборот материалов исследований 50–100-летней давности, позволяющих оценить происшедшие за это время изменения в экосистемах. Задача использования исторических материалов в качестве основы мониторинга была выдвинута в качестве приоритетной Второй Международной конференцией по планированию арктических исследований (Копенгаген, 2005), что делает архивные материалы особенно ценными в контексте изучения береговой биоты. Использование формализованных и упрощенных моделей геосистем не дает надежных результатов, поэтому исследование флоры и растительности приморских маршей позволяет дать полноценную картину динамики прибрежных экосистем в многолетнем тренде ее развития.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Был проведен анализ архивных материалов Беломорской биологической станции Карело-Финского филиала АН СССР, касающихся изучения геоморфологии устьевых зон Карельского и Поморского берегов Белого моря, сырьевых ресурсов Белого моря и научных основ их промышленного использования. Одним из плановых направлений работ станции являлись исследования по теме «Типология губ Белого моря». В период с 1949 по 1957 год сотрудниками стан-

ции были обследованы многочисленные губы Карельского и Поморского берегов Белого моря – от района Великой Салмы до эстуариев рек Колежма и Нюхча. Для анализа также привлекались данные по приморской растительности побережья Белого моря, содержащиеся в статьях сотрудников БИН РАН и КарНЦ РАН, работавших по данной проблеме в 1930–1950, 1980–2000 годах [1], [2], [5], [6], [7], [8], [13], гербарные материалы, представленные в фондах отдела «Гербарий» БИН РАН. Материалом работы также послужили гербарные сборы сосудистых растений и геоботанические описания растительности морских побережий, проведенные нами на Поморском и Карельском берегах в 2000–2010 годах. Всего собраны 450 гербарных листов, сделаны 615 геоботанических описаний приморских местообитаний. Работы проводились в следующих точках: окрестности пос. Колежма (2000, 2010), окрестности г. Беломорска (2003), побережье о. Ряжкова (2004), окрестности пос. Нюхча (2005), окрестности пос. Сумский Посад (2006), окрестности пос. Чула (2007, 2008), окрестности пос. Кереть (2007), в 2008 году – южный кут Кузокоцкой губы (северный берег губы Заволочье) Кандалакшского залива; осушка напротив о. Белая луда; губа Нерная, напротив о. Березовый, мыс Еловый; кутовая часть губы Черная, устье Черной речки; губа Кислая, на северном берегу губы Черная. Названия сосудистых растений приведены по сводке С. К. Черепанова [14] с уточнениями А. В. Кравченко [5].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Галофитный флористический комплекс приморской полосы Белого моря выделен на основе эколого-ценотического оптимума приморских видов [3]. Виды, входящие в его состав, различаются по широте экологической амплитуды и объединяются в такие экологические группы, как эвгалофиты, строго приуроченные к первичным маршам на илистых осушках и выносящие сильное засоление почвы, мезогалофиты – виды,

произрастающие на вторичных маршах, и миогалофиты – виды местной флоры, выносящие слабое засоление почвы.

Галофитный флористический комплекс растений приморской полосы Белого моря насчитывает 73 вида, относящихся к 47 родам и 23 семействам. Наиболее богаты по числу видов следующие семейства: *Poaceae* – 17, *Cyperaceae* – 9, *Chenopodiaceae* – 7 видов. Семейство *Asteraceae* насчитывает 6 видов, семейства *Juncaceae*, *Apiaceae*, *Caryophyllaceae* – по 4 вида, семейство *Plantaginaceae* имеет 3 вида, по 2 вида имеют 3 семейства, 13 семейств представлены одним видом.

Приморская галофитная растительность занимает эстуарии всех рек, впадающих в Белое море, и имеет следующие характерные особенности [6], [10].

1. Илистая маршевая осушка от моря к центральной части марша – в устьях большинства рек, впадающих в Белое море; подобная осушка тянется вдоль низкого аккумулятивного берега до 700 м в открытое море. Заращение начинается со слабых вегетативных побегов *Ruppia maritima* и *Zostera marina* в воде, ближе к берегу отмечаются проростки *Eleocharis uniglumis* на стадии появления 3-го листа. При превышении над линией уреза малой воды до 10 см на илистом слабозадернованном аллювии появляются единичные экземпляры *Tripolium vulgare*, более высокая часть марша занята сообществом с доминированием *Plantago maritima* s. l., *Heleocharis uniglumis*, *Agrostis straminea*, *Glaux maritima*, *Potentilla egedei*. При превышении сообществ над линией уреза малой воды до 15 см (на осушках) доминируют сообщества с *Agrostis straminea* и *Potentilla egedei* (рис. 1).

2. Заращение центральной части марша. Усиливается мозаичность сообществ, занимающих на осушках площадь до 150 м<sup>2</sup>. Происходит постепенное замещение эвгалофитных видов галофитами и мезогиофитами, сохраняется приуроченность осок к микропонижениям, а солероса – к незадернованному субстрату; растительность представлена сообществами с доминированием *Carex glareosa*, *Juncus atrofuscus*,

*Glaux maritima*, *Sonchus humilis*, *Festuca rubra*. На микропонижениях, созданных за счет промыва грунта во время сизигийных приливов и штормов, доминируют *Carex glareosa*, *Juncus atrofuscus*, *Heleocharis uniglumis*, на микроповышениях – *Glaux maritima*, *Potentilla egedei*, *Juncus atrofuscus* + ветошь (до 40 %). Конечные стадии разные: а) на микропонижениях: сообщества с *Bolboschoenus maritimus* + *Eleocharis uniglumis*; *Bolboschoenus maritimus* + *Phragmites australis*; б) на микроповышениях: *Potentilla egedei* + *Glaux maritima* + *Plantago maritima* s. l. + *Juncus atrofuscus* + ветошь (до 40 %).

3. Заращение бессточных площадей (томболо или перейма) по всему маршу (рис. 2). Скорее всего, раньше там были протоки или бессточные засоленные озера. Сейчас из-за быстрого поднятия берега их связь с основными водотоками (море или река) прекратилась, и заращение всегда начинается с эндемика Белого моря *Salicornia pojarkovae*, а конечные стадии завершаются внедрением эвгалофитов из злаков и осок: *Triglochin maritimum* + *Salicornia europaea* (хотя, по мнению некоторых авторов [9], различия между *S. europaea* и *S. pojarkovae* достаточно проблематичны). Сообщество на более высоких участках томболо с доминированием *Triglochin maritimum*, *Stellaria humifusa*, *Spergularia marina*, *Salicornia europaea*, *Potentilla egedei*, *Puccinellia maritima*, *Carex subspathacea* окаймляет большие бессточные площади с *Salicornia europaea* как бы «фестончиками», указывая пути нахождения бывших временных водотоков. В зависимости от расположения бессточных площадей на территории марша конечные стадии заращения различны. Поскольку томболо, или перейма, представляет собой участок, соединяющий остров с коренным берегом (например, в окрестностях пос. Колежма Беломорского района), эта перемычка имеет берег со стороны моря и со стороны устья реки. Ближе к морю заращение бессточных площадей заканчивается сообществом *Spergularia marina* + *Salicornia pojarkovae* + *Triglochin maritimum* + *Agrostis straminea*. Ближе к коренному берегу, где происходит подтопле-

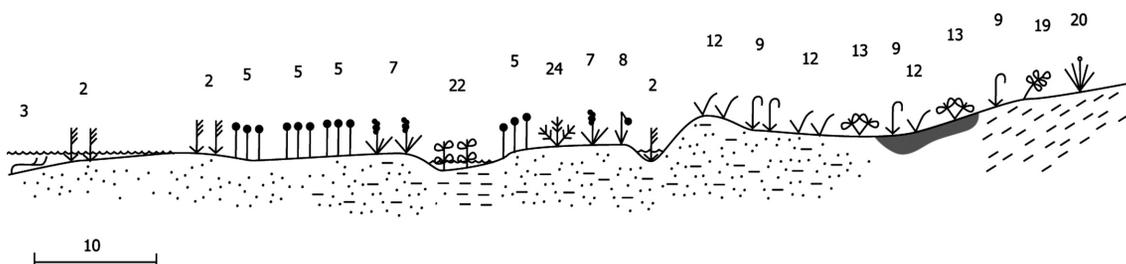


Рис. 1. Эколого-динамический ряд приморской маршевой растительности на Поморском и Карельском берегах Белого моря: приморские сообщества с доминированием:

- 2 – *Bolboschoenus maritimus*, 3 – *Zostera marina*, 5 – *Eleocharis uniglumis*, 7 – *Triglochin maritimum*, 8 – *Tripolium vulgare*, 9 – *Juncus gerardii*, 12 – *Carex subspathacea*, 13 – *Potentilla egedei* s. l., 19 – *Lathyrus japonicus* ssp. *pubescens*, 20 – *Phragmites australis*, 22 – *Hippuris tetraphylla*, 24 – *Stellaria humifusa*

ние пресными грунтовыми водами с окружающего маршевого участка болот, доминирует сообщество *Triglochin maritimum* + *Bolboschoenus maritimus* + *Phragmites australis*. Причем почвенные горизонты в этом сообществе не выражены, а сама почва напоминает плотную влажную губку из-за обилия корней, пронизывающих всю аморфную почвенную структуру. После анализа структуры приморских растительных сообществ в многолетнем тренде развития выявились следующие закономерности. На илистых осушках происходит возрастание роли эвритопных видов в растительном сообществе, что приводит к их повышенной продуктивности, но наличие стенотопов поддерживает стабильность. Динамические изменения в структуре приморской

растительности на илистых осушках представлены на рис. 3. По сравнению с 60-ми годами XX века в 2 раза увеличилось проективное покрытие эвгалофитов *Triglochin maritimum* и *Tripolium vulgare*, в 4 раза – *Zostera marina*. При зарастании томболо или перемычки от коренного берега к острову в 2–3 раза увеличилось проективное покрытие практически всех видов, доминирующих на перемычке, и только проективное покрытие *Carex subspathacea* осталось на прежнем уровне (рис. 4).

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Особенностью флористических комплексов приморских маршей Северо-Запада России является их аazonальность [10]. Повсеместно рас-

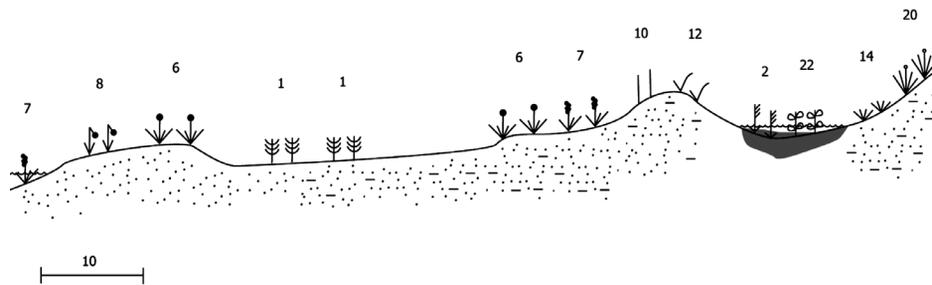


Рис. 2. Эколого-динамический ряд приморской маршевой растительности на осушках томболо (перемычка от коренного берега к острову) на побережье Белого моря: приморские сообщества с доминированием: 1 – *Salicornia europaea*, 2 – *Bolboschoenus maritimus*, 6 – *Plantago maritima* s. l., 7 – *Triglochin maritimum*, 8 – *Tripolium vulgare*, 10 – *Puccinellia coarctata*, 12 – *Carex subspathacea*, 14 – *Agrostis straminea*, 20 – *Phragmites australis*, 22 – *Hippuris tetraphylla*

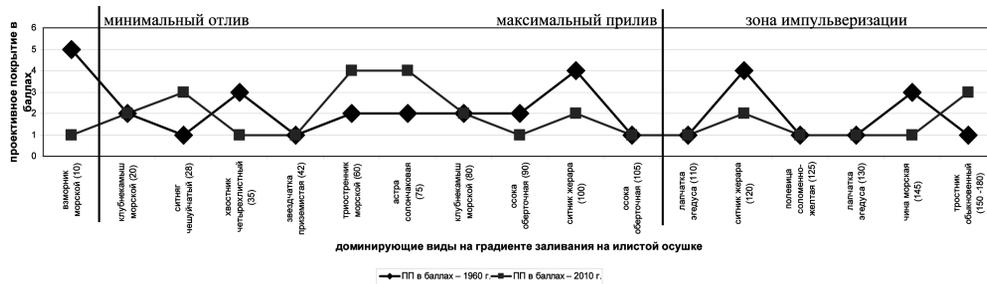


Рис. 3. Динамика изменений приморских сообществ на илистых осушках Поморского и Карельского берегов Белого моря (1960–2010): 1. Проективное покрытие растений (ось ординат) на трансектах дано по шкале Б. М. Миркина в баллах: + – до 1%, 1 – до 5%, 2 – 5–15%, 3 – 15–25%, 4 – 25–50%, 5 – 50–100%; 2. Данные на оси абсцисс представляют не размерную шкалу, а показывают порядок расположения видов (которые могут повторяться на полном эколого-динамическом ряду) при их удалении от моря (от нуля глубин – низший уровень моря)

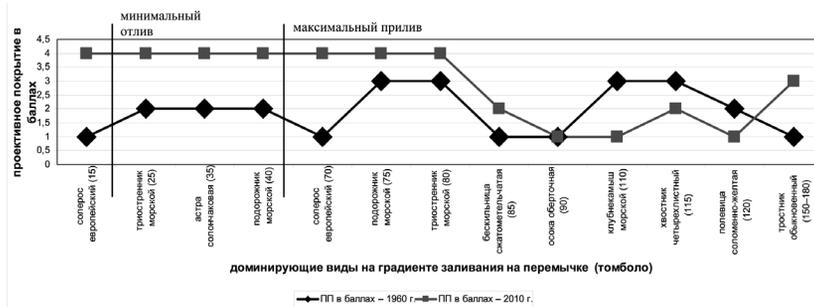


Рис. 4. Динамика изменений приморских сообществ на перемычке от коренного берега к острову (томболо или перейма) на Поморском и Карельском берегах Белого моря (1960–2010 гг.) (см. примеч. к рис. 3)

пространены только немногочисленные циркумполярные виды (*Carex subspathacea*, *Eleocharis uniglumis*, *Potentilla egedei*, *Stellaria humifusa*), являющиеся ядром и начальной точкой отсчета (первопоселенцами) сообществ. Изменение в биоразнообразии парциальных флор на конкретных местообитаниях связано с историческим развитием данного ценоза, геохимией ландшафта, климатом, а в современный период и с антропогенной нагрузкой (техногенное загрязнение). В данный исторический период (постгляциальный) приморские марши Северо-Запада России соответствуют месту функционирования древних водотоков [4], [12], но вместе с тем это территориально молодое образование, находящееся в состоянии постоянного изменения. Так, берега Онежского залива резко отличаются от других берегов Белого моря выраженным профицитом рыхлых отложений ледниково-морского, морского и аллювиального генезиса [3], [4], [11], [12]. Происходит постоянное декомпрессионное поднятие Онежского побережья, которое приводит к образованию широких (несколько сотен метров) выровненных пологих осушек, где современный активный транспорт морских приливных отложений происходит на внешней «мбристой» части осушки.

#### ВЫВОДЫ

Основные изменения растительного покрова, связанные с изменением уровня Белого моря

и с эвстатическим поднятием берега, сводятся к следующему:

- расширяется площадь растительных сообществ с доминированием бореальных европейских и евроазиатских видов на пологих илистых осушках Поморского и Карельского берегов Белого моря;
- увеличилась площадь сообществ из *Salicornia europaea* и *S. pojarkovae* на илистых бессточных площадях на томболо или перемычке от коренного берега до близлежащих островов;
- происходит деградация осоково-злаковых сообществ на илистых осушках, не выносящих подтопления и затопления;
- появляются микроценозы гигрофитов (*Phragmites australis*) в приморских сообществах;
- возникают обширные тростниковые заросли в экотонной зоне от коренного берега к центральной части марша.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает благодарность сотруднику отдела ГИС-технологий ПетрГУ М. А. Шредерс за помощь в подготовке статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов № 3832 в рамках АБЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» и ГК 14.740.11.0300 в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бреслина И. П. Материалы к экологии приморских видов высших растений Кандалакшского залива Белого моря // Ботанический журнал. 1981. Т. 66. № 6. С. 843–850.
2. Быстрова В. И., Миняев Н. А. Материалы к эколого-географической характеристике галофитов северо-запада европейской части СССР // Ареалы растений флоры СССР. Л.: Изд-во ЛГУ, 1969. Вып. 2. С. 47–63.
3. Каплин П. А., Свиточ А. А., Судаков Н. Г. Материковые оледенения и окраинные морские бассейны России в плейстоцене // Вестник Московского ун-та. Сер. «География». 2005. № 1. С. 55–65.
4. Квасов Д. Д. Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы. Л.: Наука, 1975. 278 с.
5. Кравченко А. В. Конспект флоры Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 403 с.
6. Кравченко А. В., Кузнецов О. Л. Распространение южных и северных видов сосудистых растений на побережье и островах Белого моря // Природное и историко-культурное наследие Северной Фенноскандии: Материалы междунар. науч.-практ. конф. Петрозаводск, 2003. С. 16–29.
7. Победимова Е. Г. О приморских элементах флоры побережий Ладожского озера // Ботанический журнал. 1964. Т. 49. № 10. С. 1402–1407.
8. Победимова Е. Г., Станищева О. Н., Дроздова И. Н. О растениях, собранных в 1956 г. на побережьях Баренцева и Белого морей // Ботанические материалы Гербария СССР. 1989. Т. 94. Вып. 6. С. 5359–5364.
9. Проект Панарктическая флора [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.binran.ru/projects/paf/index.htm>
10. Сергиенко Л. А. Флора и растительность побережий Арктики и сопредельных территорий. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. 225 с.
11. Стрелков С. А. Развитие береговой линии Арктических морей СССР в четвертичном периоде. Морские берега // Труды института геологии Академии наук Эстонской ССР. 1961. Т. VIII. С. 133–146.
12. Филатов Н. Н., Тержевик А. Ю. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 335 с.
13. Цинзерлинг Ю. Д. Растения морских побережий на берегах озер Северо-Запада СССР // Журнал русского ботанического общества. 1925. Т. 10. № 2. С. 355–374.
14. Черепанов С. К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб., 1995. 992 с.

**АНДРЕЙ ЛЬВОВИЧ ЖЕСТЯНИКОВ**

кандидат медицинских наук, ассистент кафедры семейной медицины (общей врачебной практики) медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*zhestyanikov@onego.ru*

**НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА ДОРШАКОВА**

доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой семейной медицины (общей врачебной практики) медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*dorshakova@psu.karelia.ru*

**ТАТЬЯНА АЛЕКСЕЕВНА КАРАПЕТЯН**

доктор медицинских наук, доцент кафедры семейной медицины (общей врачебной практики) медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*kara@karelia.ru*

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СТАТУСА У ПРОЖИВАЮЩИХ В КАРЕЛИИ ДОНОРОВ КРОВИ

Представлены результаты исследования массовых концентраций микроэлементов в цельной крови здоровых жителей Карелии молодого возраста с использованием метода атомно-абсорбционной спектроскопии. Показаны сезонные изменения микроэlementного статуса у лиц данной группы.

Ключевые слова: микроэlementный статус, сезонные изменения, доноры крови

### АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Неблагоприятные биогеохимические и климатические условия среды обитания играют серьезную роль в механизмах дезадаптации и формирования патологии [1], [2], [3], [5], [9], [10], [12], [13], [15]. Следует особо отметить значительный вклад дисбаланса химических элементов окружающей среды в эти процессы [2], [5], [12], [13]. Вместе с тем нарушения баланса микроэлементов (МЭ) в среде обитания представляют серьезную медико-социальную проблему для Карелии [5], [12], [13]. Указанные биогеохимические особенности предрасполагают к формированию дезадаптивной патологии, проявляющейся, в частности, в комплексе вегетативных и сердечно-сосудистых расстройств [1], [12], [13], [14], [17]. Ряд исследователей обращают особое внимание на важность изучения микроэlementного статуса (МЭС) у жителей Севера с учетом сложных и изменчивых климатических условий [1], [9], [12], [13]. В этой связи особенно актуальным представляется исследование МЭС у жителей Карелии в разное время года. Целью данного исследования являлось изучение особенностей МЭС у здоровых жителей Карелии молодого возраста, являющихся регулярными донорами крови, в разное время года.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Всего обследованы 60 человек, 32 мужчины и 28 женщин, в возрасте от 18 до 35 лет, уроженцы Карелии, постоянно проживающие в Петрозаводске. Все указанные лица являлись регулярными донорами крови, в период проведения обследования не переносили острых заболеваний,

не страдали хронической патологией, не предъявляли жалоб на самочувствие. Никто из обследуемых не принимал препаратов и биологически активных добавок, содержащих витамины, макро- и микроэлементы. Забор цельной крови из вены проводили по стандартной методике в полимерные пробирки с добавленным гепарином, затем герметично их закрывали. Накопление и хранение материала происходило в условиях холодильной камеры при  $-20^{\circ}\text{C}$ . Перед проведением анализа проба размораживалась до комнатной температуры в течение одного часа. Определение элементов проводилось по аттестованным методикам, рекомендованным для применения в медицинских исследованиях [11], [18].

Использовался атомно-абсорбционный спектрометр с электротермической атомизацией «МГА-915», разработанный научно-производственной фирмой аналитического приборостроения «ЛЮМЭКС» и зарегистрированный в Государственном реестре средств измерений РФ под № 17309-98. Основными достоинствами данного аналитического комплекса являются: низкие пределы обнаружения, высокая селективность и минимальная пробоподготовка. Статистическую обработку проводили с использованием лицензионных статистических программ R.1.9.1 и Statistica 6.0. Различия между группами оценивали по t-критерию Стьюдента. Достоверными считали различия при  $p < 0,05$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Достоверные различия в зависимости от пола выявлены по содержанию Fe, Cu, Co (больше у мужчин) и Cd (больше у женщин) (табл. 1).

**Таблица 1**  
Массовые концентрации элементов у доноров крови в зависимости от пола

Элемент	Содержание у лиц мужского пола (мг/л) (n = 32)	Содержание у лиц женского пола (мг/л) (n = 28)
Mg	43,16 ± 5,19	44,47 ± 6,54
Fe	488,77 ± 69,05*	369,50 ± 33,01
Cu	0,73 ± 0,18*	0,55 ± 0,25
Co	0,015 ± 0,008*	0,009 ± 0,007
Mn	0,019 ± 0,009	0,016 ± 0,007
Cd	0,00010 ± 0,00005*	0,00020 ± 0,00003
Pb	0,006 ± 0,003	0,004 ± 0,003

Примечание. \* – различия между подгруппами достоверны (p < 0,05).

Представлялось важным провести сравнение полученных данных с результатами других научных работ, в данном случае – с результатами исследования МК элементов в цельной крови у здоровых россиян центра страны (Московской и прилегающих к ней областей) [4] (табл. 2).

**Таблица 2**

Массовые концентрации элементов у здоровых жителей центральных районов России (Московской и прилегающих к ней областей) [4] и доноров крови молодого возраста, проживающих в Карелии

Элемент	Диапазон нормального содержания элементов (мг/л) [19], [20], [21], [22], [23]	Среднее содержание у здоровых россиян центра страны (Московской и прилегающих к ней областей) (мг/л)	Среднее содержание у доноров крови молодого возраста, проживающих в Карелии (мг/л)
Mg	37,8–50,0	22,0	43,77
Fe	309–521	287	433,11
Cu	0,75–1,3	0,62	0,65
Co	0,0002–0,04	0,007	0,0127
Mn	0,0016–0,075	0,009	0,018
Cd	0,00003–0,007	0,014	0,00014
Pb	0,008–0,269	0,054	0,00519

При проведении сравнительного анализа учтены данные о диапазонах нормального содержания МЭ в цельной крови [19], [20], [21], [22], [23]. МК Mg, Fe, Co, Mn у здоровых жителей Карелии укладывались в диапазон нормального содержания этих элементов, согласно данным указанных исследований, и были выше, чем у россиян из центральных районов страны. Показатели МК Cu у жителей Карелии и центральных районов страны свидетельствовали о дефиците данного элемента. МК Cd и Pb у жителей Карелии находились в диапазоне допустимого содержания этих элементов в цельной крови и отличались более низким уровнем, чем у жителей центральных районов страны, что может быть следствием более высокой антропогенной нагрузки. С преобладанием МК Cd и

Pb (проявляющих антагонистические свойства в отношении эссенциальных элементов) у жителей центральных районов страны могут быть связаны и более низкие МК Mg, Fe, Co, Mn по сравнению с жителями Карелии.

Исследование МК элементов у здоровых лиц в зависимости от времени года (были обследованы по 15 человек зимой, весной, летом и осенью) показало, что наибольшее содержание эссенциальных элементов (Mg, Fe, Cu, Co, Mn) характерно либо для зимнего, либо для весеннего периодов (табл. 3, 4, 5, 6, 7, 8).

**Таблица 3**

Массовые концентрации элементов у доноров крови в зависимости от времени года (зимний и весенний периоды)

Элемент	Содержание у обследованных зимой (мг/л) (n = 15)	Содержание у обследованных весной (мг/л) (n = 15)
Mg	40,77 ± 4,39*	45,89 ± 4,94
Fe	479,87 ± 81,78	504,63 ± 55,78
Cu	0,81 ± 0,18	0,66 ± 0,17
Co	0,015 ± 0,005	0,016 ± 0,011
Mn	0,019 ± 0,012*	0,021 ± 0,008
Cd	0,0001 ± 0,00005	0,0001 ± 0,00004
Pb	0,006 ± 0,002	0,006 ± 0,003

Примечание. \* – различия между подгруппами достоверны (p < 0,05).

**Таблица 4**

Массовые концентрации элементов у доноров крови в зависимости от времени года (зимний и летний периоды)

Элемент	Содержание у обследованных зимой (мг/л) (n = 15)	Содержание у обследованных летом (мг/л) (n = 15)
Mg	40,77 ± 4,39	44,12 ± 6,73
Fe	479,87 ± 81,78*	367,97 ± 39,05
Cu	0,81 ± 0,18*	0,51 ± 0,23
Co	0,015 ± 0,005	0,011 ± 0,009
Mn	0,019 ± 0,012	0,015 ± 0,008
Cd	0,0001 ± 0,00005	0,0001 ± 0,00003
Pb	0,006 ± 0,002	0,004 ± 0,003

Примечание. \* – различия достоверны между подгруппами (p < 0,05).

**Таблица 5**

Массовые концентрации элементов у доноров крови в зависимости от времени года (зимний и осенний периоды)

Элемент	Содержание у обследованных зимой (мг/л) (n = 15)	Содержание у обследованных осенью (мг/л) (n = 15)
Mg	40,77 ± 4,39	44,31 ± 6,33
Fe	479,87 ± 81,79*	379,97 ± 33,29
Cu	0,81 ± 0,18*	0,61 ± 0,25
Co	0,015 ± 0,005*	0,008 ± 0,006
Mn	0,019 ± 0,012	0,016 ± 0,006
Cd	0,0001 ± 0,00005*	0,0002 ± 0,00002
Pb	0,006 ± 0,002	0,005 ± 0,003

Примечание. \* – различия между подгруппами достоверны (p < 0,05).

**Таблица 6**  
Массовые концентрации элементов у доноров крови в зависимости от времени года (весенний и летний периоды)

Элемент	Содержание у обследованных весной (мг/л) (n = 15)	Содержание у обследованных летом (мг/л) (n = 15)
Mg	45,89 ± 4,94	44,12 ± 6,73
Fe	504,63 ± 55,78*	367,97 ± 39,05
Cu	0,66 ± 0,17*	0,51 ± 0,23
Co	0,016 ± 0,011	0,011 ± 0,009
Mn	0,021 ± 0,008*	0,015 ± 0,008
Cd	0,0001 ± 0,00004	0,0001 ± 0,00003
Pb	0,006 ± 0,003	0,004 ± 0,003

Примечание. \* – различия достоверны между подгруппами (p < 0,05).

**Таблица 7**  
Массовые концентрации элементов у доноров крови в зависимости от времени года (весенний и осенний периоды)

Элемент	Содержание у обследованных весной (мг/л) (n = 15)	Содержание у обследованных осенью (мг/л) (n = 15)
Mg	45,89 ± 4,94	44,32 ± 6,33
Fe	504,63 ± 55,78*	379,97 ± 33,29
Cu	0,66 ± 0,17*	0,61 ± 0,25
Co	0,016 ± 0,011*	0,008 ± 0,006
Mn	0,021 ± 0,008	0,016 ± 0,006
Cd	0,0001 ± 0,00004*	0,0002 ± 0,00002
Pb	0,006 ± 0,003	0,005 ± 0,003

Примечание. \* – различия достоверны между подгруппами (p < 0,05).

**Таблица 8**  
Массовые концентрации элементов у доноров крови в зависимости от времени года (летний и осенний периоды)

Элемент	Содержание у обследованных летом (мг/л) (n = 15)	Содержание у обследованных осенью (мг/л) (n = 15)
Mg	44,12 ± 6,73	44,32 ± 6,33
Fe	367,97 ± 39,05	379,97 ± 33,29
Cu	0,51 ± 0,23	0,61 ± 0,25
Co	0,011 ± 0,009	0,008 ± 0,006
Mn	0,015 ± 0,008	0,016 ± 0,006
Cd	0,0001 ± 0,00003*	0,0002 ± 0,00002
Pb	0,005 ± 0,003	0,005 ± 0,003

Примечание. \* – различия достоверны между подгруппами (p < 0,05).

Затем после максимального содержания данных элементов в цельной крови зимой или весной происходило снижение их МК к летнему и

осеннему периодам. Содержание Mg, Fe, Co, Mn было максимальным в весенний период, Cu – в зимний (табл. 3, 4, 5, 6, 7, 8). МК Cd (мг/л) изменялись по-другому: повышались от зимнего периода (минимальные значения) и достигали максимальных показателей в осенние месяцы (табл. 3, 4, 5, 6, 7, 8). МК Pb (мг/л) снижались от зимнего периода к летнему, достигая минимальных значений (табл. 3, 4, 5, 6, 7, 8).

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные изменения МК эссенциальных элементов у здоровых лиц молодого возраста в зависимости от времени года носят, вероятно, компенсаторный характер: повышение их содержания зимой и весной позволяет активизировать механизмы антиоксидантной защиты и способствует более устойчивой адаптации ССС в экстремальных условиях Севера. Вышеуказанные изменения МК токсичных МЭ (Cd и Pb) могут быть связаны с меняющейся интенсивностью антропогенной нагрузки в разное время года, а также с особенностями взаимодействия токсичных элементов с эссенциальными. Выявленное в настоящем исследовании низкое содержание Cu в цельной крови жителей Карелии требует дальнейшего изучения и объяснения. Содержание указанного биоэлемента в окружающей среде Карелии различается по районам. Также существуют отличия по содержанию Cu в водоемах, мхах и лесных подстилках. Отмечена проблема повышенных концентраций Cu в воде ряда озер Республики Карелии [16]. Анализ воды Онежского озера разреза Большое Онего – Вытегорское побережье выявил высокое содержание вышеуказанного металла [6], [7], [8]. Кроме того, в период осенних дождей и в пик весеннего паводка возможно значительное поступление Cu в воду Петрозаводской губы за счет прямого смыва с городской территории [6], [7], [8]. Можно предположить, что низкие МК Cu в цельной крови связаны с особенностями усвоения данного атомовита в организме и его взаимодействием с другими МЭ. Следует отметить, что повышение содержания Cd в осенний период в значительной степени может быть связано с большей частотой образования смогов, содержащих воздушные взвеси данного металла в это время года. Высокая влажность воздуха и температурная инверсия, характерные для Карелии осенью, способствуют этим изменениям. Особенности изменений МК элементов в биосредах человеческого организма в зависимости от времени года, а также причины, их вызывающие, требуют дальнейшего изучения [3], [21], [23].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авцын А. П., Жаворонков А. А., Марачев А. Г. и др. Патология человека на Севере. М.: Медицина, 1985. 416 с.
2. Агаджанян Н. А., Скальный А. В. Химические элементы в среде обитания и экологический портрет человека. М.: КМК, 2001. 83 с.

3. Агаджанян Н. А., Марачев А. Г., Бобков Г. А. Экологическая физиология человека. М.: КРУК, 1998. 416 с.
4. Барашков Г. К. и др. Диапазон содержания тяжелых металлов (ТМ) в цельной крови взрослых россиян центра страны // Микроэлементы в медицине. 2003. Т. 4. Вып. 3. С. 1–5.
5. Вапиров В. В., Чаженгина Е. А., Вапирова Н. В. Селеновый статус Республики Карелия // Эко-аналитический контроль природных объектов Карелии. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2002. С. 79–84.
6. Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Республики Карелия в 2001 году / Управление Природных ресурсов и охраны окружающей среды МПР России по Республике Карелия. Петрозаводск: Издательский дом «Карелия», 2002. 240 с.
7. Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Республики Карелия в 2002 году / Управление Природных ресурсов и охраны окружающей среды МПР России по Республике Карелия. Петрозаводск: Издательский дом «Карелия», 2003. 256 с.
8. Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Республики Карелия в 2003 году / Управление Природных ресурсов и охраны окружающей среды МПР России по Республике Карелия. Петрозаводск: Издательский дом «Карелия», 2004. 312 с.
9. Доршакова Н. В. Качество окружающей среды и здоровье человека в условиях Карелии. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1997. 204 с.
10. Дробышева А. А. Профилактика и коррекция метеотропных реакций у детей 10–14 лет с нейроциркуляторной дистонией: Автореф. дисс. ... канд. мед. наук. Иваново, 2003. 17 с.
11. Ермаченко Л. А., Ермаченко В. М. Атомно-абсорбционный анализ с графитовой печью: Методическое пособие для практического использования в санитарно-гигиенических исследованиях. М.: ПАИМС, 1999. 220 с.
12. Жестяников А. Л. Дисбаланс некоторых макро- и микроэлементов как фактор риска заболеваний сердечно-сосудистой системы на Севере // Экология человека. 2005. № 9. С. 19–25.
13. Жестяников А. Л., Доршакова Н. В., Карапетян Т. А. Нейроциркуляторная дистония: роль дисбаланса микроэлементов в патогенезе // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2008. № 4. С. 56–61.
14. Зайцева О. и др. Метаболическая адаптация у детей с дисфункцией вегетативной нервной системы // Врач. 1998. № 11. С. 23–24.
15. Карпин В. А. Современные медико-экологические аспекты внутренних болезней на урбанизированном Севере // Терапевтический архив. 2003. Т. 75. № 1. С. 30–34.
16. Мониторинг поверхностных вод во II квартале 2011 года // Государственное учреждение «Карельский республиканский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.kareliameteo.ru/monitoring/kachestvo.html>
17. Покалев Г. М., Варварина Г. Н., Виноградова Е. Г. Функциональные заболевания. Н. Новгород: Нижегородский гуманитарный центр, 2002. 287 с.
18. Рутковский Г. В., Глушков Р. К., Колбасов С. Е. и др. Лабораторная диагностика субхронических интоксикаций соединениями свинца, меди, цинка и марганца атомно-абсорбционным методом (пособие для врачей-лаборантов). СПб., 2001. 14 с.
19. Скальный А. В. Химические элементы в физиологии и экологии человека. М.: ОНИКС-21 век: Мир, 2004. 216 с.
20. Скальный А. В., Быков А. Т., Лимин Б. В. Диагностика, профилактика и лечение отравлений свинцом. М.: ВЦМК «Защита», 2002. 52 с.
21. Скальный А. В., Быков А. Т., Яцык Г. В. Микроэлементы и здоровье детей. М.: Изд-во КМК, 2002. 133 с.
22. Скальный А. В., Рудаков И. А. Биоэлементы в медицине. М.: ОНИКС-21 век: Мир, 2004. 272 с.
23. Скальный А. В., Яцык Г. В., Одинаева Н. Д. Микроэлементозы у детей: распространенность и пути коррекции: Практическое пособие для врачей. М.: Изд-во КМК, 2002. 86 с.

**АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ МЕЙГАЛ**

доктор медицинских наук, профессор кафедры физиологии человека и животных медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*meigal@petsu.ru*

**АНАСТАСИЯ МИХАЙЛОВНА ПОТЕМИНА**

ассистент кафедры физиологии человека и животных медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*medic13@inbox.ru*

**ИРИНА МАРКОВНА ШЕГЕЛЬМАН**

аспирант кафедры критической и респираторной медицины медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*narkis@onego.ru*

## НЕЙРОМЫШЕЧНЫЙ СТАТУС ЧЕЛОВЕКА ПРИ ОСТРОЙ И ХРОНИЧЕСКОЙ ИММЕРСИИ В ХОЛОДНОЙ ВОДЕ

Установлено, что занятия зимним плаванием вызывают минимальное изменение нейромышечного статуса по сравнению с контрольной группой. Достоверные изменения параметров (электромиограммы) получены лишь после острого погружения в ледяную воду в виде снижения частоты импульсации двигательных единиц (ДЕ) и снижения нелинейных параметров ЭМГ. Вывод: двигательная система человека достаточно устойчива к ремоделированию нейромышечного статуса даже при сильном длительном воздействии холодового фактора, но она реагирует на острое воздействие кратковременным изменением активности ДЕ.

Ключевые слова: электромиограмма, двигательные единицы, скелетные мышцы, иммерсия, холод, адаптация

### ВВЕДЕНИЕ

Температура среды, подобно гравитации или освещенности, постоянно присутствует в жизни человека. Человек редко пребывает в термонейтральной среде: на него в каждый момент действует либо охлаждение, либо согревание. Для не одетого человека термонейтральные условия составляют ~ 28 °С, а для легко одетого (офисный костюм, 1 CLO) ~ 21–22 °С [11]. За пределами этой температуры возникают физиологические реакции, которые поддерживают тепловой баланс человека.

Человек получает холодовую нагрузку обычно вне дома и работы, в холодный сезон (зима, частично осень и весна). Однако развитие рекреационной индустрии позволяет человеку испытывать действие холода даже летом на горнолыжных курортах, при плавании и нырянии (иммерсия и субмерсия). Холодовую экспозицию можно испытать при кондиционировании воздуха и при работе в холодильных камерах. Наиболее экстремальным видом холодового влияния является зимнее плавание (холодовая иммерсия), когда человек погружается в воду при температуре, близкой к точке замерзания. Также в последнее время получает популярность такой вид лечебно-косметической процедуры, как криосауна (*WBC, whole body cryotherapy*) [20].

Одним из наиболее мощных и частично управляемых механизмов терморегуляции живого организма является двигательная система. Она способна производить тепло (теплопродукция)

и снижать теплоотдачу через терморегуляционное поведение и теплозащитные позы. Двигательная система является чутким индикатором длительных и острых сенсорных воздействий. Известно, что двигательные единицы реагируют на длительную гипоксию, невесомость, возраст, утомление, тренировку [2], [12], [13].

Двигательная система, попадая под влияние холода, неизбежно адаптируется к нему [9]. Известно, что длительное или острое охлаждение вызывает снижение частоты импульсации ДЕ. В частности, у животных (крыс) адаптация к длительному содержанию при низкой температуре среды (экспозиция 4–5 недель при -1–15 °С) приводила к достоверному снижению частоты импульсации ДЕ на 2–6 имп./с [7]. У голубей, исследованных зимой («зимние» голуби), частота импульсации была на 1–3 имп./с меньше по сравнению с «летними» голубями [8]. Частота импульсации ДЕ при острой холодовой экспозиции снижается и у человека [5].

В соответствии с недавно предложенной парадигмой об однонаправленности действия гравитации / невесомости и некоторых других сенсорных модальностей (холод, согревание, гипоксия) в онтогенезе человека [3], [4] было бы интересно исследовать изменения нейромышечного статуса в ответ на экстремально сильное острое и хроническое действие холода на организм человека. Это могло бы стать частью профилактических мероприятий в практике космических полетов [14].

В этой связи цель настоящего исследования заключалась в том, чтобы на основе электромиографических параметров, в том числе и новых нелинейных параметров на основе фрактального анализа [15], [19], дать описание нейромышечного статуса у любителей зимнего плавания в начале и конце сезона зимнего плавания, а также при остром погружении в ледяную воду.

## МЕТОДИКА

### Общий дизайн исследования

Проведены 3 серии исследований с двумя группами испытуемых: 1) любители зимнего плавания (далее – «моржи») и 2) «не-моржи». В первом исследовании проведено сравнение параметров интерференционной электромиограммы (иЭМГ) и двигательных единиц в группах «моржей» (М1) и «не-моржей» (М0) до начала сезона зимнего плавания в лабораторных условиях (октябрь – декабрь 2010 года). Во втором исследовании проведено сравнение группы «моржей» до начала сезона зимнего плавания (М1) и при его окончании в марте – апреле 2011 года (М2). Третье исследование заключалось в сравнении параметров иЭМГ в конце сезона зимнего плавания до погружения в ледяную воду (М2) и сразу после выхода из нее (М3).

### Испытуемые и условия среды

Исследованы 13 здоровых любителей спортивного зимнего плавания (КРО общероссийской общественной организации «Федерация закаливания и спортивного зимнего плавания» (клуб «Виктория», г. Петрозаводск, наб. Варкауса, председатель И. Н. Жолудева, 7 мужчин и 6 женщин)). Антропометрические данные приведены в табл. 1. Средний стаж занятий зимним плаванием составил 4,4 года (1–12 лет), среднее время экспозиции в воде в неделю ~ 5 мин. (2–15 мин.). Среди испытуемых 2 мастера спорта, чемпион России по зимнему плаванию, 2 разрядника по разным видам спорта. Все испытуемые некурящие, не страдают неврологическими заболеваниями.

В контрольную группу отобраны 14 человек («не-моржи», 5 мужчин и 9 женщин). Обе группы примерно одинаковы по возрасту, полу и антропометрическим данным (табл. 1), хотя в группе «моржей» женщины имели больший средний возраст. У испытуемых собиралось информированное согласие на участие в исследовании. Исследование групп М1 и М0 проведено примерно в одно время года (с 21 октября по 21 декабря 2010 года) в условиях лаборатории ( $T_{\text{возд}} = 25\text{--}26^\circ\text{C}$ , влажность – 60–70 %) на базе кафедры физиологии человека и животных ПетрГУ (комнатные условия). Группа «моржей» также была обследована на берегу Онежского озера, в обогреваемом здании клуба «Виктория» (М2, комнатные условия, наб. Варкауса, г. Петрозаводск)

в марте – апреле 2011 года. Температура воздуха в здании клуба составляла 24–25 °С. Группу М3 сформировали те же испытуемые сразу после иммерсии в холодной воде (1–4 °С). Температура воздуха в марте 2011 года составила –6–2 °С, в апреле – от –1 до +10 °С. Время иммерсии (погружения) – 60–80 с. Испытуемые также получали дополнительную холодную экспозицию примерно 2–3 мин. при подходе к проруби и выходе из нее. Запись ЭМГ после погружения происходила также в здании клуба «Виктория». Измеряли средневзвешенную температуру кожи (СВТК) по методу Раманатана [18] до и после погружения в холодную воду:

$$\text{СВТК} = 0,3T_1 + 0,2T_2 + 0,3T_3 + 0,2T_4,$$

где  $T_1$  – температура кожи под ключицей,  $T_2$  – передней поверхности плеча,  $T_3$  – передней поверхности бедра,  $T_4$  – задней поверхности голени.

Таблица 1

Антропометрические данные о группах «моржей» (М1) и «не-моржей» (М0)

Группа	Группа М1	Группа М0
Возраст (годы)		
Вся группа	51,8 ± 14,5 (27–85) (n = 13)	47,7 ± 12,3 (29–81) (n = 13)
Мужчины	40,42 ± 10,19 (n = 7)	44,29 ± 9,4 (29–49) (n = 5)
Женщины	62,83 ± 16,03** (n = 13)	50 ± 13,7 (43–81) (n = 9)*
Рост (см)		
Вся группа	168,00 ± 13,31 (146–195)	169,08 ± 9,05 (148–182)
Мужчины	174,33 ± 10,45	177,44 ± 4,45 (175–182)
Женщины	153,75 ± 5,18*	163,87 ± 6,98 (148–170)*
Вес (кг)		
Вся группа	75,23 ± 15,67 (56–96)	72,00 ± 14,81 (55–100)
Мужчины	82,11 ± 13,93	86,00 ± 9,19 (77–100)
Женщины	59,75 ± 1,71**	62,00 ± 8,10 (55–73)**
ВМІ		
Вся группа	26,31 ± 2,93 (22,4–32,4)	25,13 ± 3,74 (18,7–32,3)
Мужчины	26,75 ± 3,38	27,94 ± 2,59 (26,0–32,3)*
Женщины	25,32 ± 1,41	23,13 ± 3,15 (18,7–26,8)*
Стаж занятий зимним плаванием (годы)		
Вся группа	4,53 ± 3,80	–
Мужчины	4,38 ± 3,5	–
Женщины	4,92 ± 2,36	–

Примечание. \* –  $p < 0,05$ ; \*\* –  $p < 0,01$  между группами мужчин и женщин.

### Регистрация и анализ электромиограммы

Поверхностную иЭМГ регистрировали с двуглавой мышцей плеча (*m. biceps br.*) справа, в положении стоя было опущено вниз, предплечье удерживалось в положении локтевого сгибания. Запись иЭМГ делали при нагрузках 0 (без нагрузки), 1, 2 и 3 кг. Использовали электромиограф Нейро-МВП-8 с программной средой «Нейрософт» (ООО «Нейрософт», г. Иваново, Россия). Отводящие электроды укрепляли лейкопластырем над основной массой мышцы. Кожу предварительно обрабатывали абразивной пастой и 70 % этанолом, на электрод наносили электродный гель. Полоса пропускания ЭМГ составила 50–

500 Гц. Регистрировали отрезки ЭМГ длительностью 1 с. Аппарат Нейро-МВП-8 позволяет получать такие линейные параметры, как средняя амплитуда ( $A$ , мкВ) и средняя частота (MNF, Гц) иЭМГ. Нами также применена программа FRACTAN 4.4 © для характеристики аттрактора иЭМГ, который описывается несколькими нелинейными параметрами: фрактальной размерностью ( $D$ ), корреляционной размерностью ( $D_c$ ) и корреляционной энтропией ( $K_2$ ) [4].

Также регистрировали параметры импульсации ДЕ трехглавой мышцы плеча (*m. triceps br.*) билатерально по методу, примененному нами ранее [6]. Испытуемых просили напрягать мышцу до появления спонтанно импульсирующих ДЕ. Анализировали до 70–100 межимпульсных интервалов, рассчитывали средний межимпульсный интервал (МИИ, мс), среднюю частоту импульсации ( $f$ , имп./с), вариабельность (среднеквадратическое отклонение от среднего межимпульсного интервала,  $\sigma$ , мс).

Таким образом, всего для характеристики нейромышечного статуса учитывались 8 электромиографических параметров.

### Статистический анализ

Статистический анализ проведен в программной среде SPSS 12.0™. Корреляционный анализ между параметрами производили с помощью критериев Спирмена и Пирсона, сравнение средних значений – с помощью  $t$ -теста Стьюдента. Нормальность распределения данных определяли по методу Шапиро – Уилка.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 1. Сравнение нейромышечного статуса «моржей» и «не-моржей»

Значения параметров иЭМГ групп «моржей» (M1) и «не-моржей» (M0) приведены в табл. 2. Достоверные различия были характерны только для средней частоты иЭМГ и фрактальной размерности. Средняя частота иЭМГ была меньше, а фрактальная размерность больше в группе «не-моржей». Это может свидетельствовать о наличии большей предопределенности в сигнале ЭМГ, что характерно для более низких частот импульсации ДЕ [21]. Действительно, наблюдалась отчетливая тенденция к увеличению межимпульсного интервала ДЕ в группе «моржей», характерная как для мужчин, так и для женщин. В целом частота импульсации ДЕ была на ~ 0,5 имп./с больше в группе «не-моржей», однако это различие не достигло уровня достоверности ( $p = 0,099$ ). При снижении частоты импульсации ДЕ процент детерминизма в их активности должен расти [21], поэтому меньшая сложность (низкая фрактальная размерность) иЭМГ «не-моржей» вполне объяснима сниженной частотой импульсации ДЕ. Частота импульсации ДЕ была больше на 0,5–1,0 имп./с у мужчин в обеих группах.

Таблица 2

Электромиографические параметры в группах «моржей» и «не-моржей»

Параметр ЭМГ	Группа M1 («моржи»)	Группа M0 («не-моржи»)
Средняя амплитуда иЭМГ (мкВ)		
Без нагрузки	90,05 ± 38,76	76,98 ± 37,05
1 кг	121,58 ± 33,38	112,81 ± 30,10
2 кг	131,64 ± 40,64	127,51 ± 35,58
3 кг	152,31 ± 35,11	151,11 ± 40,84
Средняя частота иЭМГ (Гц)	135,90 ± 14,33	127,81 ± 18,25*
Фрактальная размерность ( $D$ )	1,7512 ± 0,041	1,7629 ± 0,046*
Корреляционная размерность ( $D_c$ )	4,380 ± 0,366	4,253 ± 0,336
Корреляционная энтропия ( $K_2$ )	5,921 ± 2,906	5,397 ± 2,72
Средний межимпульсный интервал ДЕ (мс)		
Вся группа	111,37 ± 18,13 (n = 39)	106,88 ± 21,75 (n = 43)
< 60 лет	106,86 ± 16,00 (n = 27)	103,38 ± 20,61 (n = 36)
> 60 лет	121,52 ± 19,20 (n = 12)	131,68 ± 23,34 (n = 8)
Мужчины	108,02 ± 17,54 (n = 20)	101,25 ± 24,78 (n = 17)
Женщины	114,89 ± 18,54 (n = 19)	110,56 ± 19,33 (n = 26)
Средняя частота (имп./с)		
Вся группа	9,25 ± 1,59 (n = 39)	9,75 ± 1,99 (n = 43)
< 60 лет	9,58 ± 1,56 (n = 27)	10,04 ± 1,99 (n = 36)
> 60 лет	8,53 ± 1,45 (n = 12)	7,89 ± 1,46 (n = 8)
Мужчины	9,52 ± 1,72 (n = 20)	10,43 ± 2,47 (n = 17)
Женщины	8,98 ± 1,44 (n = 19)	9,31 ± 1,50 (n = 26)

Примечание. \* –  $p < 0,05$  между группами M1 и M0.

Характерной особенностью группы «не-моржей» было то, что внутри группы проявилось влияние возраста. Это выражалось в достоверной корреляции между возрастом и средним межимпульсным интервалом ДЕ ( $R = 0,324$ ,  $p = 0,034$ ) и фрактальной размерностью иЭМГ ( $R = 0,326$ ,  $p = 0,014$ ). В группе «моржей» подобной корреляции между возрастом и параметрами иЭМГ обнаружено не было. Внутригрупповые различия в группе «не-моржей» вполне объяснимы. Известно, что частота импульсации ДЕ снижена у лиц пожилого возраста за счет увеличения пропорции медленных ДЕ в процессе возрастного ремоделирования двигательной системы [12]. Так как возраст не оказал достоверного влияния на активность ДЕ и параметры иЭМГ в группе «моржей», это можно считать специфическим влиянием занятий зимним плаванием на нейромышечный статус.

### 2. Влияние 4-месячного сезона зимнего плавания и острой холодовой иммерсии на параметры ЭМГ

Повторное исследование, проведенное в комнатных условиях на той же группе «моржей» спустя 3,5–4 месяца занятий зимним плаванием (M2, иммерсия в среднем 5 мин. в неделю), показало, что исследованные параметры иЭМГ и параметры активности ДЕ практически не изменились (табл. 3).

Таблица 3

Электромиографические параметры в группе «моржей» до (М2) и после (М3) погружения в холодную воду в конце сезона зимнего плавания

Параметр ЭМГ	Группа М2	Группа М3
Средняя амплитуда иЭМГ(мкВ)		
Без нагрузки	65,92 ± 38,90	74,59 ± 41,43
1 кг	97,26 ± 49,21	99,81 ± 44,50
2 кг	126,61 ± 56,05	130,07 ± 57,79
3 кг	142,63 ± 55,14	144,00 ± 54,16
Средняя частота иЭМГ(Гц)	134,96 ± 25,13	132,46 ± 24,09
Фрактальная размерность (D)	1,7511 ± 0,038	1,7412 ± 0,059*
Корреляционная размерность (D <sub>1</sub> )	4,464 ± 0,570	4,355 ± 0,436*
Корреляционная энтропия (K <sub>1</sub> )	4,752 ± 1,63	4,610 ± 1,746*
Средний межимпульсный интервал ДЕ (мс)		
Вся группа	113,06 ± 30,37 (n = 35)	128,69 ± 22,26* (n = 28)
< 60 лет	113,46 ± 27,29 (n = 24)	127,05 ± 23,37 (n = 19)
> 60 лет	112,17 ± 37,69 (n = 11)	132,18 ± 20,59 (n = 9)
Мужчины	117,44 ± 26,62 (n = 20)	129,66 ± 25,72 (n = 13)
Женщины	107,21 ± 34,84 (n = 15)	127,85 ± 19,67 (n = 15)
Средняя частота (имп./с)		
Вся группа	9,46 ± 2,52 (n = 35)	7,99 ± 1,35 (n = 28)**
< 60 лет	9,31 ± 2,30 (n = 24)	8,11 ± 1,40 (n = 19)
> 60 лет	9,80 ± 3,04 (n = 11)	7,74 ± 1,29 (n = 9)
Мужчины	8,90 ± 1,85 (n = 20)	7,98 ± 1,51 (n = 13)
Женщины	10,21 ± 3,12 (n = 15)	7,99 ± 1,29 (n = 15)

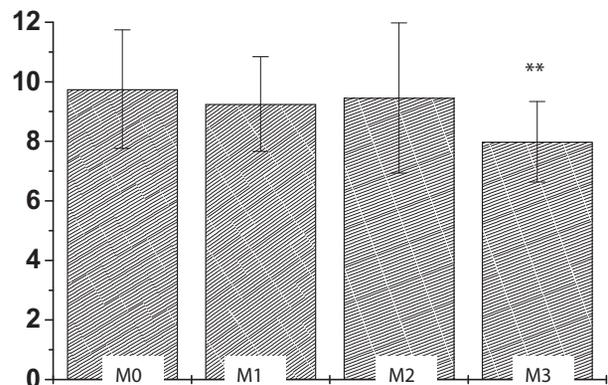
Примечание. \* –  $p < 0,05$ ; \*\* –  $0,01$  между группами М0 и М3.

Сразу после 60–80-секундного погружения в ледяную воду (М3) СВТК снижалась с  $30,9 \pm 2,1$  до  $14,6 \pm 1,5$  °С, частота импульсации ДЕ достоверно снижалась как у мужчин, так и у женщин, увеличивался межимпульсный интервал, а также снижались все нелинейные параметры иЭМГ (табл. 3), что можно считать специфическим влиянием острого охлаждения организма.

Таким образом, почти 4-месячный сезон зимнего плавания практически не изменил электромиографические параметры нейромышечного статуса в группе «моржей». Можно сделать вывод о том, что у человека, в отличие от лабораторных и свободно живущих в природе видов, длительное и сильное температурное влияние оказывает лишь минимальное воздействие на нейромышечный статус. Это может быть связано с тем, что, несмотря на длительность сезона зимнего плавания, такое воздействие является все-таки кратковременным (всего 4–5 мин. в неделю). Все остальное время любители зимнего плавания проводили в термонейтральных комфортных температурных условиях, в отличие от лабораторных животных, которые находились в более жестких температурных условиях [7], [8]. Можно также предположить, что в группе «моржей» 4-месячное воздействие холодной иммерсии «камуфлируется» уже имеющейся «аккумулятивной» адаптацией скелетных мышц к хо-

луду, поскольку у большинства любителей зимнего плавания стаж погружений в ледяную воду составляет более 2 лет.

Таким образом, наиболее сильное влияние на нейромышечный статус оказало острое охлаждение в ледяной воде на фоне более чем 2-кратного снижения кожной температуры. Погружение в ледяную воду (иммерсия) оказало достоверное и предсказуемое влияние на ДЕ, снижая их частоту, что совпадает с ранее полученными данными о влиянии умеренного воздушного охлаждения (экспозиции) на ДЕ человека [5]. Таким образом, в континууме состояний М0-М1-М2-М3 два крайних состояния – М0 («не-моржи») и М3 («моржи» после иммерсии) – оказались наиболее различными с точки зрения нейромышечного статуса (см. рисунок). Физиологический смысл этих изменений заключается в так называемой «интерполяции» скорости сокращения мышечных волокон и частоты импульсации ДЕ для того, чтобы поддерживался примерно одинаковый режим зубчатого тетануса [10], [16]. Снижение скорости сокращения при охлаждении требует снижения частоты импульсации ДЕ. Также снижение частоты импульсации имеет калоригенный эффект [1].



Средняя частота импульсации (имп./с) двигательных единиц в четырех исследованных состояниях: М0 – «не-моржи»; М1 – «моржи» до сезона зимнего плавания; М2 – «моржи» после сезона зимнего плавания до погружения; М3 – «моржи» после сезона зимнего плавания сразу после погружения в ледяную воду.  
\*\* –  $p < 0,05$  между группами М0 и М3

Новые нелинейные параметры иЭМГ, характеризующие нейромышечный статус, оказались достаточно стабильными в разных состояниях. Тем не менее после иммерсии в ледяной воде фрактальная и корреляционная размерность были достоверно ниже по сравнению с группой «не-моржей». Снижение размерности свидетельствует об уменьшении сложности биосигнала и, соответственно, о повышении его предсказуемости. Это, в свою очередь, является признаком повышенного количества одинаковых фрагментов сигнала, то есть появления ритмичности [15], [19]. Поэтому снижение нелинейных параметров после иммерсии в ледяной воде может быть признаком невя-

ной холодовой дрожи, которая визуально имела место у 2 из 13 испытуемых.

Таким образом, занятия зимним плаванием оказывают минимальный адаптационный эф-

фект на нейромышечный статус «моржей». Наибольшее влияние оказывает острое сильное охлаждение – погружение в ледяную воду (иммерсия).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурфинкель В. С., Левик Ю. С., Полещук Н. К., Коровин Ю. В. Зависимость теплопродукции скелетной мышцы от режима ее сокращения // Физиология человека. 1981. Т. 7. № 1. С. 46–54.
2. Козловская И. Б. Гравитационные механизмы в двигательной системе // Современный курс классической физиологии / Под ред. Ю. В. Наточина, В. А. Ткачука. М.: Геотар-Медиа, 2007. С. 115–134.
3. Мейгал А. Ю. Онтогенетическая модель гравитации и невесомости: теоретические и практические аспекты // Физиология человека. 2011. Т. 37. № 6. С. 130–138.
4. Мейгал А. Ю., Ворошилов А. С. Перинатальная модель перехода от гипогравитации к земной гравитации на основе нелинейных характеристик электромиограммы // Авиакосмическая экологическая медицина. 2009. Т. 43. № 6. С. 14–18.
5. Мейгал А. Ю., Герасимова Л. И., Золотова Е. В., Лупандин Ю. В. Произвольное рекрутирование двигательных единиц в условиях холодовой дрожи // Физиология человека. 1997. Т. 23. № 5. С. 64–68.
6. Мейгал А. Ю., Кузьмина Г. И., Шигуева Т. А., Закирова А. З. Способ селективного отведения потенциалов действия двигательных единиц человека накожными электродами // Физиология человека. 2009. Т. 35. № 5. С. 104–108.
7. Сорокина Л. В., Лупандин Ю. В., Власова Л. П. Терморегуляционная активность мотонейронного пула у крыс, адаптированных к холоду и гипоксии // Физиологический журнал СССР. 1984. Т. 70. С. 75–80.
8. Сорокина Л. В., Медведев Н. В. Терморегуляционная активность двигательных единиц скелетных мышц голубя // Физиологический журнал. СССР. 1986. Т. 72. № 11. С. 1571–1574.
9. Ткаченко Е. Я., Якименко М. А. Исследование эффективности работы мышцы у белых крыс при адаптации к холоду // Физиологический журнал СССР. 1985. Т. 71. № 3. С. 337–341.
10. Успенский А. Н., Данилова Л. И. Влияние охлаждения на характеристику одиночного сокращения скелетной мышцы у адаптированных к холоду крыс // Физиологический журнал СССР. 1990. Т. 76. № 3. С. 414–417.
11. Bligh J. Temperature regulation in mammals and other vertebrates // *Frontiers of Biology*. 1973. Vol. 30.
12. Doherty T. J., Vandervoort A. A., Brown W. F. Effects of ageing on the motor unit: a brief review // *Can. J. Appl. Physiol.* 1993. Vol. 18. P. 331–358.
13. Gandevia S. C. Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue // *Physiol. Rev.* 2001. Vol. 81. P. 725–1789.
14. Meigal A. Yu. Interplanetary spaceflight compared with fetal and neonatal strategy at microgravitation: theoretical and practical implications // *Pathophysiology*. 2011 (в печати).
15. Meigal A., Rissanen S., Kankaanpää M., Tarvainen M., Nuutinen J., Tarkka I., Airaksinen O., Kajalainen P. A. Novel parameters of surface EMG in patients with Parkinson's disease and healthy young and old controls // *J. Electromyogr. Kinesiol.* 2009. Vol. 19. № 3. P. e206–213.
16. Merton P. A. Voluntary strength and fatigue // *J. Physiol.* 1954. Vol. 123. P. 553–564.
17. Mulder E. R., Gerrits K. H., Rittweger J., Felsenberg D., Stegeman D. F., de Haan A. Characteristics of fast voluntary and electrically evoked isometric knee extensions during 56 days of bed rest with and without exercise countermeasure // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2008. Vol. 103. P. 431–440.
18. Ramanathan N. L. A new weighting system for mean surface temperature of the human body // *J. Appl. Physiol.* 1964. Vol. 19. P. 531–533.
19. Rissanen S., Kankaanpää M., Meigal A., Tarvainen M., Nuutinen J., Tarkka I., Airaksinen O., Kajalainen P. A. Surface EMG and acceleration signals in Parkinson's disease: feature extraction and cluster analysis // *Med. Biol. Eng. Comp.* 2008. Vol. 46. P. 849–858.
20. Smolander J., Mikkelsen M., Oksa J., Westerlund T., Leppäluoto J., Huttunen P. Thermal sensation and comfort in women exposed repeatedly to whole-body cryotherapy and winter swimming in ice-cold water // *Physiol. Behav.* 2004. Vol. 82. P. 691–695.
21. Vaillancourt D. E., Larsson L., Newell K. M. Time-dependent structure in the discharge rate of human motor units // *Clin. Neurophysiol.* 2002. Vol. 113. P. 1325–1338.

**АННА ВЛАДИМИРОВНА САНДУГЕЙ**

старший лаборант кафедры терапии Института последипломного образования, Ярославская государственная медицинская академия  
*sandugey1@nm.ru*

**ОЛЕГ АНАТОЛЬЕВИЧ ХРУСТАЛЕВ**

доктор медицинских наук, профессор кафедры терапии Института последипломного образования, Ярославская государственная медицинская академия  
*sandugey1@nm.ru*

**НАТАЛЬЯ СЕРГЕЕВНА БАРАНОВА**

кандидат медицинских наук, доцент кафедры неврологии с курсом медицинской генетики и нейрохирургии, Ярославская государственная медицинская академия  
*baranova\_ns@mail.ru*

**ЛИЛИЯ АЛЕКСАНДРОВНА НИЗОВЦЕВА**

кандидат медицинских наук, врач-невролог, ООО «Мединком» (г. Ярославль)  
*nizovtzeva\_la@mail.ru*

**ЮЛИЯ АНАТОЛЬЕВНА ПАХОМОВА**

врач-невролог, Химкинская центральная городская больница (г. Москва)  
*sandugey1@nm.ru*

**ТРУДНОСТИ КЛИНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЛАЙМ-БОРРЕЛИОЗА**

В статье рассмотрены причины трудностей диагностики лайм-боррелиоза, его основные клинические синдромы, географические особенности, а также «маски-диагнозы» лайм-боррелиоза.

Ключевые слова: лайм-боррелиоз, нейроборрелиоз, лайм-кардит

Лайм-боррелиоз (ЛБ), или болезнь Лайма в международных источниках широко распространенное инфекционное природно-очаговое заболевание, передающееся преимущественно при укусе клеща рода *Ixodes*, возбудителем которого являются спирохеты комплекса *Borrelia burgdorferi sensu lato*. ЛБ характеризуется чрезвычайно широким спектром клинических проявлений, полисистемностью и стадийностью течения [9]. Случаи заболевания ЛБ регистрируются по всему миру, в Европе чаще всего в Австрии, Германии, Швеции, Испании и Словении, где заболеваемость ежегодно составляет более 100 случаев на 100 000 человек [19]. Высокий уровень заболеваемости и в США. В России больные выявлены в 68 субъектах Федерации. Наибольший уровень заболеваемости отмечается в Ленинградской, Тверской, Пермской, Ярославской областях, в Карелии, а также на Дальнем Востоке, Урале и в Западной Сибири [8].

В России ЛБ регистрируется с 1992 года и с тех пор имеет неуклонную тенденцию к росту. Прирост заболеваемости объясняется как ухудшением экологической обстановки, частыми пожарами, отсутствием акарицидной обработки лесов, так и улучшением диагностики ЛБ [10]. Число выявленных случаев в 1992 году составило 2447, в 2002-м – уже 8131. Следует отметить, что данные статистики неточно отражают уровень заболеваемости ЛБ, так как официально регистрируются лишь 50 % заболевших [1].

Трудности диагностики ЛБ определяются несколькими факторами. Во-первых, не все больные могут указать на укус клеща в анамнезе, часто он происходит незаметно для пациента, есть данные о передаче инфекции алиментарным путем (через молоко зараженных животных) и при укусах двукрылых насекомых. Для развития заболевания необязательно длительное присасывание клещей, иногда достаточно их наползания [10]. Во-вторых, при применении диагностических, серологических методик следует иметь в виду, что для ЛБ характерно запаздывание гуморального ответа на антигены боррелии. Пик выработки IgM приходится только на 3–6-ю неделю заболевания, а IgG – лишь после 6-й недели. Кроме того, частота определения антител к *B. burgdorferi* в острый период зависит от чувствительности методики. В н-РИФ в течение первого месяца заболевания антитела IgM обнаруживаются только у 5–13 % больных, в ИФА они выявляются у 44 %, в иммуноблоте – у 32–100 % [3]. Синтез IgM прекращается к 3–60-му месяцу заболевания после лечения, а IgG – продолжается и после клинического выздоровления до 1,5–23 лет и более. В-третьих, следует помнить, что существуют серонегативные, безэритематозные и первично-хронические формы заболевания [10]. В-четвертых, отсутствие положительных результатов серологии в некоторых случаях может объясняться использованием тест-систем, приготовленных на основании выборочного спектра антигенов без учета

особенностей генотипа боррелий, распространенных на данной территории [3].

Деление на стадии является в достаточной мере условным, так как не всегда можно выявить четкую последовательность симптомов. Часто присутствует только первая стадия, иногда заболевание манифестирует одним из поздних симптомов, например хроническим атрофическим дерматитом, радикулярным синдромом или когнитивными нарушениями. При субклинически или бессимптомно перенесенном миокардите ЛБ может дебютировать через несколько месяцев или даже лет дилатационной кардиомиопатией и быстро прогрессирующей сердечной недостаточностью без других видимых причин [2]. В этом заключается трудность диагностики хронической формы лайм-боррелиоза, так как из-за срока давности теряется анамнестическая связь заболевания с укусом клеща и четкая стадийность. По данным разных авторов, безэритематозная форма ЛБ встречается в 10,7–20 % случаев заболевания и имеет более тяжелое клиническое течение, что связано с более ранней диссеминацией возбудителя [5]. Таким образом, из-за высокого полиморфизма, мультисистемности, отсутствия четких критериев диагностики болезнь Лайма часто остается нераспознанной, ее называют «великим имитатором». На поздних стадиях заболевания, когда на первое место выходит поражение одной из систем организма, больные наблюдаются и лечатся у врачей различных специальностей: кардиологов, ревматологов, невропатологов, не подозревая об истинной природе своего заболевания. В таблице представлен перечень «масок-диагнозов» в зависимости от пораженной системы.

В случае возникновения вышеперечисленных заболеваний необходимо помнить о возможности у пациентов активной боррелиозной инфекции [7]. Кроме того, существует вероятность смешанных клещевых инфекций, таких как клещевой энцефалит, гранулоцитарный анаплазмоз, бабезиоз, одновременная зараженность

несколькими генотипами *Borrelia*, которые способны изменять и утяжелять клиническую картину ЛБ. По данным отечественных ученых, зараженность гранулоцитарным анаплазмозом в центральном регионе России достигает 33 % [1].

Существует и другая сторона проблемы диагностики ЛБ. Из-за объективных трудностей диагностики болезнь Лайма может стать тем диагнозом-искушением, для постановки которого результаты серологической диагностики интерпретируются согласно намерениям и собственным представлениям исследователя [19]. С одной стороны, существует масса пациентов с нераспознанным ЛБ, с другой – в некоторых случаях имеет место и гипердиагностика болезни. Единственным патогномичным симптомом, маркером ЛБ, является мигрирующая эритема. При наличии эритемы серологическое подтверждение диагноза не требуется. Во всех остальных случаях необходимо подтверждение диагноза на основании серологических методик, иммунного блоттинга или ПЦР. Полученные данные часто интерпретируются неправильно. На современном этапе лабораторной диагностики ЛБ часто очень сложно отличить активную инфекцию и болезнь от перенесенной или бессимптомной инфекции и определить давность перенесенной инфекции только на основании серологических тестов или ПЦР [18]. Наличия диагностических титров к *Borrelia burgdorferi* недостаточно для постановки диагноза ЛБ и последующего лечения антибиотиками. Кроме того, следует учитывать высокую распространенность среди населения таких неспецифических симптомов, как миалгия, артралгия, боль в позвоночнике, невралгия, хроническая усталость, дисфункция вегетативной нервной системы. В совокупности с неверно интерпретированными данными лабораторной диагностики они могут послужить причиной неправильной постановки диагноза ЛБ [18], [19]. Ложноположительные результаты в н-РИФ (реже ИФА) могут выявляться у больных сифилисом и другими

«Маски-диагнозы» лайм-боррелиоза

Заболевания кожи	Заболевания опорно-двигательной системы	Заболевания нервной системы	Заболевания сердечно-сосудистой системы
аллергические экзантемы, анулярная экзантема, эритразма, гистиоцитоз, саркоидоз, эозинофильные кожные гранулемы, фотодерматозы, красная волчанка, В-клеточная лимфоцитоза кожи, застойный дерматит, акроцианоз при сосудистой недостаточности, рожа, лишай	подагра, хондрокальциноз, реактивные артриты, псориатический артрит, периартрит, деформирующий остеоартроз	корешковый синдром на фоне остеохондроза, диабетическая полирадикулонейропатия, ревматические полимиалгии, синдром Гийена – Барре, межреберная невралгия, опоясывающий герпес, идиопатический парез лицевого нерва, асептический менингит, болезнь Альцгеймера, хроническая ишемия мозга, системные васкулиты, рассеянный склероз, диабетическая черепная мононевропатия, эпилепсия	нейроциркуляторная дистония, аритмии на фоне повышения тонуса блуждающего нерва, острый коронарный синдром, перикардит, ДКМП, ХСН, кардиосклероз, миокардиты другой этиологии, артериальная гипертензия

спирохетозами, боковым амиотрофическим склерозом, рассеянным склерозом, большинством системных аутоиммунных заболеваний в фазе высокой активности, реже при бактериальных и вирусных инфекциях [7].

Таким образом, представляется важным знание основных клинических симптомов ЛБ для врачей различных специальностей. Следует еще раз подчеркнуть, что большинство симптомов и синдромов при ЛБ являются неспецифическими.

Представление о клинических проявлениях ЛБ на современном этапе таково: молекулярный полиморфизм комплекса *Borrelia burgdorferi sensu lato*, который выражается в гетерогенности поверхностных белков, является важным фактором, определяющим географическую разнородность клинической картины заболевания. Считается, что *B. burgdorferi sensu stricto* вызывает поражение опорно-двигательной системы, *B. garini* – преимущественно неврологические проявления, *B. afzelii* – кожные проявления [19]. Однако довольно часто у одного больного сочетаются симптомы кожной, неврологической и суставной форм заболевания. Это противоречит избирательной связи указанных генотипов боррелии с поражением определенных систем или свидетельствует об одновременном заражении несколькими типами боррелий [5].

Так, в США, где распространена *B. burgdorferi sensu stricto*, болезнь Лайма протекает преимущественно с поражением опорно-двигательного аппарата, в Европе преобладают кожные проявления (лимфоцитома кожи, хронический атрофический акродерматит), что связано с ареалом распространения *B. afzelii*, на Северо-Западе России, где определяется как *B. garini*, так и *B. burgdorferi sensu stricto*, чаще встречается поражение нервной системы при относительно низкой частоте вовлечения опорно-двигательного аппарата [10]. Для центрального региона нашей страны, где встречаются *B. afzelii* и *B. garini*, характерно преобладание неврологического синдрома в сочетании с кожными проявлениями болезни [1].

Поражение кожи при ЛБ является наиболее характерным, ранним и частым. В остром периоде заболевания – это прежде всего мигрирующая эритема. Она может быть как единственным проявлением заболевания, так и сопровождаться (примерно в 40 % случаев) симптомами общей интоксикации, такими как лихорадка, озноб, артралгия, миалгия, повышение уровня лейкоцитов, СОЭ, СРБ [13]. Иногда может отмечаться развитие нескольких очагов [3]. Эритема считается достоверным признаком болезни, если ее диаметр более 5 см и соблюдаются три следующие условия: эритема возникает вокруг укуса клеща, способна к центробежному росту, временной интервал между укусом и возникновением эритемы укладывается в сроки инкубационного периода ЛБ, который составляет в среднем 1–2 недели, но может быть как короче

(3 дня), так и длиннее (до нескольких месяцев), что также затрудняет своевременную диагностику (более раннее возникновение эритемы считается аллергической реакцией на укус) [13], [19].

Кожным маркером генерализованной десминатии болезни Лайма являются вторичные эритемы. Они меньше размером, более светлые, их количество может достигать до 100 [6], локализация не связана с местом укуса. Другим характерным признаком диссеминированной формы заболевания является доброкачественная лимфоцитома кожи. Этот симптом встречается достаточно редко, в 1–6 % случаев [10]. Хронический атрофический акродерматит (ХАД) является патогномоничным хроническим поражением кожи при ЛБ и регистрируется преимущественно в европейских странах [11]. Его возникновение в большей степени ассоциируется с заражением *B. afzelii*, она выделяется у 89 % заболевших ХАД. Как правило, ХАД сопровождается поражением нервных волокон, суставов, костей под пораженными очагами, характеризуя болезнь Лайма как системное заболевание. Отметим, что большинство заболевших не могут вспомнить ни укуса клеща, предшествующего ХАД, ни других характерных симптомов болезни [13]. У большинства пациентов с ХАД в сыворотке крови выявляются антитела к боррелии класса G. В случае отрицательного результата необходимо обследовать всех пациентов с очаговой склеродермией, лишаями и атрофическими изменениями кожи на наличие боррелиозной инфекции с помощью серологических реакций и ПЦР из биоптата пораженного участка кожи [12].

Поражение нервной системы при ЛБ возникает как на центральном, так и на периферическом уровне. Развитие нейроборрелиоза в большей степени связывается с *B. garini*, в меньшей – с *B. afzelii*. Для ранней стадии характерно развитие лимфоцитарного менингита, радикулопатии, невропатии черепных нервов со значительным преобладанием лицевого [16]. Так, в эндемичных районах США у каждого четвертого пациента с параличом лицевых нервов в весенне-летний период выявляется ЛБ [9]. Одним из типичных проявлений европейского нейроборрелиоза является синдром Баннварта, который характеризуется сочетанием поражения мозговых оболочек и периферической нервной системы (менингордикулонейропатия). Безэритематозные формы нейроборрелиоза встречаются в разных регионах в 34–64 % случаев [16]. Хронический нейроборрелиоз характеризуется развитием энцефаломиелита, энцефалопатии, церебрального васкулита с возможным исходом в инсульт, хронической радикулополинейропатии. Поздняя стадия нейроборрелиоза может дебютировать когнитивными нарушениями, вестибулопатией, что чаще всего воспринимается как хроническая ишемия мозга, особенно в старших возрастных группах. В целом частота развития хронических

форм нейроборрелиоза составляет, по данным разных авторов, от 4 до 25 %. В России встречаются все вышеперечисленные синдромы, реже всего синдром Баннварта, чаще полинейропатия, чаще всего энцефалопатия [3].

Поражение сердечно-сосудистой системы на современном этапе диагностики не связывается с определенным генотипом боррелии. Кардиальные нарушения чаще протекают либо бессимптомно, либо малосимптомно, что позволяет выявлять их только при инструментальном исследовании [4]. Наиболее частым проявлением заинтересованности сердечно-сосудистой системы при ЛБ является миокардит, реже миоперикардит. В России частота поражения сердца колеблется в широкий пределах – от 0,6 % на Среднем Урале до 32,5 % на Северо-Западе [10]. В центральном регионе России эта цифра составляет 3,2–9 % (в США – 4–10 %, в Европе – 0,3–4 %). Чаще всего лайм-кардит сочетается с кожными проявлениями болезни (67 %), с нейроборрелиозом (27 %), но встречаются и случаи, при которых лайм-кардит является единственным проявлением болезни [1]. Наиболее яркими и характерными проявлениями лайм-кардита являются нарушения ритма и проводимости на разных уровнях проводящей системы (синауриальные, предсердные, атриовентрикулярные, ножки пучка Гиса, волокна Пуркинье) с развитием разностепенных блокад [14]. Отмечается транзиторный, флюктуирующий характер атриовентрикулярных блокад, когда их степень неоднократно меняется от I до III и обратно в течение суток, часто нося бессимптомный характер. Известны случаи полной поперечной блокады сердца, требующие постановки искусственных временных кардиостимуляторов [12]. Нехарактерен выраженный лейкоцитоз, палочко-ядерный сдвиг влево, высокая СОЭ. В исходе манифестной формы нередко развивается дилатационная кардиомиопатия, но она встречается и при латентном, субклиническом течении лайм-кардита. Частота безэритематозных форм в Европе при наличии лайм-кардита – 37 % [14]. Отечественными учеными установлено, что у пациентов в хроническом периоде болезни Лайма большое количество жалоб связано с дисфункцией вегетативной нервной системы, тогда как у пациентов в остром периоде болезни жалобы обусловлены органической патологией атриовентрикулярного узла [4].

По литературным данным, сроки возникновения кардиальной патологии существенно варьируют (от 2 недель до 7 месяцев) [2], [6]. До настоящего времени остается неясным, связано ли поражение сердечной мышцы с непосредственным проникновением и повреждением миокарда боррелией или в большей степени с запуском иммунопатологических реакций [14].

В настоящее время обсуждается роль боррелиозной инфекции в развитии атеросклероза. Исследование, проведенное С. Stöllberger с соавт., показало, что у больных со стенозом коро-

нарных артерий более 50 % (по данным коронарографии) повышенные титры IgG к боррелиям встречаются в 14 % случаев, тогда как у лиц с нормальными показателями коронарографии – всего в 6 % [20]. Н. Völzke и соавторы установили достоверное утолщение интимы медиа сонных артерий и увеличение частоты встречаемости атеросклеротических бляшек в сонных артериях у пациентов с повышенным уровнем антител к *Borrelia burgdorferi* класса G [21]. На основании европейских рекомендаций диагноз лайм-кардита выставляется при наличии клинической картины миокардита, электрокардиографических и/или эхокардиографических изменений с подтверждением наличия боррелиозной инфекции (серологическими методиками и/или иммунным блоттингом и/или ПЦР). Биопсия миокарда не является необходимой диагностической процедурой из-за риска развития осложнений и локального характера лайм-кардита. При возникновении миокардита одновременно с мигрирующей эритемой диагноз лайм-кардита считается достоверным [14].

Изменения со стороны опорно-двигательного аппарата отмечаются как в остром, так и в хроническом периодах ЛБ. По данным американских ученых, сроки возникновения лайм-артрита после появления мигрирующей эритемы варьируют от 4 дней до 2 лет. Однако описываются и более длительные периоды времени до возникновения артрита. Лайм-артрит протекает по типу инфекционно-аллергического [11]. Несмотря на эффективность антибиотикотерапии в большинстве случаев, у некоторых больных отмечается резистентность к лечению антибиотиками и наличие клиники артрита даже после повторных курсов антибиотиков, что может говорить об аутоиммунном характере воспаления при лайм-артрите [7], [10]. Характерно развитие артралгий, моно- и олигоартритов с вовлечением крупных суставов, чаще коленных, реже возникают полиартриты. Менее типично поражение мелких суставов кистей и стоп [17].

В крови у пациентов с лайм-артритом отмечаются умеренное повышение СОЭ, в среднем не выше 20–30 мм/ч, концентрация СРБ либо нормальная, либо умеренно повышена, иногда лейкоцитоз возрастает до  $10 \times 10^9$ . Ревматоидный фактор и антиядерные антитела обычно отрицательны, но могут быть и положительными в низких титрах. У пациентов с лайм-артритом в сыворотке почти всегда выявляются антитела IgG к *B. burgdorferi*, отрицательная серология IgG практически исключает артрит Лайма [17].

При поражении глаз наиболее часто (у 10–15 %) встречается конъюнктивит, реже периорбитальный отек, увеит, кератит, эписклерит, ирит, хориоретинит, паноптальмит [3].

У 15–19 % больных при диссеминации инфекции, обычно на ранних стадиях заболевания, наблюдаются симптомы поражения печени.

Чаще всего диагноз выставляется только на основании изменений функциональных проб печени – повышения уровня трансаминаз или появления прямого билирубина [2], [19].

У 5 % больных ЛБ описано поражение почек в виде гематурии и протеинурии, выявляемых при микроскопии осадка мочи [18].

Таким образом, знание основных клинических проявлений лайм-боррелиоза во всем его многообразии и полисиндромности позволяет во

многих случаях избежать диагностических ошибок в трудных клинических ситуациях. Наиболее важным для постановки диагноза ЛБ является наличие основных характерных симптомов болезни в сочетании с подтверждением диагноза в серологических методиках, выявлением антител к *B. burgdorferi* в диагностических титрах в сыворотке крови, спинномозговой, синовиальной жидкости, при получении сомнительных результатов – использование иммуноблотта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешковская Е. С., Благов Н. А., Дружинина Т. А., Шалепо Е. В. Клещевые микстинфекции (иксодовый клещевой боррелиоз и гранулоцитарный эрлихиоз человека) в Ярославской области // Эпидемиология и инфекционные болезни. 2008. № 2. С. 6–8.
2. Ананьева Л. П. Болезнь Лайма // Справочник поликлинического врача. 2006. № 1(4). С. 29–33.
3. Баранова Н. С., Спиринов Н. Н., Дружинина Т. А., Низовцева Л. А. и др. Клещевые инфекции в Ярославской области // Вестник УГМА. 2010. № 2. С. 33–40.
4. Климушева Н. Ф. Особенности поражения сердца при болезни Лайма по данным клинического и электрофизиологического исследований: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. Екатеринбург, 2000.
5. Коренберг Э. И., Крючечников В. И. Иксодовые клещевые боррелиозы – новая группа заболеваний человека // Медицинская паразитология и паразитарные болезни. 2006. № 3. С. 104–107.
6. Лесняк О. М. Лайм-боррелиоз. Екатеринбург: ОАО «Полиграфист», 1999. 219 с.
7. Лобзин Ю. В., Финогеев Ю. В., Винакмен Ю. А., Захаренко С. М. Маски иксодовых клещевых боррелиозов // Маски инфекционных болезней. СПб.: ФОЛИАНТ, 2002.
8. Манзенюк И. Н., Манзенюк О. Ю. Клещевые боррелиозы (болезнь Лайма): Пособие для врачей. Кольцово, 2005. 85 с.
9. Низовцева Л. А., Баранова Н. С. Дифференциальная диагностика радикулопатии при Лайм-боррелиозе и дистрофических поражениях позвоночника // Научно-практическая ревматология. 2010. № 3. С. 31–35.
10. Усков А. Н., Лобзин Ю. В. Иксодовые клещевые боррелиозы в Северо-Западном регионе России // Медицинский академический журнал. 2002. № 3. С. 104–114.
11. Asbrink E. Erythema chronicum migrans Afzelius and acrodermatitis chronica atrophicans: early and late manifestations of Ixodes ricinus-borne Borrelia spirochetes // Acta Derm Venereol Suppl. (Stockh). 1985. Vol. 118. P. 1–63.
12. Bhattacharya I. S., Dweck M., Francis M. Lyme carditis: a reversible cause of complete atrioventricular block // The Journal of the Royal College of Physicians of Edinburgh. 2010. Vol. 40(2). P. 121–122.
13. Dandache P., Nadelman R. B. Erythema migrans // Infectious disease clinics of North America. 2008. Vol. 22. P. 235–260.
14. Fish A. E., Pride Y. B., Pinto D. S. Lyme carditis // Infectious disease clinics of North America. 2008. Vol. 22. P. 275–288.
15. Goodlad J. R., Davidson M. M., Hollowood K., Ling C., MacKenzie C., Christie I., Batstone P. J., Ho-Yen D. O. Primary cutaneous B-cell lymphoma and Borrelia burgdorferi infection in patients from the highlands of Scotland // The American journal of surgical pathology. 2000. Vol. 24. P. 1279–1285.
16. Halperin J. J. Nervous system Lyme disease // Infectious disease clinics of North America. 2008. Vol. 22. P. 261–274.
17. Puius Y. A., Kalish R. A. Lyme arthritis: pathogenesis, clinical presentation, and management // Infectious disease clinics of North America. 2008. Vol. 22. P. 289–300.
18. Steere A. C., Sikand V. K., Schoen R. T., Nowakowski J. Asymptomatic infection with Borrelia burgdorferi // Clinical infectious diseases: an official publication of the Infectious Diseases Society of America. 2003. Vol. 37. P. 528–532.
19. Strle F., Stanek G., Lipsker D., Jaulhac B. Lyme Borreliosis. Clinical Manifestations and Diagnosis of Lyme Borreliosis // Current problems in dermatology. Basel: Karger, 2009. Vol. 37. P. 51–110.
20. Stöllberger C., Mölzer G., Finsterer J. Seroprevalence of antibodies to microorganisms known to cause arterial and myocardial damage in patients with or without coronary stenosis // Clinical and Diagnostic Laboratory Immunology. 2001. Vol. 8(5). P. 997–1002.
21. Völzke H., Wolff B., Ludemann J. et al. Seropositivity for anti-Borrelia IgG anti-body is independently associated with carotid atherosclerosis // Atherosclerosis. 2006. Vol. 184(1). P. 108–112.

**ИНГА СЕРГЕЕВНА СКОПЕЦ**аспирант кафедры госпитальной терапии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*ingas@karelia.ru***НАТАЛЬЯ НИКОЛАЕВНА ВЕЗИКОВА**доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой госпитальной терапии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*vezikov23@mail.ru***ИРИНА МИХАЙЛОВНА МАРУСЕНКО**доктор медицинских наук, профессор кафедры госпитальной терапии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*feva@karelia.ru***АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ МАЛЫГИН**заведующий кардиологическим отделением Регионального сосудистого центра, Республиканская больница им. В. А. Баранова (г. Петрозаводск)  
*chuki@sampo.ru*

### ОСТРЫЙ КОРОНАРНЫЙ СИНДРОМ: ОЦЕНКА ОТДАЛЕННЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ

Статья посвящена оценке отдаленных последствий перенесенного острого коронарного синдрома, которая позволит выделять группы риска с целью коррекции тактики ведения пациентов, профилактики развития осложнений, снижения смертности и улучшения качества жизни больных. Нами проведена оценка отдаленных последствий перенесенного острого коронарного синдрома в группе пациентов, находившихся на лечении в Региональном сосудистом центре.

Ключевые слова: ишемическая болезнь сердца, острый коронарный синдром, сердечно-сосудистые заболевания, инфаркт миокарда, отдаленные последствия

Сердечно-сосудистая патология по-прежнему занимает первое место в структуре заболеваемости и смертности как в России, так и во всем мире. В период 2008–2009 годов в нашей стране от болезней системы кровообращения умерли 2,4 млн человек. Смертность от сосудистых заболеваний стабильно составляет 57 %, причем почти 20 % из этого числа умирают в трудоспособном возрасте [11]. Заболеваемость патологией системы кровообращения, по данным Государственного комитета статистики, составила в 2009 году 3 761 000 человек [18]. Первое место в структуре заболеваний системы кровообращения занимает ишемическая болезнь сердца (ИБС). Так, в России 56,6 % смертей среди мужчин и 40,4 % смертей среди женщин в возрасте 35–64 лет приходится на ее долю [1].

ИБС может дебютировать остро в виде инфаркта миокарда или внезапной коронарной смерти или же сразу проявиться хронической формой. В странах Западной Европы, США, Канаде, Австралии в течение последних десятилетий наметилась устойчивая тенденция к снижению смертности от ИБС, чего не наблюдается в России. В РФ почти 10 млн трудоспособного населения страдают ИБС [8].

Одним из наиболее частых острых проявлений ИБС является острый коронарный синдром (ОКС), под которым в настоящее время понимают любую группу клинических признаков или симптомов, позволяющих подозревать острый инфаркт миокарда или нестабильную стенокар-

дию [14]. Согласно статистическим данным, частота острого инфаркта миокарда среди мужского населения старше 40 лет колеблется в разных регионах мира от 2 до 6 на 1000 человек, причем есть тенденция увеличения ее с возрастом. Информация о догоспитальной летальности при остром инфаркте миокарда неоднородна. По данным эпидемиологического исследования ВОЗ Monica (1997 год), в 29 популяциях (возраст – 35–64 года) она составляет 30 % [2], [14]. Причем отношение количества случаев догоспитальной смерти к случаям госпитальной снижается с возрастом, составляя от 15,6 % у лиц моложе 50 лет до 2,0 % у лиц старше 70 лет [5]. Внутрибольничная летальность, согласно итальянскому регистру Blitz, составляет 7,4 % [14]. Однако следует отметить и тенденцию к снижению госпитальной смертности при остром инфаркте миокарда на фоне совершенствования медицинской помощи. Так, в 1960-е годы в наиболее квалифицируемых стационарах она составляла 20–25 %, к концу 1980-х снизилась до 10–15 % и в настоящее время составляет 7,5 % среди пациентов, переносивших ОИМ с подъемом ST, и 5,2 % для ОКС без подъема сегмента ST [5]. В целом за последние 20 лет внутрибольничная летальность снизилась на 20 % [2]. Таким образом, растет число пациентов, перенесших острый коронарный синдром, а значит, актуальна проблема оценки последствий этого состояния с целью совершенствования тактики дальнейшего ведения таких пациентов.

Понимание последствий перенесенного ОКС включает в себя не только оценку клинической картины, но и анализ психических, экономических и социальных аспектов. Безусловно, последствия перенесенного острого коронарного синдрома определяются множеством факторов риска, которые должны быть своевременно и правильно расценены для адекватной коррекции тактики ведения пациента. Так, следует учитывать, что пожилой возраст (старше 65 лет), инфаркт миокарда в анамнезе, передняя локализация поражения, наличие механических осложнений инфаркта, сердечной недостаточности или ранней постинфарктной стенокардии, отсутствие подъема ST в остром периоде заболевания и сопутствующий сахарный диабет – факторы, обуславливающие высокий риск развития повторного инфаркта миокарда или внезапной сердечной смерти в течение последующих 6 месяцев. Напротив, пациенты, которым в раннем периоде заболевания проводились процедуры реваскуляризации (системная тромболитическая терапия или чрескожное интракоронарное вмешательство) и не имеющие ангинозных приступов, входят в группу низкого риска [3].

Нами была проведена работа по оценке отдаленных последствий перенесенного ОКС у пациентов Регионального сосудистого центра Республиканской больницы им. В. А. Баранова, поступивших в стационар с диагнозом «острый коронарный синдром». В группу (106 человек) вошли больные в возрасте не старше 65 лет. Пациенты наблюдались в кардиологическом отделении во время госпитализации. В последующем оценивались клинические и социальные последствия перенесенного ОКС, а также приверженность пациентов к лечению. Время наблюдения составило от 1 до 1,5 года. Большинство пациентов исследуемой группы составили мужчины (75 %). В возрастной группе от 35 до 50 лет также преобладали мужчины (93,5 %), в то время как на долю женщин пришлось только 6,5 %. В более старшей возрастной группе от 51 до 65 лет мужчины составили 66,7 %. Ведущими факторами риска на момент поступления были: возраст (93 %), артериальная гипертензия (91 %) и дислипидемия (91 %). Среди наиболее значимых ассоциированных и коморбидных состояний необходимо отметить артериальную гипертензию (91 %), стенокардию напряжения (51 %) и хроническую сердечную недостаточность (28 %). При оценке стационарного этапа ведения пациентов удалось установить, что 25 % пациентов к моменту поступления с диагнозом ОКС уже имели перенесенный инфаркт миокарда в анамнезе. 59 % больных трактовались при поступлении как пациенты с ОКС без подъема сегмента ST, у 41 % больных диагностирован ОКС с подъемом сегмента ST.

Известно, что проведенные в ранние сроки процедуры реваскуляризации являются в последующем предиктором низкого риска развития ос-

ложнений у пациентов, перенесших инфаркт миокарда. В анализируемой нами группе у 41 % пациентов, поступивших с диагнозом «острый коронарный синдром с подъемом сегмента ST», не проводились процедуры реваскуляризации по экстренным показаниям. Основными причинами консервативного ведения были позднее обращение больного в стационар или информированный отказ от вмешательства. У 33,3 % пациентов данной группы проводилась системная тромболитическая терапия, 19 % пациентов выполнялось первичное чрескожное коронарное вмешательство и у 6 % после неэффективной тромболитической терапии выполнялось спасительное чрескожное интракоронарное вмешательство.

Наиболее частым исходом ОКС был Q-инфаркт миокарда (41 %), не Q-инфаркт наблюдался у 23 % пациентов, у 33 % больных диагностирована нестабильная стенокардия. В отдаленном периоде у 29 % пациентов были выполнены процедуры реваскуляризации: в 18 % случаев – коронарное шунтирование, у 11 % – чрескожное коронарное вмешательство (ЧКВ). Остальная часть пациентов (71 %) велась консервативно.

При оценке медикаментозной терапии на амбулаторном этапе было установлено, что приверженность к терапии в исследуемой группе составила 81 %. Только 75 % пациентов, перенесших ЧКВ, получают дезагрегантную терапию в полном объеме. Гиполипидемическую терапию продолжают получать 80 % пациентов, а лечение В-адреноблокаторами – 81 %. Известно, что бета-блокаторы снижают риск смерти и повторного инфаркта миокарда в среднем на 25 % [10]. Следует отметить, что основной причиной неадекватной медикаментозной терапии является отсутствие приверженности пациентов к лечению.

При дальнейшем наблюдении за пациентами мы оценивали различные аспекты отдаленных последствий перенесенного ОКС. Среди клинических последствий следует отметить увеличение функционального класса стенокардии напряжения: 1 ФК – с 3,7 до 5,7 %, 2 ФК – с 25,5 до 33 %, 3 ФК – с 8,5 до 18 %, 4 ФК – с 0 до 1,9 %. Кроме того, наблюдалась тенденция к увеличению числа пациентов с хронической сердечной недостаточностью (с 28,3 до 53,8 %), а также прогрессия исходно имевшейся хронической сердечной недостаточности (1 ФК – с 1,9 до 6,6 %, 2 ФК – с 18,9 до 32,1 %, 3 ФК – с 3,7 до 10,4 %).

Летальность в исследуемой группе составила 5,6 %. Согласно литературным данным, после выписки в течение года умирает 4 % больных [2]. У пожилых пациентов прогноз хуже: в первый месяц после инфаркта смертность среди лиц старше 65 лет составляет 20 %, в первый год – 35 % [2]. Две трети умерших в течение времени наблюдения пациентов (3,7 %) перенесли ОКС с подъемом сегмента ST. Ни у одного пациента в группе умерших не проводились процедуры реваскуляризации по экстренным показаниям. У одной пациентки из данной группы проводилось плановое

ЧКВ (стентирование передней нисходящей артерии, маргинальных ветвей, интрамедирной артерии). В последующем больная получала всю рекомендованную терапию, однако через 10 дней после вмешательства наступила смерть; одной из предполагаемых причин летального исхода является тромбоз в зоне стентирования. Среди умерших в исследуемой нами группе две трети пришли на лиц мужского пола (3,7 %). Средний возраст составил 56 лет. Две трети пациентов из числа умерших на момент поступления в Региональный сосудистый центр имели в анамнезе постинфарктный кардиосклероз.

Мы оценили и некоторые социальные последствия перенесенного ОКС. Так, среди пациентов, перенесших ОКС, на 20 % возросло число больных, имеющих группу инвалидности. Среди лиц, имевших инвалидность ранее (51 %), у 17 % группа инвалидности была усилена. Следует отметить, что патология системы кровообращения занимает первое место среди причин, вызвавших впервые установление группы инвалидности. На ее долю приходится 386 тыс. случаев из 934 тыс. человек, впервые признанных инвалидами в 2009 году [11].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, патология сердечно-сосудистой системы по-прежнему является ведущей

в структуре заболеваемости и смертности населения как в России, так и во всем мире, и более половины в этой структуре приходится на долю ишемической болезни сердца. ОКС является одним из значимых острых проявлений ИБС. В связи с успехами лечения острого периода инфаркта миокарда (или нестабильной стенокардии) достигнута отчетливая тенденция к снижению госпитальной летальности. Однако по-прежнему высока смертность на догоспитальном этапе. Кроме того, достаточно большое клиническое и социальное значение имеют отдаленные последствия перенесенного ОКС.

Необходимо проводить правильную и своевременную оценку этих последствий, в которую должно входить не только выявление клинической значимости тех или иных вмешательств, выделение среди пациентов групп риска, но и анализ психологических, экономических и социальных аспектов. Большое значение необходимо придавать формированию приверженности пациентов к лечению. Кроме того, нужно вырабатывать адекватную тактику ведения больных, направленную на коррекцию клинических проявлений, профилактику развития осложнений и рецидивов заболевания, улучшение прогноза, полноценную психическую и социальную реабилитацию пациентов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болезни сердца: Руководство для врачей / Под ред. Р. Г. Оганова, И. Г. Фоминой. М.: Литера, 2006. 1328 с.
2. Внутренние болезни по Тинсли Р. Харрисону: В 7 т. М.: Практика, 2005. 418 с.
3. Диагностика и лечение в кардиологии: Пер. с англ. М.: МЕДпресс-информ, 2007. 800 с.
4. Маслов Л. Н., Крылов А. Л. Опыт применения первичной коронарной ангиопластики в лечении больных острым инфарктом миокарда // *Ангиология и сосудистая хирургия*. 2008. Т. 14. № 1. С. 131–141.
5. Метелица В. И. Справочник по клинической фармакологии сердечно-сосудистых лекарственных средств. М.: БИНОМ; СПб.: Невский диалект, 2002. 926 с.
6. Моисеев В. С., Сумароков А. В. Болезни сердца: руководство для врачей. М.: Универсум паблишинг, 2001. 462 с.
7. Национальные рекомендации по диагностике и лечению больных острым инфарктом миокарда с подъемом сегмента ST ЭКГ. 2007 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://scardio.ru/recommendations/approved000ed/default.asp>
8. Национальные рекомендации по диагностике и лечению стабильной стенокардии. 2008 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://scardio.ru/recommendations/approved000E1/default.asp>
9. Национальные рекомендации по лечению ОКС без стойкого подъема ST на ЭКГ. 2006 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://scardio.ru/recommendations/approved000F8/default.asp>
10. Национальные рекомендации по рациональной фармакотерапии больных сердечно-сосудистыми заболеваниями. 2009 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://scardio.ru/recommendations/approved00101/default.asp>
11. Официальный сайт Министерства здравоохранения и социального развития [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.minzdravsoc.ru/health/>
12. Перепеч Н. Б. Острые коронарные синдромы. СПб.: ИНКАРТ, 2004. 93 с.
13. Поздняков Ю. М., Красницкий В. Б. Практическая кардиология. М.: БИНОМ, 2007. 776 с.
14. Руководство по кардиологии. Киев: МОРИОН, 2008. 1424 с.
15. Руксин В. В. Неотложная кардиология: Руководство для врачей. СПб.: Невский диалект; М.: БИНОМ. Лаборатория знаний: Издательская группа «ГЭОТАР-Медиа», 2007. 512 с.
16. Савченко А. П., Руденко Б. А. Клиническая эффективность эндоваскулярных технологий при лечении ишемической болезни сердца // *Кардиологический вестник*. 2008. Т. 3 (XV). № 1. С. 5–11.
17. Сейдов В. Г. и др. Сравнение отдаленных результатов эндоваскулярного лечения и коронарного шунтирования в течение 5 лет наблюдения // *Ангиология и сосудистая хирургия*. 2007. Т. 13. № 1. С. 42–47.
18. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.gks.ru/wps/portal/OSI\\_N/ZDRAV#](http://www.gks.ru/wps/portal/OSI_N/ZDRAV#)
19. Цединова Е. А. и др. Оценка эффективности хирургического и консервативного методов лечения больных инфарктом миокарда, получавших тромболитическую терапию // *Российский кардиологический журнал*. 2007. № 1. С. 27–30.
20. Шевченко О. П., Мишнев О. Д., Шевченко А. О., Трусов О. А., Сластикова И. Д. Ишемическая болезнь сердца. М., 2005. 416 с.
21. Chlinical triets in cardiovascular disiases: a companion to Braunwald's heart desiase / Ed. by Chartes H. Hennekans. 1999. 472 p.

**ЭРНЕСТ АНАТОЛЬЕВИЧ ЩЕГЛОВ**

кандидат медицинских наук, сердечно-сосудистый хирург хирургического отделения № 1 Больницы скорой медицинской помощи (г. Петрозаводск)  
*esheglov@onego.ru*

**НАТАЛЬЯ НИКОЛАЕВНА ВЕЗИКОВА**

доктор медицинских наук, заведующий кафедрой госпитальной терапии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*vezikov23@mail.ru*

**ИННА ВЛАДИМИРОВНА ХЕЙФЕЦ**

кандидат медицинских наук, заведующий отделением ультразвуковой и функциональной диагностики, Республиканская больница Республики Карелия  
*inhei@yandex.ru*

**СВЕТЛАНА НИКОЛАЕВНА КОНДРИЧИНА**

кандидат медицинских наук, доцент кафедры лучевой диагностики и лучевой терапии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*vezikov23@mail.ru*

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ И РЕНТГЕНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТИНА ПРИ СОЧЕТАНИИ ХРОНИЧЕСКОЙ ВЕНОЗНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТИ И ОСТЕОАРТРОЗА КОЛЕННЫХ СУСТАВОВ

Статья посвящена вопросам лучевой (ультразвуковой и рентгенологической) диагностики при сочетании патологии вен нижних конечностей и остеоартроза коленных суставов как до начала лечения, так и по результатам консервативного и хирургического лечения.

Ключевые слова: хроническая венозная недостаточность, остеоартроз, ультразвук

В России неуклонно растет количество пациентов, страдающих варикозной болезнью нижних конечностей. Так, по данным Е. Г. Яблокова и соавт., различными формами хронической венозной недостаточности в России страдают более 35 млн человек [18]. По данным Г. Д. Константиновой, приблизительное количество пациентов, которым требуется оперативное вмешательство, составляет несколько миллионов человек [7]. Варикозной болезнью страдают около 20 % мужчин и 40 % женщин [2], [12], а частота субъективных жалоб, связанных с хроническими заболеваниями вен нижних конечностей, достигает 61 % [1].

Одной из наиболее актуальных проблем современной ревматологии и ортопедии является остеоартроз. По данным, приведенным в Российском национальном руководстве по ревматологии, остеоартроз является самым частым заболеванием суставов во многих популяциях. Первые признаки остеоартроза появляются, как правило, в 30–40 лет, среди 50-летних заболевание встречается в 17–27 % случаев, среди лиц 60–65 лет – в 90 %, а после 65 лет – в 100 % случаев [5], [9], [14].

В основе диагностического процесса при патологии вен нижних конечностей и при остеоартрозе коленных суставов на протяжении многих лет лежали рентгеновские методы исследования.

Рентгеноконтрастная флебография длительное время оставалась основным инструментальным методом оценки состояния вен нижних конечностей [7]. Однако, несмотря на большую

информативность исследования, у него имелись очень серьезные недостатки: инвазивность и небезопасность рентгеноконтрастных препаратов, тромбогенность большинства из них [7]. В связи с этим в соответствии с принятыми Российскими рекомендациями по диагностике и лечению хронических заболеваний вен конечностей единственным показанием к использованию флебографии в настоящее время является планирование операции у пациентов с окклюзией или аплазией подвздошных вен [11].

Рентгенография коленного сустава до сих пор остается важной составляющей диагностического процесса. УЗИ суставов и другие методы применяются лишь для изучения характера поражения всех составляющих сустава, но не для оценки эффективности лечения, поскольку они для этого не стандартизированы [10].

Однако для изучения состояния коленных суставов и вен нижних конечностей в процессе лечения может потребоваться неоднократное выполнение исследования у одного больного. Поэтому в данной ситуации должен применяться метод, обладающий такими качествами, как высокая объективность получаемых результатов, низкая лучевая нагрузка и неинвазивность, простота в использовании и низкая себестоимость. Этим критериям, на наш взгляд, отвечает сочетание ультрасонографии коленных суставов и триплексного сканирования вен нижних конечностей.

Нами была предпринята попытка оценить возможности ультразвуковых методов исследования при диагностике и лечении пациентов с сочетанием варикозной болезни нижних конечностей и остеоартроза коленных суставов.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании участвовали 116 больных, страдающих варикозной болезнью в сочетании с остеоартрозом коленных суставов, в возрасте старше 40 лет. Средний возраст пациентов составил  $53,2 \pm 0,85$  года, средняя длительность заболевания –  $10,2 \pm 0,69$  года. Среди пациентов 88 (75,8 %) составили женщины, 28 (24,2 %) – мужчины. Работающих было 73 (62,9 %), на пенсии по возрасту – 27 (23,3 %), инвалидами различных групп явились 16 (13,8 %) пациентов.

Критериями исключения из исследования были: возраст моложе 40 лет, острый глубокий тромбоз вен на момент включения, нарушения артериального кровотока с исчезновением пульса более чем на одной из артерий стопы, активная или зажившая трофическая язва голени, негативный настрой пациентов на выполнение врачебных рекомендаций и отсутствие уверенности в строгом соблюдении рекомендаций по приему препаратов, соблюдению режима и обеспечению адекватной эластической компрессии.

Диагноз варикозной болезни был выявлен при первичном осмотре и подтвержден данными триплексного сканирования вен нижних конечностей. Исследования проводились по стандартной методике в положении лежа и стоя, с выполнением функциональных проб [4], [6], [8]. При исследовании требовалось оценить:

1. Глубокие вены – проходимость, диаметр, состояние венозной стенки и функцию клапанов, координаты несостоятельных клапанов, при тромбозе – уровень тромбоза, пути коллатерального оттока.
2. Сафено-фemorальное соустье – местоположение, функцию остиального клапана, диаметр большой подкожной вены (БПВ), наличие крупных притоков, рефлюкс по ним.
3. Ствол большой подкожной вены – его проходимость и диаметр, наличие второго ствола, уровень впадения крупных притоков.
4. Сафено-поплитеальное соустье – местоположение, функцию остиального клапана, диаметр малой подкожной вены (МПВ), наличие притоков, в том числе суральных вен и вены Джиакоми.
5. Ствол малой подкожной вены – его проходимость и диаметр.
6. Перфорантные вены с несостоятельными клапанами – местоположение, отношение к стволу большой и малой подкожных вен, диаметр, проходимость.

Исследования проводились в положении лежа и стоя для оценки состояния венозных клапанов и рефлюкса по магистральным венам. Прово-

дились пробы с задержкой дыхания, проксимальной и дистальной компрессией, проба Вальсальвы. Рефлюкс оценивался как патологический, если рефлекс-индекс был больше 0,4 [13].

Триплексное сканирование вен нижних конечностей пациентам выполнялось при включении в исследование через 6 и 12 месяцев после начала лечения. В группе оперированных пациентов накануне операции обязательно проводилось контрольное исследование с маркировкой основных анатомических ориентиров, необходимых в процессе операции.

Диагноз остеоартроза выявлялся на основании осмотра ревматолога или ортопеда, пациентам выполнялись артросонография коленных суставов, рентгенография коленных суставов. Артросонография коленного сустава проводилась по стандартной методике. Исследование включало в себя выполнение серии сканов: саггитальных выше и ниже надколенника и по задней поверхности сустава для оценки наличия выпота и состояния капсулы, переднегоризонтальных и заднегоризонтальных через мышечки бедра для изучения суставного хряща, остеофитов [16]. Нередкой находкой при исследовании в задних отделах являлась киста Бейкера.

Ультразвуковое исследование коленного сустава выполнялось при включении в исследование через 6 и 12 месяцев после начала лечения. Рентгеновские исследования выполнялись по стандартной методике в двух проекциях. При оценке результатов исследования принимались рентгенологические критерии артроза Kellgren-Lawrence:

- 1-я стадия – подозрение на сужение суставной щели, начальные остеофиты.
- 2-я стадия – сужение суставной щели, очевидные остеофиты.
- 3-я стадия – сужение суставной щели, умеренный, но многочисленный остеофитоз, незначительная деформация эпифизов.
- 4-я стадия – значительное сужение суставной щели, выраженный остеофитоз и деформация эпифизов.

Рентгеновские исследования выполнялись больным при включении в исследование и через 12 месяцев после его начала.

Степень выраженности хронической венозной недостаточности оценивалась по шкале CEAP, выраженность проявлений гонартроза – по суммарному индексу Лекена и функциональному индексу WOMAC, ВАШ, оценивалась потребность в нестероидных противовоспалительных препаратах [17]. С целью оценки избыточной массы тела определялся индекс массы тела.

После включения в исследование терапия остеоартроза включала в себя применение нестероидных противовоспалительных средств, болезнь-модифицирующих препаратов (хондроитин сульфат, глюкозамин сульфат в дозе 500 мг 2 раза в сутки продолжительностью до 6 меся-

цев). Данная терапия на протяжении исследования полностью соответствовала той терапии остеоартроза, которую пациенты получали до включения в исследование.

Лечение варикозной болезни включало в себя хирургическое лечение и консервативную терапию.

Хирургическое лечение включало кроссэктомию, стриппинг ствола большой подкожной вены, надфасциальную перевязку несостоятельных перфорантных вен [7].

Консервативная терапия подразумевала назначение пациентам венотоников стандартными курсами по 2 месяца 2 раза в год. Также пациенты получали рекомендации по режиму с ограничением времени нахождения в вертикальном положении, применению компрессионного трикотажа (предпочтение отдавалось чулкам или колготам 2-го функционального класса).

После включения в исследование пациенты оставались под динамическим наблюдением сердечно-сосудистого хирурга в течение года. Осмотры проводились через 1, 3, 6 месяцев и через год после включения в исследование. При первом и втором осмотрах оценивались данные суммарного индекса Лекена и функционального индекса WOMAC, ВАШ, через 6 и 12 месяцев также выполнялось ультразвуковое исследование или рентгенография коленных суставов, пациенты осматривались ревматологом или ортопедом.

Статистическая обработка результатов проводилась с помощью процессора Pentium с использованием пакета статистических программ Microsoft Excel, Statistica 5.0, Statplus2007. Определялись средние величины  $[M \pm m]$ , достоверность средних величин по критерию Стьюдента (t), критериям Манна – Уитни для малых выборок [3].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

За время проведения исследования были оперированы 65 пациентов, или 56 % от включенных в исследование (группа 1). Консервативная терапия проводилась 51 (44 %) больному (группа 2). В течение года после включения в исследование наблюдались 49 (42,2 %) оперированных больных и 31 (26,7 %) пациент, получавший консервативную терапию. Остальные пациенты к настоящему моменту находятся на разных сроках после включения в исследование (табл. 1).

В начале исследования проведена оценка выраженности проявлений хронической венозной недостаточности по международной классификации хронических заболеваний вен нижних конечностей (система CEAP). Преобладали пациенты второй (55,2 %) и третьей (30,2 %) стадий. Пациенты в стадии 0 (без клинических проявлений), а также в стадиях 5 и 6 (зажившая или активная язва) в исследование не включались.

**Таблица 1**  
Количество пациентов, находящихся на разных этапах исследования

Группа больных	Осмотр через 1 месяц	Осмотр через 3 месяца	Осмотр через 6 месяцев	Осмотр через 12 месяцев
Группа 1	62 (53,4 %)	57 (49,1 %)	54 (46,6 %)	49 (42,2 %)
Группа 2	47 (40,5 %)	42 (36,2 %)	37 (31,9 %)	31 (26,7 %)
Всего	109 (94 %)	99 (85,3 %)	91 (78,4 %)	80 (69,0 %)

При динамическом наблюдении отмечено снижение проявлений хронической венозной недостаточности. Рецидив варикозной болезни зафиксирован через год у 2 пациентов из 49 обследованных оперированных, что составило 4,1 %. Не отмечено ни одного пациента, у которого на фоне проводимого лечения возникла трофическая язва голени или произошло прогрессирование проявлений и увеличение стадии хронической венозной недостаточности.

Результаты триплексного сканирования вен нижних конечностей в начале исследования приведены в табл. 2.

**Таблица 2**  
Результаты триплексного сканирования вен нижних конечностей перед началом исследования

Группа больных	Несостоятельность остиального клапана и / или клапанов ствола БПВ	Несостоятельность остиального клапана и / или клапанов ствола МПВ	Наличие несостоятельных перфорантных вен
Оперированные	65 (100 %)	5 (7,7 %)	59 (90,7 %)
Неоперированные	45 (88 %)	7 (13,7 %)	49 (96,1 %)
Всего	110 (94,8 %)	12 (10,3 %)	108 (93,1 %)

Из табл. 2 видно, что практически у всех пациентов выявлялась несостоятельность остиального клапана сафено-фemorального соустья и клапанов ствола большой подкожной вены в сочетании с наличием несостоятельных перфорантных вен. Количество несостоятельных перфорантных вен у пациентов было от 1 до 5, в среднем  $3,7 \pm 0,8$ .

При исследовании через 6 и 12 месяцев после начала лечения получены результаты, приведенные в табл. 3.

Данные по исследованию в динамике состояния малой подкожной вены неинформативны и не могут участвовать в сравнении, так как из 7 пациентов, имевших поражение малой подкожной вены и получавших консервативную терапию, 4 находятся в пределах первых 6 месяцев исследования. При адекватно выполненной операции одной из основных причин рецидива варикозной болезни могут явиться вновь возникшие несостоятельные перфорантные вены на месте ранее состоятельных. Динамическое триплексное сканирование позволяет оценить данную проблему и дать всю необходимую информацию для ее решения.

Таблица 3

Результаты триплексного сканирования вен нижних конечностей в процессе исследования

Группа больных	Несостоятельность остиального клапана и / или клапанов ствола БПВ		Несостоятельность остиального клапана и / или клапанов ствола МПВ		Наличие несостоятельных перфорантных вен	
	6 месяцев	12 месяцев	6 месяцев	12 месяцев	6 месяцев	12 месяцев
Оперированные	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)	2 (4,1)
Неоперированные	34 (91,9 %)	29 (93,5 %)	3 (8 %)	3 (9,7 %)	36 (97,3 %)	31 (100 %)
Всего	34 (37,4 %)	29 (36,3 %)	3 (3,3 %)	3 (3,8 %)	36 (39,6 %)	33 (41,3 %)

У пациентов, получающих консервативную терапию, повторение триплексного сканирования в динамике чаще одного раза в год для оценки состояния глубоких вен не целесообразно. Причиной является то, что никакой новой диагностической информации от данного исследования врач не получает и никакого влияния на решение лечебных задач исследование не оказывает.

По данным ультразвукового исследования коленных суставов нами проведена оценка следующих параметров: наличие выпота в коленных суставах, толщина хряща коленного сустава, размеры остеофитов. Полученные результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

Частота встречаемости синовита у пациентов в процессе лечения

Группа больных	До лечения	Через 6 месяцев	Через 12 месяцев
Оперированные	31 (47,7 %)	21 (38,9 %)	16 (32,7 %)
Неоперированные	25 (49,0 %)	16 (43,2 %)	11 (35,5 %)
Всего	56 (48,3 %)	37 (40,7 %)	27 (33,8 %)

Таким образом, из полученных данных видно, что частота наличия синовита коленных суставов у пациентов до начала лечения и в его процессе достоверно отличаются. Это совпадает с данными Т. В. Соколовой о том, что наличие и выраженность синовита при остеоартрозе коррелируют с высотой венозного давления, измеренной с помощью ультразвуковой доплерографии.

В табл. 5 приведены данные о состоянии хряща коленного сустава и размерах остеофитов в процессе лечения.

Видно, что у обеих групп пациентов отмечена положительная динамика толщины хряща коленного сустава.

Таблица 5

Толщина хряща (мм) и размеры остеофитов (мм) у пациентов в процессе лечения

Группа больных	До лечения		Через 6 месяцев		Через 12 месяцев	
	Хрящ	Остеофиты	Хрящ	Остеофиты	Хрящ	Остеофиты
Группа 1	1,30±0,29	2,73±1,2	1,55±0,3	2,74±1,2	1,74±0,31	2,74±1,1
Группа 2	1,28±0,28	3,19±1,1	1,34±0,31	3,16±1,2	1,42±0,31	3,15±1,2
Всего	1,30±0,29	2,90±1,2	1,46±0,32	2,88±1,2	1,61±0,35	2,89±1,2

Что касается размеров остеофитов, то в процессе лечения отмечено отсутствие отрицательной динамики в обеих группах пациентов, что также может свидетельствовать о замедлении патологического процесса.

## ВЫВОДЫ

1. Триплексное сканирование вен нижних конечностей и УЗИ коленных суставов являются методами выбора при оценке состояния пациентов с сочетанным поражением вен нижних конечностей и остеоартрозом коленных суставов.

2. Применение триплексного сканирования вен нижних конечностей в динамике после хирургического лечения позволяет оценивать состояние перфорантных вен, появление новых перфорантных вен с несостоятельными клапанами.

3. У пациентов, получающих консервативную терапию, применение триплексного сканирования в динамике имеет смысл через год после начала лечения для оценки состояния глубоких вен нижних конечностей.

4. Ультразвуковое исследование коленных суставов дает достоверную информацию о состоянии хряща коленного сустава, наличии синовита.

5. Применение ультразвукового исследования коленного сустава в динамике у пациентов, получающих консервативную терапию или перенесших хирургическое лечение по поводу варикозной болезни, позволяет оценивать динамику суставного процесса.

6. В процессе лечения на фоне устранения хронической венозной недостаточности отмечено уменьшение числа пациентов с синовитом.

7. В группе пациентов, получающих консервативную терапию, и в группе оперированных пациентов отмечена положительная динамика толщины хряща коленного сустава через 6 и 12 месяцев после начала лечения. Также на фоне лечения отмечено отсутствие отрицательной динамики в виде нарастания размеров остеофитов.

8. Устранение проявлений хронической венозной недостаточности приводит к положительной динамике в течении остеоартроза коленных суставов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богачев В. Ю. Системная фармакотерапия хронической венозной недостаточности нижних конечностей. Современное состояние вопроса // Русский медицинский журнал. 2004. Т. 12. № 18. С. 1–4.

2. Вахтарьян П. Е., Гавриленко А. В., Ким Е. А. Результаты комплексного лечения больных варикозной болезнью нижних конечностей // *Ангиология и сосудистая хирургия*. 2008. Т. 14. № 4. С. 93–96.
3. Гланц С. Медико-биологическая статистика. М.: Практика, 1999. 459 с.
4. Зубарев А. Р., Богачев В. Ю., Митьков В. В. Ультразвуковая диагностика заболеваний вен нижних конечностей. М.: Видар, 1999. 104 с.
5. Козел Н. П., Мальчевский В. А. Комплексная реабилитация больных с заболеваниями опорно-двигательного аппарата. Тюмень, 2003. С. 18–21.
6. Константинова Г. Д., Алекперова Т. В. Место ультразвуковой флебографии в миниинвазивной технологии лечения варикозной болезни нижних конечностей // *Флебологическая наука и практика*. 1997. № 3. С. 8–12.
7. Константинова Г. Д., Воскресенский П. К., Гордина О. В. и др. Практикум по лечению варикозной болезни. М.: Профиль, 2006. 191 с.
8. Лелюк В. Г., Лелюк С. Э. Ультразвуковая ангиология. М.: Реальное время, 1999. 288 с.
9. Пшетаховский И. Л. Артросы: клиника, диагностика, лечение и реабилитация. Одесса, 2004. 287 с.
10. Ревматология. Национальное руководство / Под ред. Е. Л. Насонова, В. А. Насоновой. М.: Гэотар-Медиа, 2008. 720 с.
11. Российские клинические рекомендации по диагностике и лечению хронических заболеваний вен // *Флебология*. 2009. Т. 3. № 3. С. 4–48.
12. Сабельников В. В., Шулупова Е. К. Варикозная болезнь нижних конечностей. Современный взгляд на проблему // *Мир медицины*. 2001. № 3–4.
13. Савельев В. С., Гологорский В. А., Кириенко А. И. и др. Флебология, руководство для врачей / Под ред. В. С. Савельева. М.: Медицина, 2001. 664 с.
14. Сазонова Н. В., Щуров В. А. Динамометрические показатели мышц нижних конечностей у больных остеоартрозом // *Вестник травматологии и ортопедии им. Н. Н. Приорова*. 2008. № 4. С. 40–42.
15. Соколова Т. В. Роль гемодинамических факторов в формировании остеоартроза коленных и тазобедренных суставов: Дис. ... канд. мед. наук. Ярославль, 1999.
16. Хейфец И. В. Ультразвуковое исследование в оценке эффективности локальной терапии ревматоидного артрита: Дис. ... канд. мед. наук. СПб., 2006.
17. Щеглов Э. А., Дуданов И. П., Цуканова Р. С. Оценка состояния венозной системы нижних конечностей у больных с остеоартрозом коленных суставов // *Сердечно-сосудистые заболевания*. Бюллетень НЦССХ им. А. Н. Бакулева РАМН. 2009. Т. 10. № 6. С. 132.
18. Яблоков Е. Г., Кириенко А. И., Богачев В. Ю. Хроническая венозная недостаточность М.: Берег, 1999. 126 с.

**МИХАИЛ ПАВЛОВИЧ КОНОВАЛОВ**аспирант кафедры зоотехнии, товароведения и экспертизы продовольственных товаров агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*smiwanja@mail.ru***АНАТОЛИЙ ЕФРЕМОВИЧ БОЛГОВ**доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой зоотехнии, товароведения и экспертизы продовольственных товаров агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*bolg@psu.karelia.ru*

## ОЦЕНКА ПЛЕМЕННЫХ КАЧЕСТВ БЫКОВ АЙРШИРСКОЙ ПОРОДЫ ПО ПЕРЕДАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

В статье представлены результаты оценки племенной ценности быков айрширской породы двумя методами – по передающей способности и по разнице между показателями дочерей и их сверстниц. Выделена группа быков с высокими племенными качествами. Установлена высокая совпадаемость двух методов оценки племенной ценности быков по величине удоя и низкая связь по содержанию жира в молоке. Отмечено, что показатели передающей способности могут быть дополнительным критерием для оценки племенных достоинств быков-производителей.

Ключевые слова: племенная ценность, передающая способность, корреляция, признаки молочной продуктивности

### ВВЕДЕНИЕ

Ключевой проблемой в селекции крупного рогатого скота является выявление лучших производителей, определение их племенной ценности, от достоверности которой во многом зависит общий генетический прогресс в популяциях. В последние годы проблема интенсивно изучается, совершенствуются существующие подходы и разрабатываются принципиально новые методы оценки племенных качеств сельскохозяйственных животных. Одним из новых методов селекции является оценка племенных качеств молочного скота по передающей способности [1], [4].

Передающая способность – это свойство, которым в той или иной мере обладает любая особь в популяции, унаследованное и реализованное в виде фиксированного уровня (характера) развития признака, служащего предметом отбора у родителей. Она определяется соотношением частот распределения потомков в классах вариационного ряда. В основе оценки лежит учет числа потомков, соответствующих направлению отбора, а не их отличие по средней величине признака от сверстников или средней по стаду.

В работе [1] обосновано важное значение передающей способности для оценки племенных качеств животных и разработана матрица отбора. Метод пока не получил широкого распространения в научных исследованиях и практике племенного дела, но заслуживает особого внимания.

Целью данной работы было оценить быков айрширской породы по передающей способности и определить совпадаемость этого метода с оценкой быков методом «дочери-сверстницы».

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для работы использовалась специально сформированная база данных по 6 ведущим стадам айрширского скота в Республике Карелии. Объектом исследования были айрширские коровы-первотелки ( $n = 8231$ ), отелившиеся в период с 2000 по 2010 год, дочери 50 быков. У подконтрольных животных были изучены происхождение и молочная продуктивность. Средний удой за 305 дней лактации составил  $4912 \pm 14$  кг молока (с учетом года и места лактирования – от 2753 до 6664 кг), жирность молока –  $4,05 \pm 0,01$  % (3,56–4,39 %). Оценка производителей по передающей способности проводилась в соответствии с рекомендациями ГНУ ВНИИГРЖ [1].

Методика оценки быков по передающей способности сначала предусматривает распределение дочерей всех быков на классы вариационного ряда. Критерием отнесения первотелок к определенному классу является среднее квадратическое отклонение ( $\sigma_p$ ), поскольку при любой величине средней арифметической ( $\bar{X}$ ) оно отражает характер распределения членов выборки. Нормированное отклонение рассчитывают исходя из  $1/2\sigma_p$ . Вся популяцию подразделяют на 3 класса: к первому классу (1) относят первотелок, величина признака которых меньше, чем  $(\bar{X} - 1/2\sigma_p)$ , ко второму (2) –  $(\bar{X} \pm 1/2\sigma_p)$ , к третьему (3) – больше, чем  $(\bar{X} + 1/2\sigma_p)$ . При этом в двух крайних классах (1 и 3) должно находиться по 30,7 % особей, а в среднем (2) – 38,3 %. Подразумевается, что в крайние классы вариационного ряда попадают особи, существенным образом отличающиеся по своей генетической структуре, чем, вероятно, обусловлено их пре-

восходство (непревосходство) в выборке по селекционному признаку. Распределение ведется отдельно для каждого года оценки и по каждому стаду, что позволяет снизить влияние паратипических факторов. Фактором, определяющим племенные качества животных, становится не столько абсолютное значение признака у той или иной особи, сколько принадлежность к классу вариационного ряда.

Оценивая племенные качества быков-производителей используют классификационную оценку дочерей. Подсчитывают общую сумму дочерей каждого быка и их сумму в каждом классе вариационного ряда. Затем рассчитывают частоты распределения дочерей в классах  $p_1$ ,  $p_2$  и  $p_3$ . Исходя из частот распределения дочерей быка его категорию по передающей способности в стаде оценивают по формуле:  $ПЦ = \text{Log} = [(p_3 + 1)/(p_1 + 1)]$ , где ПЦ – племенная ценность по передающей способности. Критерием принадлежности быка к той или иной категории служит нормированное отклонение  $\text{Log}$  в долях  $1/2\sigma$  от его среднего значения по всем быкам в выборке.

Помимо оценки передающей способности быков, учитывали их племенную ценность на основании разницы между показателями дочерей и их сверстниц по формуле:

$$ПЦ = 2 \times b \times (D - C_b),$$

где  $D$ ,  $C_b$  – показатели дочерей и сверстниц,  $b$  – повторяемость оценки быка, рассчитанная по формуле

$$b = \frac{N}{N + \frac{4 - h^2}{h^2}},$$

где  $N$  – число эффективных дочерей, найденное как отношение произведения количества дочерей на количество сверстниц к их сумме,  $h^2$  – наследуемость оцениваемого признака [2].

Для изучения совпадаемости оценки быков по передающей способности с их оценкой методом «дочери-сверстницы» были рассчитаны коэффициенты ранговой корреляции Спирмена, определяемые по формуле

$$r_s = 1 - \frac{6 \times \Sigma(x - y)^2}{n \times (n^2 - 1)},$$

где  $x$  и  $y$  – ранги по каждому признаку,  $n$  – число пар рангов [3].

Так же была определена связь между оценками производителей по передающей способности по разным признакам молочной продуктивности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе работы мы оценили 50 быков айр-ширской породы. Распределение оцененных быков в зависимости от их передающей способности по удою дочерей представлено в табл. 1.

Среднее значение  $\text{Log}$  по всем быкам в популяции составило 0,023 при величине  $1/2\sigma = 0,029$ . Быки со значением  $\text{Log} > 0,006$  вошли в 3-ю категорию, быки с  $\text{Log} < -0,052$  отнесены к 1-й категории, оставшиеся быки со значением  $-0,052 < \text{Log} < 0,006$  составили 2-ю категорию по передающей способности.

С учетом класса дочерей в стаде сохраняется нормальный характер распределения первотелок в крайних классах: в 1-м классе – 2630 голов, в 3-м – 2406 голов, или 31,6 и 29,2 % соответственно, что близко к теоретическому значению (30,7 %).

Анализ быков по их принадлежности к той или иной категории показал, что 30,0 % быков обладают повышенной передающей способностью, от них получено почти в 2,5 раза больше дочерей (3342 голов), чем от быков 1-й категории (1394 голов). Количество дочерей 3-го класса, полученных от производителей, отнесенных к 1-й категории (249 голов), было более чем в 5 раз меньше по сравнению с количеством дочерей 3-го класса (1281 голова) от быков 3-й категории. Кроме того, от быков 3-й категории получена меньшая доля дочерей 1-го класса, чем от быков 1-й категории. Это подтверждается и изменением характера распределения дочерей в крайних классах. Они составляют по группе быков 1-й категории:  $p_1 = 0,415$  и  $p_3 = 0,179$ , по 3-й категории –  $p_1 = 0,247$  и  $p_3 = 0,383$ . Таким образом, от быков 3-й категории получена большая доля дочерей 3-го класса и меньшая – 1-го класса, чем от быков 1-й категории.

Аналогично изучена передающая способность производителей по содержанию жира в молоке дочерей. Сводные данные по категориям быков приведены в табл. 2.

Характер распределения первотелок в классах вариационного ряда по жирности молока также носит нормальный характер. К первому классу отнесено 30,7 % первотелок, к третьему – 30,6 %, что соответствует теоретическому распределению. Характер же распределения быков-отцов отличался от теоретического. В частности, к 1-й категории было отнесено 36 % быков, к 3-й – 28 %, что, скорее всего, связано со значительной изменчивостью оценок производителей.

В зависимости от принадлежности отцов к категории изменяется характер распределения дочерей в вариационном ряду. У быков 1-й категории на 9 % больше дочерей 1-го класса, чем противоположного. В то же время от быков 3-й категории получено на 14 % больше дочерей 3-го класса по сравнению с 1-м классом. Эти данные свидетельствуют о наличии наследственной обусловленности влияния категорий быков на класс дочерей.

Список быков 3-й категории по жирности молока дочерей с распределением дочерей в классах вариационного ряда представлен в табл. 3.

Таблица 1

Распределение дочерей в классах вариационного ряда по удою и категории быков-производителей по передающей способности

Кличка и № быка	Число дочерей, частоты их распределение в вариационном ряду и категория быков								ПЦ быков по удою по методу «Д – Св», кг
	Учтено дочерей	Дочерей в 1-м классе	$p_1$	Дочерей в 3-м классе	$p_3$	$(p_3 + 1)/(p_1 + 1)$	$\text{Log}_1$ быка	Категория	
Веньюс 5165	16	9	0,563	2	0,125	0,720	-0,143	1	–
Дуплет 958	131	66	0,504	13	0,099	0,731	-0,136	1	-672
Юлерми 900	56	26	0,464	8	0,143	0,781	-0,107	1	-254
Вудли 5075	10	5	0,500	2	0,200	0,800	-0,097	1	–
Понтус 56636	28	12	0,429	4	0,143	0,800	-0,097	1	-540
Данко 111	48	21	0,438	8	0,167	0,812	-0,090	1	-572
Модуль 1849	178	75	0,421	29	0,163	0,818	-0,087	1	-639
Диктор 1170	215	85	0,395	35	0,163	0,834	-0,079	1	-620
Бриз 551	110	40	0,364	18	0,164	0,853	-0,069	1	-145
Ерри 905	216	90	0,417	45	0,208	0,853	-0,069	1	-561
Марс 955	34	14	0,412	7	0,206	0,854	-0,069	1	–
Юмблет 80	10	4	0,400	2	0,200	0,857	-0,067	1	–
Тайто 3972	93	37	0,398	21	0,226	0,877	-0,057	1	-400
Хууго 188	86	32	0,372	18	0,209	0,881	-0,055	1	–
Велюр 6049	163	63	0,387	37	0,227	0,885	-0,053	1	-19
<b>n = 15</b>	<b>1394</b>	<b>579</b>	<b>0,415</b>	<b>249</b>	<b>0,179</b>	<b>0,833</b>	<b>-0,079</b>	–	–
Дебют 4553	301	110	0,365	64	0,213	0,889	-0,051	2	-338
Сотник 3261	40	15	0,375	9	0,225	0,891	-0,050	2	82
Полюс 2499	49	17	0,347	10	0,204	0,894	-0,049	2	-87
Тукки 3730	317	114	0,360	72	0,227	0,902	-0,045	2	-213
Ралли 4032	123	42	0,341	26	0,211	0,903	-0,044	2	-137
Яхкю 904	175	65	0,371	42	0,240	0,904	-0,044	2	-140
Сампо 4781	250	97	0,388	64	0,256	0,905	-0,043	2	-267
Луоко 1481	107	37	0,346	26	0,243	0,923	-0,035	2	-60
Хунна 54	512	194	0,379	139	0,271	0,922	-0,035	2	-134
Турку 3729	99	30	0,303	21	0,212	0,930	-0,032	2	-226
Лорви 147	231	89	0,385	67	0,290	0,931	-0,031	2	-141
Толму 3947	97	30	0,309	22	0,227	0,937	-0,028	2	-198
Мороз 1490	306	93	0,304	70	0,229	0,942	-0,026	2	-157
Таави 3949	188	66	0,351	51	0,271	0,941	-0,026	2	-68
Ринг 3988	248	83	0,335	66	0,266	0,948	-0,023	2	-198
Патрон 916	176	59	0,335	48	0,273	0,954	-0,020	2	-215
Денди 4803	144	43	0,299	38	0,264	0,973	-0,012	2	-61
Лабри 5161	39	12	0,308	12	0,308	1,000	0,000	2	–
Лама 488	30	7	0,233	7	0,233	1,000	0,000	2	–
Тахо 3757	63	21	0,333	22	0,349	1,012	0,005	2	-171
<b>n = 20</b>	<b>3495</b>	<b>1224</b>	<b>0,350</b>	<b>876</b>	<b>0,251</b>	<b>0,927</b>	<b>-0,033</b>	–	–
Лесси 144	619	178	0,288	200	0,323	1,027	0,012	3	206
Вертти 901	261	76	0,291	86	0,330	1,030	0,013	3	-100
Рокот 3958	159	41	0,258	48	0,302	1,035	0,015	3	69
Хукко 173	138	36	0,261	42	0,304	1,034	0,015	3	-192
Джаз 396	30	9	0,300	11	0,367	1,052	0,022	3	-86
Аракки 245	24	5	0,208	7	0,292	1,070	0,029	3	–
Хякя 135	310	82	0,265	118	0,381	1,092	0,038	3	68
Сокери 8	83	21	0,253	33	0,398	1,116	0,048	3	–
Сириус 3353	398	95	0,239	158	0,397	1,128	0,052	3	232
Сонет 1759	425	99	0,233	171	0,402	1,137	0,056	3	235
Юракка 237	22	7	0,318	11	0,500	1,138	0,056	3	–
Реестр 3760	50	11	0,220	20	0,400	1,148	0,060	3	155
Лепя 533	564	119	0,211	256	0,454	1,201	0,080	3	664
Принц 4622	247	46	0,186	114	0,462	1,233	0,091	3	612
Дисплей 5162	12	2	0,167	6	0,500	1,285	0,109	3	–
<b>n = 15</b>	<b>3342</b>	<b>827</b>	<b>0,247</b>	<b>1281</b>	<b>0,383</b>	<b>1,109</b>	<b>0,045</b>	–	–
<b>По быкам всех категорий</b>	<b>8231</b>	<b>2630</b>	<b>0,316</b>	<b>2406</b>	<b>0,307</b>	<b>0,993</b>	<b>-0,003</b>	–	–

Таблица 2

Передающая способность быков по жирности молока исходя из распределения их дочерей в классах вариационного ряда

Категория быка	Число быков	Учтено дочерей	Дочерей в 1-м классе	$P_1$	Дочерей в 3-м классе	$P_3$	$(p_3 + 1)/(p_1 + 1)$	Log
1	18	3514	1243	0,354	928	0,264	0,934	-0,030
2	18	2971	885	0,298	945	0,318	1,015	0,006
3	14	1746	395	0,226	648	0,371	1,118	0,048
Итого	50	8231	2523	0,307	2521	0,306	0,999	0,000

С целью изучения связи племенной ценности быков по передающей способности с официальной оценкой их племенной ценности был рассчитан ранговый коэффициент корреляции. Установлена пониженная корреляция ( $r_s = 0,325 \pm 0,155$ ;  $P < 0,05$ ), которая свидетельствует о низкой совпадаемости показателей по признаку жирности молока.

Ранговый коэффициент корреляции между оценками быков по удою, полученными двумя методами, выявил высокую достоверную связь ( $r_s = 0,745 \pm 0,110$ ;  $P < 0,001$ ) этих параметров. Коэффициент корреляции, рассчитанный учеными ВНИИГРЖ на поголовье черно-пестрого голштинизированного скота Ленинградской области, также был довольно высок ( $r = 0,618$ ), что свидетельствует о схожей связи анализируемых параметров [1]. Однако при детальном сопостав-

лении оценок выявляются некоторые несоответствия. Так, например, производители Вертти 901, Хукко 173, Джаз 396, являющиеся ухудшателями в соответствии с племенной ценностью по методу «дочери-сверстницы», были отнесены к группе быков с повышенной передающей способностью.

Определенный интерес представляет связь полученных логарифмов оценки быков по удою и жирности молока дочерей. Рассчитанный коэффициент ранговой корреляции между ними ( $r_s = -0,147 \pm 0,143$ ) указывает на отсутствие достоверной связи. Это говорит о необходимости отдельного учета оценок производителей по передающей способности при оценке производителей по данным признакам.

Таким образом, наши исследования позволили установить в популяции айрширского скота Карелии наличие эффекта передающей способности по линии отец – дочь по признакам молочной продуктивности, что подтверждает возможность использования оценки по передающей способности для выявления производителей, дающих в потомстве большую долю наиболее продуктивных дочерей (3-й класс).

Установлена различная степень совпадаемости оценок производителей по передающей способности с официальной оценкой, а именно высокая совпадаемость по величине удоя и низкая связь по содержанию жира в молоке.

Таблица 3

Список быков 3-й категории по жирности молока дочерей исходя из их распределения в классах вариационного ряда

Категория быка	Кличка и № быка	Число дочерей, частоты их распределение в вариационном ряду и категория быков							ПЦ быков по жиру, %
		Учтено дочерей	Дочерей в 1-м классе	$P_1$	Дочерей в 3-м классе	$P_3$	$(p_3 + 1)/(p_1 + p)$	Log, быка	
Быки 3-й категории	Дисплей 5162	12	4	0,333	5	0,417	1,063	0,027	–
	Хукко 173	138	36	0,261	48	0,348	1,069	0,029	0,088
	Сонет 1759	425	100	0,235	143	0,336	1,082	0,034	-0,039
	Мороз 1490	306	72	0,235	107	0,350	1,093	0,039	0,057
	Данко 111	48	14	0,292	20	0,417	1,097	0,040	0,017
	Тахо 3757	63	10	0,159	18	0,286	1,110	0,045	-0,068
	Джаз 396	30	6	0,200	10	0,333	1,111	0,046	0,046
	Тайто 3972	93	21	0,226	34	0,366	1,114	0,047	0,267
	Дуплет 958	131	34	0,260	54	0,412	1,121	0,050	0,126
	Сотник 3261	40	9	0,225	16	0,400	1,143	0,058	0,000
	Понтус 56636	28	6	0,214	11	0,393	1,147	0,060	0,046
	Дебют 4553	301	69	0,229	128	0,425	1,159	0,064	0,039
	Аракки 245	24	5	0,208	12	0,500	1,242	0,094	–
	Луоко 1481	107	9	0,084	42	0,393	1,285	0,109	-0,047

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егизарян А. В., Дмитриев В. Б. и др. Система оценки племенных качеств молочного скота по передающей способности. СПб.: ВНИИГРЖ, 2010. 72 с.
2. Карманова Е. П., Болгов А. Е. Краткий справочник зоотехника-селекционера. Петрозаводск: Карелия, 1984. 279 с.
3. Карманова Е. П., Макарова В. Е., Муравья Л. Н. Генетические параметры признаков отбора сельскохозяйственных животных: Учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003. 52 с.
4. Smaragdov M. G. et al. Validation Of Novel Approach For Estimation Of Bovine Transmitting Ability With The Use Of Reporter Gene DGAT1 // 9<sup>th</sup> World Congress on Genetics Applied to Livestock Production. 08.2010. P. 1–6.

**АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ ЕГОРОВ**

кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники и дендрологии лесохозяйственного факультета, Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С. М. Кирова  
egorovfta@yandex.ru

**ДАНИИЛ СЕРГЕЕВИЧ БУРЦЕВ**

кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией воспроизводства и защиты леса, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства  
forest1641@gmail.com

**ЛАРИСА ВЛАДИМИРОВНА ОРЛОВА**

кандидат биологических наук, научный сотрудник, Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН  
orlarix@mail.ru

**МАРИНА АЛЕКСЕЕВНА НИКОЛАЕВА**

кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией лесного семеноводства, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства  
marina\_lta@mail.ru

**ПРОДУКТИВНОСТЬ ВИДОВ И ВНУТРИВИДОВЫХ ТАКСОНОВ *PICEA ABIES*,  
*P. FENNICA*, *P. OBOVATA* В ГЕОГРАФИЧЕСКИХ КУЛЬТУРАХ  
НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ РОССИИ**

Проведена оценка таксономического разнообразия и продуктивности еловых насаждений, созданных из семян различного происхождения в географических культурах Тосненского района Ленинградской области. Установлена связь между продуктивностью и таксономической принадлежностью ели сибирской, разновидностей видов елей европейской и форм ели финской. Изучено влияние характера ветвления кроны на таксационные показатели древостоя.

Ключевые слова: интродукция, географические культуры, продуктивность, *Picea abies*, *P. fennica*, *P. obovata*, таксоны елей

**ВВЕДЕНИЕ**

Одной из основных задач лесного хозяйства наряду с сохранением биологического разнообразия является получение высоких запасов древесины в короткие сроки. Одним из способов достижения этой задачи может служить внедрение в лесокультурное производство быстрорастущих внутривидовых таксонов различного географического происхождения, на что указывал в ряде своих работ еще В. Н. Сукачев [11], [12], а «при изучение формового разнообразия надо устремить внимание на изучение экотипов как климатических (климатипов) и эдафических (эдафотипов), так и связанных с отдельными типами (ассоциациями) леса (ценотипов)» [12; 29].

Важную роль в отборе хозяйственно ценных форм древесных пород играют географические культуры, когда в сходных условиях под контролем человека проходит испытание исходного материала. Для разработки лесосеменного районирования территории России в 1970-х годах в различных регионах европейской части России были заложены географические культуры из основных лесообразователей России [5].

Географические культуры ели были созданы из географических популяций ели европейской (*P. abies* (L.) Н. Karst.), ели сибирской (*P. obovata* Ledeb.) и их природного гибрида – ели финской,

приоритетным названием которой является *P. fennica* (Regel) Kom. [6].

**ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ**

Географические культуры площадью 24,0 га расположены в Тосненском участковом лесничестве Любанского лесничества Ленинградской области, кв. 69, выделы 8, 9, 10, 11, с географическими координатами 59°30' с. ш. и 30°52' в. д. По лесорастительному районированию С. Ф. Курнаева [3] эта территория относится к южной подзоне таежных темнохвойных лесов, а по геоботаническому районированию – к полосе южной тайги на границе Лужского и Волховского округов Северо-Европейской таежной провинции [1] с господством еловых зеленомошных и производных от них мелколиственных лесов и присутствием сосновых заболоченных лесов. В соответствии с приказом № 37 от 04.02.2009 [9] при лесоустройстве эту территорию относят к среднетаежному району европейской части РФ.

До освоения участок представлял собой свежую вырубку из-под березово-еловых и березово-осиновых насаждений II–III классов бонитета кисличных и черничных типов леса.

Закладка объектов осуществлялась в мае 1977 года по единой государственной методике [10]. Под культуры проведена сплошная подго-

товка почвы с предварительной раскорчевкой и расчисткой площади. Через 2,5 м плугом ПКЛ-70 на ТДТ-40 были напаханы борозды, маркировка участка на блоки выполнена в 3-кратной повторности. Ряды на участке расположены по направлению север – юг.

Посадка выполнена 3-летними сеянцами, выращенными в открытом грунте, вручную (под меч Колесова) в пласт борозды. Исходная густота культур – 5,4 тыс. шт./га. Дополнение культур проводилось 4-летними сеянцами весной через год после посадки. До 1985 года уход проводился ежегодно и заключался в весенней opravке саженцев, выжатых морозом, в ручной прополке травы и вырубке лиственной поросли. Всего испытанию подлежат 35 климатипов (вариантов) – популяций из 23 областей и республик бывшего СССР (табл. 1). Разница между крайними популяциями по широте составляет 19,70° (Мурманская область – Закарпатье), по долготе – 43,00° (Литва – Свердловская область) [5].

Таксационные параметры древостоев определяли следующим образом: диаметры замеряли по каждому варианту (потомству) мерной вилкой на высоте 1,3 м с точностью до 1,0 см в количестве 150–250 деревьев на вариант. Высота замерялась высотомером Блюме – Лейсса с точностью до ±0,1 м не менее чем у 20–25 деревьев. Значение высот находили графическим способом. Верхняя высота определена как среднеарифметическое значение высот самых крупных деревьев. Данные о суммах площадей сечений, запасах определялись общепринятыми в лесоводстве методами. Средний диаметр рассчитывался как производный от суммы площади сечения древостоя. Все данные обрабатывались методами математической статистики и достоверны на уровне значимости 0,05 [2].

В 2009 году был проведен сбор образцов для изучения таксономического разнообразия географических культур ели. Были использованы достаточно устойчивые признаки морфологического строения шишек и их чешуй [14], [13] в сочетании с признаками хвоинок и вегетативных побегов, а также дополненные нами [6].

При исследовании вегетативных органов были проанализированы 26 признаков, среди которых «наиболее ценными для систематики оказались форма поперечного сечения и верхушки хвоинок, степень их изогнутости, расположение на побеге, длина и форма подушечек и степень их отклонения от оси побега, толщина и степень изогнутости молодых побегов, размеры почек, форма верхушки, опушенность и килеватость их чешуй, а также соотношение длины профиллов и почки» [6; 14].

Всего были изучены более 600 образцов органов со 101 модельного дерева ели различного происхождения, в результате чего в географических культурах ели выявлены 3 вида (*Picea abies*, *P. fennica* и *P. obovata*). Причем в составе

*Picea abies* – 2 разновидности с 6 формами: *P. abies* var. *abies* (f. *abies*, f. *biloba*, f. *cuneata*), *P. abies* var. *acuminata* (f. *acuminata*, f. *deflexa*, f. *ligulata*). В пределах ели финской (*P. fennica*) – 3 формы: типичная; *P. fennica*, близкая *P. abies*; *P. fennica*, близкая *P. obovata*. Более подробно систематическая характеристика трех последних таксонов рассмотрена в нашей работе [6], где для таксонов приведены устойчивые диагностические признаки и их отличия от родительских таксонов *P. abies* и *P. obovata*. Ниже приведена только характеристика по шишкам.

«*P. fennica*, близкая к *P. abies*, отличается от типичной *P. abies* менее крупными (7,5–11 см дл.), часто изогнутыми шишками, семенные чешуи которых по верхнему краю треугольные, острые. *P. fennica*, близкая к *P. obovata*, отличается от типичной *P. obovata* вытянуто-закругленным, преимущественно неровнозубчатым или вытянутым в середине в небольшой носик верхним краем семенных чешуй. Морфология кроющих чешуй у таких шишек очень вариabельна, они 5–6 (7) мм дл. и (1,7) 2–3 мм шир., обратнойцевидные с округлой верхушкой или широколанцетные, или широкоромбические, с туповатой верхушкой.

Промежуточная, или типичная, форма отличается от других форм *P. fennica* строением семенных чешуй – треугольных, на верхушке закругленных или вытянуто-закругленных. Семенные чешуи 13–23 мм выс. и 13–22 мм шир., ромбовидно-обратнойцевидные, обратнойцевидные или широко-обратнойцевидные, отклоненные от оси под углом 30–45°. Шишки 6–10,3 см дл., 3,5–4,5 см толщ., обратнойцевидно-цилиндрические, узко-обратнойцевидные или обратнойцевидные, с варьирующей формой основания шишки – от закругленной до клиновидной. Кроющие чешуи 4,8–7,5 (8) мм дл., 1,7 мм шир., треугольные, ромбические или широколанцетные, туповатые» [6; 13–14].

Кроме определения принадлежности к тому или иному таксону на тех же модельных деревьях определялся тип ветвления кроны [8], [7], [4]. Ель с гребенчатым типом ветвления характеризуется горизонтальным расположением ветвей I порядка, от которых гребенчато свешиваются ветви II и последующего порядков. Щетковидный тип ветвления отличается тем, что ветви I и II порядка расположены горизонтально, ветви короче, чем у гребенчатых елей, а ветви III и последующих порядков отходят вверх, в стороны и вниз, ближе к стволу, образуя подобие щетки. Плоско-ветвистый тип выделяется неправильно широко-разветвленными горизонтальными ветвями I и последующих порядков. Кроме трех основных типов нами также был выделен промежуточный – плоско-щетковидный.

Тип ветвления визуально определяли по ветвям, растущим в средней части кроны, так как в верхней и нижней частях он слабо выражен.

Таблица 1

Таксационная характеристика различных популяций (вариантов) 32-летних географических культур ели Тосненского лесничества

№ пункта по гос. реестру	Место заготовки семян (регион, область, район)	$D_{1,3}$ , см	$H_{\text{сред.}} / H_{\text{верхн.}}$ , м	Бонитет	Сохранность, %	$M$ , м <sup>3</sup> /га	$V$ ств., м <sup>3</sup>
<b><i>P. obovata</i></b>							
1	Мурманская	8,2 ± 0,22	8,2 / 11,1	III,1	14	15	0,028
25	Коми, Корткеросский	8,5 ± 0,24	8,9 / 12,1	II,8	46	80	0,032
26	Коми, Сосногорский	7,1 ± 0,21	7,5 / 10,6	III,4	40	42	0,020
41	Свердловская, Н.Тагильский	10,4 ± 0,33	10,6 / 14,0	II,2	40	120	0,056
42	Свердловская, Тавдинский	10,1 ± 0,34	10,0 / 14,0	II,5	39	104	0,049
39	Пермская, Добрянский	10,4 ± 0,32	10,8 / 15,4	II,1	41	120	0,054
<b><i>P. fennica</i>, близкая <i>P. obovata</i></b>							
2	Карелия, Сегежский	10,7 ± 0,27	11,0 / 15,5	II,0	31	100	0,060
20	Архангельская, Пинежский	10,0 ± 0,31	10,1 / 15,0	II,4	29	109	0,071
23	Архангельская, Холмогорский	10,0 ± 0,30	10,2 / 15,1	II,4	40	109	0,050
24	Вологодская, Череповецкий	12,3 ± 0,30	13,7 / 18,7	I,1	50	244	0,091
28	Кировская	9,4 ± 0,42	10,4 / 13,0	II,3	38	98	0,047
35	Удмуртия	9,2 ± 0,32	9,6 / 14,0	II,6	51	113	0,041
38	Пермская, Красновишерский	9,6 ± 0,29	9,6 / 14,8	II,6	42	95	0,042
40	Свердловская, Карпинский	12,1 ± 0,41	11,9 / 15,0	I,7	32	142	0,082
<b><i>P. fennica</i></b>							
1А	Карелия, Медвежьегорский	11,2 ± 0,31	11,5 / 16,0	I,8	23	89	0,071
3	Карелия, Пряжинский	11,2 ± 0,39	12,8 / 18,5	I,4	45	186	0,077
21	Архангельская, Коношский	9,9 ± 0,24	11,4 / 16,0	I,8	43	123	0,053
22	Архангельская, Котласский	10,1 ± 0,33	11,5 / 15,9	I,8	47	142	0,056
34	Татарстан	8,6 ± 0,22	9,4 / 13,7	II,6	47	87	0,034
<b><i>P. fennica</i>, близкая <i>P. abies</i></b>							
4	Карелия, Пудожский	14,1 ± 0,41	13,9 / 19,3	I,0	40	267	0,124
5	Ленинградская	12,4 ± 0,29	13,7 / 18,3	I,1	59	290	0,092
21А	Архангельская, Плесецкий	9,6 ± 0,33	10,4 / 15,0	II,3	43	106	0,045
27	Костромская	13,1 ± 0,42	12,8 / 16,5	I,4	37	208	0,104
29А	Московская, Загорский	14,4 ± 0,38	14,3 / 19,0	Ia	40	284	0,130
32	Калужская	13,8 ± 0,40	14,2 / 18,8	Ia	54	352	0,120
<b><i>P. abies var. abies</i></b>							
7	Псковская	14,0 ± 0,31	14,1 / 19,0	Ia	59	385	0,120
10	Латвия	12,2 ± 0,28	12,8 / 18,1	I,4	59	279	0,088
11	Витебская	13,3 ± 0,29	13,7 / 18,0	I,1	47	267	0,106
29	Московская, Солнечногорский	13,6 ± 0,40	13,8 / 18,8	I,0	57	359	0,117
30	Тверская	12,6 ± 0,34	13,4 / 18,4	I,2	46	239	0,096
31	Нижегородская	9,3 ± 0,29	9,8 / 14,5	II,5	46	103	0,042
32А	Новгородская	11,6 ± 0,32	12,6 / 16,0	I,5	61	242	0,074
<b><i>P. abies var. acuminata</i></b>							
8	Эстония	14,9 ± 0,42	14,5 / 19,2	Ia	46	364	0,147
9	Литва	13,0 ± 0,43	13,3 / 18,4	I,2	34	186	0,103
17	Закарпатье	11,9 ± 0,32	12,5 / 16,5	I,5	44	193	0,081

Примечание.  $D_{1,3}$  – диаметр на высоте груди (см);  $H_{\text{сред.}} / H_{\text{верхн.}}$  – средняя и максимальная высота деревьев одного варианта (м);  $M$  – запас древостоя в м<sup>3</sup>/га;  $V$  ств. – средний объем одного ствола, м<sup>3</sup>.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таксономический анализ елей в географических культурах позволил выявить неоднородность ряда вариантов – популяций, в которых

могли встречаться особи разных таксонов. Так как массовые таксационные измерения и уточнение таксономического состава проводились в разное время, анализ продуктивности древо-

стоев был сделан по преобладающему таксону на уровне вида или внутривидового таксона (см. первую графу табл. 2). Подробный анализ таксационных показателей по преобладающим таксонам елей в популяциях показывает преимущество *P. abies* над *P. obovata*, при этом, чем в систематическом отношении таксон ближе к *P. abies* и дальше от *P. obovata*, тем он имеет большую продуктивность (табл. 2).

Таблица 2

Таксационная характеристика 32-летних географических культур Тосненского лесничества по преобладающим таксонам елей в популяциях

Таксон	№ климатипа	$D_{1,3}$ , см	$H_{\text{сред.}} / H_{\text{верх.}}$ , м	$M$ , м <sup>3</sup> /га	Бонитет
<i>P. obovata</i>	1, 25, 26, 39, 41, 42	9,0 ± 0,10	9,3/12,9	80	II,7
<i>P. fennica</i> , близкая <i>P. obovata</i>	2, 20, 23, 24, 28, 35, 38, 40	9,9 ± 0,11	10,8/15,1	126	II,3
<i>P. fennica</i>	1a, 3, 21, 22, 34	10,2 ± 0,13	11,3/16,0	125	I,9
<i>P. fennica</i> , близкая <i>P. abies</i>	4, 5, 21a, 27, 29a, 32	12,6 ± 0,14	13,2/17,8	251	I,1
<i>P. abies</i> var. <i>abies</i>	7, 10, 11, 29, 30, 31, 32a	12,7 ± 0,15	12,9/17,5	268	I,5
<i>P. abies</i> var. <i>acuminata</i>	8, 9, 17	13,5 ± 0,22	13,4/18,0	248	I,4

Примечание. Сокращения см. в примечании к табл. 1.

Лучшие таксационные показатели имеют посадки, в которых преобладает разновидность *P. abies* var. *acuminata*, созданная из семян, географическое происхождение которых территориально соответствует Эстонии (табл. 1). Также довольно высокие параметры имеют варианты культур с преобладанием *P. abies* var. *abies* из Псковской и Московской областей, посадки *P. fennica*, близкой к *P. abies* из Калужской области. Все эти древостои в 32-летнем возрасте достоверно превосходят по запасу сырорастающей древесины контрольные варианты, созданные из посадочного материала местного происхождения (Ленинградский климатип).

Если сравнивать исследуемые насаждения только по скорости роста в высоту и по диаметру, среднему объему одного ствола, без учета запаса древесины на 1 га и сохранности культур в варианте, то преимущество перед аборигенным таксоном, помимо ранее названных, имеют Карельский, Костромской, Витебский и Литовский климатипы, принадлежащие к трем уже названным таксонам ели.

Судя по географической принадлежности наиболее продуктивных таксонов в естественном ареале они произрастают в более благоприятных климатических условиях. Высокую скорость роста эти формы сохраняют и в менее благоприятных условиях Ленинградской области. Однако следует отметить, что наиболее продуктивные популяции произрастают на территории

ях, смежных с Ленинградской областью. Например, потомство довольно удаленной популяции *P. abies* var. *acuminata* из Закарпатья уступает по всем таксационным показателям местной *P. fennica*, близкой к *P. abies*.

Интересными также являются результаты анализа влияния на продуктивность типа ветвления кроны (табл. 3).

Как видно из табл. 3, в 21 из 35 исследованных вариантов преобладает промежуточный тип ветвления кроны – плоско-щетковидный. Такой тип ветвления встречается практически у всех изученных таксонов ели, кроме *P. abies* var. *acuminata*. Еловые насаждения с преобладанием этого признака показывают самую низкую продуктивность. В 9 случаях преобладающим типом ветвления является плоско-ветвистый, который также встречается практически у всех исследованных таксонов елей, кроме *P. fennica*, близкой *P. abies*, и также характеризуется сравнительно низкой продуктивностью искусственных древостоев.

Очень редко встречаются популяции с преобладанием гребенчатого и щетковидного типов ветвления кроны. Первый встречается только у двух разновидностей *P. abies*, второй – еще и у *P. fennica*. Насаждения с преобладанием этих типов ветвления кроны более продуктивны, особенно высокую продуктивность показывают популяции с преобладанием *P. abies*, имеющих гребенчатый тип ветвления кроны.

Возможно, более высокая продуктивность природных популяций *P. abies* по сравнению с *P. fennica* и *P. obovata* наряду с другими генетическими и фенотипическими особенностями определяется и типом ветвления кроны. Теоретически гребенчатый или щетковидный тип ветвления способствует лучшему доступу хвои к солнечному свету, чем плоско-ветвистый, что может влиять на продуктивность особи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате изучения таксономического разнообразия насаждений, созданных из семян различного происхождения в географических культурах елей Тосненского района Ленинградской области, были выявлены 3 вида (*Picea abies*, *P. fennica* и *P. obovata*); в составе *Picea abies* – 2 разновидности (*P. abies* var. *abies* и *P. abies* var. *acuminata*) с 6 формами. В пределах ели финской (*P. fennica*) выявлены 3 формы: типичная; *P. fennica*, близкая *P. abies*; *P. fennica*, близкая *P. obovata*.

Анализ таксационных показателей популяции по преобладающим таксонам елей показывает преимущество *P. abies* над *P. obovata*, при этом чем таксон ближе в систематическом отношении к *P. abies* и дальше от *P. obovata*, тем большей продуктивностью он отличается. Для создания высокопродуктивных лесных культур в южной части Ленинградской области необходимо использовать семенной материал *P. abies*

Таблица 3

Таксационная характеристика 32-летних географических культур ели  
Тосненского лесничества по преобладающему типу ветвления кроны и таксонам

Таксон	№ климатипа-варианта	$D_{1,3}$ , см	$H_{\text{сред.}}/H_{\text{верхн.}}$ , м	$M$ , м <sup>3</sup> /га	Бонитет
<i>Щетковидный тип ветвления</i>					
<i>P. fennica</i>	3	11,2 ± 0,35	12,8 / 18,5	186	I,4
<i>P. abies</i> var. <i>abies</i>	29	13,6 ± 0,42	13,8 / 18,8	359	I,0
<i>P. abies</i> var. <i>acuminata</i>	9	13,0 ± 0,37	13,3 / 18,4	186	I,2
<b>Среднее</b>		<b>12,5 ± 0,22</b>	<b>13,3 / 18,6</b>	<b>244</b>	<b>I,2</b>
<i>Плоско-щетковидный тип ветвления</i>					
<i>P. obovata</i>	1, 25, 26, 41	8,4 ± 0,12	8,8 / 12,0	64	II,9
<i>P. fennica</i> , близкая <i>P. obovata</i>	2, 20, 35, 38, 40	10,3 ± 0,16	10,4 / 14,9	112	II,3
<i>P. fennica</i>	1a, 21, 34	10,6 ± 0,21	10,8 / 15,2	100	II,1
<i>P. fennica</i> близкая <i>P. abies</i>	4, 5, 21a, 27, 29a, 32	12,9 ± 0,14	13,2 / 17,8	251	I,1
<i>P. abies</i> var. <i>abies</i>	11, 31, 32a	10,6 ± 0,20	12,0 / 16,2	204	I,7
<b>Среднее</b>		<b>10,6 ± 0,08</b>	<b>11,1 / 15,2</b>	<b>146</b>	<b>II,0</b>
<i>Плосковетвистый тип ветвления</i>					
<i>P. obovata</i>	39, 42	10,2 ± 0,19	10,4 / 14,7	112	II,3
<i>P. fennica</i> , близкая <i>P. obovata</i>	23, 24, 28	10,6 ± 0,20	11,4 / 15,6	150	II,3
<i>P. fennica</i>	22	10,1 ± 0,31	11,5 / 15,9	142	I,8
<i>P. abies</i> var. <i>abies</i>	7, 30	12,3 ± 0,34	13,8 / 18,7	312	I,2
<i>P. abies</i> var. <i>acuminata</i>	17	11,8 ± 0,33	12,5 / 16,5	193	I,5
<b>Среднее</b>		<b>11,4 ± 0,12</b>	<b>11,9 / 16,3</b>	<b>182</b>	<b>I,8</b>
<i>Гребенчатый тип ветвления</i>					
<i>P. abies</i> var. <i>abies</i>	10	12,2 ± 0,33	12,8 / 18,1	279	I,4
<i>P. abies</i> var. <i>acuminata</i>	8	14,9 ± 0,37	14,5 / 19,2	364	Ia
<b>Среднее</b>		<b>13,7 ± 0,26</b>	<b>13,7 / 18,7</b>	<b>321</b>	<b>I,0</b>

var. *abies* и *P. fennica*, близкой к *P. abies* из регионов, расположенных южнее, – Калужской, Московской, Псковской областей и Эстонии, которые, возможно, составляют единый лесосеменной район.

Изучение типа ветвления кроны показало, что популяции с преобладанием гребенчатого и щетковидного типа имеют лучшие таксационные показатели, чем с преобладанием плоско-ветвистого или плоско-щетковидного типа ветвления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геоботаническое районирование Нечерноземья Европейской части РСФСР / Отв. ред. В. Д. Александрова, Т. К. Юрковская. Л., 1989. 64 с.
2. Жигунов А. В., Маркова И. А., Бондаренко А. С. Статистическая обработка материалов лесокультурных исследований: Учеб. пособие. СПб.: СПбГЛТА; СПбНИИЛХ, 2002. 86 с.
3. Курнаев С. Ф. Лесорастительное районирование СССР. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 240 с.
4. Мосеев Д. С. Формы ветвления ели в различных типах леса Архангельской области и связь с ними некоторых биометрических показателей // Экологические проблемы Севера. Вып. 8. Архангельск: АТУ, 2005. С. 54–56.
5. Николаева М. А., Пелевина Н. Н. Особенности роста и развития географических культур ели в Ленинградской области // Лесохозяйственная информация: Сб. науч.-техн. инф. по лесн. хоз-ву. М.: ВНИИЛМ, 2002. № 5. С. 13–18.
6. Орлова Л. В., Егоров А. А. К систематике и географическому распространению ели финской (*Picea fennica* (Regel) Kom., Pinaceae) // Новости систематики высших растений / Под ред. Н. Н. Цвелева. Т. 42. М.; СПб.: Тов. науч. изд. КМК, 2011. С. 5–23.
7. Попов В. Я. Формы ели по типу ветвления кроны в северной и средней подзонах тайги // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение: Межвуз. сб. науч. тр. ЛТА. Вып. 9. Л.: ЛТА, 1980. С. 47–51.
8. Правдин Л. Ф. Ель европейская и ель сибирская в СССР. М.: Наука, 1975. 189 с.
9. Приказ Минсельхоза РФ № 37 от 04.02.2009 г. «Об утверждении перечня лесорастительных зон и лесных районов Российской Федерации». М., 2009. 17 с.
10. Проказин Е. П. Изучение имеющихся и создание новых географических культур: Программа и методика работ. Пушкино: ВНИИЛМ, 1972. 52 с.
11. Сукачев В. Н. Очередные задачи русской дендрологии // Труды всероссийской лесной конференции, проходившей 10–17 ноября 1921 года в Москве. М., 1922. С. 46–58.
12. Сукачев В. Н. Основные установки селекции лесных древесных пород в условиях советского лесного хозяйства // Советская ботаника. 1933. № 1. С. 23–34.
13. Юркевич И. Д., Парфенов В. И. К вопросу о систематике *Picea abies* (L.) Karst. // Бюл. Главн. ботан. сада АН СССР. 1967. Вып. 64. С. 41–48.
14. Lindquist B. The main varieties of *Picea abies* (L.) Karst. in Europe // Acta Horti Berg. 1948. Vol. 14. P. 249–342.

УДК 660.185; 660.129; 630\*.5(03)

**АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ НИКИФОРОВ**  
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры таксации, лесоустройства и геоинформационных систем лесохозяйственного факультета, Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С. М. Кирова  
*alex\_nikiforov@mail.ru*

**АНТОНИНА ИВАНОВНА ЖУКОВА**  
кандидат технических наук, доцент кафедры технологии лесозаготовительных наук лесоинженерного факультета, Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С. М. Кирова  
*zhukova\_tonya@mail.ru*

## РАСЧЕТ УРОЖАЙНОСТИ И АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗМЕЩЕНИЯ СЪЕДОБНЫХ ГРИБОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ (на примере Лисинского учебно-опытного лесхоза)

При помощи ГИС-технологий стали возможными сбор, хранение, анализ и графическая визуализация данных о распределении площадей съедобных грибов по территории Лисинского учебно-опытного лесхоза. Проведен анализ результатов приуроченности основных видов грибов к существующим типам леса.

Ключевые слова: геоинформационные системы, лесные ресурсы, съедобные грибы

Антропогенная нагрузка на лесные экосистемы увеличивается с каждым годом, в связи с чем возникает задача повышения их устойчивости. Самым важным фактором устойчивости является биоразнообразие лесных экосистем. В то же время многоцелевое использование лесной экосистемы – основной пункт в освоении лесных ресурсов, о чем свидетельствует наличие ст. 25 Лесного кодекса, в которой перечислены более 15 видов использования леса. Недревесные ресурсы являются удачным объектом для разработки рекомендаций по рациональному использованию лесных экосистем. Одним из самых урожайных видов пользования лесом является заготовка пищевых лесных ресурсов, к которым относятся и грибы [4].

Исследования по определению биологической урожайности и анализ пространственного размещения съедобных грибов были проведены для Лисинского учебно-опытного лесхоза (УОЛХ). Лисинский УОЛХ расположен в 50 км к юго-востоку от Санкт-Петербурга в центральной части Тосненского административного района Ленинградской области. Территория Лисинского УОЛХ представляет собой компактный лесной массив протяженностью с севера на юг 34 км и с запада на восток 18 км. Общая площадь УОЛХ, по данным лесоустройства 2005 года, составляет 28 384 га. Наиболее распространенными и имеющими потенциальное промысловое значение на территории Лисинского УОЛХ съедобными грибами являются: белый гриб (*Boletus edulis* Fr.); подосиновики желто-бурый (*Leccinum testsceoscabrum* (Seer.) Sing.), красно-бурый (*Leccinum aurantiacum* (St. Amans) S. F. Gray); подберезовик обыкновенный (*Leccinum scabrum* (Bull.: Fr.) S. F. Gray); лисичка обыкновенная

(*Cantharellus cibarius* Fr.); масленок зернистый (*Suillus granulatus* (L.: Fr.) Kuntze) и поздний (*S. luteus* (Fr.) S. F. Gray); волнушка розовая (*L. torminosus* (Fr.) S. F. Gray).

Основой использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов, расположенных в границах Лисинского УОЛХ, является лесохозяйственный регламент, в котором, помимо данных об использовании древесной растительности, содержатся сведения о фонде пищевых ресурсов леса, в том числе нормативы, параметры и сроки разрешенного использования лесов для заготовки съедобных дикорастущих грибов. Эффективное использование имеющихся ресурсов грибов возможно лишь при наличии сведений об их запасах и территориальном размещении. Эта информация для Лисинского УОЛХ была получена благодаря применению геоинформационных технологий.

Для проведения анализа распределения съедобных грибов применялась геоинформационная система (ГИС) Лисинского УОЛХ [8]. ГИС реализована на основе планов лесонасаждений масштаба 1:25000 в условных координатах; базы данных лесотаксационных описаний PLP (разработчик – «ПЕТЛЕСПРО»).

Для удобства дальнейшей работы с базой данных в среде MapInfo сформированы таблицы по группам показателей. Это позволило значительно ускорить процесс обработки данных в системе MapInfo, сгруппировать их и упростить работу пользователя с SQL-запросами [12], [13]. Геоинформационные системы предназначены для сбора, хранения, анализа и графической визуализации пространственных данных и связанной с ними информации о представленных в ГИС объектах. Неразрывно с ГИС связаны геоинформационные технологии [3], [6], [11].

Геоинформационные технологии можно определить как совокупность программно-технологических средств получения новых видов информации об окружающем мире. Они предназначены для повышения эффективности процессов управления, хранения и представления информации, обработки и поддержки принятия решений.

Для промышленной заготовки необходимо выделять наиболее перспективные участки, предназначенные для организации на них сбора грибов. Проектирование объемов заготовки съедобных грибов проводилось на основании данных об их биологической урожайности, а также исходя из общей площади, типов и урожайности угодий, концентрации плодоносящих участков.

Определение биологического запаса грибов осуществлено в камеральных условиях по региональным таблицам для средней многолетней урожайности с учетом типов леса, типов условий произрастания, а также таксационной характеристики насаждений [10]. Распределение территории лесничества по типам леса проводилось по преобладающей породе [1], [2], [7], [9]. Тематические карты насаждений по преобладающей породе приведены на рис. 1. Тематические

карты позволяют наглядно изучить потенциальные участки для заготовки съедобных грибов и ориентироваться на местности [5].

На основании урожайности съедобных грибов в различных типах лесорастительных условий, типах леса на единице площади (кг/га) и площади участка (выдела), для которого ведутся расчеты, была получена величина запаса грибов на этой территории (см. таблицу). В качестве основных таксационных показателей, влияющих на продуктивность грибных угодий, были также приняты полнота и возраст насаждений.

Однако общие биологические запасы грибов в настоящее время не могут быть использованы полностью, что связано с транспортным освоением территории арендной базы, доступностью участков, предназначенных для промышленной заготовки. Кроме этого, не вся доступная к сбору площадь может давать урожай; ежегодная плодоносящая площадь съедобных грибов составляет 10–30 % от общей площади угодий. В связи с этим при расчете биологической урожайности был принят показатель среднегодовой биологической урожайности с учетом процента плодоносящих участков по типам леса (см. таблицу).

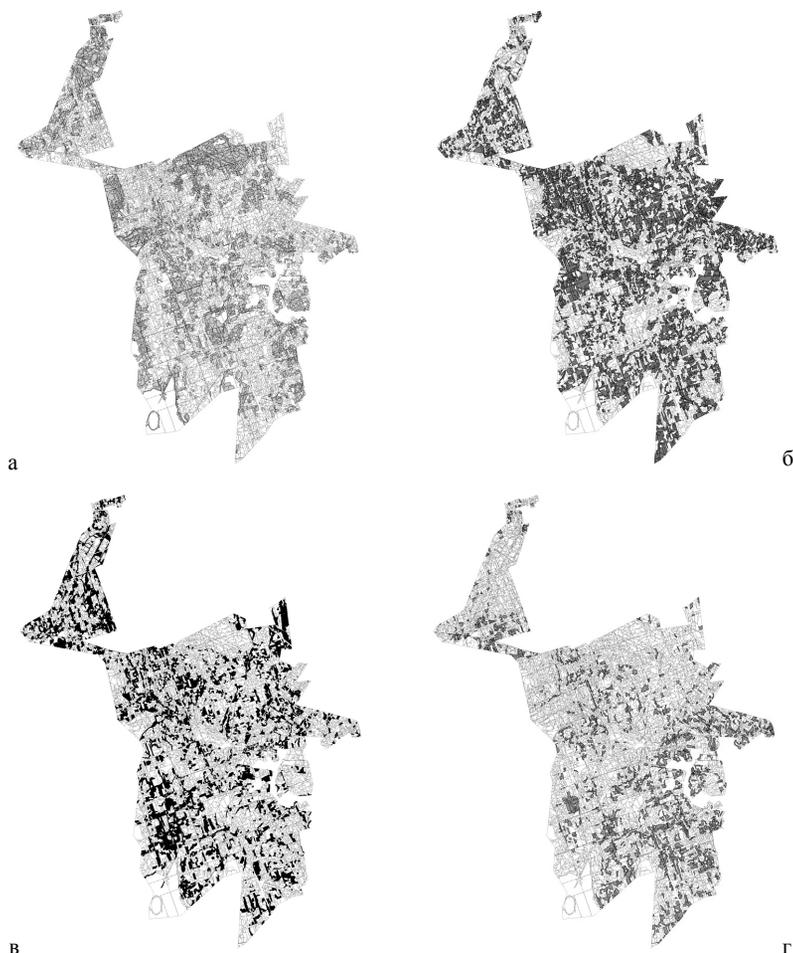


Рис. 1. Преобладающая порода: а – сосна, б – ель, в – береза, г – осина

## Урожайность грибов в различных типах леса

Гриб	Преобладающая порода	ТУМ	Тип леса	Возраст	Полнота	Площадь, га	Среднегодовая биологическая урожайность, кг/га	Общий урожай, кг
Белый гриб	С	A <sub>2</sub>	ЧС	40–100	0,4–0,5	592,1	10	5921
		B <sub>3</sub>	ЧС	40–100	0,4	212,2	10	2122
	Б	B <sub>3</sub>	ЧС	60–100	0,4	633,4	10	6334
		B <sub>4</sub>	ЧВ	60–100	0,4	218,3	10	2183
Подосиновик	С	A <sub>2</sub>	БР	40–60	0,4–0,7	2,4	10	24
		A <sub>2</sub>	ЧС	20–60	0,4–0,6	107,3	20	2146
	ОС	B <sub>3</sub>	ЧВ	20–60	0,4–0,6	25,1	30	753
		C <sub>2</sub>	КС	20–60	0,4–0,6	163,7	50	8185
Масленок	С	A <sub>4</sub>	ДЛ	50–120	0,4–0,6	449,2	10	4492
		B <sub>4</sub>	ДЛ	50–120	0,4–0,6	16,9	10	169
Лисичка	Е	A <sub>3</sub>	ЧВ	разный	0,4–0,7	4,1	30	123
		B <sub>3</sub>	ЧВ	разный	0,4–0,7	998,8	30	29 964
		C <sub>2</sub>	КС	разный	0,3–0,5	832,8	30	24 984
	Б	A <sub>3</sub>	БР	разный	0,8	5,8	30	174
		A <sub>3</sub>	ЧВ	разный	0,4–0,7	29,0	30	870
		B <sub>3</sub>	ЧВ	разный	0,4–0,7	458,7	30	13 761
C <sub>2</sub>	КС	разный	0,3–0,5	266,9	50	13 345		
Волнушка	Б	A <sub>2</sub>	БР	разный	0,7	5,8	30	174
	Е	C <sub>2</sub>	КС	разный	0,8	625,4	50	31 270
Подберезовик	Б	A <sub>2</sub>	БР	10–30	0,4–0,7	5,8	10	58
		B <sub>2</sub>	КС	10–30	0,4–0,7	9,3	10	93
		B <sub>2</sub>	ЧС	10–30	0,4–0,7	135,5	10	1355
		B <sub>3</sub>	ЧВ	10–30	0,4–0,7	140,0	10	1400
	Ос	B <sub>3</sub>	КС	10–30	0,4–0,7	7,9	10	79
		B <sub>3</sub>	ЧС	10–30	0,4–0,7	11,2	10	112
Итого								150 091

Территория Лисинского УОЛХ разнородна по породному и типологическому составу лесов, их возрастной структуре, поэтому различна и оценка по содержанию запасов съедобных грибов. Для более наглядного представления о размещении участков, где произрастают те или иные виды съедобных грибов, и их приуроченности к условиям произрастания были построены диаграммы и составлены тематические карты на основе типологических признаков с использованием лесостроительных материалов. Благодаря тематическим картам установлено, в каких кварталах лесничества целесообразно планировать заготовку грибов по видам.

Из диаграммы, представленной на рис. 2, видно, что максимальный биологический урожай белого гриба наблюдается в сосняке и березняке черничном свежем. Для данных типов леса он составляет 5921 и 6334 кг соответственно. Это объясняется преобладанием участков, соответствующих данным типам леса и типам условий

произрастания, при одинаковой урожайности рассмотренных типологических условий.

На тематической карте, построенной с применением ГИС, видно, что пространственное размещение лесных участков, где наблюдается произрастание белого гриба, характеризуется

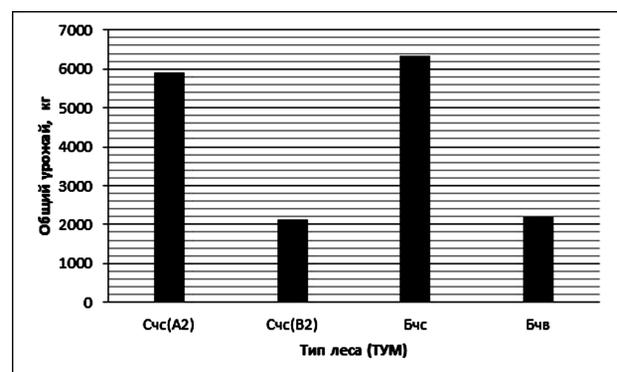


Рис. 2. Урожай белого гриба по типам леса

его равномерным распределением по площади лесничества (рис. 3). При этом данные участки отличает хорошая транспортная доступность, а также возможность объединения выделов в крупные участки для промышленной заготовки.



Рис. 3. Пространственное размещение белого гриба

Наибольшая урожайность подосиновика отмечена в осинниках кисличных, на лесных участках Лисинского УОЛХ она составляет 8185 кг (рис. 4). Это связано в первую очередь с наибольшим значением среднегодовой биологической урожайности в данном типе леса и с преобладанием данных условий произрастания по площади.

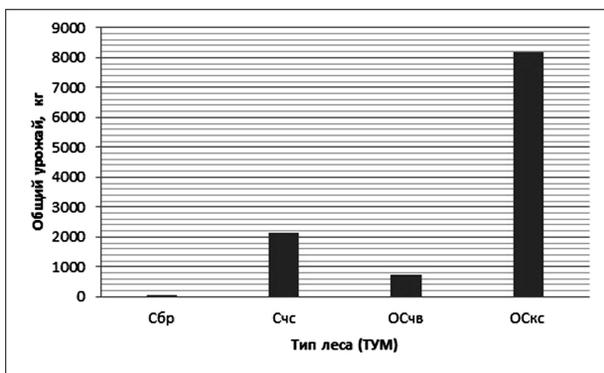


Рис. 4. Урожай подосиновика по типам леса

Анализ тематической карты показал, что лесные участки находятся в достаточном удалении друг от друга (рис. 5), что будет затруднять промышленную заготовку данного гриба. Однако, если ориентироваться только на определенный тип леса (осинник кисличный), то это позволит более рационально реализовать заготовительный процесс.



Рис. 5. Пространственное размещение подосиновика

В Лисинском УОЛХ возможны максимальные объемы заготовки лисички, которая преобладает в ельниках и березняках черничных (влажных) и кисличных (рис. 6).

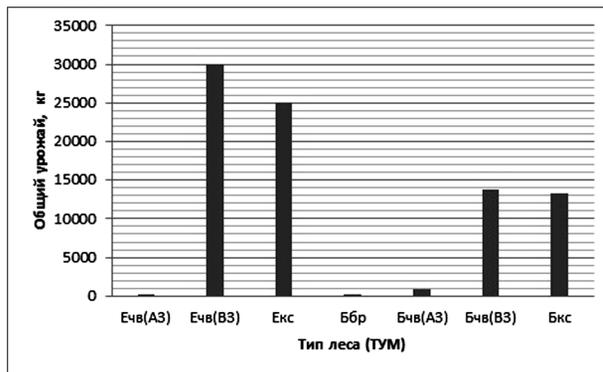


Рис. 6. Урожай лисички по типам леса

Размещение лисички по территории УОЛХ достаточно равномерное (рис. 7), с явным преобладанием в южной части, что обусловлено заболоченными низинными участками с влажными типами леса.

Урожай подберезовика в березняке и черничнике свежем и влажном составляет 1400 и 1355 кг соответственно (рис. 8). Участки с данными типами леса встречаются только в центральной и южной частях лесничества в достаточном удалении друг от друга (рис. 9).

Волнушка на территории Лисинского УОЛХ встречается преимущественно в ельниках-кисличниках и незначительно – в березняках-брусничниках (рис. 10). Урожай волнушки в ельниках-кисличниках составляет 31 270 кг.

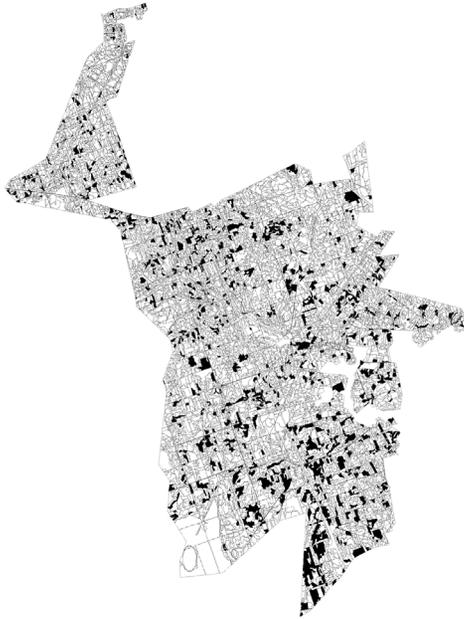


Рис. 7. Пространственное размещение лиси́чки

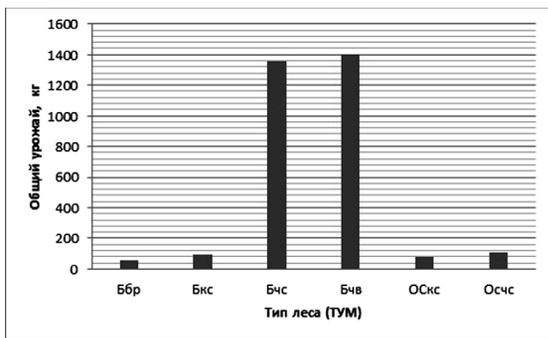


Рис. 8. Урожай подберезовика по типам леса



Рис. 9. Пространственное размещение подберезовика



Рис. 10. Пространственное размещение волнушки

Масленок встречается в сосняке долгомошном, его урожай составляет 4661 кг (рис. 11).

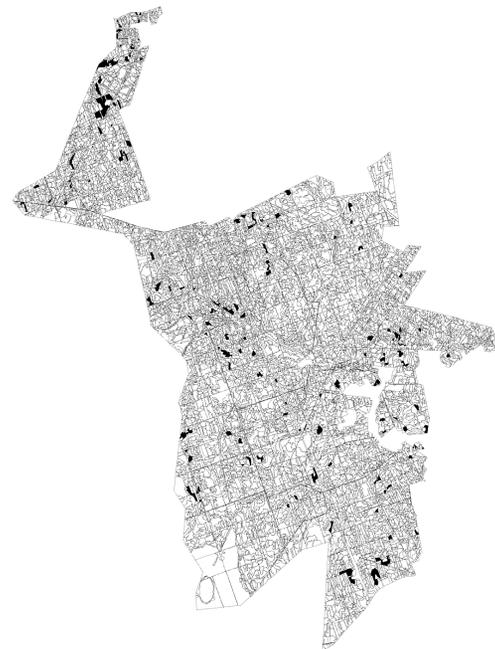


Рис. 11. Пространственное размещение масленка

Таким образом, на основе поведельной базы данных 2005 года в Лисинском УОЛХ определен видовой состав произрастающих съедобных грибов, выполнен расчет площади, занятой грибными угодьями, и произведен анализ распределения общей площади для основных видов в зависимости от типа леса и типа условий местопроизрастания. Можно сделать следующие выводы.

1. Рационально организованная заготовка грибов позволит: расширить объемы ценного

сырья, дополнительно получаемого при плановом освоении лесного фонда; улучшить благосостояние сельского населения; удовлетворить растущие потребности народного хозяйства при стабилизации площади вырубаемых лесов и принести существенные дополнительные доходы в бюджеты местных администраций.

2. Суммарная биологическая урожайность основных видов съедобных грибов, которая была определена с применением геоинформационных технологий, составляет 150 091 кг.

3. Сравнительная комплексная оценка типологических условий показала приуроченность грибных угодий к следующим типам леса: сосняк-черничник, ельник-черничник, березняк-черничник, осинник-кисличник.

4. Созданная ГИС позволила выявить наиболее ценные районы в отношении изученных видов грибов.

5. Геоинформационные системы могут быть использованы в лесном ресурсоведении как инструмент для инвентаризации грибных угодий, мониторинга и отражения текущего состояния продуктивности участков, предназначенных для промышленной заготовки грибов, а также с целью их охраны и организации рациональной заготовки.

6. Предложенные технологии могут быть использованы для определения урожайности таких практически значимых видов побочного пользования, как дикорастущие ягоды и лекарственное сырье.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А. С., Никифоров А. А. Анализ характеристик лесного фонда Лисинской лесной дачи Лисинского учебно-опытного лесхоза с 1841 по 1993 годы по картографическим материалам с применением ГИС-технологий // 200 лет практической подготовки студентов в Лисинском учебно-опытном лесхозе: Материалы всероссийской конф. СПб.: СПбЛТА, 2005. С. 74–90.
2. Алексеев А. С., Никифоров А. А. Анализ динамики лесного фонда Лисинской лесной дачи с 1841 по 2005 годы с применением ГИС-технологий // Современные проблемы устойчивого управления лесами, инвентаризации и мониторинга лесов: Материалы междунар. науч.-техн. конф. СПб., 2006. С. 16–24.
3. Геоинформационные системы / Ю. Ю. Герасимов, С. А. Кильпелайнен, Г. А. Давыдков. Йоэнсуу: Изд-во Университета Йоэнсуу, 2001. 201 с.
4. Жукова А. И., Григорьев И. В., Григорьева О. И., Ледяева А. С. Лесное ресурсоведение: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2007.
5. Инструкция о порядке создания и размножения лесных карт. Государственный комитет СССР по лесному хозяйству. М., 1987. 80 с.
6. Лесные географические информационные системы: Методические указания. Петрозаводск, 1998. 58 с.
7. Лисино. 200 лет служения лесам России / Сост. А. В. Селиховкин, Б. В. Бабиков, А. С. Алексеев, А. А. Никифоров и др. СПб.: ЛТА, 2009. 224 с.
8. Никифоров А. А. Разработка информационной системы Лисинского УОЛХ с применением ГИС-технологий // Сборник докладов молодых ученых на ежегодной науч. конф. Санкт-Петербургской лесотехнической академии. Вып. 6. СПб.: СПбЛТА, 2002. С. 54–59.
9. Никифоров А. А., Жукова А. И. Анализ распределения дикорастущих ягодников по типам леса на территории Лисинского УОЛХ с применением ГИС-технологий // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2010. № 191. С. 4–13.
10. Руководство по учету и оценке второстепенных лесных ресурсов и продуктов побочного лесопользования / Л. Е. Курлович и др. М.: ВНИИЛМ, 2003. 316 с.
11. Цветков В. Я. Геоинформационные системы и технологии. М.: Финансы и статистика, 1998. 288 с.
12. MapInfo Professional: Руководство пользователя. N. Y.: MapInfo Corporation, 2007. 618 p.
13. MapInfo Professional. Справочник. N. Y.: MapInfo Corporation, 2007. 552 p.

**МАКСИМ НИКОЛАЕВИЧ ТРИШКИН**аспирант, Университет Восточной Финляндии  
*maxim.trishkin@uef.fi***ЕВГЕНИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ ЛОПАТИН**доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Университет Восточной Финляндии, консалтинговая компания Forgis Oy  
*eugene.lopatin@uef.fi***ОЛЬГА ИВАНОВНА ГАВРИЛОВА**кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесного хозяйства лесинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет  
*ogavril@psu.karelia.ru*

## ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ВЕДЕНИЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ СЕРИЙ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В работе предложен и протестирован новый метод оценки устойчивости ведения лесного хозяйства по принципам и критериям Российского национального стандарта сертификации лесного попечительского совета (FSC), позволяющий оценить 1/3 индикаторов стандарта методами дистанционного зондирования.

Ключевые слова: устойчивость, лесное хозяйство, дистанционное зондирование, лесная сертификация

В настоящее время понятие «устойчивое лесопользование», основанное на соблюдении экологических, экономических и социальных принципов ведения лесного хозяйства, не вызывает вопросов у большинства специалистов, работающих в лесном бизнесе. При этом одним из формальных критериев устойчивости лесопользования и продуктов, произведенных этими лесами, находящимися под устойчивым управлением, является наличие сертификата по системам FSC (Forest Stewardship Council) или PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification schemes).

Сертификация лесов и лесопроductии по программе FSC начала работать гораздо раньше. Так, в 2011 году общая площадь FSC-сертифицированных лесов в России достигла почти 30,5 млн га. По данному показателю наша страна прочно удерживает второе место в мире после Канады. Кроме того, Россия стабильно удерживает лидерство по самым крупным сертификатам в мире, выданным на лесопользование. Так, один из сертификатов, выданных в 2011 году, покрывает 3,7 млн га лесной аренды одного из сертифицированных предприятий [1].

Основным инструментом при принятии решения о выдаче сертификата PEFC или FSC является проведение полевого аудита. При этом есть ряд ограничений, в результате чего оценка качества ведения лесного хозяйства может стать субъективной:

1. Площадь полевого аудита является ограниченной, и за время, отведенное на аудит, невозможно проследить все участки, на которых предприятие ведет лесное хозяйство.
2. Оценка устойчивости ведения лесного хозяйства по принципам и критериям зависит от опыта аудитора и ряда факторов, прямо или косвенно влияющих на его решение.

3. Реальное состояние крупных лесных массивов, особенно если они расположены в разных концах мира, определить сложно.

Учитывая, что с 2009 года все спутниковые снимки Landsat с пространственным разрешением 15–90 м за период с 1974 по 2011 год распространяются бесплатно, стало возможным проведение анализа временных серий космических снимков на любом участке поверхности суши. При этом анализ существующих данных позволяет сделать вывод, что для любого участка бореальных лесов можно подобрать набор из 20–30 безоблачных снимков за период с 1974 по 2011 год. Это позволяет проводить анализ динамики изменения лесного покрова практически ежегодно.

Целью нашей работы является разработка методики оценки устойчивости ведения лесного хозяйства на основе анализа временных серий данных дистанционного зондирования Landsat. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Проанализировать Российский национальный стандарт лесной сертификации FSC для определения индикаторов, которые можно достоверно оценить по временным сериям данных дистанционного зондирования.
2. Проанализировать по выявленным индикаторам изменение практики ведения лесного хозяйства до и после получения сертификата FSC.
3. Разработать полностью автоматическую систему анализа, позволяющую производить поиск, получение и обработку необходимых данных дистанционного зондирования на любом участке местности.

## АНАЛИЗ ИНДИКАТОРОВ УСТОЙЧИВОСТИ ЛЕСОПОЛЬЗОВАНИЯ

Анализ литературы и Российского национального стандарта лесной сертификации FSC показал, что в стандарте используются 306 индикаторов [3], из них уникальными являются 148. Кроме того, 158 индикаторов опираются на другие или перекликаются с ними. Из 148 уникальных индикаторов дистанционными методами могут быть проверены 46 (табл. 1). Анализ всей совокупности индикаторов позволил выявить, что 15 % индикаторов могут быть оценены на основе анализа временных серий косми-

ческих снимков и геопространственного моделирования результатов их обработки. В связи с тем, что часть индикаторов стандарта перекликаются с другими или основаны на них, можно сделать вывод, что около 1/3 от их общего количества в стандарте могут быть проверены дистанционными методами. Таблица индикаторов (табл. 1) была сконвертирована в логическое дерево решений в программном продукте Definiens Image Intelligence Suite. Данный программный продукт позволяет проводить объектно-ориентированное дешифрирование временных серий космических снимков.

Таблица 1

Индикаторы Российского национального стандарта сертификации лесопользования FSC-STD-RUS-01 2008-11, которые могут быть оценены дистанционно

Индикатор стандарта FSC	Значение	Метод оценки
Индикатор 1.5.1 и др. Компания должна осуществлять систему мер по выявлению, документированию и пресечению незаконных и несанкционированных видов деятельности на сертифицируемой территории	Выявление незаконных фактов рубки на основе серий данных дистанционного зондирования	Картографирование рубок с последующим анализом направленных на выявление: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Вид рубки</li> <li>• Площадей рубок, превышающих максимально допустимые размеры</li> <li>• Нарушение сроков примыкания лесосек</li> <li>• Общая площадь рубок</li> </ul>
Индикатор 6.2.4– 6.2.7 и др. Предприятие должно проводить полевые обследования и/или использовать другие методы выявления ключевых биотопов, реализовывать меры по сохранению редких и находящихся под угрозой видов	Выделение ключевых биотопов в рубках (определение размера группы, кол-ва отдельных единиц при сплошных рубках)	Картографирование сплошных рубок: <ul style="list-style-type: none"> <li>• число ключевых биотопов,</li> <li>• площадь ключевых биотопов от площади вырубки</li> </ul>
Индикатор 6.3.1. Предприятие должно вести регулярный учет изменений экологических характеристик состояния лесного участка	Определение лесопокрытой площади, состава, площади гарей и погибших насаждений и др.	Изменение во времени основных показателей лесного участка: <ul style="list-style-type: none"> <li>• лесопокрытая площадь,</li> <li>• состав древостоев,</li> <li>• площадь погибших насаждений,</li> <li>• площадь гарей,</li> <li>• распределение древостоев по группам классов возраста</li> </ul>
Индикатор 6.3.6. При отводе лесосек необходимо учитывать естественные границы выделов – ландшафт	Форма лесосек должна совпадать с формой выдела	Правильная форма, как правило, является индикатором того, что естественные границы не соблюдаются в рубках
Индикатор 6.3.4 и др. Должна существовать программа по переходу от сплошных рубок больших размеров к узколесосечным, постепенным (многоприемным) рубкам и/или выборочным рубкам	Присутствие выборочных / постепенных рубок	Динамика площадей по видам рубок за анализируемые отрезки времени
Индикатор 6.3.9–6.3.12, 6.3.14 и др. Предприятие должно: при сплошных рубках (а также после последнего приема постепенных рубок) площадью более 10 га сохранять мозаичный лесной ландшафт в виде полос и куртин леса, включающих редкие, нетипичные участки лесных насаждений, элементы девственного леса	На каждые 10 га сплошной вырубки необходимо оставлять не менее одной куртины (полосы) леса, чей размер не менее чем в полтора раза превышает среднюю высоту оставляемого древостоя	Картографирование по космоснимкам размеров лесосек и количество необходимых куртин в соответствии с размером рубки
Индикатор 6.3.5 и др. Предприятие должно имитировать естественную динамику леса при проведении лесохозяйственных мероприятий	В соответствии со стандартом не рекомендовано применять вырубки, превышает по площади 30 га	Определение размеров лесосек и видов рубок
Индикатор 6.3.4. Предприятие должно принять меры по лесовосстановлению деградированных в результате хозяйственной деятельности лесных участков	Выявление участков, которые деградировали в результате хозяйственной деятельности	Картографирование восстановления участков рубок по временным сериям данных дистанционного зондирования
Индикатор 5.5.7. Предприятие должно вести лесохозяйственные мероприятия, которые не приведут к эрозии или заболачиванию почв	Оценка мест заготовки	Картографирование эрозионно опасных участков на основе анализа цифровой модели рельефа, сопоставление с картами проведенных рубок, картографирование заболоченных рубок

Продолжение табл. 1

Индикатор стандарта FSC	Значение	Метод оценки
Индикатор 5.5.8. Предприятие должно вести свою хозяйственную деятельность, которая не будет негативно влиять на водоохранные функции лесов водосборных бассейнов в пределах сертифицируемой территории	Соответствие водоохранных зон требованиям лесного законодательства и сертификации. Так, водоохранная зона для рек < 10 км – 50 м, < 10–50 км – 100 м, > 50 км – 200 м	Картографирование водоемов, расчет буферных зон, картографирование рубок в пределах буферных зон
Индикатор 5.5.6. Предприятие должно вести шадящий режим лесохозяйственных мероприятий внутри водоохранных зон всех типов.	Запрещение сплошных рубок в водоохранной зоне, наличие сплошной рубки в водоохранной зоне (нарушение)	Картографирование водоемов, расчет буферных зон, картографирование рубок в пределах буферных зон.
Индикатор 5.5.1. Предприятие должно установить водоохранные зоны по соответствующим водотокам	Выделение водоохранных полос вокруг болот и водотоков (в том числе облесенных) можно выделить в виде особо защитных участков (ОЗУ) или неэксплуатационных площадей (НЭП)	Определение наличия ОЗУ и НЭП вокруг болот и водотоков
Индикатор 5.3.4, 6.2.6–6.2.10 и др. Предприятие должно определить свою хозяйственную деятельность для исключения уничтожения ценных местообитаний	Лесохозяйственная деятельность предприятия должна ограничивать рубки в ценных местообитаниях	При наличии карты ценных местообитаний возможно сравнение их расположения и мест расположения хозяйственной деятельности за ревизионный период
Индикатор 3.3.5. В соответствии со стандартом FSC предприятие должно определить ценные места в результате консультаций с коренными народами.	Определение расположения ценных мест для коренного населения на основе публичного отчета по лесной сертификации	При наличии карты ценных мест для коренного населения в публичном отчете возможно сравнение их расположения и мест расположения хозяйственной деятельности за ревизионный период
Индикатор 9.4.1. Предприятие должно принять эффективные меры по сохранению и усилению характеристик, ЛВПЦ должна оцениваться на основе результатов ежегодного мониторинга	Определение расположения и другой информации о ЛВПЦ на территории предприятия	При наличии карты ЛВПЦ возможно сравнение их расположения и мест расположения хозяйственной деятельности за ревизионный период

### «МОДЕЛЬНЫЙ ЛЕС ПРИЛУЗЬЕ»

Концепция модельных лесов в России начала активно развиваться с 1990-х годов. Прилузский лесхоз в Республике Коми получил статус «Модельный лес Прилузье» в 1996 году. Территория модельного леса включает около 800 000 га леса в Республике Коми. Некоторые из модельных лесов послужили платформой для тестирования основных принципов и критериев сертификации. В 1999 году тестовый аудит по сертификации FSC был проведен на территории модельного леса. В течение следующих 3 лет велась активная подготовка по исправлению несоответствий и приведению системы менеджмента предприятия в соответствие с требованиями стандарта FSC. Как результат, в 2003 году «Модельный лес Прилузье» получил сертификат лесоправления по системе лесного попечительского совета. В 2008 году «Модельный лес Прилузье» подтвердил право владения сертификатом лесоправления еще на 5 лет [2].

### ДААННЫЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Выбранный тестовый участок (path 172, row 18 в системе WRS-2 программы Landsat) попадает в границы проекта «Модельный лес Прилузье». Для анализа использовали малооблачные снимки (облачность менее 20 %), полученные спутниками Landsat 5 и Landsat 7. Спутник Landsat 5 (запущен 1 марта 1984 года) позволяет получать снимки поверхности Земли с пространственным разрешением 30 м в 6 спектральных диапазонах. Спутник Landsat 7 (запущен

15 апреля 1999 года) позволяет получать снимки поверхности Земли с пространственным разрешением 30 м в 6 спектральных диапазонах и 15 м в пахроматическом режиме. В настоящее время спутник Landsat 7 функционирует с отклонениями в работе камеры и фактически непригоден для качественного картографирования лесного покрова.

Временные серии данных дистанционного зондирования спутника Landsat (табл. 2) на тестовом участке «Модельный лес Прилузье» были обработаны по единой методике (3), основанной на знании принципов изменения спектральных характеристик лесного покрова при ведении лесного хозяйства (на основе анализа 5-спектрального канала). Основными картографируемыми и анализируемыми во времени параметрами были:

1. Рубки с расчетом площадей и классификацией по видам.
2. Сроки примыкания лесосек.
3. Число и площадь ключевых биотопов в пределах сплошных рубок.
4. Лесопокрытая площадь.
5. Состав древостоев (хвойные, лиственные).
6. Площадь погибших насаждений.
7. Площадь гарей.
8. Распределение древостоев по группам классов возраста (молодняки, средневозрастные, спелые и перестойные).
9. Форма лесосек.
10. Период восстановления рубок.
11. Рубки в эрозионно опасных участках, определенных по цифровой модели рельефа.

12. Заболоченные вырубки.
13. Рубки в пределах буферных зон водоемов.
14. Оставленные особо защитные участки и неэксплуатационные площади вдоль болот и водотоков.
15. Сопоставление мест рубок с картой ценных местообитаний.
16. Сопоставление мест рубок с картой интересов местного населения.
17. Сопоставление мест рубок с картой лесов высокой природоохранной ценности.

Таблица 2

Использованные данные дистанционного зондирования

Период	Дата съемки	Спутник
До получения FSC-сертификата	22.02.1985	Landsat 5
	22.05.1986	Landsat 5
В процессе получения FSC-сертификата	14.04.2000	Landsat 7
	17.08.2001	Landsat 7
После получения FSC-сертификата	26.04.2006	Landsat 5
	15.05.2007	Landsat 5
	22.04.2009	Landsat 5
	22.07.2010	Landsat 5

## ВЫВОДЫ

Статистический анализ результатов обработки данных дистанционного зондирования за периоды до, в процессе и после получения FSC-сертификата по 17 параметрам не позволил выявить статистически значимые отличия между этими этапами.

Несмотря на множество усилий по ведению устойчивого лесного хозяйства по принципам и критериям FSC, индикаторы в пределах тестового участка «Модельный лес Прилузье», определенные дистанционно, не показали в целом увеличения устойчивости лесопользования.

Результаты проведенного исследования легли в основу полностью автоматической системы анализа, позволяющей производить поиск, получение и обработку необходимых данных дистанционного зондирования на любом участке местности. Использование этой системы позволит увеличить площадь исследования и проанализировать другие модельные леса, созданные в России за период с 1990 года. Система может стать основой для проведения независимого мониторинга устойчивости ведения лесного хозяйства предприятиями лесного комплекса России.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лесной попечительский совет Россия. Площадь FSC сертифицированных лесов в России превысила 30 млн га [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://fsc.ru/index.php?mod=news&id=197>
2. Модельный лес «Прилузье». Коми региональный некоммерческий фонд Серебряная Тайга [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.silvertaiga.ru/page/109/>
3. Российская Национальная Инициатива Лесного Попечительского совета. Российский Национальный Стандарт Добровольной Лесной Сертификации по Схеме Лесного Попечительского Совета. Одобрен Координационным советом Национальной инициативы ЛПС от 25.12.2007 года [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://fsc.ru/pdf/RNS.pdf>
4. Köhl M., Magnussen S., Marchetti M. Sampling Methods, Remote Sensing and GIS Multiresource Forest Inventory. 2006.

АННА ИГОРЕВНА ЧЕРКАШИНА

ассистент кафедры землеустройства факультета землеустройства, Государственный университет по землеустройству (г. Москва)  
anna@infokad.ru

## ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗЕМЛЕУСТРОИТЕЛЬНОЙ И КАДАСТРОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В РЕГИОНЕ

В статье раскрыто содержание информационного обеспечения землеустроительной и кадастровой деятельности, показана эффективность проведения кадастровых и землеустроительных работ на основе применения информационно-коммуникационных технологий.

Ключевые слова: кадастровая деятельность, кадастровые работы, землеустроительное обеспечение, информационно-коммуникационные технологии

Эволюция информационного обеспечения землеустроительной и кадастровой деятельности началась в 1990-е годы, когда появились первые мобильные землеустроительные и геодезические бригады, которые занялись созданием планов границ земельных участков. Но с непрерывным увеличением объема работ и требований к предоставляемой на утверждение документации все внимание переключалось на электронные возможности и способы оформления землеустроительных дел, а впоследствии и документов для постановки на кадастровый учет объектов недвижимости. Таким образом, ранее создавались отдельные программные продукты для обработки геодезических изысканий, для маркшейдерского обеспечения, землеустроительных и проектных работ с возможностями обработки результатов межевания, быстрого оформления землеустроительной документа-

ции. В настоящее время необходима подготовка межевого, технического планов, комплексных проектов землеустройства.

Основываясь на динамике развития современных информационных ресурсов, мы создали интернет-портал «Кадастровые инженеры. Информационно-коммуникационный портал», в котором объединены и логически организованы полезные информационно-аналитические электронные системы, справочные базы данных и другие информационные ресурсы, а также созданы условия взаимодействия заказчика землеустроительных и кадастровых работ и исполнителя для осуществления кадастровой, землеустроительной деятельности с учетом интернет-технологий и создания индивидуальных рабочих пространств для формирования комплексных проектов, документов кадастрового учета и регистрации прав (рис. 1).



Рис. 1. Информационная схема построения портала «Кадастровые инженеры. Информационно-коммуникационный портал»

Логическая и структурная организация, классификация и типология информационных ресурсов в едином информационном пространстве (портале) являются основой построения и обоснования усиления землеустроительного обеспечения кадастровой деятельности в регионе. Интернет-портал создавался в интересах некоммерческого партнерства «Западно-Уральский союз кадастровых инженеров». Данный сайт ориентирован на землевладельцев (землепользователей) – заказчиков кадастровых и землеустроительных работ, которые желают зарегистрировать свои права на объект недвижимости, уточнить сведения об объектах недвижимости, обменять или объединить земельные участки, находящиеся в собственности.

Информационно-коммуникационный портал создан с целью упрощения ведения землеустроительных и кадастровых работ с учетом инновационных интернет-технологий, сочетающих в себе комплекс информационных ресурсов, обеспечение деятельности кадастрового инженера, а также получение достоверных сведений и проведение необходимых мероприятий по вопросам землеустроительного обеспечения кадастровых работ.

Портал является площадкой для зарегистрированных пользователей, а именно кадастровых инженеров и заказчиков кадастровых и землеустроительных работ, для взаимодействия между ними. Кроме того, портал – центр получения информации для всех участников процесса по актуальным вопросам в сфере землеустроительной и кадастровой деятельности, анализа нормативно-правовой базы, аккумулирования, обмена и распространения знаний с целью качественного осуществления кадастровой и землеустроительной деятельности (рис. 2).

Нами были проведены расчеты эффективности использования системы при осуществлении кадастровых работ на примере расчета трудозатрат при выполнении подготовительных кадастровых работ (см. таблицу).

Как показывают расчеты, время, необходимое для проведения подготовительных работ, с использованием информационного портала сокращается на 30 %. Аналогичные расчеты были проведены для подготовки межевого плана, комплексного проекта землеустройства, которые показали сокращение срока выполнения работ в 1,5–2 раза.



Рис. 2. Возможности портала для кадастровых инженеров и землеустроительных организаций

Расчет затрат времени для проведения  
подготовительных кадастровых работ, чел./день (чел./час)

Наименование операции	Стандартный способ	Портал
Подготовка и оформление доверенности на право ведения работ от лица собственника	1,5 (12,000)	0,7 (5,600)
Сбор и изучение документов: 1. Сбор сведений ГКН. 2. Сбор удостоверяющих права на землю документов (при их отсутствии – правоустанавливающих). 3. Сбор и изучение каталогов (списков) координат пунктов опорной межевой сети (ОМС) и иных исходных геодезических пунктов. 4. Сбор и изучение адресов лиц, права которых могут быть затронуты при проведении работ.	4,8 (38,400)	2,4 (19,200)
А. Составление бумажного документа, представляемого заявителем при личном обращении: 1. Заполнение бланка документа. 2. Печать документа на принтере. 3. Визирование подписью. 4. Обращение в орган кадастрового учета (ОКУ). 5. Обслуживание в ОКУ. 6. Обращение в ОКУ.	(40,542) (0,250) (0,021) (0,021) (0,125) (40,000) (0,125)	–
В. Составление бумажного документа путем его отправки по почте: 1. Заполнение бланка документа. 2. Печать документа на принтере. 3. Визирование подписью. 4. Сканирование. 5. Отправка / получение почты. 6. Обслуживание в ОКУ.	(40,324) (0,250) (0,021) (0,021) (0,021) (0,011) (40,000)	(40,282) (0,250) (0,021)
С. Составление электронной формы документа путем заполнения формы запроса: 1. Заполнение формы запроса. 2. Печать документа на принтере. 3. Визирование подписью. 4. Обращение в ОКУ. 5. Обслуживание в ОКУ. 6. Получение ответа.	(40,334) (0,042) (0,021) (0,021) (0,125) (40,000) (0,125)	(40,063) (0,042) (0,021)
Д. Составление в электронной форме посредством отправки XML-документа с использованием web-сервисов: 1. Заполнение электронной формы. 2. Визирование подписью. 3. Обслуживание в ОКУ. 4. Получение ответа.	–	(40,084) (0,042) (0,021) (40,000) (0,021)
Оформление платежного документа: 1. Оплата через банк. 2. Онлайн-перевод средств с web-счета.	(0,125)	(0,021)
Итого 1 (А/Д):	11,43 (91,445)	8,11 (64,905)
Итого 2 (В):	11,36 (90,849)	8,14 (65,103)
Итого 3 (С):	11,36 (90,859)	8,11 (64,884)
ВСЕГО (в среднем)	11,4	8,1

Таким образом, проведенные исследования и расчеты свидетельствуют об эффективности информационного обеспечения кадастровой и землеустроительной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков С. Н., Варламов А. А., Купчиненко А. В. и др. Землеустройство и кадастр недвижимости: Учеб. пособие. М.: Колос, 2010. 336 с.
2. Корнейчук Б. В. Информационная экономика: Учеб. пособие. СПб.: Питер, 2006. 400 с.
3. Сборник цен и общественно необходимых затрат (ОНЗТ) на изготовление проектной и изыскательской продукции землеустройства, земельного кадастра и мониторинга земель. М.: Русслит, 1996. 320 с.

**ЮРИЙ ЮРЬЕВИЧ ГЕРАСИМОВ**

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

**АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ СЕЛИВЕРСТОВ**

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры тяговых машин лесинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет  
alexander@psu.karelia.ru

**ЮРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ СУХАНОВ**

старший преподаватель кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет  
yurii\_ptz@bk.ru

**ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ СЮНЁВ**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тяговых машин лесинженерного факультета, проректор по учебной работе, Петрозаводский государственный университет  
siounev@psu.karelia.ru

## ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ДРЕВЕСНОГО ТОПЛИВА ИЗ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ

В статье рассмотрены основные и наиболее важные факторы, которые следует учитывать при проектировании технологических процессов заготовки древесной биомассы и производстве топливной щепы: эксплуатационные затраты, качество древесного топлива, человеческий фактор, фактор взаимодействия между машинами в технологической цепочке, экологические факторы.

Ключевые слова: биоэнергетика, порубочные остатки, дровяная древесина, тонкомерная древесина, пневая и корневая древесина, топливная щепа

В настоящее время во многих странах мира растет интерес к биоэнергетике, находит применение твердое, жидкое и газообразное биотопливо. В Европе на мини-ТЭЦ и в котельных, расположенных недалеко от источников древесного сырья, используется твердое древесное топливо в виде щепы, брикетов и гранул. Наблюдается тенденция снижения потребления колотых дров.

В качестве сырья для производства древесного биотоплива используются следующие источники биомассы [6], [10]:

- неделовая древесина: низкокачественная, малоценная и дровяная;
- тонкомерная древесина от рубок ухода и специально выращиваемая для энергетических целей;
- порубочные остатки: вершины, ветви, сучья, обломки стволов, откомлевка;
- пневая и корневая древесина.

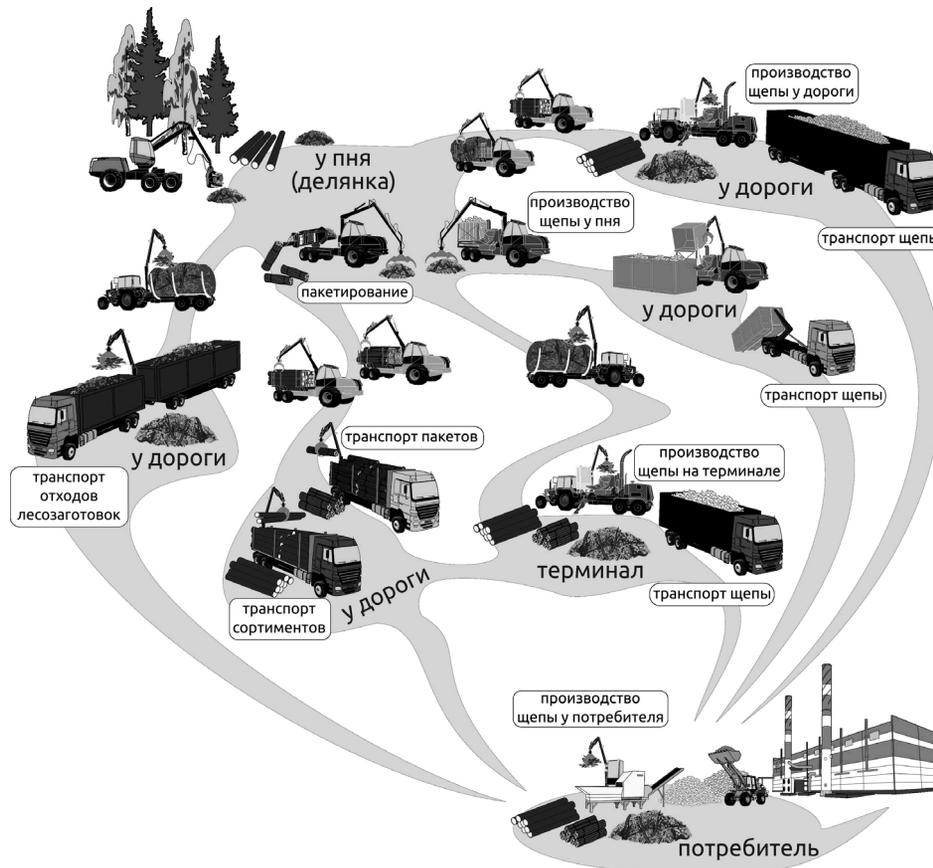
Российская Федерация обладает огромным потенциалом в области лесной биоэнергетики. В лесах России можно заготавливать значительные объемы древесной биомассы из неделовой древесины [6], [7]. На Северо-Западе России выход неделовых сортиментов составляет для ели 15–25 %, для сосны – 14–25 %, для березы – 46–74 %, для осины – 56–78 % [12]. При этом стоимость энергии из топливной щепы, полученной из неделовой древесины, значительно ниже, чем из щепы, в качестве сырья для которой выступают

ют порубочные остатки, пневая и тонкомерная древесина.

В европейских странах планирование производства древесного топлива тесно интегрируется во все системы лесопользования, планирования и логистики лесозаготовок, управления качеством и сертификации лесного хозяйства [11]. Технологические процессы заготовки древесной биомассы для производства древесного топлива разделяются на три следующие группы [3]:

- комплексная заготовка деловой и топливной древесины на рубках главного пользования;
- специальная заготовка древесной биомассы на некоммерческих рубках ухода, вырубке плантаций энергетических деревьев и расчистке линейных объектов;
- заготовка пневой и корневой древесины.

На рисунке представлен комплексный метод, когда наряду с заготовкой деловой древесины при сплошнолесосечной сортиментной технологии осваиваются лесосечные отходы. Операция измельчения древесной биомассы и отходов лесозаготовок может выполняться на делянке, на погрузочной площадке у лесовозной дороги или на предприятии, где будет использоваться щепа (ТЭЦ, котельная). Положение рубительной машины зависит от того, в каком виде осуществляется транспортировка древесной биомассы до конечного потребителя: в виде щепы, обвязанных пакетов и насыпных отходов лесозаготовок, низкосортной и дровяной древесины.



Комплексная технология освоения отходов лесозаготовок для энергетических целей при сплошнолесосечной сортиментной технологии

Специальная заготовка древесной биомассы используется, как правило, при заготовке тонкомерных деревьев с кроной, в основном при уходе за молодняком. Технология заготовки древесной биомассы из пней и корней осуществляется главным образом на участках рубок главного пользования с рыхлыми минеральными почвами.

При проектировании технологических процессов производства древесного топлива из древесной биомассы необходимо принимать во внимание ряд факторов: эксплуатационные затраты, качество древесного топлива, человеческий фактор, фактор взаимодействия между машинами в технологической цепочке, экологические факторы [1], [13].

Знание эксплуатационных затрат на лесосечные и транспортные работы и производство древесного топлива является необходимым условием эффективного планирования системы поставок [10]. Решением транспортных задач занимается логистика, которая позволяет оптимизировать управление процессом транспортировки с делянки до потребителя [9]. Оптимальное решение логистической задачи позволяет существенно снизить прямые затраты на производство топливной щепы, так как затраты на трелевку древесной биомассы и транспортировку древес-

ного топлива до потребителя составляют значительную часть всех затрат.

При оценке затрат необходимо принимать во внимание технические характеристики лесозаготовительных машин, определяющие пределы их применения в различных условиях: производительность, грузоподъемность, проходимость, устойчивость, скорость, маневренность, надежность, универсальность, которая определяет возможность ее использования на разных фазах технологического процесса, и т. д. Степень загрязненности древесной биомассы инородными материалами, такими как грязь, песок, камни, металлические предметы, также влияет на эксплуатационные затраты, так как при повреждении ножей рубительной машины может потребоваться их замена или заточка. Тупые ножи снижают производительность рубительной машины и не позволяют получить щепу требуемых размеров.

Следующим важным фактором является качество древесного топлива (щепы). Оно зависит от вида источника биомассы и методов ее измельчения, погрузки, разгрузки и хранения, а также от многих факторов: влажности, зольности, теплотворной способности, энергетической плотности, содержания хвои, удельных выбросов  $\text{CO}_2$ , размеров частиц [5]. Наиболее важны-

ми показателями качества щепы являются ее влажность и зольность.

Повышенная влажность щепы может привести к снижению цены на топливо, в то время как низкая влажность может принести дополнительные доходы. Уровень влажности оказывает влияние на величину теплотворной способности, свойства щепы в период хранения и затраты на транспортировку. Чем больше влажность материала, тем меньше объем груза топлива. Высокое или неравномерное содержание влаги усложняет процесс сжигания топлива.

Зольность чистой древесины составляет 0,5 %; зольность коры в 6–7 и листвы в 6–11 раз выше зольности древесины [13]. Таким образом, чистая зольность щепы из целых деревьев составляет около 1 %, щепы из отходов лесозаготовок – 2 %, или 4–6 и 8–12 кг/м<sup>3</sup> топлива соответственно. На практике выход золы с примесями выше, так как щепа может содержать примеси, например песок. Таким образом, при лесозаготовительных работах необходимо обеспечить получение максимально чистой биомассы. Эту задачу облегчает, например, осуществление трелевки древесины форвардерами.

При производстве древесного топлива следует учитывать и человеческий фактор. Как показали проведенные нами исследования, квалификация оператора оказывает значительное влияние на производительность лесосечной машины [2].

Для оценки этого фактора используется показатель, учитывающий количество создаваемых технологией рабочих мест на 1 МВт энергии, полученной из топливной щепы:

$$P_s = P_{se} + P_{so},$$

где  $P_{se}$  – число рабочих мест высокой квалификации, создаваемых при внедрении технологии;  $P_{so}$  – число рабочих мест «обычной» квалификации.

Кроме того, необходимо учитывать сложность труда, долю ручного труда и травмоопасность, что характеризуется коэффициентом интегральной тяжести труда, рассчитываемым для каждой машины в технологической цепочке [8]. Для сравнения систем лесозаготовительных машин в работе [14] используются критерии Вальда, Лапласа или Ходжа-Лемана. Так, в соответствии с минимаксным критерием Вальда лучшей считается та система машин, в которой наибольшая тяжесть труда из всех видов работ в этой системе окажется меньше:

$$W = \min_i \cdot \max_j \cdot I_{ij},$$

где  $i$  – число рассматриваемых систем машин;  $j$  – число рабочих мест в каждой системе машин;  $I_{ij}$  – интегральная тяжесть труда на  $j$ -м рабочем месте в составе  $i$ -й системы машин.

Взаимодействие между машинами, представляющее собой технологическую цепочку по заготовке древесной биомассы, производству и

транспортировке древесного топлива и включающее несколько видов машин, осуществляющих трелевку, измельчение, а также транспортировку, является важным фактором технологического процесса. Так как в качестве основной машины при производстве древесного топлива выступает рубительная машина, от ее работы будет зависеть производительность всего процесса.

Прямое взаимодействие осуществляется, когда производится перемещение древесной биомассы или топлива непосредственно из одной машины или транспортного средства в другие без промежуточного хранения, например, когда пневматическое устройство рубительной машины перегружает щепу непосредственно в щеповоз. Анализ рабочего времени и моделирование процессов показывают, что при производстве щепы на погрузочной площадке у дороги условия взаимодействия могут снижать производительность рубительной машины на 10–20 % [13].

Непрямое взаимодействие имеет место при укладке биомассы или древесного топлива в штабеля или кучи. В этом случае процесс складирования или штабелевки лесоматериалов оказывает воздействие на производительность последующих этапов процесса.

Обращая внимание на экологические последствия, необходимо учитывать, что включение операций по заготовке древесной биомассы в существующую систему лесозаготовок оказывает неоднозначное воздействие на будущий рост и развитие древостоя. С точки зрения лесоводства заготовка древесной биомассы оказывает как положительное, так и отрицательное воздействие. Характер воздействия зависит от того, осуществляется заготовка древесной биомассы после проведения рубки главного пользования или при проведении рубок прореживания, а так же от плодородия лесной почвы, породного состава древостоя, системы лесосечных машин и т. п.

В качестве экологических факторов предлагается учитывать уплотнение почвогрунтов и колееобразование как наиболее серьезные факторы с точки зрения отрицательных экологических последствий воздействия на лесную среду.

Уплотнение почвы сопровождается снижением размера и количества пор, что затрудняет циркуляцию почвенного воздуха, понижая содержание в нем кислорода. Уплотнение почвы в зоне колее затрудняет процесс проникновения влаги в глубинные слои, способствует застою воды в углублениях или усиленному поверхностному стоку на склонах. В последнем случае возникает опасность водной эрозии. Избыток влаги нарушает деятельность почвенных микроорганизмов, играющих важную роль в обеспечении корней растений доступными элементами питания [4].

Колееобразовательные процессы негативно сказываются на лесном массиве. Глубокая колея

предполагает разрушение большей части корневой системы, попадающей на волок, может служить накопителем излишней влаги, а также способствует водной эрозии и затрудняет лесовосстановление [4]. Кроме этого, глубина колеи влияет на проходимость техники по волоку. Если геометрической проходимости лесной машины не хватает для прохода по колее, то движение по волоку будет невозможно.

Таким образом, при разработке системы поддержки принятия решений по стимулированию рационального использования древесной биомассы и отходов лесозаготовок в биоэнергетике предлагается принимать во внимание все пере-

численные выше факторы, что позволит выбрать технологическую цепочку производства древесного топлива и подобрать оптимальную систему машин с учетом лесосырьевой базы, финансовых возможностей предприятия, экологических и социальноэкономических последствий.

Статья подготовлена в рамках научного проекта ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России 2009–2013», «Система поддержки принятия решений по стимулированию рационального использования древесной биомассы и отходов лесозаготовок в биоэнергетике».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вос Д. Передовой опыт в использовании энергии биомассы: Пер. с англ. Минск: РУП Белэнергосбережение, 2006. 198 с.
2. Селиверстов А. А., Сюнёв В. С., Герасимов Ю. Ю., Соколов А. П. Повышение эффективности использования харвестеров // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 4(8). С. 133–139.
3. Суханов Ю. В., Герасимов Ю. Ю., Селиверстов А. А., Соколов А. П. Технологические цепочки и системы машин для сбора и переработки древесной биомассы в топливную щепу при сплошнолесосечной заготовке в сортаментах // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 4(12).
4. Сюнёв В. С., Катаров В. К. Выбор технологии лесозаготовок на основе экологической совместимости с лесной средой // Материалы Всероссийской науч. конф. с междунар. участием «Лесные ресурсы таежной зоны России: проблемы лесопользования и лесовосстановления». Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2009. С. 91–93.
5. BS EN 14961-1:2010 Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 1: General requirements.
6. Gerasimov Y., Karjalainen T. Energy wood resources in Northwest Russia // Biomass and Bioenergy. 2011. № 35. P. 1655–1662.
7. Gerasimov Y., Seliverstov A. Industrial round-wood losses associated with the harvesting systems in Russia // Croatian Journal of Forest Engineering. 2009. № 31(2). P. 111–126.
8. Gerasimov Y., Sokolov A. Ergonomic characterization of harvesting work in Karelia // Croatian Journal of Forest Engineering. 2009. № 30(2). P. 159–170.
9. Gerasimov Y. Y., Sokolov A. P., Syuney V. S. Optimization of industrial and fuel wood supply chain associated with cut-to-length harvesting // Systems. Methods. Technologies. 2011. № 3(11). P. 118–124.
10. Goltsev V., Ilavsky J., Gerasimov Y., Karjalainen T. Potential for biofuel development in Tihvin and Boksitogorsk districts of the Leningrad region – the analysis of energy wood supply systems and costs // Forest Policy and Economy. 2010. № 12(4). P. 308–316.
11. Hakkila P. Developing technology for large-scale production of forest chips. Wood Energy Technology Programme 1999–2003 // Tekes Technology Programme Report. 2004. № 6. 98 p.
12. Karjalainen T., Gerasimov Y., Goltsev V., Ilavský J., Tahvanainen T. Assessment of Energy Wood Resources in the Leningrad Region // Developing Bioenergy Markets – Focuson Forest Sectorand Russia. Lappeenranta, 2006. 20 p.
13. Richardson J., Björheden R., Hakkila P., Lowe A. T., Smith C. T. Bioenergy from Sustainable Forestry – Guiding Principles and Practice. Forestry Sciences. Vol. 71. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2002.
14. Sokolov A., Gerasimov Y. Ergonomic characterization of wood harvesting systems in Russia // 44 rd International Symposium on Forestry Mechanization. Austria, 2011. 12 p.

**ОЛЕГ НИКОЛАЕВИЧ ГАЛАКТИОНОВ**кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет  
*galakt@psu.karelia.ru***АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ КУЗНЕЦОВ**кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет  
*kuzalex@psu.karelia.ru*

## ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЛЕСОТРАНСПОРТНЫХ ПУТЕЙ ЛЕСОСЕКИ НА ЛЕСОТИПОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНОВЕ

В статье представлена методика, позволяющая определить объем лесосечных отходов, необходимый для строительства волоков с учетом их образования на лесосеке в процессе проведения лесозаготовок, в зависимости от типа леса и условий его произрастания.

Ключевые слова: лесозаготовительные машины, несущая способность грунтов, волок, типы леса, древесная биомасса

Важнейшая проблема лесозаготовительного комплекса – эффективность заготовительно-транспортных операций. Она определяется состоянием лесотранспортных путей и расстоянием транспортировки по ним. Во избежание снижения производительности лесотранспортных машин из-за потери проходимости и увеличения времени на буксование и вытаскивание застрявших лесных машин необходимо укреплять пути первичного транспорта леса древесной биомассой в виде вторичного сырья (сучьев, веток и т. д.), образующегося на лесосеке. Укрепление волоков особенно актуально при работе лесных машин в заболоченной местности, при необходимости сохранить подрост (неплошные рубки и рубки ухода). Кроме этого, использование лесосечных отходов в качестве дорожной одежды позволит рационально использовать биомассу дерева и снизить затраты на обустройство волоков.

В связи с этим возникает необходимость исследования характеристик взаимодействия хвостяной подушки и почвогрунта при эксплуатации транспортных путей. Необходимо определить объем лесосечных отходов, достаточный для строительства волоков, с учетом образования их в процессе лесозаготовок в зависимости от типа леса и условий его произрастания. Кроме того, учитываем, что характеристики места лесопроизрастания (тип почвы, ее увлажнение) определяют параметры древостоя – запас, объем кроны, численность древостоя и т. д. Таким образом, задачи исследования состоят в следующем: определить взаимосвязь между параметрами древостоя, условиями его местопроизрастания и характеристиками транспортной сети лесосеки.

Основой для работы послужили исследования, которые позволили:

1. Определить уровень укрепления волоков, необходимый для полного возвращения несущей

способности, а также оптимальный способ размещения лесосечных отходов [2].

2. Определить минимальный уровень укрепления волоков, позволяющий минимизировать работы по формированию поверхности волока с учетом ранее полученных результатов [4].

3. Рассчитать на основании данных, полученных в предыдущих исследованиях и работе [3], объем древесной биомассы, необходимый для укрепления волоков.

Исходные данные для обоснования концентрации лесосечных отходов на волоке были получены по результатам исследования влияния их ориентации на состояние почвогрунтового слоя. Данные оказались завышенными и позволяли обеспечить необходимую производительность лесозаготовительных машин класса ТДТ-55 или ЛТ-189М только на очень коротком протяжении транспортной сети [2].

После проведения второго этапа исследований (рис. 1) удалось получить данные, которые имели значения, аналогичные результатам первого этапа по состоянию грунта, но более низкие значения по объему лесосечных отходов, и учтены эффекты, обусловленные влажностью грунта. Это позволило выработать рекомендации, позволяющие использовать низкие уровни концентрации лесосечных отходов [4].

Полученные данные второго этапа исследований имели предельный характер, то есть при достижении порогового значения концентрации лесосечных отходов снижения напряжений в грунте практически не наблюдалось, появилась возможность построить ряд значений концентраций лесосечных отходов на волоке в зависимости от предполагаемого коэффициента возврата несущей способности волока. Это, в свою очередь, позволяет выработать рекомендации по поддержанию несущей способности, связанной с количеством проходов транспортного агрегата.

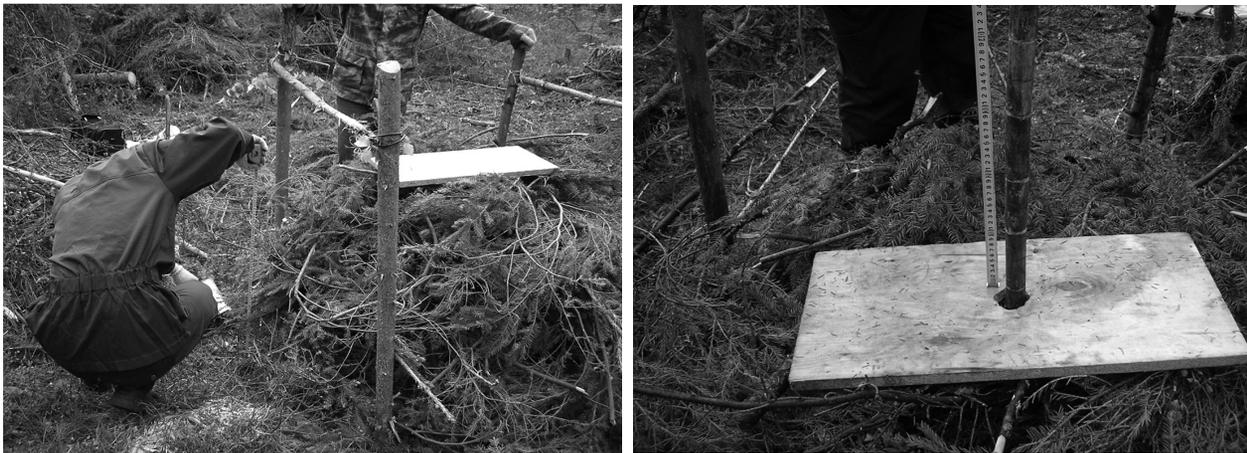


Рис. 1. Полевые исследования упругих свойств покрытия волока

Введем коэффициент возврата несущей способности волока: исходный уровень несущей способности – 1, после 10 проходов (установлено в результате экспериментов [4]) – 0. Для того чтобы вернуть его на уровень 0,2 (коэффициент снижения несущей способности составит 0,8), на волок необходимо уложить лесосечные отходы с концентрацией  $0,02 \text{ м}^3/\text{м}^2$ ; чтобы повысить уровень несущей способности до 0,8 (коэффициент снижения несущей способности составит 0,2), необходима концентрация  $0,06 \text{ м}^3/\text{м}^2$ . Таким образом, несущая способность и концентрация лесосечных отходов оказываются связанными (табл. 1). Это позволило построить зависимость концентрации лесосечных отходов ( $\rho$ ) от коэффициента возврата несущей способности ( $k_{вз}$ ):

$$\rho = e^{0,0218984 - \ln(1 - k_{вз})}. \quad (1)$$

Достоверность регрессионного уравнения  $R^2 = 93 \%$ .

Для определения концентрации лесосечных отходов воспользуемся формулой нахождения концентрации лесосечных отходов на пасеке [1], учитывающей объем ствола среднего дерева, количество деревьев на лесосеке, разряд высоты древостоя и т. д. Зависимость, связывающая условия проведения лесозаготовок и среднюю плотность биомассы лесосечных отходов на волоках, имеет вид [1]:

$$\rho = \frac{N_o V_o e^{a_0 + a_1 d_o + a_2 H + a_3 R + a_4 dH + a_5 \ln(d_d) + a_6 C + a_7 D_n}}{b_{вол} L_{ср,мп}}, \quad (2)$$

где  $N_o$  – число деревьев одной породы, заготовленных на одной пасеке, шт.;  $V_o$  – средний объем ствола,  $\text{м}^3$ ;  $d_o$  – диаметр ствола, м;  $R$  – разряд высоты;  $C$  – сезон, лето – 1, зима – 2;  $D_n$  – порода, береза – 1, сосна – 2, ель – 3, осина – 4;  $b_{вол}$  – ширина волока, м;  $L_{ср,мп}$  – средняя длина волока, м.

Указанные в табл. 1 результаты получены для чистых древостоев.

Отрицательные значения концентрации лесосечных отходов, приведенные в табл. 1, получены для случаев, когда возврат исходной несущей способности волоков теоретически достижим, но практически невозможен. Они показывают объем отходов, который необходимо еще уложить на волок. На таких участках лесосеки рекомендуется укреплять только наиболее влажные части волоков или использовать особенности применяемой лесозаготовительной техники.

Для определения разрядов высот использованы данные таблиц хода роста (по данным [7]) и таблиц разрядов высот [6]. Они сведены в базу данных, которая позволяет по породе, объему ствола, высоте, диаметру на высоте груди определить разряд высоты. Для удобства использования и распространения результатов на любые древостои и лесосеки с произвольной транспортной инфраструктурой длина и ширина волока приняты равными 1 м. Коэффициенты уравнений регрессии и анализ уравнений приведены в табл. 2.

Используя данные таблицы необходимых объемов лесосечных отходов для поддержания несущей способности, определенных в работе [4], рассчитываем площадь лесосеки, которая обеспечит указанный объем лесосечных отходов с учетом типа леса, условий его произрастания и уровня возврата несущей способности.

В 1-м типе местности с относительной влажностью менее 0,75 (супесь) для стабильного движения гусеничных машин требуется концентрация лесосечных отходов  $0,0325 \text{ м}^3/\text{м}^2$  [4]. При проведении лесозаготовок в произрастающем на этих почвогрунтах сосновом древостое (сосняк-кисличник) возрастом 90 лет потенциальная средняя концентрация лесосечных отходов составляет  $0,0015 \text{ м}^3/\text{м}^2$ . Таким образом, для покрытия  $1 \text{ м}^2$  площади волока требуется  $21,67 \text{ м}^2$  площади исходного древостоя, что соответствует ширине пасеки 20 м и требуемой длине сбора лесосечных отходов 1,1 м (рис. 2).

Таблица 1

Необходимая концентрация лесосечных отходов в зависимости от типа леса и требуемой несущей способности

Тип леса, класс бонитета					Почва	Коэффициент возврата несущей способности							
						Гусеничные машины				Колесные машины			
1-й тип местности, относительная влажность менее 0,75						0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8
–	С. длг., III (IV)		С. бр., II (III)	С. лиш., III (IV)	Песок	0,02	0,02	0,03	0,06	0,03	0,04	0,06	0,11
–	–	–	С. тр., I (III)	С. кисл., I (II)	Супесь	0,02	0,02	0,03	0,06	0,03	0,04	0,06	0,11
–	–	–	–	Е. кисл., I (II)	Суглинок	0,02	0,03	0,04	0,08	0,04	0,05	0,07	0,14
–	–	–	–	–	Глина	0,05	0,07	0,11	0,22	0,02	0,02	0,04	0,07
Е. трав., IV (V)	Е. лог, III	Е. ос.-сфаг., V (Va)	–	С. баг., IV (V)	Торф	0,04	0,05	0,08	0,15	-0,12	-0,15	-0,23	-0,46
2-й тип местности, относительная влажность 0,75 – 0,9													
–	С. длг., III (IV)	С. черн., III (II)	–	–	Песок	0,04	0,05	0,08	0,15	0,05	0,07	0,10	0,21
–	–	–	С. трав., I (III)	С. кисл., I (II)	Супесь	0,04	0,05	0,08	0,15	0,05	0,07	0,10	0,21
–	–	–	Е. черн., III	Е. кисл., I (II)	Суглинок	0,05	0,06	0,09	0,18	0,05	0,07	0,11	0,21
–	–	–	–	–	Глина	-0,08	-0,11	-0,16	-0,32	-0,56	-0,75	-1,12	-2,24
Е. трав., IV (V)	Е. лог, III	Е. ос.-сфаг., V (Va)	С. сфаг., Va (V)	С. баг., IV (V)	Торф	-0,40	-0,53	-0,79	-1,59	-1,61	-2,14	-3,22	-6,43
3-й тип местности, относительная влажность более 1,0													
–	–	С. черн., III (II)	–	–	Песок	0,04	0,05	0,08	0,16	0,05	0,07	0,11	0,21
–	–	–	–	–	Супесь	0,04	0,05	0,08	0,16	0,05	0,07	0,11	0,21
–	–	–	Е. черн., III	–	Суглинок	0,05	0,06	0,10	0,19	0,05	0,07	0,10	0,21
–	–	–	–	–	Глина	-0,11	-0,15	-0,23	-0,45	-0,68	-0,90	-1,35	-2,71
–	Е. лог, III	–	С. сфаг., Va (V)	–	Торф	-0,49	-0,65	-0,98	-1,96	-1,89	-2,52	-3,77	-7,55

Примечание. Сосна – С; ель – Е; долгомошный – длг.; брусничник – бр.; кисличник – кисл., травянистый – тр., лишайниковый – лш.; черничник – черн.; осоко-сфагновый – ос.-сфаг.; багульниковый – баг.; лог (приручьевой) – лог.

Таблица 2

Коэффициенты уравнений регрессии, средней плотности биомассы лесосечных отходов

Параметр	Оценка ( $a_n$ )	Ст. ошибка	T-статистика	P-значение
Константа	2,20906	0,0987598	22,368	0,0000
Диаметр ствола – $d_d$	-0,113671	0,00787708	-14,4306	0,0000
Высота дерева – $H$	-0,148072	0,00965275	-15,3399	0,0000
Разряд высоты – $R$	0,207891	0,0125352	16,5846	0,0000
$d*H$	0,003525	0,00019471	18,1019	0,0000
$\ln(d_d)$	1,63775	0,110414	14,8329	0,0000
Сезон – $C$	0,845448	0,0148845	56,8007	0,0000
Порода – $D_n$	0,030195	0,00720369	4,19163	0,0000

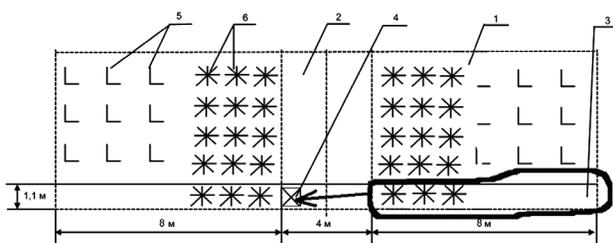


Рис. 2. Схема определения требуемой площади сбора древесной биомассы для укрепления волока: 1 – полупасека; 2 – волок; 3 – требуемая площадь сбора древесной биомассы для укрепления 1 м<sup>2</sup> волока; 4 – участок укрепленного волока; 5 – пень; 6 – лесосечные отходы

Таким образом, при длине волоков 100 м и ширине 4 м полное укрепление возможно только на

протяжении 25 м (всего четверть требуемого покрытия). Для обеспечения эффективной работы лесозаготовительных машин следует укреплять наиболее влажные или нагруженные участки.

При работе машин с колесным движителем концентрация лесосечных отходов 0,0775 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>, при тех же параметрах волока и пасеки возможно укрепление только 12,5 % протяженности волока. Действуя подобным образом для остальных местопроизрастаний, определяем протяженность волока, на которой возможно его укрепление лесосечными отходами (табл. 3).

Из табл. 3 следует, что практически ни в одном из древостоев не будет обеспечено исходное состояние несущей способности на всем протяжении волоков.

Таблица 3

Протяженность укрепления волоков (потенциальная) в зависимости от типа леса, грунта, необходимой несущей способности

Типы леса	Преобладающие почвогрунты	Концентрация лесосечных отходов, м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup>	Протяженность укрепленного волока в зависимости от коэффициента возврата несущей способности волока, м					
			Гусеничные			Колесные		
Сосняки			0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8
Кисличник	Супесь	0,00154	48,0	36,0	24,0	26,9	20,2	13,4
Черничник	Песок	0,00407	130,3	97,7	65,2	72,5	54,4	36,3
Сфагнозник	Торф	0,00651	84,0	63,0	42,0	0	0	0
Долгомощник	Песок	0,00570	75,7	56,8	37,9	54,8	41,1	27,4
Кислично-черничниковый	Песок	0,00270	33,9	25,4	16,9	25,5	19,1	12,7
Кислично-папоротниковый	Супесь	0,00248	30,6	22,9	15,3	23,3	17,4	11,6
Хвощево-сфагновый	Торф	0,00628	0	0	0	0	0	0
Ельники								
Кисличник	Суглинок	0,00183	43,8	32,9	21,9	25,4	19,1	12,7
Черничник	Суглинок	0,00181	19,7	14,7	9,8	17,0	12,7	8,5
Сфагнозник	Торф	0,00142	18,3	13,7	9,2	0	0	0
Долгомощник	Торф	0,00280	0	0	0	0	0	0
Хвощево-сфагновый	Торф	0,00299	0	0	0	0	0	0
Травяно-таволжный	Торф	0,00284	0	0	0	0	0	0
Кислично-черничный	Суглинок	0,00203	21,2	15,9	10,6	19,5	14,6	9,7
Кислично-папоротниковый	Суглинок	0,00168	0	0	0	0	0	0

Лучше всего дело обстоит с сосняками: в сосняке-черничнике длина укрепленного волока на песчаных грунтах составляет 97–130 м (лесные машины с гусеничным движителем). Колесные машины оказывают гораздо более сильное влияние на волок, и при числе проходов более 10 исходная несущая способность никогда не будет достигнута.

Полученные результаты позволяют разделять лесосеку на зоны летней и зимней разработки, планировать потери производительности из-за снижения несущей способности волоков. Ре-

зультаты исследования могут быть использованы для проектирования волоков на лесотипологической основе. Кроме этого, появляется возможность использования количественной взаимосвязи между несущей способностью волока, типом леса и нагрузкой лесозаготовительной машины для формирования параметров пазов и волоков, обеспечивающих минимальное воздействие на экологическую среду как для гусеничной, так и для колесной техники.

Таким образом, на основании характеристик древостоя, условий его местопроизрастания, нагрузки сети первичного транспорта леса получены рекомендации по формированию технологической структуры лесосеки.

## ВЫВОДЫ

1. Установлены количественные характеристики влияния древостоя и условий его местопроизрастания на инфраструктуру лесосеки.

2. Рекомендуется по возможности увеличивать ширину пазов при повышении влажности грунтов с целью увеличения доступного объема лесосечных отходов для укрепления волоков.

3. Целесообразная величина коэффициента возврата несущей способности волока для машин класса ТДТ-55 или ЛТ-189М составляет не более 0,8, концентрация лесосечных отходов составит от 0,06 до 0,22 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> для гусеничных машин и от 0,11 до 0,14 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> – для колесных при влажности грунта до 75 %.

4. При преобладании колесной техники среди лесозаготовительных машин и недостатке отходов лесозаготовок рекомендуется более широкое использование машин с гусеничным движителем.

5. При невозможности использовать гусеничную технику необходимо сосредоточиться на поддержании несущей способности критических областей лесотранспортных путей лесосеки.

6. При невозможности укрепления свыше 50 % волоков, расположенных на влажных грунтах, рекомендуется переводить лесосеку или ее часть в зимний лесосечный фонд.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования РФ (государственный контракт № 16.515.11.5052).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галактионов О. Н. Обоснование рационального технологического процесса лесозаготовок с минимальными потерями древесной зелени: Дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2001. 184 с.
2. Галактионов О. Н., Кузнецов А. В. Повышение несущей способности трелевочных волоков. Моделирование, оптимизация и интенсификация производственных процессов и систем // Материалы междунар. науч.-практ. конф. Вологда: ВоГТУ, 2004. С. 167–171.
3. Галактионов О. Н., Кузнецов А. В. Технология, машины и производство лесного комплекса будущего // Материалы междунар. науч.-практ. конф. Ч. II. Воронеж: ВГЛТА, 2004. С. 381–385.
4. Галактионов О. Н., Кузнецов А. В., Пискунов М. А. Характеристики настила из лесосечных отходов и состояние грунта на трелевочном волоке // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2009. № 7 (101). С. 90–95.
5. Карпачевский Л. О. Лес и лесные почвы. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 264 с.
6. Сергеев П. Н. Лесная таксация. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1953. 303 с.
7. Третьяков Н. В., Горский П. В., Самойлович Г. Г. Справочник таксатора. Таблицы для таксации леса. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 459 с.

АНДРЕЙ МИХАЙЛОВИЧ КРУПКО

аспирант кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет  
andreykrupko@yandex.ru

ЕВГЕНИЙ КОНСТАНТИНОВИЧ БЕЛЫЙ

кандидат технических наук, доцент кафедры математического моделирования систем управления математического факультета, Петрозаводский государственный университет  
belyi@psu.karelia.ru

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ МОЩНОСТЯМИ ЛЕСОТРАНСПОРТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В статье предлагается математическая модель управления производственными мощностями лесотранспортного предприятия с учетом сезонных факторов.

Ключевые слова: математическая модель, автопарк, производственная мощность

Функционирование лесотранспортных предприятий требует учета природно-производственных условий лесозаготовок, при которых в течение небольшого временного интервала нужны транспортные средства различных классов, в частности, при организации многоступенчатых перевозок, связанных с особенностями производственного процесса и качеством автомобильных дорог [3; 198]. Поэтому представляет интерес задача оптимального использования производственных мощностей и инвестиций как во временной развертке, так и в плане структуры автотранспортного предприятия.

Допустим, что лесопромышленное предприятие имеет на балансе парк лесовозных автомобилей одного типа и периода эксплуатации. Перед руководством предприятия возникает проблема инвестирования денежных средств в парк лесовозных автомобилей, то есть вопрос о том, в какой период времени и в каких количествах необходимо вкладывать денежные средства для эффективной работы предприятия.

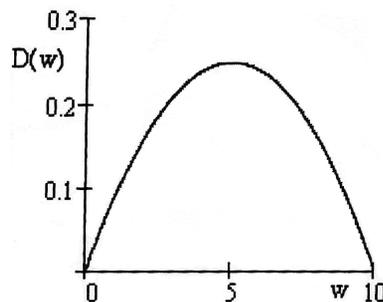
Для  $t = 0, 1, \dots, T$  положим  $D_t$  – прибыль предприятия за период  $t$ ;  $w_t$  – мощность парка машин в период времени  $t$  в денежном выражении;  $I_t$  – инвестиции в начале периода  $t$ , то есть приращение мощности парка,  $I_\Sigma = \sum_{t=1}^T I_t$  – суммарные

инвестиции за «большой период»  $T$ ,  $I = \emptyset$

Положим, что мощность парка  $w_t$  через один период в результате амортизации принимает значение  $w_t \cdot \rho$ , где  $\rho < 1$  – коэффициент, постоянный для данного парка машин. Тогда с учетом инвестиций мощность парка в период  $t + 1$  составит величину  $w_{t+1} = w_t \cdot \rho + I_{t+1}$ . Зависимость дохода предприятия в период  $t$  от его мощности зададим уравнением вида

$$D_t(w_t) = \alpha_t \cdot w_t - \beta \cdot w_t^2, \quad (1)$$

где  $\alpha_t$  и  $\beta$  – некоторые вещественные положительные коэффициенты. Причем первый из них зависит от периода  $t$ . Из (1) следует, что вначале с ростом мощности прибыль от основной хозяйственной деятельности растет, затем темпы роста снижаются. Наконец, при  $w_t = \frac{\alpha_t}{2 \cdot \beta}$  прибыль достигнет максимального значения, и дальнейшее увеличение мощности приведет только к снижению прибыли (см. рисунок). Последнее связано с действием известного экономического закона убывающей доходности: по мере увеличения затрат одного типа при фиксированных всех остальных затратах в некоторый момент будет достигнута точка, за которой предельный результат производства будет уменьшаться [1; 140]. Следовательно, при фиксированных постоянных издержках прибыль с некоторых пор будет снижаться.



Зависимость дохода предприятия от производственной мощности

Как было замечено выше,  $\alpha_t$  зависит от  $t$ . Таким образом, мы можем учесть в модели сезонный характер работ, когда эффективность производственных мощностей зависит от временного периода. Учитывая амортизацию и инвестиции  $I_t$  проведем последовательность подстановок в формулах  $w_{t+1} = w_t \cdot \rho + I_{t+1}$ .

$$\begin{cases} w_1 = w_0 \cdot \rho + I_1 \\ w_2 = w_0 \cdot \rho^2 + I_1 \cdot \rho + I_2 \\ w_3 = w_0 \cdot \rho^3 + I_1 \cdot \rho^2 + I_2 \cdot \rho + I_3 \\ \dots \dots \dots \\ w_T = w_0 \cdot \rho^T + I_1 \cdot \rho^{T-1} + I_2 \cdot \rho^{T-2} + \dots + I_T. \end{cases} \quad (2)$$

То есть  $w_t = w_0 \cdot \rho^t + \sum_{i=1}^t I_i \cdot \rho^{t-i}$ . Теперь мы можем сформулировать задачу оптимального использования инвестиций в виде:

$$\begin{aligned} \sum_{t=0}^T D_t &\rightarrow \max \\ \sum_{t=1}^T I_t &= I_\Sigma. \end{aligned}$$

Мы не будем предъявлять требование неотрицательности инвестиций, поскольку отрицательные инвестиции иногда можно трактовать как продажу мощностей или сдачу их в аренду. Найдем максимум функции

$$F(I_1, I_2, \dots, I_T, \lambda) = \sum_{t=0}^T D_t - \lambda \cdot \left( \sum_{t=0}^T I_t - I_\Sigma \right), \quad (3)$$

где

$$D_t = \alpha_t \cdot \left( w_0 \cdot \rho^t + \sum_{i=1}^t I_i \cdot \rho^{t-i} \right) - \beta \cdot \left( w_0 \cdot \rho^t + \sum_{i=1}^t I_i \cdot \rho^{t-i} \right)^2,$$

$\lambda$  – множитель Лагранжа. Здесь мы учли условие  $I_0 = 0$ .

Тогда

$$\frac{\partial F}{\partial I_j} \equiv \sum_{t=0}^T \frac{\partial D_t}{\partial I_j} - \lambda = 0, \text{ где } j = 1, 2, \dots, T. \quad (4)$$

$$\frac{\partial D_t}{\partial I_j} = \begin{cases} \alpha_t \cdot \rho^{t-j} - 2 \cdot \beta \cdot \left( w_0 \cdot \rho^{2 \cdot t - j} + \sum_{i=1}^t I_i \cdot \rho^{2 \cdot t - i - j} \right), & \text{если } j \leq t. \\ 0, & \text{если } j > t. \end{cases}$$

Подставив значения частных производных прибыли в уравнение (4), после ряда преобразований получим систему уравнений

$$\sum_{t=j}^T \sum_{i=1}^t I_i \cdot \rho^{2 \cdot t - i - j} = \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \sum_{t=j}^T \alpha_t \cdot \rho^{t-j} - w_0 \cdot \sum_{t=j}^T \rho^{2 \cdot t - j} - \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \lambda$$

для  $j = 1, 2, \dots, T$ . Запишем систему в матричной форме.

$$R \cdot I = \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot A - w_0 \cdot P - \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \lambda \cdot E. \quad (5)$$

Здесь

$$I = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_T \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} \sum_{t=1}^T \alpha_t \cdot \rho^{t-1} \\ \sum_{t=2}^T \alpha_t \cdot \rho^{t-2} \\ \vdots \\ \alpha_T \end{pmatrix}, \quad P = \begin{pmatrix} \sum_{t=1}^T \rho^{2 \cdot t - 1} \\ \sum_{t=2}^T \rho^{2 \cdot t - 2} \\ \vdots \\ \rho^T \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix},$$

а матрица

$$R = \begin{pmatrix} \sum_{j=0}^{T-1} \rho^{2 \cdot j} & \rho \cdot \sum_{j=0}^{T-2} \rho^{2 \cdot j} & \dots & \rho^{T-1} \\ \rho \cdot \sum_{j=0}^{T-2} \rho^{2 \cdot j} & \sum_{j=0}^{T-2} \rho^{2 \cdot j} & \dots & \rho^{T-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho^{T-1} & \rho^{T-2} & \dots & 1 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, элементы матрицы  $R$  определяются равенством

$$R_{j,t} = \begin{cases} \sum_{i=0}^{T-t} \rho^{2 \cdot i}, & \text{если } j = t \\ \rho^{t-j} \cdot \sum_{i=0}^{T-t} \rho^{2 \cdot i}, & \text{если } j < t \\ \rho^{j-t} \cdot \sum_{i=0}^{T-j} \rho^{2 \cdot i}, & \text{если } j > t \end{cases}.$$

Матрица  $R$  при любом значении  $T$  обладает следующими свойствами:

1. Определитель матрицы  $|R| = 1$ .
2. Обратная матрица

$$R^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & -\rho & 0 & \dots & 0 \\ -\rho & 1 + \rho^2 & -\rho & \dots & 0 \\ 0 & -\rho & 1 + \rho^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 + \rho^2 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, несмотря на довольно сложное описание матрицы  $R$ , ее обратная матрица имеет очень простой вид. Доказательство мы опустим, не желая чрезмерно увеличивать объем статьи. Заметим только, что оно ведется по индукции и опирается на свойства блочных матриц [2; 55–56].

Умножим левую и правую части уравнения (5) слева на  $R^{-1}$ :

$$I = \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot R^{-1} \cdot A - w_0 \cdot R^{-1} \cdot P - \frac{1}{2 \cdot \beta} \cdot \lambda \cdot R^{-1} \cdot E. \quad (6)$$

Умножим матрицу  $R^{-1}$  на векторы  $A$ ,  $P$  и  $E$ :

$$R^{-1} \cdot A = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 - \rho \cdot \alpha_1 \\ \dots \\ \alpha_T - \rho \cdot \alpha_{T-1} \end{pmatrix}, \quad R^{-1} \cdot P = \begin{pmatrix} \rho \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix} \text{ и } R^{-1} \cdot E = \begin{pmatrix} 1 - \rho \\ (1 - \rho)^2 \\ \dots \\ (1 - \rho)^2 \\ 1 - \rho + \rho^2 \end{pmatrix}.$$

Просуммировав члены уравнения (6) по строкам, получим:

$$\begin{cases} I_1 = -w_0 \cdot \rho + \frac{\alpha_1}{2 \cdot \beta} + \frac{(1 - \rho)}{2 \cdot \beta} \cdot (-\lambda) \\ I_2 = \frac{\alpha_2 - \rho \cdot \alpha_1}{2 \cdot \beta} + \frac{(1 - \rho)^2}{2 \cdot \beta} \cdot (-\lambda) \\ \dots \\ I_{T-1} = \frac{\alpha_{T-1} - \rho \cdot \alpha_{T-2}}{2 \cdot \beta} + \frac{(1 - \rho)^2}{2 \cdot \beta} \cdot (-\lambda) \\ I_T = \frac{\alpha_T - \rho \cdot \alpha_{T-1}}{2 \cdot \beta} + \frac{(1 - \rho + \rho^2)}{2 \cdot \beta} \cdot (-\lambda) \end{cases} \quad (7)$$

Таким образом, мы нашли значения инвестиций в периоды  $t = 1, 2, \dots, T$ , выраженные через  $\lambda$ . Теперь просуммируем соответственно левые и правые части равенств (7).

$$\sum_{t=1}^T I_t = I_{\Sigma} = -w_0 \cdot \rho + \frac{(1-\rho) \cdot \sum_{t=1}^{T-1} \alpha_t + \alpha_T}{2 \cdot \beta} - \frac{(T-1) \cdot (1-\rho)^2 + 1}{2 \cdot \beta} \cdot \lambda. \quad (8)$$

Отсюда

$$- \lambda = \frac{2 \cdot \beta \cdot (I_{\Sigma} + w_0 \cdot \rho) - (1-\rho) \cdot \sum_{t=1}^{T-1} \alpha_t + \alpha_T}{(T-1) \cdot (1-\rho)^2 + 1}.$$

Теперь, подставив значение  $-\lambda$  в (7), мы можем найти оптимальные значения инвестиций  $I_t$ .

*Пример.* Пусть количество периодов  $T = 10$ , исходная мощность в денежном выражении  $w_0 = 5$ , коэффициент в уравнении (1)  $\beta = 0,01$ ,  $\rho = 0,95$ ,  $I_{\Sigma} = 50$ . Значения коэффициента  $\alpha_t$  для различных периодов времени приведены ниже в таблице. Также в таблице приведены соответствующие расчетные значения инвестиций, производственных мощностей и дохода.

Пример расчета инвестиций за 10 периодов времени

1	2	3	4	5	6
Период $t$	$\alpha_t$	$\rho^t$	Инвестиции $I_t$	Мощность $w_t$	Доход $D_t$
1	0,2	0,950	4,944	9,694	0,999
2	0,2	0,903	0,485	9,694	0,999
3	0,2	0,857	0,485	9,694	0,999
4	0,4	0,815	10,485	19,694	3,999
5	0,5	0,774	5,985	24,694	6,249
6	0,5	0,735	1,235	24,694	6,249
7	0,7	0,698	11,235	34,694	12,249
8	0,8	0,663	6,735	33,694	15,999
9	0,9	0,630	6,985	44,694	20,249
10	1,0	0,599	1,428	43,888	24,626

Рассмотрим следующую задачу, в которой автомобильный парк делится на  $M$  классов лесовозных автомобилей. В каждом классе представлены машины одного типа и времени эксплуатации.

Аналогично (4) найдем

$$\frac{\partial F}{\partial I_{m,j}} \equiv \sum_{m=1}^M \sum_{t=0}^T \frac{\partial D_{m,t}}{\partial I_{m,j}} - \lambda = 0, \text{ где } j = 1, 2, \dots, T.$$

Далее, повторив все выкладки предыдущего пункта отдельно для каждого класса машин, получим систему уравнений, в которой значения  $I_{m,t}$  аналогично (7) выражены через множитель Лагранжа  $\lambda$ . Просуммируем соответственно левые и правые части (7). Тогда

$$I_{\Sigma} = - \sum_{m=1}^M G_m + \sum_{m=1}^M H_m \cdot \lambda, \quad (9)$$

где

$$G_m = w_{m,0} \cdot \rho_m - \frac{(1-\rho_m) \cdot \sum_{t=1}^{T-1} \alpha_{m,t} + \alpha_{m,T}}{2 \cdot \beta_m},$$

$$H_m = - \frac{(T-1) \cdot (1-\rho_m)^2 + 1}{2 \cdot \beta_m}.$$

$$\text{Отсюда } \lambda = \frac{I_{\Sigma} + \sum_{m=1}^M G_m}{\sum_{m=1}^M H_m}.$$

Подставив  $\lambda$  в уравнения (7), получим систему уравнений, определяющих величины инвестиций для всех классов машин  $m = 1, 2, \dots, M$  за все рассматриваемые периоды времени  $t = 1, 2, \dots, T$ .

$$\left\{ \begin{aligned} I_{m,1} &= -w_{m,0} \cdot \rho_m + \frac{\alpha_{m,1} - (1-\rho_m) \cdot \lambda}{2 \cdot \beta_m} \\ I_{m,2} &= \frac{\alpha_{m,2} - \rho_m \cdot \alpha_{m,1} - (1-\rho_m)^2 \cdot \lambda}{2 \cdot \beta_m} \\ &\dots \\ I_{m,T} &= \frac{\alpha_{m,T} - \rho_m \cdot \alpha_{m,T-1} - (1-\rho_m + \rho_m^2) \cdot \lambda}{2 \cdot \beta_m} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

В приведенном выше примере все оптимальные значения инвестиций положительны. Однако при других исходных данных могут получаться и отрицательные значения  $I_{m,t}$ . Если под  $I_{m,t} > 0$  понимать любые привлечения мощностей в основную производственную деятельность предприятия, а под  $I_{m,t} < 0$  – любой способ их изъятия, то такое решение может быть вполне адекватно исследуемому процессу.

Разумеется, адекватность модели зависит не только от самой модели, но и от цели и объекта исследования. Мы допустили ряд упрощений, которые позволили получить выражения  $I_{m,t}$  в общем виде. Такое представление результата позволяет проводить дальнейшие исследования аналитическими методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долан Эдвин Дж. Микроэкономика: Пер с англ. СПб.: Санкт-Петербург оркестр, 1994. 448 с.
2. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. М.: Наука, 1966. 576 с.
3. Шегельман И. Р., Скрыпник В. И., Кузнецов А. В., Пладов А. В. Вывозка леса автопоездами. Техника. Технология. Организация. СПб.: Профлекс, 2008. 304 с.

**НИКОЛАЙ ГЕННАДЬЕВИЧ ПАНОВ**инженер кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет  
*supernikola@yandex.ru***СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ РОЖКОВ**кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории физико-химических исследований нанокремниевых материалов Института геологии, Карельский научный центр РАН  
*rozhkovserg@igkrc.ru***АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ ПИТУХИН**доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет  
*pitukhin@psu.karelia.ru*

## ПОВЫШЕНИЕ ВОДОСТОЙКОСТИ ТРЕХСЛОЙНЫХ ДРЕВЕСНО-СТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ НА ОСНОВЕ КАРБАМИДОФОРМАЛЬДЕГИДНОЙ СМОЛЫ ПРИ ВВЕДЕНИИ НАНОРАЗМЕРНОГО ШУНГИТОВОГО НАПОЛНИТЕЛЯ В СВЯЗУЮЩЕЕ

В работе приводятся результаты исследований наноразмерного шунгитового наполнителя, модифицирующего связующее на основе карбаминоформальдегидной смолы, и результаты испытаний трехслойных древесно-стружечных плит на основе карбаминоформальдегидной смолы на водостойкость (разбухание и водопоглощение) и физико-механические свойства.

Ключевые слова: древесно-стружечные плиты, наноразмерный шунгитовый наполнитель, физико-механические свойства

### ВВЕДЕНИЕ

Важным элементом экономики Карелии является производство древесно-стружечных плит (ДСП). На заводе ОАО «Карелия ДСП» производят трехслойные древесно-стружечные плиты с использованием карбаминоформальдегидной смолы (КФС) в качестве связующего. Эти плиты применяются как облицовочный материал в мебельном производстве и для строительных работ. К их преимуществам можно отнести высокую прочность и жесткость, легкую механическую обработку. Недостатками являются высокая набухательность водой и слабая огнестойкость [5].

При эксплуатации ДСП в условиях повышенной влажности водостойкость влияет на физико-механические свойства плит. При разбухании прочность ДСП снижается, что может вести к разрушению конструкций [5]. Вследствие этого возникает потребность модернизации ДСП для достижения высоких значений водостойкости плит (50–80 %), а именно модифицирования структуры связующего ДСП, состоящего из КФС и хлорида аммония на соизмеримом с наноразмерным уровне.

Наноматериалы и нанотехнологии находят все большее применение во многих отраслях промышленности, сельского хозяйства, медицины, биологии. Примером могут служить разработки по использованию ультрадисперсных алмазов детонационного синтеза в качестве наполнителя ремонтно-восстановительных составов, которые были проведены в лаборатории физики кластерных структур ФТИ им. А. Ф. Иоффе [5].

Эти разработки применяются как при эксплуатации техники, так и при металлообработке, когда наноструктурированные материалы качественно меняют свойства исследуемых объектов. Однако наноразмерные наполнители пока не применяются в производстве древесных плит несмотря на их большое разнообразие и актуальную необходимость повышения потребительских свойств ДСП, таких как водостойкость и физико-механическая прочность [7], [8]. Кроме того, научных исследований в указанной области крайне мало.

Ранее было показано, что в процессе полимеризации меламиноформальдегидной, фенолформальдегидной и карбаминоформальдегидной смолы с наноструктурированным шунгитом образуется пленка, которая улучшает физико-механические свойства материала [11]. Это достигается методом модифицирования связующего на основе соответствующих смол путем введения наноразмерного шунгитового наполнителя (НШН) вследствие аналогичного механизма взаимодействия с нанокремниевым [9], [15].

Высокоуглеродистые шунгитовые породы добывают на Зажогинском месторождении в Медвежьегорском районе Республики Карелии. Перед добавлением в связующее шунгит был измельчен и обработан для выделения наноструктурных элементов и их стабилизации [10].

Целью данной работы является повышение водостойкости трехслойных ДСП на основе карбаминоформальдегидного связующего путем введения НШН, а также оценка влияния наполнителя на физико-механические свойства ДСП.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

## Объекты и методы

Образцы трехслойных плит для испытаний изготовлены в лаборатории кафедры технологии древесных композиционных материалов Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии по общепринятой для лабораторных условий технологии с соблюдением процесса производства ДСП, применяемого на заводе ОАО «Карелия ДСП» [6].

Осиновая стружка из цеха плит ОАО «Карелия-ДСП» с пористостью 80 % и плотностью 309 кг/м<sup>3</sup> пропущена через грохот. Ситовый анализ приведен в табл. 1.

Таблица 1

Ситовый анализ

Диаметр сита, мм	Количество стружки, %
5,0	не менее 10
3,15	10...28
2,0	22...37
1,0	15...35
0,5	3...15
0,2	не более 4
0 (поддон)	не более 1,5

Примечание. Толщина стружки – 0,60...0,73 мм.

Связующее готовили на основе следующих компонентов: КФС марки КФ-МТ-15 производства ОАО «Карелия-ДСП» концентрацией 67,3 %; хлорид аммония в виде водного раствора концентрацией 20 %.

Для модифицирования ДСП в связующее вводили НШН в виде порошка с размером частиц ~ 100 нм и удельной поверхностью 120 м<sup>2</sup>/г. НШН был предоставлен лабораторией физико-химических исследований наноглеродных материалов Института геологии КарНЦ РАН. Состав наполнителя представлен в табл. 2.

Таблица 2

Состав наноразмерного шунгитового наполнителя

Содержание компонентов в порошке	Вес, %
C	28,0–31,0
SiO <sub>2</sub>	56,0–60,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,3–5,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,0–6,0
K <sub>2</sub> O	1,3–1,5
MgO	0,9–1,4
TiO <sub>2</sub>	< 0,45
Na <sub>2</sub> O	< 0,4
CaO	~ 0,1

Для определения влияния НШН на свойства ДСП были проведены необходимые испытания двух серий образцов, изготовленных без введения шунгита и с его наполнением. Количество образцов в серии определяем по известной формуле

$$n = \left( \frac{V_{1-p}}{\varepsilon} \right)^2,$$

где  $\varepsilon$  – допустимая относительная погрешность;  $V_{\frac{1-p}{2}}$  – квантиль закона нормального распределения. Для обеспечения среднего уровня точности полагаем  $\varepsilon = 0,5$  и доверительную вероятность  $p = 0,95$ .

При этих значениях получаем  $n = 16$ . По технологическим соображениям для степени точности при  $\varepsilon = 1,0$  принимаем  $n = 14$ .

Исследовали время желатинизации (скорости отверждения) связующего при 100 °С. Испытания проводили по ГОСТ 14231-88 [1]. Содержание абсолютно сухого отвердителя хлорида аммония в массе абсолютно сухой КФС – 1,65 %, как это принято для внутреннего слоя ДСП в цехе плит ОАО «Карелия-ДСП». Содержание НШН в связующем изменяли от 0 до 20 мас. %. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Время желатинизации КФС с различным содержанием НШН

Содержание НШН, мас. %	0	5	10	15	20
$\tau_{\text{жел}}, \text{с}$	44,2	42,9	41,2	42,5	42,0

Оптимальная скорость отверждения связующего с содержанием НШН наблюдается при концентрации 10 %. При этом НШН имело более высокие прочностные свойства, чем при остальных концентрациях. Поэтому было принято решение для производства лабораторных трехслойных ДСП на основе КФС использовать НШН в размере 10 % от массы КФС.

Расчетная плотность плит – 680 кг/м<sup>3</sup>, доля наружных слоев – 40 %, содержание абсолютно сухой смолы в наружных слоях – 13,1 %, во внутреннем – 7,8 % от массы абсолютно сухой древесины. В связующее для наружных слоев ДСП отвердитель не вводили. НШН в количестве 10 % абсолютно сухого вещества от массы абсолютно сухой КФС вводили в связующее для наружных и внутреннего слоев плит.

Для качественного пневматического распыления связующего товарную КФС разбавляли водой до концентрации 55 %. При использовании НШН его вводили в смолу после разбавления водой, затем суспензию перемешивали для равномерного распределения НШН в связующем. Нанесение связующих на стружку наружных и внутренних слоев проводили в лабораторном барабанном смесителе. Пакеты для плит формировали вручную.

## Прессование

Изготовили трехслойные ДСП толщиной 15,5 мм, размером 400 × 400 мм. Влажность стружки наружных и внутреннего слоев ДСП

составляла 2,1 %. Плиты изготавливали по режимам, принятым в цехе ДСП ОАО «Карелия-ДСП». Горячее прессование ДСП проводили при температуре 210 °С, давлении 2,5 МПа, удельном времени 11 с/мм толщины готовой плиты. Всего изготовили 4 плиты: 2 ДСП на КФС (контроль) и 2 ДСП, связующее которых содержало 10 % НШН. После горячего прессования плиты выдерживали при комнатных условиях в течение суток и раскраивали на образцы. График прессования представлен на рис. 1 [2].

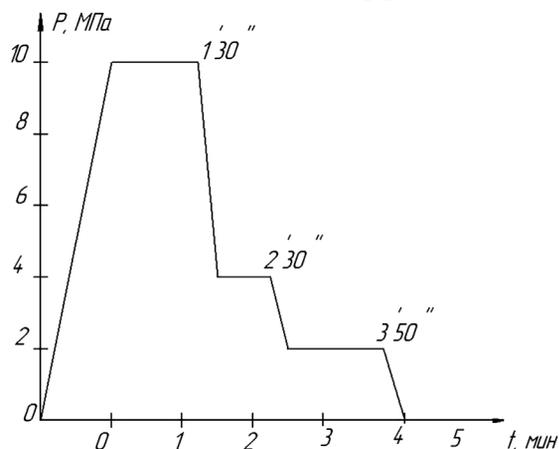


Рис. 1. График прессования ДСП

На рис. 2 представлены прессованные образцы ДСП. Видно, что внешние характеристики поверхностей, такие как цветность и шероховатость, существенно не различаются, что позволяет использовать данную технологию в условиях цеха ОАО «Карелия-ДСП».

#### Определяемые свойства

Определили условную вязкость приготовленных связующих по вискозиметру ВЗ-246 с со-

плом диаметром 4 мм. Испытания проводили по ГОСТ 14231-88 [1]. Условная вязкость КФС концентрацией 55 % составила 22,5 с, вязкость смолы концентрацией 55 %, содержащей 10 % абсолютно сухого НШН от массы абсолютно сухой КФС, – 18,5 с.

Результаты эксперимента обрабатывались с использованием известных методов математической статистики путем оценки математических ожиданий и дисперсий конкретных показателей свойств ДСП.

Были проведены испытания водостойкости, прочности при растяжении, прочности при статическом изгибе. Проведенные испытания соответствуют ГОСТ 14231-88 [1], ГОСТ 10634-88 [2], ГОСТ 10635-88 [3], ГОСТ 10636-88 [4].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В связи с гетерогенной структурой и неоднородностью плотности трехслойных ДСП полученные результаты сравнительных показателей водостойкости и прочности плит были пересчитаны к одной плотности 680 кг/м<sup>3</sup> по известным методикам [14]. Приведенные оценки средних значений показателей опытных ДСП представлены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что при введении НШН в КФС наблюдается увеличение водостойкости ДСП на 20 %. Это связано с конденсированием водной дисперсии шунгитового наночуглерода, сопровождающейся агрегацией наночастиц и образованием в процессе полимеризации наночуглеродной сетки в связующем ДСП на поверхности плиты. Углеродные фрагменты высвобождаются в водной дисперсии, формируя углеродный НШН, и определяют устойчивость наночастиц в воде и их взаимодействие с водой [12].



Рис. 2. Образцы ДСП: а) без наполнителя в связующем; б) с НШН в связующем

**Таблица 4**  
Физико-механические показатели и водостойкость опытных ДСП, приведенные к плотности образцов 680 кг/м<sup>3</sup>

№ п/п	Содержание НШН, мас. %	$\sigma_{изг}$ , МПа	$\sigma_{\perp}$ , МПа	$\Delta S$ , %	$\Delta M$ , %
1	0	18,6	0,17	51,6	139
2	10	22,0	0,19	52,7	111

Примечание.  $\sigma_{изг}$  – значение прочности на изгиб,  $\sigma_{\perp}$  – значение прочности на растяжение перпендикулярно пласти плиты,  $\Delta S$  – разбухание,  $\Delta M$  – водопоглощение.

Также из табл. 4 видно, что образованная пленка НШН улучшает физико-механические свойства ДСП. По сравнению с контролем прочность при статическом изгибе увеличилась на 18 %, а прочность при растяжении перпендикулярно пласти плиты была увеличена на 12 %. Это связано с упрочнением химических связей КФС с пленкой НШН, благодаря чему поверхность становится более прочной.

В среде MathCad была проведена проверка статистической гипотезы значимости отличия математических ожиданий показателей свойств ДСП с концентрациями НШН от 0 до 10 %. Сначала была проведена проверка гипотезы о равенстве двух неизвестных дисперсий по критерию F (Фишера). Во всех испытаниях критическое значение критерия  $F_{кр}$  при уровне значимости 0,05 превышало наблюдаемое значение критерия F. Выполнялось условие

$$F < F_{кр}$$

Это позволило сделать вывод о равенстве дисперсий результатов свойств партий плит без

наполнителя (партия 1) и с введением НШН (партия 2).

Проверка значимости отличия показателей свойств ДСП партии 1 и партии 2 осуществлялась путем проверки гипотезы о равенстве двух средних нормальных генеральных совокупностей, дисперсии которых неизвестны и одинаковы по T-критерию Стьюдента. Во всех испытаниях наблюдаемый критерий был больше критического значения  $T_{кр}$ . Выполнялось условие  $T > T_{кр}$ , что позволило сделать вывод о значимости различия свойств партии плит без НШН и с введением НШН.

## ВЫВОДЫ

1. Водопоглощение ДСП при введении в связующее 10 мас. % НШН снижается на 20 %; разбухание плит по толщине за 24 часа находится на уровне контроля.

2. Физико-механические показатели плит, содержащих в связующем НШН, улучшаются по сравнению с контролем по прочности при статическом изгибе на 18 %, по прочности при растяжении перпендикулярно пласти плиты на 12 %.

3. Использование НШН для модифицирования КФС не обнаруживает каких-либо технологических отклонений при изготовлении ДСП на лабораторной установке: время желатинизации и условная вязкость КФС несколько снижаются при введении в нее НШН; сохраняется жизнеспособность рабочего раствора модифицированной смолы; горячее прессование плит на связующем с НШН допускает использование стандартного режима.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 14231-88. Смолы карбамидоформальдегидные. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1998. 15 с.
- ГОСТ 10634-88. Плиты древесно-стружечные. Методы определения физических свойств. М.: Комитет стандартизации и метрологии, 1988. 5 с.
- ГОСТ 10635-88. Плиты древесно-стружечные. Методы определения предела прочности и модуля упругости при изгибе. М.: Изд-во стандартов, 1988. 4 с.
- ГОСТ 10636-88. Плиты древесно-стружечные. Методы определения предела прочности при растяжении перпендикулярно пласти плиты. М.: Изд-во стандартов, 1990. 6 с.
- Леонович А. А. Физико-механические основы образования древесных плит. СПб.: ХИМИЗДАТ, 2003. 192 с.
- Леонович А. А. Новые древесноплитные материалы. СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008. 160 с.
- Панов Н. Г. Нанотехнологии и их перспективы в машиностроении // Тезисы докладов 61-й науч. студенческой конф. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2009. С. 82–83.
- Панов Н. Г. Повышение прочностных свойств древесных материалов на основе применения нанотехнологии // Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева. Химия древесины. СПб.: СПбГЛИА, 2010. С. 173–176.
- Рожкова Н. Н. Влияние модифицирования шунгитового наполнителя с помощью поверхностно-активных веществ и его влияние на физико-механические и проводящие свойства полимерных композиционных материалов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 1992. 20 с.
- Рожкова Н. Н. Технологии для многоуровневой активации наноглерода шунгитовых пород // Геодинамика, магматизм, седиментогенез и минералогия Северо-Запада России. Петрозаводск: Институт геологии КарНЦ РАН, 2007. С. 335–339.
- Рожкова Н. Н. Наноглерод шунгитов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 100 с.
- Рожкова Н. Н. Роль непланарных графеновых частиц в формировании нанокластеров шунгитового углерода // Сборник докладов конф., посвящ. 50-летию Института геологии КарНЦ РАН «Геология Карелии от архея до наших дней». Петрозаводск, 2011. С. 180–187.
- Тополянский П. А., Ермаков С. А., Соснин Н. А. Нанесение алмазоподобного нанопокртия на инструмент из быстрорежущей стали // Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня: Материалы 11-й междунар. науч.-практ. конф. СПб.: Политехнический институт, 2009. С. 227–236.
- Шварцман Г. М., Щедро Д. А. Производство древесно-стружечных плит. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 320 с.
- Voigt B., McQueen D. H., Pelis'kova M., Rozhkova N. Electrical and Mechanical Properties of Melamine-Formaldehyde-Based Laminates With Shungite Filler // Polymer. Composite. 2005. Vol. 26 (4). P. 552–562.

**ВЛАДИМИР ЯКОВЛЕВИЧ ШАПИРО**

доктор технических наук, профессор кафедры высшей математики лесоинженерного факультета, Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С. М. Кирова  
unpppta@mail.ru

**ИГОРЬ ВЛАДИСЛАВОВИЧ ГРИГОРЬЕВ**

доктор технических наук, профессор кафедры технологии лесозаготовительных производств лесоинженерного факультета, Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С. М. Кирова  
silver73@inbox.ru

**АНТОН ЕВГЕНЬЕВИЧ ГУЛЬКО**

аспирант кафедры технологии лесозаготовительных производств лесоинженерного факультета, Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С. М. Кирова  
tlzp@inbox.ru

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ И ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ КОРЫ ПРИ ГРУППОВОЙ ОКОРКЕ ДРЕВЕСИНЫ

В статье представлен анализ ранее выполненных работ по моделированию процесса удаления коры в барабанах и обоснованы пути уточнения математической модели данного процесса.

Ключевые слова: окорка, ударное взаимодействие, групповая окорка, окорка трением

Теоретические основы процессов очистки древесины от коры и используемые при этом различные окорочные устройства подробно описаны в работах [1], [11], [12], [13] и др.

Согласно результатам исследований [15], в процессе барабанной окорки в пределах пространства обработки можно выделить 5 зон. Наибольший интерес с позиций механики взаимодействия бревен в окорочном барабане представляет четвертая зона – зона обрушения, где бревна соударяются друг с другом, и пятая – зона удара, в которой бревна ударяются о стенку барабана или о размещенные на его внутренней поверхности рабочие органы.

Интенсивность и качество окорки, а также потери древесины зависят от необходимого и достаточного числа ударов ( $N$ ) определенной силы ( $P$ ), которые испытывает бревно определенного диаметра ( $d$ ) и длины ( $l$ ) за период времени ( $t$ ) нахождения в барабане, диаметр и длина которого составляют соответственно  $D$  и  $L$ .

Величины  $N$  и  $P$ , в свою очередь, зависят от физико-механических, структурных и прочностных свойств сырья, их состояния (влажности  $W$  и температуры  $T$ ), а также от размеров емкости барабана, степени его загрузки и угловой скорости вращения  $\omega$ , определяющих в совокупности скорость ( $v$ ) соударения бревен как между собой, так и с конструктивными элементами барабана. При сухой окорке возникающие ударные нагрузки и силы трения при взаимодействии бревен являются недостаточными для качественной окорки сырья. Необходимо использование специальных коронрезающих ножей на внутренней поверхности барабана [7].

Стохастическая модель процесса соударений бревен в барабане предложена в работе [1], где качество окорки связано со временем обработки бревен. На основе биномиального распределения числа ударов, приходящихся на элементарную площадку  $\Delta s$  за период времени  $t$ , получено соотношение для определения математического ожидания ( $M$ ) качества окорки:

$$M = 100 \left[ 1 - \exp(-\lambda t) \sum_{i=0}^{N-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!} \right], \quad (1)$$

где  $\lambda$  – интенсивность ударов или их среднее количество, получаемое одним участком  $\Delta s$  в единицу времени. Величина  $N$  – основополагающий параметр соотношения (1) – зависит от силы удара  $P$  и характеристик коры.

Исходя из теоретических положений данной модели в работе [2] справедливо отмечается, что параметры  $N$  и  $\lambda$  не в полной мере отражают такой сложный процесс, как групповая окорка, и недостаточно учитывают закономерности ударных процессов в окорочном барабане в летние и зимние сезоны. В этой связи предложена математическая модель послойного перемешивания древесного сырья в окорочном барабане при положительных и отрицательных температурах [2]. При этом влажность сырья, его физико-механические и прочностные свойства учитываются не дифференцированно, а интегрально путем введения специальных параметров. Так, полученные в ходе выполненных исследований соотношения для определения скоростей движения коры и древесины содержат безразмерный параметр  $\theta$ , названный в [2] степенью сопротивления

элемента коры удару и равный произведению циклической частоты колебаний на период продолжительности удара. Число ударов  $N$  принимается равным отношению ударного импульса  $I_y$ , Н·с, необходимого для появления пятна окорки площадью  $\Delta s$ , к величине ударного импульса  $I_o$ , Н·с, возникающего при единичном ударе бревна в процессе его обрушения во вращающемся барабане.

Величину  $I_o$  определяют с учетом характерных размеров бревна и барабана, а также угла наклона  $\alpha$  поверхности обрушения. Величина  $I_y$  в конечном счете устанавливается экспериментально в процессе непосредственного нанесения акцентированных ударов по бревну с помощью специально созданных опытных установок. Суммированные значения  $\sum I_y$  и  $\sum \Delta s$  являются интегральными характеристиками необходимых силовых затрат для достижения поставленных технологических и качественных целей окорки в течение ее полного периода времени  $T_o$ . Суммарное количество ударов  $N_\Sigma$ , которым подвергается вся совокупность элементарных участков  $\Delta s$ , определяется геометрическими параметрами бревна и барабана и может быть оценено с помощью соотношения:

$$N_\Sigma = \left[ \frac{360}{\arccos\left(1 - \frac{K_d^2}{2(1 - K_d)^2}\right) K_l} \right], \quad (2)$$

где коэффициенты  $K_d$  и  $K_l$  представляют собой соответственно отношения диаметров  $d/D$  и длин  $l/L$ . На рис. 1а представлен график зависимости величины  $N_\Sigma$  от коэффициента  $K_d$  в диапазоне его изменения 0,035–0,077 и коэффициента  $K_l$  в диапазоне его изменения 0,13–0,52. Как следует из рис. 1а, в процессе окорки материалов реализуются существенно различные условия по фактору числа ударов  $N_\Sigma$ , причем при уменьшении размеров бревен число ударов стремительно возрастает.

Объем коры  $\sum V_k$  в барабане зависит от объема  $V_o$  барабана, коэффициента его заполнения  $k_p$ , доли коры  $k_k$  в общей фитомассе ствола и, особо подчеркнем, коэффициента  $Kп$  полнодревесности укладки бревен в барабане, представленного на рис. 1б, который также зависит от безразмерных коэффициентов  $K_d$  и  $K_l$ .

Резюмируя результаты исследования [2], необходимо отметить, что оно расширяет диапазон использования стохастической модели [1], однако за рамками теоретического рассмотрения оказался сам процесс соударения бревен как между собой, так и с конструктивными элементами барабана.

Величину импульса  $I_y$  и процесс образования пятна окорки целесообразно оценить с позиций механики контактного разрушения такой сложной среды, как кора и древесина лесоматериалов.

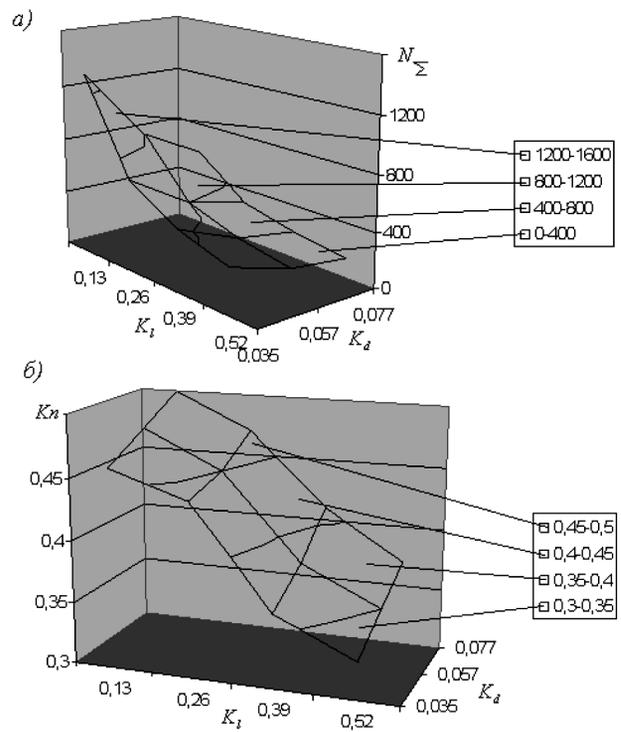


Рис. 1. Графики двумерных функций: а)  $N_\Sigma = f_1(K_d, K_l)$ ; б)  $Kп = f_2(K_d, K_l)$

Указанный подход нашел некоторое отражение в работе [10], в которой на базе уравнений движения конечно-элементной модели изучены закономерности изменения сил контактного взаимодействия бревен при их соударении в барабане. Авторы [3] справедливо отмечают, что для определения таких сил необходимы данные о жесткости бревен, которые устанавливаются экспериментальным путем. При этом бревна, взаимодействующие с поверхностью барабана, испытывают значительные по величине нагрузки за счет более высокой жесткости корпуса барабана. В свою очередь, само бревно испытывает неравнозначные по поверхностному распределению силы соударений, и в его торцевых частях наблюдается процесс так называемого размочивания.

Основной научный результат [4] – прогноз объема бревен, при обработке которых сила соударений может оказаться недостаточной для качественной окорки древесины. Однако и в этом случае рассмотренный процесс взаимодействия бревен не отражает особенности контактного разрушения различных участков массива коры и древесины как сложных структур, обладающих набором характерных физико-механических и прочностных свойств, влажностью и температурой.

Указанные параметры, как свидетельствуют результаты исследований [5], [14], применительно к механической окорке с использованием как тупых короснимателей, так и фрез оказывают существенное влияние на все протекающие про-

цессы отделения коры от древесины. На основании результатов выполненного анализа сформулируем основные положения для обоснования математической модели разрушения коры при групповой окорке лесоматериалов.

Бревно как совокупность цилиндров с диаметром и высотой  $d$  представим как совокупность равновеликих по объему шаров с диаметром  $D_{ш} = \sqrt[3]{1,5d}$ . Количество шаров, приходящихся на одно бревно, равно целой части плюс единица отношения объема бревна  $V_{бр}$  к объему шара  $V_{ш}$ . Два крайних шара назовем торцевыми, остальные – внутренними. Все шары бревна принимаются как мягкие по отношению к жесткой поверхности барабана. Выделим основные схемы взаимодействия мягких шаров с поверхностью барабана, которую, в свою очередь, будем рассматривать как жесткий шар  $D_{жс}$  с бесконечно большим диаметром  $D_{жс} = \infty$ : схема I: « $D_{ш} - D_{ш}$ » – взаимодействие двух мягких шаров; схема II: « $D_{ш} - D_{жс}$ » – взаимодействие мягкого и жесткого шаров; схема III « $D_{ш} - D_{жс}$ » – взаимодействие мягкого шара с жестким, на поверхности которого закреплен нож (твердый индентор).

Представленные схемы будем рассматривать в рамках постановки квазистатических задач ударного взаимодействия двух сферических контактирующих тел [8]. Для обоснования математической модели и оценки ее адекватности на примере сравнения с опытными данными [2] остановимся на схеме II.

При воздействии ударной нагрузки силой  $P$  основными геометрическими параметрами пятна контакта (его глубины и радиуса) являются величины контактного сближения  $h$  и радиуса контактной площадки  $a$ . Эти параметры функционально связаны между собой, однако ударные процессы в механике контактного разрушения [6], [8] рассчитываются именно через величину сближения  $h$ ; с точки зрения качества окорки нас интересует очистка древесины на полную глубину коры. Поэтому в качестве основной геометрической характеристики контакта примем параметр  $h$ .

Будем считать [8], что по мере формирования пятна окорки контактная сила  $F$  растет и определяется в виде:

$$F = kh^{\frac{3}{2}}, \quad (3)$$

где коэффициент пропорциональности  $k$  зависит от упругопластических характеристик мягкого шара (модуля Юнга  $E$  и коэффициента Пуассона  $\mu$ ) и его диаметра  $D_{ш}$ :

$$k = \frac{4E\sqrt{D_{ш}/2}}{3(1-\mu^2)}. \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение движения среды на границе контакта при развитии пятна окорки вглубь массива коры имеет вид:

$$\frac{dh}{d\tau} = \sqrt{v^2 - \frac{4kh^{5/2}}{m}}, \quad (5)$$

где  $v$  – скорость движения бревна массой  $m$  в момент удара.

Наибольшее значение  $h = h_0$  достигается в момент времени, когда скорость сближения  $\frac{dh}{d\tau} = 0$ ,

откуда величина максимального контактного сближения от единичного удара равна:

$$h_0 = \left(\frac{5}{4k}mv^2\right)^{2/5}. \quad (6)$$

Общая продолжительность удара  $\tau = \tau_0$  при этом составит:

$$\tau_0 = 3,2\left(\frac{m^2}{vk^2}\right)^{1/5}. \quad (7)$$

Интегрирование дифференциального уравнения (5) с учетом (6) при начальных условиях: в момент  $\tau = 0$  сближение  $h = 0$  позволяет получить функцию изменения во времени контактного сближения  $h = h(\tau)$ :

$$h = h_0 \sin\left(\frac{v\pi\tau}{2,94h_0}\right), \quad (8)$$

которую будем рассматривать на участке возрастания  $h$  от 0 до  $h_0$ .

Радиус контактной площадки  $a$  зависит от  $h$  и описывается соотношением:

$$a = \frac{k}{E}(1-\mu^2)\sqrt{h}. \quad (9)$$

Силу удара  $P$  вычислим следующим образом: вначале из закона сохранения энергии определяем величину  $v = (2gH)^{0,5}$ , где  $H$  – высота обрушения бревен (максимальное значение  $H = D - d$ ), затем из закона сохранения импульсов движения – силу  $P = mv/\tau_0$ , причем  $\tau_0$  определяется из (7).

Расчеты с помощью соотношений (3)–(9) производились таким образом, чтобы в максимальной степени учесть опытные данные [2], в частности, применительно к условиям обработки летних бревен сосны влажностью  $W = 40-60\%$ , диаметром  $d = 0,12$  м, длиной  $l = 2$  м в окорочном барабане диаметром  $D = 2,2$  м и длиной  $L = 4,3$  м. При таком диаметре бревна толщина коры сосны  $h_k$  принята равной 0,02 м. Физико-механические свойства коры сосны принимались по данным [5] с учетом влияния влажности  $W$  на изменение плотности коры  $\rho_k$ . Так, для сухой коры при  $W = 10\%$  величина  $\rho_k = 370$  кг/м<sup>3</sup>, при  $W = 40-60\%$  плотность возрастает до  $\rho_k = 687$  кг/м<sup>3</sup>. Тогда масса бревна  $m$  достигает 15,55 кг. Расчеты показывают, что в момент удара скорость соударения  $v = 6,39$  м/с, а продолжительность удара  $\tau_0 = 9,62$  мс. Контактная сила  $P$  достигла величины 10,32 кН и обеспечила достижение максимальной глубины контактного сближения  $h_0 = 0,021$  м, превышающей толщину

коры  $h_k$ , то есть в этом случае выполняется условие  $h_o \geq h_k$ .

На рис. 2 представлены зависимости изменения во времени  $h(\tau)$  и  $a(\tau)$ . Как видим, контактное сближение в направлении  $z$  отстает от развита контактной площадки в радиальном направлении  $r$ , и если возникающие в массиве коры в процессе ударного взаимодействия сдвиговые нагрузки  $q_s$  достаточны для ее разрушения, то можно считать, что отделение данного участка на максимальную глубину  $h_o$  будет иметь место. Учитывая, что  $h \leq a$  при любом  $\tau$ , размеры разрушаемых площадок будем оценивать через величину  $h$  (оценка снизу).

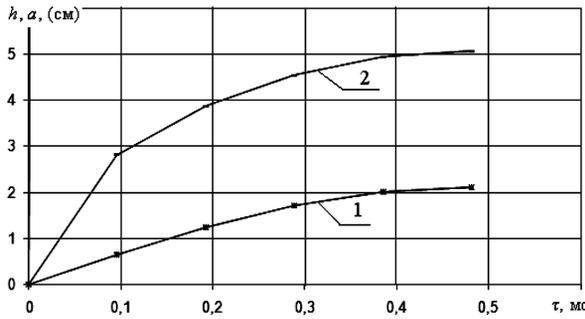


Рис. 2. Изменение во времени удара величин контактного сближения и радиуса контактной площадки: 1 –  $h(\tau)$ ; 2 –  $a(\tau)$

Величину среднего вертикального давления  $q_z$  при ударном взаимодействии шаров определим через параметры  $h$  и  $D_{ш}$  [8]:

$$q_z = \frac{P}{\pi h D_{ш}} \quad (10)$$

Величину радиального (горизонтального) давления с достаточной степенью точности определим через механизм бокового распора [9]:

$$q_r = -\frac{\nu}{1-\nu} q_z, \quad (11)$$

после чего величину давления сдвига  $q_s$  на элемент коры определим как приведенное давление:

$$q_s = \sqrt{q_z^2 + q_r^2} \quad (12)$$

На рис. 3 представлена зависимость изменения во времени  $q_s(\tau)$ ; расчеты произведены при значениях  $\mu = 0,25$  и  $E = 33,29$  МПа, установленных через корреляционные связи этих параметров с заданными физико-механическими характеристиками различных сплошных сред, включая лесоматериалы [5], [9].

Сравнивая полученные значения  $q_s$  с величиной предела прочности немерзлой коры сосны на скалывание  $\sigma_{ск} = 0,33$  МПа [13], можно сделать вывод о том, что с начального момента времени удара вплоть до достижения максимально го сближения выполняется условие:

$$q_s \geq \sigma_{ск}, \quad (13)$$

то есть участок размером  $\Delta s = \pi h_o^2 = 1385 \times 10^{-6} \text{ м}^2$  будет полностью окорен на полную глу-

бину сближения  $h_o$ . Величина ударного импульса при этом составила  $I_y = 99,34 \text{ Н} \cdot \text{с}$ .

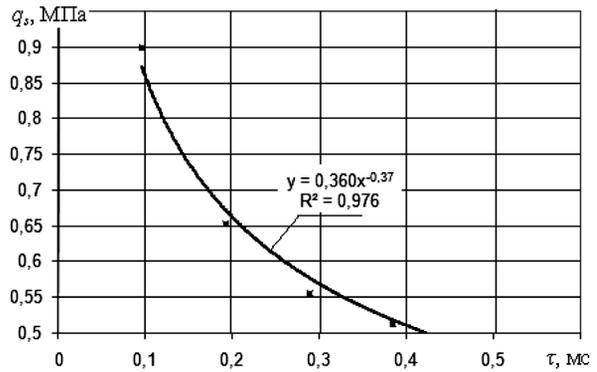


Рис. 3. Изменение во времени удара величины приведенного давления в массиве коры летней сосны

Уместно отметить, что для мерзлых бревен сосны величина  $\sigma_{ск} \geq 1,1$  МПа [13] и возрастает до 1,8 МПа с понижением температуры  $T$  до 20 °С. Это означает, что в таких условиях установленные значения  $q_s$  недостаточны для реализации механизма сдвига в пределах элементарной площадки и не обеспечивают надлежащую окорку данного участка. В этом случае необходимо либо увеличивать силовое воздействие, включая использование ножей, либо улучшать состояние бревен – обрабатывать их паром или водой с целью снижения величины  $\sigma_{ск}$  до необходимого уровня. В обоих случаях это требует дополнительных затрат, а при использовании ножей обуславливает рост потерь древесины. Влияние температуры на силы сцепления коры и процессы ее разрушения подробно рассмотрены в работе [5], а особенности контактного разрушения при статическом внедрении индентора – в [14].

Возвращаясь к анализу условий обработки бревен летней сосны при выполнении условия (13), скажем, что для окорки элементарного участка достаточно одного удара о жесткую поверхность барабана, то есть интегральные характеристики  $\sum I_y$  и  $\sum \Delta s$  совпадают с полученными одинарными значениями  $I_y$  и  $\Delta s$ .

Общий объем коры в обрабатываемых бревнах для данных условий расчета  $\sum V_k = 0,059 \text{ м}^3$  при следующих значениях технологических коэффициентов:  $k_s = 0,5$ ,  $k_k = 0,15$ ,  $Kn = 0,36$ . Максимально возможный объем разрушенной коры в пределах зоны контакта в результате единичного удара  $V_k = \pi h_k^3 = 127 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ , то есть минимально необходимое число ударов по всем элементарным участкам бревен  $N_{\Sigma} = 465$ , что удовлетворительно согласуется с данными рис. 1а при значении коэффициентов  $K_d = 0,055$  и  $K_l = 0,47$ . Сравним полученные результаты с опытными данными [2], которые показывают, что для окорки аналогичных бревен также достаточно одного удара по элементарному участку коры при величине ударного импульса  $I_y = 106 \text{ Н} \cdot \text{с}$  с образованием пятна окорки площа-

дью  $\Delta s = 1486 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ . Как видим, теоретические расчеты согласуются с опытными данными: относительная погрешность  $\delta$  при оценке импульса составляет 6,7 %, при оценке размеров пятна  $\delta = 7,3$  %.

Выполним аналогичный расчет для условий окорки летних бревен осины с плотностью коры  $\rho = 758 \text{ кг/м}^3$  при  $W = 40\text{--}60$  % и толщине  $h_{\kappa} = 0,05 \text{ м}$ . Упругопластические характеристики:  $\mu = 0,25$ ,  $E = 146,83 \text{ МПа}$ . Масса бревна  $m = 17,15 \text{ кг}$ , время удара  $\tau_o = 5,52 \text{ мс}$  при максимальной силе  $P = 19,82 \text{ кН}$  и ударном импульсе  $I_y = 109,5 \text{ Н} \cdot \text{с}$ .

Расчет показал, что максимальное контактное сближение  $h_o = 0,0112 \text{ м}$ , а величина  $q_c$  достигла 1,26 МПа и превысила во всем диапазоне своего изменения значение прочностной характеристики немерзлой коры осины:  $\sigma_{\text{СК}} = 0,79 \text{ МПа}$ . Для мерзлой коры осины уже при  $T \leq -10$  °С величина  $\sigma_{\text{СК}} \geq 1,6 \text{ МПа}$ .

Таким образом, для летних условий обработки бревна осины разрушение в пределах элементарной площадки  $\Delta s = 456 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  на глубину  $h_o$ , как и при окорке сосны, произойдет. Вместе с тем за один удар очистка массива коры осуществится только на глубину  $h_o = 1,12 \text{ см}$ , и для окорки бревна на полную глубину  $h_{\kappa} = 5 \text{ см}$  потребуются не менее  $N = 5$  ударов. На данном этапе обоснования математической модели не будем учитывать механизмы уплотнения коры в процессе циклического ударного взаимодействия с жесткой поверхностью барабана (индентора), то есть принимаем, что на каждом новом цикле процесс удара воспроизводится в полном объеме. Тогда имеем:  $\sum I_y = NI_y = 548 \text{ Н} \cdot \text{с}$  и  $\sum \Delta s = N\Delta s = 2284 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ .

Сравним полученные результаты с опытными данными [2] при окорке бревен осины в аналогичных условиях, где установлены следующие показатели разрушения коры:  $N = 7$ ,  $\sum I_y = 630 \text{ Н} \cdot \text{с}$  ( $\delta = 14,96$  %) и  $\sum \Delta s = 2350 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  ( $\delta = 2,89$  %).

Сравнение погрешности расчетов при окорке кражей сосны и осины показывает, что при механическом воспроизводстве ударных процессов наблюдаются более высокие расхождения теоретических данных с опытными. Однако результаты расчетов следует признать удовлетворительными. Дальнейший учет в математической модели особенностей разрушения коры при циклических нагрузках, включая ее уплотнение и как следствие – изменение упругопластических и прочностных свойств, приведет к росту необходимого числа ударов  $N$  и повышению точности оценок.

Подводя итог и анализируя результаты математического моделирования процессов контактного ударного взаимодействия мягкого шара (элемента бревна) с жестким шаром (поверхностью барабана), можно сделать вывод об адекватности принятых методических положений реальным условиям реализации процессов разрушения элементарного участка коры при групповой окорке древесины. Разработанная модель позволяет более детально рассмотреть предложенные схемы ударного взаимодействия I–III для разнообразных технологических условий групповой окорки лесоматериалов.

Материалы статьи получены при выполнении НИР, в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», в рамках мероприятия 1.3.1. Контракт П 1209.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойков С. П. Теория процессов очистки древесины от коры. Л.: Изд-во ЛГУ, 1980. 152 с.
2. Васильев А. С. Обоснование технических решений, повышающих эффективность режимов групповой окорки древесного сырья: Дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск, 2004. 148 с.
3. Васильев С. Б., Колесников Г. Н., Никонова Ю. В., Раковская М. И. Влияние локальной жесткости корпуса корообдирочного барабана на изменение силы соударений и величину потерь древесины // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2008. № 4. С. 84–91.
4. Васильев С. Б., Колесников Г. Н., Никонова Ю. В., Раковская М. И. Исследование закономерностей изменения силы соударений с целью снижения потерь при окорке древесины в барабане // Известия СПбГЛТА. Вып. 185. 2008. С. 258–264.
5. Газизов А. М., Григорьев И. В., Кацадзе В. А. и др. Повышение эффективности механической окорки лесоматериалов. СПб.: СПбГЛТА, 2009. 240 с.
6. Колесников Ю. В., Морозов Е. М. Механика контактного разрушения. М.: Изд-во ЛКИ, 2010. 224 с.
7. Крылов Г. А. Механика процесса сухой барабанной окорки древесины // Труды ЦНИИМЭ. Сб. 124. Химки, 1972. С. 118–122.
8. Морозов Е. М., Зернин М. В. Контактные задачи механики разрушения. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 544 с.
9. Мосинец В. Н., Абрамов А. В. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород. М.: Недра, 1982. 248 с.
10. Никонова Ю. В. Обоснование конструктивно-технологических параметров корообдирочных барабанов с применением численного моделирования динамического взаимодействия балансов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск, 2009. 19 с.
11. Пигильдин Н. Ф. Окорка лесоматериалов (теория, технология, оборудование). М.: Лесн. пром-сть, 1982. 192 с.
12. Симонов М. Н., Торговников Г. И. Окорочные станки: устройство и эксплуатация. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 184 с.
13. Симонов М. Н., Югов В. Г. Окорка древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1972. 128 с.
14. Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Гумерова О. М. Моделирование процесса разрушения коры при окорке резанием // Известия СПбГЛТА. 2010. № 193. С. 220–229.
15. Шегельман И. Р. Создание и внедрение новых технических решений в лесной промышленности. Петрозаводск: Карелия, 1988. 56 с.

**ВЕНИАМИН НИКОЛАЕВИЧ ШИЛОВСКИЙ**

доктор технических наук, профессор кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет  
*tmir@psu.karelia.ru*

**СЕРГЕЙ АДОЛЬФОВИЧ КИЛЬПЕЛЯЙНЕН**

кандидат технических наук, доцент кафедры тяговых машин лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет  
*kilp@psu.karelia.ru*

**ВЕЙККО АРМАСОВИЧ КЯЛЬВИЙНЕН**

аспирант кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет  
*vek-1987@mail.ru*

## О МЕТОДАХ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН

В статье рассмотрены методы оценки эксплуатационной технологичности лесозаготовительных машин. Предложена методика поиска неисправностей, получено уравнение регрессии для вычисления оперативной трудоемкости обслуживания, рассмотрен метод функционально-стоимостного анализа.

Ключевые слова: технологичность конструкции, среднее время поиска неисправности, корреляционная связь, трудоемкость обслуживания, стоимость механизма функции, стоимость продукта

Проблема эксплуатационной технологичности (ЭТ) является составной частью общей проблемы качества машин и качества их технической эксплуатации, от решения которой значительно зависит эффективность использования лесозаготовительных машин (ЛЗМ) и оборудования. Проблема ЭТ носит комплексный характер, и для ее решения необходим системный подход, заключающийся в решении ряда задач [1], [2], [3].

Проблема ЭТ может успешно решаться путем создания замкнутой системы: разработчик – эксплуатационник – ремонтник – разработчик. В соответствии с этим технологичность конструкции делится на производственную, эксплуатационную и ремонтную. Под технологичностью при ремонте понимается приспособленность машин к работам, выполняемым на ремонтных заводах и в ремонтных мастерских. Под технологичностью при техническом обслуживании (ТО) ЛЗМ понимают совокупность свойств конструкции, определяющих ее приспособленность к работам, выполняемым при ТО, диагностировании, а также при устранении последствий эксплуатационных отказов. Технологичность конструкции ЛЗМ является функцией конструктивных, производственных и эксплуатационных факторов. Конструктивные факторы характеризуют контролепригодность, доступность, легкосъемность, взаимозаменяемость, стандартизацию и унификацию, восстанавливаемость, преемственность, монтажепригодность, эргономичность, сложность, транспортабельность, сохраняемость, гигиеничность. Производственно-тех-

нологические факторы можно разделить на две группы: организационно-технического и технологического характера. Наиболее значимыми факторами являются методы обеспечения точности при изготовлении деталей и сборочных единиц, приемы обеспечения требуемого качества рабочих поверхностей деталей и их обработки; технология сварки, сборки и обкатки. Эксплуатационные факторы определяют условия, в которых проявляются свойства конструкции ЛЗМ, заложенные при изготовлении. Основными эксплуатационными факторами являются: организация проведения ТО, в том числе диагностирования; организация и качество проведения ремонтов; квалификация и комплектность штата исполнителей; заправка ТСМ; полнота, качество и соблюдение эксплуатационной и ремонтной документации. В таблице приведены операции технологических процессов предупреждения и устранения отказов и соответствующие им свойства элементов ЛЗМ.

Требования к методам и средствам диагностирования должны предъявляться исходя из общей цели диагностирования – получения информации о техническом состоянии ЛЗМ, осуществления анализа и прогноза этого состояния, подготовки и принятия командной информации по управлению состоянием для сохранения оптимальной надежности машин при эксплуатации.

Для обнаружения отказавшего элемента может быть использована определенная стратегия поиска. Исследуемый объект разбивается на отдельные элементы, имеющие связи «вход – выход».

Операции технологических процессов предупреждения и устранения отказов и соответствующие им свойства элементов ЛЗМ

	Операции									
	определенные технического состояния	подход к элементу	снятие	ремонт	установка	подбор, центровка, пригонка	Регулировка	мойка, чистка, смазка	установка предварительно снятых элементов	проверка
Свойства элементов	Контролепригодность	Доступность	Легкость	Восстановимость	Легкость	Взаимозаменяемость	Регулируемость	Обслуживаемость	Доступность	Контролепригодность
Характеристики элементов	$t_k$ $T_k$ $C_k$	$t_d$ $T_d$ $C_d$	$t_l$ $T_l$ $C_l$	$t_v$ $T_v$ $C_v$	$t'_l$ $T'_l$ $C'_l$	$t_{вз}$ $T_{вз}$ $C_{вз}$	$t_{рег}$ $T_{рег}$ $C_{рег}$	$t_{обсл}$ $T_{обсл}$ $C_{обсл}$	$t'_d$ $T'_d$ $C'_d$	$t'_k$ $T'_k$ $C'_k$

Примечание.  $t$  – продолжительность,  $T$  – трудоемкость выполнения,  $C$  – стоимость операций.

На рис. 1 и 2 представлены функциональная схема и граф программы диагностирования и поиска параметрических отказов элементов гидропривода трелевочного трактора типа ТБ-1М.

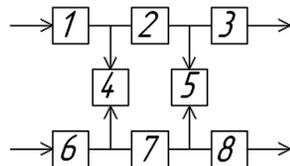


Рис. 1. Функциональная схема объекта диагностирования, состоящего из 8 элементов: 1 – насос НШ-100; 2 – насос НШ-50; 3 – распределитель Р-75; 4 – гидроцилиндр стрелы; 5 – гидроцилиндр стрелы; 6 – гидроцилиндр поворота; 7 – гидроцилиндр рукоятки; 8 – гидроцилиндр захвата

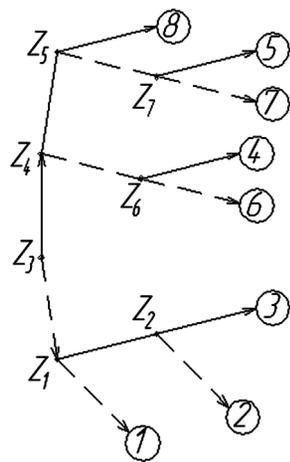


Рис. 2. Граф программы последовательного поиска отказов в объекте, приведенного на рис. 1

Если считать, что в рассматриваемом объекте невозможны параметрические отказы одновременно нескольких элементов и что отказ любого из элементов приводит к отказу всего объекта, то среднее время поиска неисправности можно определить по выражению [1]:

$$T_k = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{q_i}{p_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{q_i}{p_i}} \cdot \sum_{i=1}^m t_i, \quad (1)$$

где  $q_i$  – вероятность отказа  $i$ -го элемента;  $p_i$  – вероятность безотказной работы;  $n$  – число ветвей согласно разработанному графу;  $m$  – множество элементов, составляющих  $i$ -ю ветвь программы контроля;  $t_i$  – время на все операции контроля  $i$ -го элемента.

Методы оценки технологичности при техническом обслуживании, согласно работе [7], включают аналитический, графоаналитический, экспериментально-расчетный, комплексный, экономический методы. Рассмотрим подробнее аналитический метод.

Он объединяет большую группу методов, общим для которых является положение о том, что между техническими параметрами, характеризующими конструкцию, и показателями эксплуатационной технологичности существует корреляционная связь. Корреляционную связь можно представить в виде уравнения регрессии [7], [4]:

$$S = a_0 x_1^{a_1} x_2^{a_2} x_3^{a_3} \dots x_m^{a_m}, \quad (2)$$

где  $S$  – оперативная трудоемкость по видам обслуживания (зависимая переменная);  $a_0, \dots, a_m$  – коэффициенты уравнения регрессии;  $x_1, \dots, x_m$  – конструктивные и эксплуатационно-технологические факторы (независимые переменные);  $x_1$  – средневзвешенная периодичность ТО;  $x_2$  – число видов ТО;  $x_3, x_4, x_5$  – число операций обслуживания (контрольно-заправочных, крепежно-регулирующих, моечно-очистных соответственно);  $x_6$  – число встроенных контрольных приборов;  $x_7$  – число емкостей, заправляемых маслами;  $x_8$  – число инструментов, прикладываемых к трактору (используемых при ТО и текущем ремонте).

Связь между результирующими признаками эксплуатационной технологичности  $S$  и факторами  $x_1, x_2, \dots, x_m$  можно представить в виде матрицы:

$$\begin{matrix} S_1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ S_2 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_n & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{matrix}$$

В результате решения поставленной задачи на основании материалов испытаний тракторов Онежского тракторного завода и машин на их базе получено уравнение регрессии:

$$S = 4399,7 \cdot x_1^{-0,79} \cdot x_2^{-0,80} \cdot x_3^{-0,39} \times \\ \times x_4^{0,08} \cdot x_5^{0,29} \cdot x_6^{-0,37} \cdot x_7^{0,58} \cdot x_8^{0,59} \quad (3)$$

Все факторы, вошедшие в уравнение (3), по  $t$ -критерию значимы при вероятности  $\alpha = 0,1$  и числе степеней свободы  $\nu = 3$  (коэффициент множественной детерминации  $R^2 = 0,89$ , значение критерия Фишера  $F = 7,97$ ). По уравнениям, подобным уравнению (3), можно определять трудоемкость ТО на этапе проектирования, в процессе модернизации машин, а также дать сравнительную оценку эксплуатационной технологичности разных машин, оценить эффект различных мероприятий, улучшающих технологичность конструкций.

Эксплуатационная технологичность связана с оснащенностью ремонтно-обслуживающей базы (РОБ) предприятия. Полнота и качество проведения ТО зависят от наличия достаточно дорогих ремонтно-диагностических стендов. Решению задачи обоснования номенклатуры и количества стендов во многом способствует внедрение на лесозаготовительных предприятиях процессного подхода к управлению и основанного на нем метода функционально-стоимостного анализа (ФСА) [1], [2]. Стоимость функции по созданию конечного продукта зависит от суммарной стоимости ее механизмов. Стоимость механизма – это стоимость поглощаемого отдельной функцией ресурса. Она рассчитывается путем распределения общей стоимости ресурса между функциями, потребляющими этот ресурс на основе носителя затрат. Общая формула для расчета стоимости механизма (как действия по реализации функции) имеет вид:

$$C_{mi} = \sum_{j=1}^k \frac{CHZ_j \cdot HZ_j}{\Phi_i} \quad (4)$$

где  $C_{mi}$  – стоимость  $i$ -го механизма;  $CHZ_j$  – ставка  $j$ -го носителя затрат;  $HZ_j$  – количественное значение  $j$ -го носителя затрат по отдельной функции;  $\Phi_i$  – частота выполнения функции;  $k$  – количество групп затрат.

В свою очередь, ставка носителя затрат равна:

$$CHZ_j = \frac{Z_{oj}}{HZ_{oj}} \quad (5)$$

где  $Z_{oj}$  – суммарные затраты предприятия (структурного подразделения) по  $j$ -й группе затрат;  $HZ_{oj}$  – количественное значение  $j$ -го носителя за-

трат в целом по предприятию (структурному подразделению).

Стоимость бизнес-процесса есть суммарная стоимость составляющих его функций. При этом стоимость продукта как результата бизнес-процесса связана с его стоимостью соотношением:

$$C_n = C_{\text{он}} + C_{\text{е}} \quad (6)$$

где  $C_n$  – стоимость продукта на выходе;  $C_{\text{он}}$  – стоимость бизнес-процесса;  $C_{\text{е}}$  – стоимость ресурсов на входе.

Продуктом может быть техническое обслуживание (ТО-2, ТО-3, СО) лесозаготовительной машины, кубометр заготовленной древесины на верхнем складе лесозаготовительного предприятия или кубометр древесины, доставленный потребителю.

Критическими бизнес-процессами являются те, вклад которых в создание конечного продукта меньше затрат на их реализацию. В результате функционально-стоимостного анализа должны быть выявлены бизнес-процессы, имеющие сравнительно низкую потребительскую стоимость, в целях дальнейшего ее повышения путем соответствующих управленческих воздействий [6].

## ВЫВОДЫ

1. Уровень эксплуатационной технологичности лесозаготовительной машины определяется ее приспособленностью к техническому обслуживанию и текущему ремонту, а также уровнем оснащенности ремонтно-обслуживающей базы и организации технической эксплуатации машин на лесозаготовительном предприятии.
2. Для сравнительной оценки уровня эксплуатационной технологичности как отечественных, так и зарубежных ЛЗМ могут быть использованы аналитический, графоаналитический, экспериментально-расчетный, комплексный и экономический методы оценки.
3. Оценка уровня оснащенности ремонтно-обслуживающей базы лесозаготовительного предприятия может быть осуществлена с использованием методики функционально-стоимостного анализа деятельности предприятия, отдельных фаз лесозаготовительного производства или отдельных фаз осуществления технического обслуживания и ремонта машин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойко А. А., Рыбачек А. А. Методика функционально-стоимостного анализа деятельности машиностроительного предприятия // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2008. № 2. С. 24–28.
2. Влчек Р. Функционально-стоимостной анализ в управлении. М.: Экономика, 1986. 176 с.
3. Иващенко Н. И. Технология ремонта автомобилей. Киев: Вища школа, 1977. 360 с.
4. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. М.: Наука, 1971. 576 с.
5. Ремонтпригодность машин. М.: Машиностроение, 1975. 368 с.
6. Шиловский В. Н. Теоретические основы и стратегии организации маркетинга и менеджмента технического сервиса территориально распределенных машин и оборудования. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2001. 324 с.
7. Эксплуатационная технологичность конструкций тракторов. М.: Машиностроение, 1982. 256 с.

ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ ВАСИЛЬЕВ

аспирант кафедры транспорта леса и инженерной геодезии  
лесоинженерного факультета, Воронежская государственная  
лесотехническая академия  
vasiliev.vova2012@yandex.ru

## ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СПЛОТНОЙ ЕДИНИЦЫ СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ПЛАВУЧЕСТИ

В статье представлены зависимости для расчета эксплуатационных показателей сплottedной единицы стабилизированной плавучести: коэффициента запаса плавучести и осадки. В сплottedных единицах стабилизированной плавучести интенсивность поглощения воды древесиной на ее осадку никакого влияния не оказывает, а коэффициент полндревесности таких сплottedных единиц способствует снижению осадки.

Ключевые слова: сплottedная единица, коэффициент полндревесности, осадка, стабилизация плавучести, гибкий водонепроницаемый материал

Сплottedные единицы предназначены для формирования плотов и сплава вольницей. Основными эксплуатационными показателями сплottedных единиц являются запас плавучести, который определяет сроки нахождения на воде в непотопляемом состоянии, и осадка, предъявляющая требования к глубинам водного пути и регламентирующая возможность использования сплottedных единиц в конкретных условиях плавания.

Анализируя закономерность формирования осадки сплottedной единицы, следует отметить, что на первоначальном этапе сплава она имеет минимальное значение, но с течением времени увеличивается [4]. Это приводит к уменьшению коэффициента запаса плавучести и времени нахождения сплottedной единицы на плаву. Такой процесс особенно неприятен на реках с малыми глубинами, когда не хватает времени для вывода сплottedных единиц на большие глубины и они тонут или садятся на мель на порогах и перекатах. Таким образом, изменение (снижение) коэффициента запаса плавучести с течением времени является одним из недостатков всех сплottedных единиц, в том числе усовершенствованных плоских [3].

Для устранения указанного недостатка предложена конструкция сплottedной единицы стабилизированной плавучести [1], [4], которая также позволяет снизить энергозатраты на буксировку.

Если сплottedная единица включает лесоматериалы повышенной плавучести и ограниченной плавучести, а также гибкий водонепроницаемый материал и сплottedный такелаж, то ее вес  $G_{CE}$ , Н составит

$$G_{CE} = g(k_{III}V_{III}\rho_{III} + k_{OP}V_{OP}\rho_{OP} + m_{GM} + m_{CT}), \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $k_{III}$  – коэффициент, учитывающий увеличение массы лесоматериалов повышенной плавучести за счет коры;  $V_{III}$  – объем лесоматериалов повышенной

плавучести, м<sup>3</sup>;  $\rho_{III}$  – плотность лесоматериалов повышенной плавучести, кг/м<sup>3</sup>;  $k_{OP}$  – коэффициент, учитывающий увеличение массы лесоматериалов ограниченной плавучести за счет коры;  $V_{OP}$  – объем лесоматериалов ограниченной плавучести, м<sup>3</sup>;  $\rho_{OP}$  – плотность лесоматериалов ограниченной плавучести, кг/м<sup>3</sup>;  $m_{GM}$  – масса листа гибкого водонепроницаемого материала, кг;  $m_{CT}$  – масса сплottedного такелажа, кг.

Согласно закону Архимеда, выталкивающая сила  $P$  равна весу вытесненной жидкости  $G$  ( $P = G$ ), следовательно, условие равновесия сплottedной единицы на воде примет вид

$$P = G_{CE} = G. \quad (2)$$

В выражении (2) вес вытесненной жидкости определяется по формуле

$$G = g\rho W_{II}(1 + k_K), \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $W_{II}$  – погруженный объем лесоматериалов сплottedной единицы, м<sup>3</sup>;  $k_K$  – коэффициент, учитывающий долю коры от объема лесоматериалов.

При обертывании сплottedной единицы в водонепроницаемый материал пространство между лесоматериалами в погруженной части не заполняется водой, поэтому формула (3) примет вид

$$G = \frac{g\rho W_{II}}{k_{POL}}, \quad (4)$$

где  $k_{POL}$  – коэффициент полндревесности сплottedной единицы.

Из равенства (2) получим следующее выражение:

$$k_{III}V_{III}\rho_{III} + k_{OP}V_{OP}\rho_{OP} + m_{GM} + m_{CT} = \frac{\rho W_{II}}{k_{POL}}. \quad (5)$$

Используя формулу (5), выразим погруженный объем лесоматериалов сплottedной единицы, который составит

$$W_{II} = \frac{k_{пол}(k_{III}V_{III}\rho_{III} + k_{оп}V_{оп}\rho_{оп} + m_{ГМ} + m_{СТ})}{\rho}. \quad (6)$$

Так как  $k_{пол} < 1$ , то, согласно формуле (6), погруженный объем лесоматериалов сплочной единицы уменьшится, следовательно, уменьшится и ее осадка.

Коэффициент запаса плавучести сплочной единицы составляет [1], [5]

$$K = 1 - \frac{\rho_{св}}{\rho}, \quad (7)$$

где  $\rho_{св}$  – средневзвешенная плотность сплочной единицы, кг/м<sup>3</sup>.

Средневзвешенная плотность завернутой в гибкий водонепроницаемый материал сплочной единицы  $\rho_{св}$  равна

$$\rho_{св} = \frac{k_{III}V_{III}\rho_{III} + k_{оп}V_{оп}\rho_{оп} + m_{ГМ} + m_{СТ}}{W}, \quad (8)$$

где  $W$  – геометрический объем сплочной единицы, м<sup>3</sup>.

$$W = \frac{k(V_{III} + V_{оп})}{k_{пол}}, \quad (9)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий увеличение геометрического объема сплочной единицы за счет обертывающего материала и такелажа.

Коэффициент запаса плавучести завернутой в гибкий водонепроницаемый материал сплочной единицы с учетом формулы (8) составит

$$K = 1 - \frac{k_{III}V_{III}\rho_{III} + k_{оп}V_{оп}\rho_{оп} + m_{ГМ} + m_{СТ}}{\rho W}. \quad (10)$$

Подставив в формулу (10) выражение (9), получим

$$K = 1 - \frac{k_{пол}(k_{III}V_{III}\rho_{III} + k_{оп}V_{оп}\rho_{оп} + m_{ГМ} + m_{СТ})}{k\rho(V_{III} + V_{оп})}. \quad (11)$$

Если не учитывать влияние коры на массу сплочной единицы, пренебречь влиянием обертывающего материала и такелажа, то  $k_{III} = k_{оп} = 1$ ,  $m_{ГМ} = m_{СТ} = 0$ ,  $k = 0$ , а формула (11) упрощается [1].

Анализ формулы (11) показывает, что применение в конструкции сплочной единицы гибкого материала для ее обертывания по дну и бортам независимо от вида применяемого круглого лесоматериала позволяет увеличить запас плавучести и стабилизировать его за счет исключения водонасыщения лесоматериалов при их контакте с водой.

Определим осадку сплочной единицы, для чего выразим ее погруженный объем  $W_{II}$  через габаритные размеры – длину  $L$  и ширину  $B$ , а также осадку  $T$ . Для сплочной единицы, конструкция которой представлена в работах [1], [4], принимаем постоянную ширину по высоте; длина ее ватерлинии  $L_{вЛ}$  зависит от осадки:

$$L_{вЛ} = L - 2B_{III} - d_{оп}(1 - \sin \alpha) + 2T \operatorname{ctg} \alpha, \quad (12)$$

где  $B_{III}$  – ширина пакета лесоматериалов повышенной плавучести, м;  $d_{оп}$  – диаметр лесоматериалов ограниченной плавучести нижнего ряда, м;  $\alpha$  – угол скоса донной части пакета лесоматериалов повышенной плавучести, град.

С достаточной точностью угол скоса донной части пакета лесоматериалов повышенной плавучести можно определить по зависимости

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{H - d_{III} - d_{оп}}{2B_{III} - d_{III} + d_{оп}}, \quad (13)$$

где  $H$  – высота (толщина) сплочной единицы, м;  $d_{III}$  – диаметр лесоматериалов повышенной плавучести, м.

Надо отметить, что зависимость (12) справедлива при величинах осадки меньше значения  $T_0$  ( $T < T_0$ ), равного

$$T_0 = [B_{III} + d_{оп}(1 - \sin \alpha)] \operatorname{tg} \alpha. \quad (14)$$

При принятых условиях погруженный объем  $W_{II}$  сплочной единицы определяется интегралом

$$W_{II} = kB \int L_{вЛ} dT. \quad (15)$$

Интегрирование выполняется при следующем условии:  $T < T_0$ ;  $T = 0$ ;  $W_{II} = 0$ . Зависимость  $W_{II}$  от  $T$  имеет вид

$$W_{II} = kBT \left( L - 2B_{III} - d_{оп}(1 - \sin \alpha) + T \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \right). \quad (16)$$

Формула (16) представляет собой квадратное уравнение, определяющее величину осадки. Запишем его в виде

$$aT^2 + bT + c = 0; a = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha}; \quad (17)$$

$$b = L - 2B_{III} - d_{оп}(1 - \sin \alpha); c = -\frac{W_{II}}{kB}.$$

С учетом выражения (6)

$$c = -\frac{k_{пол}(k_{III}V_{III}\rho_{III} + k_{оп}V_{оп}\rho_{оп} + m_{ГМ} + m_{СТ})}{kB\rho}. \quad (18)$$

Решение уравнения (17) при  $0 < \alpha < 90^\circ$  и  $a = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} > 0$

$$T = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (19)$$

При величинах осадки больше значения  $T_0$ , но меньше  $T_1$  ( $T_0 < T < T_1$ ) погруженный объем сплочной единицы состоит из двух составляющих: объема  $W_{II_0}$ , соответствующего значению  $T_0$  и определяемого по формуле (16), где  $T = T_0$ , и объема  $W_{II_1}$ , соответствующего разности  $T = T_0$  и вычисляемого по формуле

$$W_{\Pi 1} = kBL(T - T_0). \quad (20)$$

Значение  $T_1$  равно

$$T_1 = H - [B_{\text{III}} + d'_{\text{OII}}(1 - \sin \alpha')] \operatorname{tg} \alpha', \quad (21)$$

где  $d'_{\text{OII}}$  – диаметр лесоматериалов ограниченной плавучести верхнего ряда, м;  $\alpha'$  – угол скоса верхней части пакета лесоматериалов повышенной плавучести, град.  $\alpha'$  определяется по формуле (13) при  $d_{\text{OII}} = d'_{\text{OII}}$ .

Сложив объемы  $W_{\Pi 0}$  и  $W_{\Pi 1}$  и приравняв их сумму к правой части выражения (6), после преобразований получим

$$T = \frac{k_{\text{ПОЛ}}(k_{\text{III}}V_{\text{III}}\rho_{\text{III}} + k_{\text{OII}}V_{\text{OII}}\rho_{\text{OII}} + m_{\text{ГМ}} + m_{\text{СТ}})}{kBL\rho} - \frac{T_0}{L} \left( L - 2B_{\text{III}} - d_{\text{OII}}(1 - \sin \alpha) + T_0 \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \right) + T_0. \quad (22)$$

При величинах осадки больше значения  $T_1$  ( $T > T_1$ ) в погруженный объем сплочной единицы входят три составляющие: объем  $W_{\Pi 0}$ , соответствующий значению  $T_0$  и определяемый по формуле (16), где  $T = T_0$ , объем  $W_{\Pi 1}$ , соответствующий разности  $(T - T_1)$  и вычисляемый по формуле (20) при  $T = T_1$ , и объем  $W_{\Pi 2}$ , соответствующий разности  $(T - T_1)$  и вычисляемый в зависимости от длины ватерлинии  $L_{\text{ВЛ}}$  определяемой выражением

$$L_{\text{ВЛ}} = L - 2(T - T_1) \operatorname{ctg} \alpha'. \quad (23)$$

Обозначим  $t = T - T_1$ , тогда с учетом (23) определим  $W_{\Pi 2}$  по формуле

$$W_{\Pi 2} = kB \int L_{\text{ВЛ}} dt = kB \int \left( L - 2t \frac{\cos \alpha'}{\sin \alpha'} \right) dt. \quad (24)$$

После интегрирования при условии  $t = 0$ ,  $W_{\Pi 2} = 0$  получим

$$W_{\Pi 2} = kB \left( Lt - t^2 \frac{\cos \alpha'}{\sin \alpha'} \right). \quad (25)$$

Зависимость (25) – квадратное уравнение, которое запишем в виде

$$dt^2 + et + f = 0; d = \frac{\cos \alpha'}{\sin \alpha'}; e = -L; f = \frac{W_{\Pi 2}}{kB}. \quad (26)$$

Так как  $W_{\Pi} = W_{\Pi 0} + W_{\Pi 1} + W_{\Pi 2}$ , с учетом зависимостей (6), (16) и (20)

$$W_{\Pi 2} = \frac{k_{\text{ПОЛ}}(k_{\text{III}}V_{\text{III}}\rho_{\text{III}} + k_{\text{OII}}V_{\text{OII}}\rho_{\text{OII}} + m_{\text{ГМ}} + m_{\text{СТ}})}{\rho} - \quad (27)$$

$$-kBT_0 \left( L - 2B_{\text{III}} - d_{\text{OII}}(1 - \sin \alpha) + T_0 \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \right) - kBL(T_1 - T_0).$$

Из формулы (27) следует, что

$$f = \frac{k_{\text{ПОЛ}}(k_{\text{III}}V_{\text{III}}\rho_{\text{III}} + k_{\text{OII}}V_{\text{OII}}\rho_{\text{OII}} + m_{\text{ГМ}} + m_{\text{СТ}})}{\rho kB} - \quad (28)$$

$$-T_0 \left( L - 2B_{\text{III}} - d_{\text{OII}}(1 - \sin \alpha) + T_0 \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \right) - L(T_1 - T_0).$$

Решение уравнения (26) при  $0 < \alpha' < 90^\circ$  и  $d = \frac{\cos \alpha'}{\sin \alpha'} > 0$  после подстановки  $t = T - T_1$  выглядит так:

$$T = \frac{-e - \sqrt{e^2 - 4df}}{2d} + T_1. \quad (29)$$

На основании всего сказанного можно сделать вывод, что формирование осадки сплочных единиц происходит за счет коэффициента полндревесности, плотности древесины, интенсивности поглощения воды древесиной, а также конструкции и параметров сплочной единицы. При этом в сплочных единицах стабилизированной плавучести [1], [4] интенсивность поглощения воды древесиной на осадку сплочной единицы никакого влияния не оказывает. В то же время коэффициент полндревесности таких сплочных единиц способствует снижению осадки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афоничев Д. Н., Папонов Н. Н., Васильев В. В. Сплочная единица стабилизированной плавучести // Известия вузов «Лесной журнал». 2010. № 6. С. 114–120.
2. Митрофанов А. А. Лесосплав. Новые технологии, научное и техническое обеспечение. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. 492 с.
3. Пат. 2043255 РФ, МПК В 63 В 35/62. Сплочная единица / А. А. Митрофанов, Г. Я. Сувор, М. Н. Фоминцев; заявитель и патентообладатель Архангельский ЛТИ. № 4928310/11; заявл. 18.04.1992, опубл. 10.09.1995 г., бюл. № 25.
4. Пат. 2381949 РФ, МПК В 63 В 35/62, 35/58. Сплочная единица / Д. Н. Афоничев, Н. Н. Папонов, В. В. Васильев; заявитель и патентообладатель ВГЛТА. № 2008146180/11; заявл. 21.11.2008, опубл. 20.02.2010, бюл. № 5.
5. Справочник по водному транспорту леса / Под ред. В. А. Щербакова. М.: Лесн. пром-сть, 1986. 384 с.

**ЮРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ ЗАЙКА**

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Института прикладных математических исследований, Карельский научный центр РАН  
 zaika@krc.karelia.ru

**ЕКАТЕРИНА КОНСТАНТИНОВНА КОСТИКОВА**

научный сотрудник Института прикладных математических исследований, Карельский научный центр РАН  
 fedorova@krc.karelia.ru

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ТЕРМОДЕСОРБЦИИ ВОДОРОДА**

Рассматривается дегазация пластины, насыщенной водородом. Эксперимент проводится методом термодесорбционной спектроскопии. В краевой задаче с нелинейными граничными условиями учтены основные физико-химические процессы: диффузия и десорбция. Представлены методика оценки параметров модели по измерениям и результаты численного моделирования.

Ключевые слова: водородопроницаемость, нелинейные краевые задачи, параметрическая идентификация

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Водород рассматривается как один из перспективных экологически чистых энергоносителей. Кроме того, безопасность систем транспортировки и переработки углеводородного сырья во многом определяется уровнем защиты конструкционных материалов от водородной коррозии. Экспериментальный метод термодесорбционной спектроскопии (ТДС) является одним из основных при исследовании взаимодействия водорода с твердым телом [2], [3], [5]. Пластина толщины  $\ell$  из металла или сплава, нагретая до температуры  $T = \bar{T}$ , находится в камере с газобразным водородом под давлением  $\bar{p}$ . После насыщения раствором атомарным водородом образец быстро охлаждается (отключается ток нагрева), камера вакуумируется и в условиях медленного нагрева с помощью масс-спектрометра определяется десорбционный поток. По этой информации судят о характеристиках взаимодействия водорода с материалом.

Рассмотрим симметричную по постановке эксперимента нелинейную краевую задачу ТДС-дегазации:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D(T) \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad t \in (0, t_*), \quad x \in (0, \ell), \quad (1)$$

$$c(0, x) = \varphi(x) = \varphi(\ell - x), \quad x \in [0, \ell], \quad (2)$$

$$D(T)c_x(t, 0) = b(T)c_0^2(t), \quad t \in [0, t_*], \quad (3)$$

$$D(T)c_x(t, \ell) = -b(T)c_\ell^2(t), \quad t \in [0, t_*].$$

Здесь  $c(t, x)$  – концентрация атомарного водорода (H), растворенного в пластине,  $c_0(t) \equiv c(t, 0)$ ,  $c_\ell(t) \equiv c(t, \ell)$ ,  $c_0(t) = c_\ell(t)$ ;  $t_*$  – время дегазации;  $D$ ,  $b$  – коэффициенты диффузии и десорбции;  $J(t) = b(T)c_{0,\ell}^2(t)$  – плотность десорбционного потока (торцами пластины пренебрегаем). Квадратичность десорбции связана с тем, что водород диффундирует в металле в атомарном

состоянии, а покидает поверхность (при  $x = 0$  и  $x = \ell$ ) в молекулярной форме. Коэффициент диффузии  $D$  и коэффициент десорбции (эффективной рекомбинации)  $b$  зависят от температуры  $T$ . Как правило, в «рабочем диапазоне» с достаточной степенью приближения выполняется закон Аррениуса:  $D(t) = D_0 \exp\{-E_D/[RT]\}$ ,  $b(T) = b_0 \exp\{-E_b/[RT]\}$ ,  $D_0$ ,  $E_D$ ,  $b_0$ ,  $E_b$ ,  $R = \text{const}$  ( $E_D$ ,  $E_b$  – энергии активации,  $R = 8,31441 \text{ Дж/[моль} \cdot \text{К]}$  – универсальная газовая постоянная). Нагрев обычно линейный:  $T(t) = T_0 + vt$ ,  $v > 0$ . Сокращенно  $D(t) \equiv D(T(t))$ ,  $b(t) \equiv b(T(t))$ .

Что касается начальных данных  $\varphi(x)$ , то в силу непродолжительности подготовительного этапа (охлаждение и вакуумирование) начальное распределение обычно считают практически равномерным:  $\varphi(x) = \bar{c} = \text{const}$ . Здесь  $\bar{c} = \bar{c}(\bar{p}, \bar{T})$  – равновесная концентрация. Несогласованность начальных и граничных условий при этом непринципиальна, поскольку будем использовать лишь интегральные соотношения (решение задачи (1)–(3) понимается как обобщенное). Для тонких мембран следует учесть «начальный прогиб» концентрации по краям. Ограничимся параболической аппроксимацией  $\varphi(x) = \bar{c} - A_0[x - \ell_0]^2$ ,  $\ell_0 = \ell/2$ ,  $A_0 > 0$ .

Цель работы состоит в разработке вычислительного алгоритма для определения по плотности потока термодесорбции  $J(t)$ ,  $t \in [0, t_*]$  ( $J(t) \approx 0$ ,  $t \geq t_*$ ) параметров  $b_0$ ,  $E_b$ ,  $D_0$ ,  $E_D$ , характеризующих водородопроницаемость материала.

Трудности решения обратных задач известны [9], [10]. В частности, разработаны градиентные алгоритмы минимизации в пространстве параметров среднеквадратичной невязки экспериментальных и модельных кривых [1]. Но на каждой итерации в общем случае приходится численно решать краевые задачи при текущих приближениях параметров. К тому же обычно сходимость локальная. Учет специфики метода

ТДС позволил разработать алгоритм идентификации, в котором основная вычислительная нагрузка связана с квадратурными формулами, а не решением краевых задач.

Для тестирования алгоритма решения обратной задачи сначала численно генерировались модельные кривые, порождающие параметры которых затем «забывались». Из-за большого разброса порядков величин при моделировании  $J(t)$  проводилось масштабирование:  $x = \ell z$ ,  $z \in [0, 1]$ ,  $u = c/\bar{c}$ ,  $u_t = Du_{zz}$ ,  $Du_z|_{0,1} = \pm bu_{0,1}^2$ ,  $D = D/\ell^2$ ,  $b = b\bar{c}/\ell$ ,  $u(0, z) = 1 - A_0(z - 0,5)^2$ ,  $A_0 = A_0\ell^2/\bar{c}$ . Здесь за преобразованными параметрами модели оставляем прежние обозначения  $D$ ,  $b$ ,  $A_0$ . В вычислительных экспериментах ориентировались на данные по вольфраму, являющемуся одним из конструкционных материалов в реакторах [8]:  $\bar{c} = 5,084 \times 10^{16}$  1/см<sup>3</sup> (К), ( $\bar{T} = 1300$  К),  $T_0 = 300$  К,  $\dot{T} = 2$  К/с,  $t_* = 500$  с,  $\ell = 0,1$  см,  $b_0 = 6 \times 10^{-12}$  см<sup>4</sup>/с;  $E_b = 39,559$  кДж/моль,  $D_0 = 4,1 \times 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с;  $E_D = 37,629$  кДж/моль.

#### ПАРАБОЛИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ

Сходимость в нелинейных обратных задачах параметрической идентификации, как правило, локальная. В рассматриваемом ТДС-эксперименте распределение  $c(t, x)$  имеет «куполообразный» характер. Поэтому целесообразно в качестве начального плана за первое приближение взять параболическую аппроксимацию

$$c(t, x) \approx \bar{c}(t, x) = B(t) - A(t)(x - \ell_0)^2, \\ 2\ell_0 = \ell, A(0) = A_0, B(0) = \bar{c}.$$

Считаем известной равновесную растворимость  $\bar{c} = \bar{c}(\bar{p}, \bar{T}) \sim \sqrt{\bar{p}}$ , которая в условиях эксперимента пропорциональна корню из давления насыщения. Функция  $B(t) > 0$  аппроксимирует срединную концентрацию  $c(t, \ell_0)$ ,  $A(t) > 0$ ,  $t > 0$ . Поскольку к моменту  $t_*$  произошла дегазация образца ( $c(t, x) \approx 0$ ,  $t \geq t_*$ ), определим константу  $A_0$  в начальных данных  $\varphi(x) = \bar{c} - A_0[x - \ell_0]^2$  из материального баланса

$$S_* = \int_0^{t_*} J(\tau) d\tau = \int_0^{\ell_0} \{\bar{c} - A_0[x - \ell_0]^2\} dx = \bar{c}\ell_0 - \frac{A_0\ell_0^3}{3}. \quad (4)$$

Отсюда  $A_0 = 3(\bar{c}\ell_0 - S_*)/\ell_0^3$ . Величина  $S_*$  равна половине количества десорбировавшегося водорода (в атомах), отнесенного к см<sup>2</sup> поверхности ( $x = 0$  или  $x = \ell$  неважно в силу симметрии). Условия согласования  $Dc_x|_{0,\ell} = \pm bc_{0,\ell}^2$  при  $t = 0$  начальных данных и граничных условий дает зависимость  $D_0/b_0 = f_0(E_b - E_D)$ :

$$D(0)A_0\ell = b(0)[\bar{c} - A_0\ell_0^2]^2 \Rightarrow \\ \frac{D_0}{b_0}A_0\ell = \exp\left\{\frac{E_D - E_b}{RT_0}\right\}[\bar{c} - A_0\ell_0^2]^2. \quad (5)$$

Перейдем к конкретизации функций  $A(t)$ ,  $B(t)$  в аппроксимации  $\bar{c}(t, x)$ . Из условия баланса выразим  $B(t) > 0$  и подставим в  $\bar{c}(t, x)$ :

$$\int_0^{\ell_0} \varphi(x) dx - S(t) = \int_0^{\ell_0} \bar{c}(t, x) dx \Rightarrow \\ \bar{c}\ell_0 - A_0\ell_0^3/3 - S(t) = B(t)\ell_0 - A(t)\ell_0^3/3, \\ B(t) = A(t)\ell_0^2/3 + \bar{c} - A_0\ell_0^2/3 - S(t)/\ell_0, \\ \Rightarrow \bar{c}(t, x) = Q(t)\ell^{-1} - A(t)[x^2 - \ell x + \ell^2/6], \\ S(t) \equiv \int_0^t J(\tau) d\tau, \quad Q(t) \equiv 2 \int_t^{t_*} J(\tau) d\tau.$$

Чтобы найти оставшийся функциональный параметр  $A(t)$ , подставим выражение для  $\bar{c}(t, x)$  в граничное условие  $D(T)\bar{c}_x(t, 0) = b(T)\bar{c}_0^2(t)$ . Это соотношение позволяет выразить  $A(t)$  через коэффициенты модели  $D$ ,  $b$  и известную по экспериментальным данным  $Q(t)$ . Оба корня квадратного уравнения относительно  $A(t)$  положительные, выбираем меньший из них (по физическому смыслу  $c_0(t) \geq 0$ ). Из условия  $\sqrt{J} = \bar{c}_0\sqrt{b}$  получаем соотношение для оценки  $D_0$ ,  $E_D$ ,  $b_0$ ,  $E_b$ :

$$\sqrt{\frac{J(t)}{b(T)}} = \frac{3D(T)}{\ell b(T)} \left[ \sqrt{1 + Q(t) \frac{2b(T)}{3D(T)}} - 1 \right], T = T(t), t \in [0, t_*]. \quad (6)$$

Поскольку  $J(t)$  соответствует модели (1)–(3), а на предварительном этапе оценки  $b$ ,  $D$  используется параболическое приближение, то это равенство является приближенным.

График  $J(t)$  имеет характер всплеска с последующим затуханием, причем на начальном и конечном этапах измерения менее точны. Поэтому ограничимся  $t \in [t_1, t_2] \subset (0, t_*)$ , нормируем уравнение на  $I_{\max} = \sqrt{J_{\max}}$  ( $I(t) \equiv \sqrt{J(t)}$ ) и выделим безразмерные переменные:

$$I(t)I_{\max}^{-1} = \left( \sqrt{1 + 2Q(t)t_*^{-1}J_{\max}^{-1}X} - 1 \right) Y, \\ X \equiv \frac{t_*J_{\max}b(T)}{3D(T)}, \quad Y \equiv \frac{3D(T)}{I_{\max}\ell\sqrt{b(T)}}. \quad (7)$$

Формально допуская  $E < 0$ , удобно считать новые переменные  $X(t) \equiv X(T(t))$ ,  $Y(t) \equiv Y(T(t))$ , «каррениусовскими»:

$$X_0 \equiv \frac{t_*J_{\max}b_0}{3D_0}, \quad Y_0 \equiv \frac{3D_0}{I_{\max}\ell\sqrt{b_0}}.$$

$$E_X \equiv E_b - E_D, \quad E_Y \equiv E_D - E_b/2.$$

Обозначая  $q \equiv 2Qt_*^{-1}J_{\max}^{-1}$ , получаем уравнение

$$f(t; X_0, E_X, Y_0, E_Y) \equiv I(t)I_{\max}^{-1} - \\ - \left( \sqrt{1 + q(t)X} - 1 \right) Y = 0. \quad (8)$$

Преобразуем величину  $Y$  с учетом связи  $D_0/b_0 = f_0(E_X)$  (см. (5)):

$$Y = Y_0 \exp\{-E_Y/[RT(t)]\} = \\ = Z_0 \exp\{-E_X/[RT_0]\} \exp\{-E_Y/[RT(t)]\}, \quad (9)$$

$$Z_0 \equiv \frac{3[\bar{c} - A_0\ell_0^2]^2\sqrt{b_0}}{A_0\ell^2I_{\max}}, \quad Z_0 = Z_0(b_0) \leftrightarrow b_0.$$

Величина  $I_{\max}$  зависит от входных данных  $\{\varphi, D, b\}$ . Запись  $Z_0 = Z_0(b_0)$  означает, что значения  $\bar{c}, A_0$  уже найдены, а функция  $J(t)$  при решении обратной задачи известна. Аналогично

$$X = X_0 \exp\left\{-\frac{E_X}{RT(t)}\right\} = \frac{t_* J_{\max} A_0 \ell}{3[\bar{c} - A_0 \ell_0^2]^2} \exp\left\{\frac{E_X}{RT_0}\right\} \exp\left\{-\frac{E_X}{RT(t)}\right\}.$$

Подставляя выражения  $X, Y$  в уравнение (8), получаем зависимость  $f = f(t; Z_0, E_X, E_Y)$ . Далее с учетом зашумленности реальных измерений и погрешности параболической аппроксимации следуем методу наименьших квадратов (МНК):

$$F(Z_0, E_X, E_Y) \equiv \int_{t_1}^{t_2} f^2(\tau) d\tau \rightarrow \min.$$

Производные функции  $F$  можно выписать явно (подсчет интеграла считаем элементарной операцией).

Перейдем к изложению результатов численного моделирования. Разностная схема решения задач термодесорбции изложена в [4]. График плотности потока водорода для указанных параметров представлен на рис. 1.

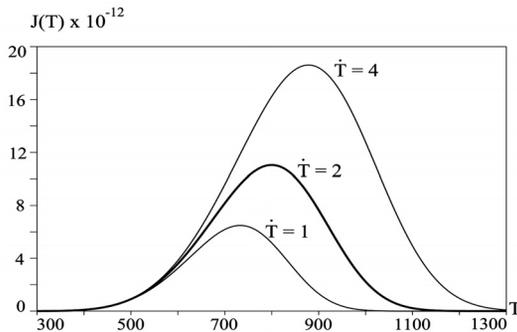


Рис. 1. ТДС-спектр. Влияние скорости нагрева

Для оценки значений  $D_0, E_D, b_0, E_b$  использовались МНК и метод моментов (ММ) применительно к уравнению (8) ( $f = 0$ ), в которое подставлены: выражения  $X, Y$  согласно формулам (7);  $D(t) = D_0 \exp\{-E_D/[RT]\}$ ,  $b(T) = b_0 \exp\{-E_b/[RT]\}$ ;  $T(t) = T_0 + vt$  выражение  $D_0 = D_0(b_0, E_D, E_b)$  из соотношения (5). На рис. 2, 3 показано, что задача  $\|f\|_{L_2} \rightarrow \min (L_2 = L_2[t_1, t_2], t_1 = 50 \text{ с}, t_2 = 450 \text{ с})$  хорошо обусловлена по каждому из коэффициентов  $D, b$  (один из них фиксировался равным «истинному» значению). При этом дополнительное соотношение (5) не учитывалось при построении поверхности на рис. 3, но для рис. 2 оно необходимо, иначе отсутствует экстремум в физически оправданном диапазоне.

Остановимся на уравнении  $f(t; Z_0, E_X, E_Y) = 0$ , полученном после подстановки в (8) выражений  $X, Y, D_0$  в соответствии с формулами (5), (7). «Истинные» значения:  $Z_0^* = 0,119, E_X^* = 1,929, E_Y^* = 17,849$ . Варьируем лишь один из параметров  $Z_0, E_X, E_Y$ . Решение задачи  $\|f\|_{L_2} \rightarrow \min$  по  $Z_0$  дает относительную погрешность  $\delta(Z_0) = |Z_0 - Z_0^*|/Z_0^* = 0,52$ . Это приводит в соответствии с формулой (9) к  $\delta(b_0) = 0,77$  и  $\delta(D_0) = 0,17$  в силу (5).

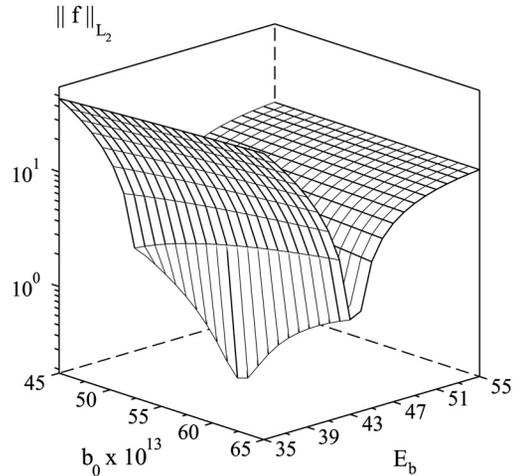


Рис. 2. Экстремум по  $b$

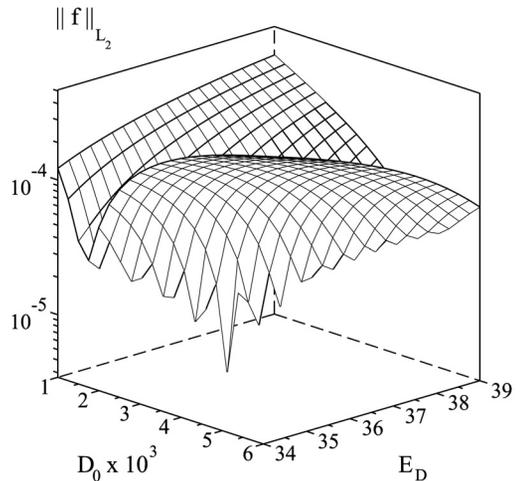


Рис. 3. Экстремум по  $D$

Для задачи  $\|f\|_{L_2} \rightarrow \min$  по  $E_X$  имеем  $\delta(E_X) = 1,38 (\delta(E_b) = 0,13, \delta(E_D) = 0,07); \delta(E_Y) = 0,26 (\delta(E_b) = 0,23, \delta(E_D) = 0,25)$  для  $\|f\|_{L_2} \rightarrow \min$  по  $E_Y$ .

Обратимся к методу моментов. Обозначим

$$M_i = M_i(Z_0, E_X, E_Y) =$$

$$= \int_{t_1}^{t_2} \Psi_i(t) f(t; Z_0, E_X, E_Y) dt.$$

Ограничимся функциями  $\Psi_1(t) = t/t_*$ ,  $\Psi_2(t) = t^2/t_*^2$ ,  $\Psi_3(t) = 10^{-1} t_*/t, t \in [t_1, t_2], t_1 = 50, t_2 = 450 (t_* = 500)$ . Использование ММ (решение системы  $M_i = 0$ ) дает в среднем такую же точность, как и МНК. Применение параболического приближения позволило решить обратную задачу для исходной распределенной модели с погрешностями, указанными в табл. 1. Подчеркнем, что параболическое приближение является грубым для исходной краевой задачи (1)–(3). Его задача – «попасть в порядки» оцениваемых коэффициентов  $D, b$ . Значение предэкспоненты  $b_0$  определяется заметно хуже, что объясняется его малым

абсолютным значением (коэффициент при квадрате концентрации). Можно было бы перейти к двойной точности вычислений на всех этапах моделирования, но это излишне при зашумленных входных данных обратной задачи.

Таблица 1  
Оценки параболического приближения

Параметр	Исходные данные	Полученные значения	Относительная погрешность
$b_0$	$6 \times 10^{-12}$	$1,514 \times 10^{-11}$	152,3 %
$E_b$	39,559	45,100	19,8 %
$D_0$	$4,1 \times 10^{-3}$	$2,880 \times 10^{-3}$	29,7 %
$E_D$	37,629	36,745	7,1 %

Начальные приближения  $E_D$ ,  $E_b$  в диапазоне нескольких десятков кДж/моль можно указать из физико-химических соображений. Приближение  $b_0(Z_0)$  берем в силу  $J(0) = b(T_0)c_{0,\ell}^2(0) = b_0 \exp\{-E_b/[RT_0]\}[\bar{c} - A_0\ell_0^2]^2$ . Только как начальное приближение, поскольку  $J(0)$  обычно известно с большой погрешностью.

*Замечание.* Задача усложняется, когда равновесную концентрацию  $\bar{c}$  также приходится считать неизвестной. Тогда задача четырехмерная в соответствии с (8). По оценкам  $X_0$ ,  $E_x$ ,  $Y_0$ ,  $E_y$  значения  $\bar{c}$ ,  $A_0$  находятся из уравнений (4), (5).

Далее переходим к локальному уточнению оценок  $D_0$ ,  $E_D$ ,  $b_0$ ,  $E_b$  в соответствии с исходной моделью (1)–(3). Искомых независимых переменных 3 в силу  $D_0/b_0 = f_0(E_b - E_D)$ .

### ПРИМЕНЕНИЕ ФУНКЦИИ ГРИНА

Поскольку зависимость  $J(t)$  известна по результатам эксперимента, то решение задачи

$$c_t = D(T)c_{xx}, \quad c(0, x) = \bar{c} - A_0[x - \ell_0]^2,$$

$$Dc_x(t, 0) = -Dc_x(t, \ell) = J(t)$$

удобно представить с помощью функции Грина [6]. Получаем следующее представление  $c_0(t)$ :

$$\begin{aligned} c_0(t) = & \bar{c} - \frac{2}{\ell} \int_0^t J(\tau) d\tau - \\ & - A_0 \ell \left[ \frac{\ell}{12} + \frac{4}{\ell} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n} \exp\{-\mu_n \gamma(t, 0)\} \right] - \\ & - \frac{4}{\ell} \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^t \exp\{-\mu_n \gamma(t, \tau)\} J(\tau) d\tau, \\ \gamma(t, \tau) \equiv & \int_{\tau}^t D(s) ds, \quad \mu_n \equiv \left( \frac{n\pi}{\ell_0} \right)^2. \end{aligned}$$

Заменим в скобке [...] экспоненту на  $[\exp\{-\mu_n \gamma(t, 0)\} - 1] + 1$ :

$$v_n(t) \equiv \frac{1 - \exp\{-\mu_n \gamma(t, 0)\}}{\mu_n}, \quad [1 - \dots]/\mu_n$$

$$c_0(t) = \varphi(0) - \frac{2}{\ell} \int_0^t J(\tau) d\tau + 4A_0 \sum_{n=1}^{\infty} v_n(t) - \frac{4}{\ell} \sum_{n=1}^{\infty} J_n(t),$$

$$J_n(t) \equiv \int_0^t \exp\{-\mu_n \gamma(t, \tau)\} J(\tau) d\tau.$$

Соотношение  $J = bc_{0,\ell}^2 \Rightarrow \sqrt{J} - \sqrt{b}c_0(t) = 0$  имеет форму семейства уравнений для параметров:  $\Phi(t; D_0, E_D, b_0, E_b) = 0$ . При численной реализации ряды заменялись частичными суммами:

$$\begin{aligned} \Phi = & \sqrt{J(t)} - \sqrt{b} \left[ \varphi(0) - \frac{2}{\ell} \int_0^t J(\tau) d\tau + \right. \\ & \left. + 4A_0 \sum_{n=1}^{N_1} v_n(t) - \frac{4}{\ell} \sum_{n=1}^{N_2} J_n(t) \right] = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

С использованием пакета Scilab численно решалась задача  $\int_{t_1}^{t_2} \Phi^2 d\tau \rightarrow \min$  при  $N_1 = N_2 = 5$ . Уровень ошибок оценивания улучшился лишь на несколько процентов. Необходимы дополнительные соотношения.

### СОПРЯЖЕННЫЕ УРАВНЕНИЯ

Следуя технике сопряженных уравнений [7], интегрированием по частям для достаточно гладкой функции  $\psi(t, x)$  получим:

$$\begin{aligned} 0 = & \int_0^{t_*} \int_0^{\ell} \psi(t, x) [c_t - Dc_{xx}] dx dt = \\ = & \int_0^{t_*} J(t) \psi(t, 0) dt + \int_0^{t_*} J(t) \psi(t, \ell) dt + \\ & + \int_0^{t_*} D(t) \sqrt{J(t)b^{-1}(t)} \psi_x(t, \ell) dt - \\ & - \int_0^{t_*} D(t) \sqrt{J(t)b^{-1}(t)} \psi_x(t, 0) dt - \\ & - \bar{c} \int_0^{\ell} \psi(0, x) dx + A_0 \int_0^{\ell} (x - \ell_0)^2 \psi(0, x) dx. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь опущен двойной интеграл, поскольку далее считаем функцию  $\psi(t, x)$  подчиненной сопряженному уравнению  $\partial\psi/\partial t = -D\partial^2\psi/\partial x^2$ . Кроме того, пренебрегаем интегралом от  $\psi(t_*, x)c(t_*, x)$  по  $x$  с учетом  $c(t_*, x) \approx 0$ . Косвенно ограничиваемся не слишком быстро растущими по  $t$  функциями  $\psi(t, x)$ . Подчеркнем, что краевые условия не ставятся, «пробных» функций  $\psi$  бесконечно много. Простые варианты  $\psi = 1, x$  приводят к уравнению материального баланса, которое уже использовалось для оценки константы  $A_0$ . Выберем, например,  $\psi(t, x) = \beta(t) \exp\sigma x$ . При нормировке  $\beta(t_*) = 1$  получаем

$$\psi(t, x) = \exp\{\sigma^2 \gamma(t_*, t)\} \exp\{\sigma x\}.$$

Перепишем соотношение (11) в обозначениях

$$X \equiv \int_0^{t_*} J\beta dt, \quad Y \equiv \int_0^{t_*} D\sqrt{Jb^{-1}}\beta dt, \quad \kappa \equiv \frac{\exp\sigma\ell + 1}{\exp\sigma\ell - 1};$$

$$\begin{aligned} F(\sigma) = & \kappa\sigma X + \sigma^2 Y + \\ & + \beta(0)\sigma^{-2} \{2A_0 - \sigma^2(\bar{c} - A_0[\ell_0^2 - \ell\kappa\sigma^{-1}])\} = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Параметр  $\sigma$  целесообразно варьировать в пределах  $\sigma \ell \sim 1$ . В табл. 2 приведены значения параметров, полученные решением системы уравнений (12) для  $\sigma = 1, 8, 10, 11$ . Энергии активации восстанавливаются с большой точностью (их влияние на кинетику дегазации очень велико). Предэкспонента  $b_0$  определяется хуже вследствие ее малого абсолютного значения. Погрешность включает в себя и погрешность решения прямой задачи численного моделирования  $J(t)$ .

Таблица 2

Применение сопряженных уравнений

Параметр	Исходные данные	Полученные значения	Относительная погрешность
$b_0$	$6 \times 10^{-12}$	$5,468 \times 10^{-12}$	8,7 %
$E_b$	39,559	39,559	0 %
$D_0$	$4,1 \times 10^{-3}$	$4,104 \times 10^{-3}$	1,7 %
$E_D$	37,629	37,629	0 %

На рис. 4, 5 представлены поверхности  $G = F^2(9) + F^2(11)$  при фиксированных  $D = D^*$ ,

$b = b^*$ . Из рис. 4 видно, что для  $b$  важно найти хорошее начальное приближение.

Уравнение  $F = 0$  хорошо обусловлено по каждому из параметров модели. Для самого «трудноуловимого» параметра  $b_0$  среди указанных значений  $\sigma(\delta(b_0)) \leq 0,3 \%$  наименьшую погрешность дает  $\sigma = 9$ .

Таким образом, изложенные этапы алгоритма параметрической идентификации позволяют восстановить параметры модели с относительной погрешностью, которая с запасом «поглощается» точностью ТДС-эксперимента. В предлагаемой итерационной процедуре оценивания используется подсчет интегралов по времени, а не численное решение краевой задачи при текущих приближениях параметров. Входные данные  $J(t)$  используются под знаком интеграла, что обеспечивает определенную помехоустойчивость. Если мембрану нельзя считать тонкой (это зависит от материала и условий эксперимента), целесообразно взять  $\varphi(x) = \bar{c} - A_0 [x - \ell_0]^{2k}, k > 1$ .

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 09-01-00439).

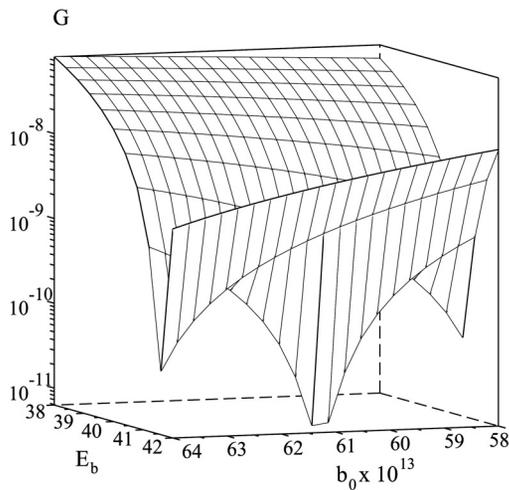


Рис. 4. Экстремум  $G(b)$

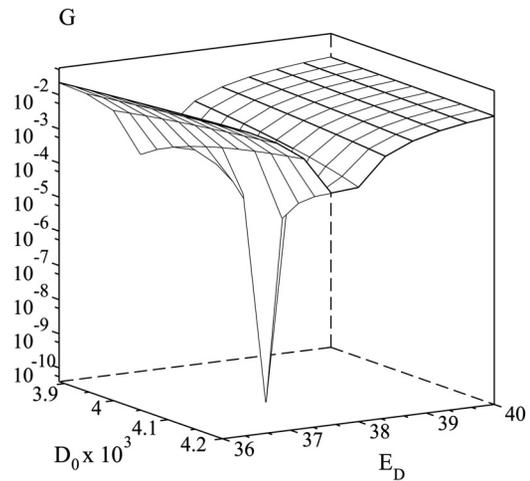


Рис. 5. Экстремум  $G(D)$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алифанов О. М., Артюхин Е. А., Румянцев С. В. Экстремальные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1988. 288 с.
2. Взаимодействие водорода с металлами / Под ред. А. П. Захарова. М.: Наука, 1987. 296 с.
3. Водород в металлах: В 2 т.; пер. с англ. / Под ред. Г. Алефельда, В. Фелькля. М.: Мир, 1981.
4. Заика Ю. В., Костикова Е. К. Разностная схема для краевой задачи ТДС-дегазации с динамическими граничными условиями // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2009. № 7 (101). С. 65–70.
5. Кунин Л. Л., Головин А. И., Суровой Ю. И., Хохрин В. М. Проблемы дегазации металлов. М.: Наука, 1972. 324 с.
6. Мартинсон Л. К., Малов Ю. И. Дифференциальные уравнения математической физики. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 368 с.
7. Марчук Г. И. Сопряженные уравнения и анализ сложных систем. М.: Наука, 1992. 336 с.
8. Писарев А. А., Цветков И. В., Маренков Е. Д., Ярмо С. С. Проницаемость водорода через металлы. М.: МИФИ, 2008. 144 с.
9. Самарский А. А., Вабишевич П. Н. Численные методы решения обратных задач математической физики. М.: Едиториал УРСС, 2004. 480 с.
10. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 288 с.

**ЮРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ СИДОРОВ**

кандидат технических наук, доцент кафедры теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет  
smalt@drevlanka.ru

**ПАВЕЛ ВЛАДИМИРОВИЧ КИРИКОВ**

преподаватель кафедры теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет  
lispad@gmail.com

**АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ РОГОВ**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет  
rogov@psu.karelia.ru

**СРАВНЕНИЕ ДЕНДРОГРАММ С РАВНЫМ ЧИСЛОМ ВЕРШИН**

В статье рассматривается статистический подход к сравнению расстояний между дендрограммами с равным числом вершин, основанный на ряде классических метрик.

Ключевые слова: расстояния между дендрограммами, вероятностный подход, сравнение расстояний

Один из наиболее популярных алгоритмов кластерного анализа – иерархический алгоритм [1]. Результатом этого алгоритма является дендрограмма. При проведении кластеризации часто приходится рассматривать одни и те же объекты с полным и укрупненным набором признаков [4]. Результаты кластеризации могут в этих случаях отличаться, при этом возникает вопрос о критерии, согласно которому можно решать вопрос о том, значительны или незначительны отличия в результатах. Решение этой задачи и некоторых других требует построения метрики, позволяющей находить расстояния между дендрограммами.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ДЕНДРОГРАММАМИ**

Пусть  $A, B$  – две дендрограммы, содержащие  $n$  объектов. Обозначим  $A^k, B^k$  –  $k$ -е слои данных дендрограмм. Первоначально каждая дендрограмма содержит  $n$  объектов, каждый из которых выделен в свой кластер. На каждом слое происходит объединение двух кластеров в один, в результате на  $k$ -м слое дендрограмма содержит  $n - k$  кластеров. В таком случае функцию схожести  $\rho(A, B)$  двух дендрограмм можно задать как функцию от функции схожести  $\rho(A^k, B^k)$  одинаковых слоев дендрограмм. В качестве такой функции могут выступать  $\rho_m(A, B) = \max_{1 \leq k \leq n-1} \rho(A^k, B^k)$  или  $\rho_a(A, B) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{n-1} \rho(A^k, B^k)$ . В работе [4] и в данном исследовании используется  $\rho_a(A, B)$ .

Функцию схожести одинаковых слоев дендрограмм можно задать как функцию от функций схожести  $\rho(A_i^k, B_j^k)$  для каждого из  $n - k$  кластера этого слоя.

В зависимости от постановки задачи следует применять различные подходы к определению данного расстояния. В случае сравнения деревь-

ев безотносительно к способу нумерации узлов, например в задачах сравнения деревьев семантического описания, для корректности значения данной функции необходимо произвести нормировку значения, учитывая инвариантность к способу нумерации объектов и кластеров. Этим свойствам будет удовлетворять следующая метрика:

$$\rho(A^k, B^k) = \frac{1}{n-k} \min_{\theta \in \Theta} \sum_{i=1}^{n-k} \rho(A_i^k, B_{\theta_i}^k),$$

где  $A_i^k, B_{\theta_i}^k$  – соответственно  $i$  и  $\theta$  кластеры  $k$ -го слоя дендрограмм  $A$  и  $B$ ,  $\Theta$  – множество всевозможных  $n - k$  элементных размещений номеров групп от 1 до  $n - k$ .

При сравнении дендрограмм важно учитывать порядок группировки узлов. В таком случае предлагается применение следующей метрики:

$$\rho(A^k, B^k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} \mu_i, \mu_i = \frac{2 * N_i}{n_{i,1} + n_{i,2}}$$

Хемминга,  $\mu_i = \frac{N_i}{n_{i,1} + n_{i,2} - N_i}$  для расстояния

Роджерса – Танимото, где  $n_{i,1}$  и  $n_{i,2}$  – число объектов в группе, содержащей объект  $i$ , соответственно в первом и втором дереве,  $N_i$  – число совпадающих элементов в группах, содержащих объект  $i$ . В данной статье рассматривается второй подход.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧИМОСТИ РАЗЛИЧИЙ МЕЖДУ ДЕНДРОГРАММАМИ**

Независимо от используемых расстояний возникает проблема определения, какие значения расстояний можно считать большими, а какие – малыми для ответа на вопрос о том, является ли отличие между дендрограммами существенным или возникшим случайным образом. В данной статье предлагается подход, основанный на вероятностной модели генерации дендрограмм. Если значение расстояния оказывается

таким, что значения не меньше данного встречаются в рамках модели редко, оно считается «большим» (статистически значимым), а если они встречаются часто – то «малым».

Определим случайный эксперимент, порождающий пару дендрограмм. Расстояние между случайно появившимися дендрограммами будет случайной величиной. На этой основе можно получить вероятностное распределение значений расстояния и провести градуировку интервала возможных значений с помощью квантилей функции распределения расстояния. Пусть  $\lambda_a$  – квантиль уровня  $a$  для функции распределения  $F_p(t)$ . Тогда, если расстояние  $p$  оказывается не меньше, чем  $\lambda_a$ , можно сделать вывод, что не менее чем  $a * 100\%$  случайно выбранных пар разбиений имеют между собой расстояние меньше, чем  $p$ . Аналогичный подход рассмотрен авторами в работе [1] при сравнении расстояний между подмножествами.

### ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ПОЯВЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЯ РАССТОЯНИЯ

Представим кластера  $A_i^k$  и  $B_j^k$  в виде бинарных векторов  $a$  и  $b$  размерности  $n$ , построенных по принципу:  $a_i = 1$  тогда и только тогда, когда объект  $u_i$  входит в кластер  $A$ :  $u_i \in A$ , в противном случае  $a_i = 0$  (аналогично для  $b$  и  $B$ ). Обозначим через  $p_i, i = 1, \dots, n$  вероятность появления элемента  $u_i$  в кластере. Рассмотрим случайный эксперимент, состоящий из  $n$  независимых испытаний, в каждом из которых элемент может как появиться, так и не появиться в кластерах. Тогда в каждом испытании возможны исходы четырех видов  $A^{uv} = \{x_i = u, y_i = v\}$ , где  $u, v \in \{0,1\}$ ,  $i$  – номер испытания. Пусть  $I(A)$  – индикатор события  $A$ ,  $I(A_{11}^i) + I(A_{10}^i) + I(A_{01}^i) + I(A_{00}^i) = 1$ ,  $a = \sum_{i=1}^n I(A_{11}^i)$ ,  $b = \sum_{i=1}^n I(A_{10}^i)$ ,  $c = \sum_{i=1}^n I(A_{01}^i)$ ,  $d = \sum_{i=1}^n I(A_{00}^i)$ . Тогда  $a + b + c + d = n$ .

Согласно мультиномиальному (полиномиальному) распределению [5], функция распределения расстояния примет вид:

$$F_p(t) = P(\rho(X, Y) < t) = \sum_{(a,b,c,d) \in C(A_{11}^i, \dots, A_{00}^i) \in B} \prod_{i=1}^n p_i^{2I(A_{11}^i)} (1-p_i)^{2I(A_{00}^i)} (p_i(1-p_i))^{I(A_{10}^i) + I(A_{01}^i)}, \quad (1)$$

где  $C = \{(a,b,c,d) \in Z^4 : a,b,c,d \geq 0, a + b + c + d = n, h(a,b,c,d) < t\}$ .

Объединение любых двух кластеров на каждом шаге является равновозможным. Будем считать равновозможной нумерацию кластеров на каждом слое. Вычислим вероятность появления произвольного объекта в любом кластере. Вероятность  $P_{i,j}^k$  попадания  $i$ -го объекта в  $j$ -ый кластер на  $k$ -м слое не зависит от  $i$  и  $j$  и равняется  $\frac{1}{n-k}$ .

Учитывая, что  $p_i = \frac{1}{n-k}$ , формула (1) примет вид:

$$F_p(t) = \sum_{(a,b,c,d) \in C(A_{11}^i, \dots, A_{00}^i) \in B} \prod_{i=1}^n \left(\frac{1}{n-k}\right)^{2I(A_{11}^i)} \left(\frac{n-k-1}{n-k}\right)^{2I(A_{00}^i)} \left(\frac{1}{n-k} \left(\frac{n-k-1}{n-k}\right)\right)^{I(A_{10}^i) + I(A_{01}^i)} = \sum_{(a,b,c,d) \in C(A_{11}^i, \dots, A_{00}^i) \in B} \prod_{i=1}^n \frac{1}{(n-k)^{2a}} \frac{(n-k-1)^{2d}}{(n-k)^{2d}} \frac{(n-k-1)^{b+c}}{(n-k)^{2b+2c}} = \sum_{(a,b,c,d) \in C(A_{11}^i, \dots, A_{00}^i) \in B} \prod_{i=1}^n \frac{(n-k-1)^{n+d-a}}{(n-k)^{2n}}. \quad (2)$$

### РАССТОЯНИЕ ХЕММИНГА

Для конкретных расстояний формула (2) может упрощаться. В [6] в качестве простейшего коэффициента различия между множествами, обладающего свойствами метрики, предлагается мощность симметрической разности:  $|X \Delta Y| = |(X \setminus Y) \cup (Y \setminus X)|$ . Если разделить это число на  $n$ , то получим расстояние Хэмминга [3] между бинарными векторами, принимающее значения от 0 до 1:

$$\rho^H(X, Y) = \frac{|X \Delta Y|}{n} = \frac{m}{n}, \text{ где } m = b + c.$$

Вероятность исходов  $A_{10}^i$  и  $A_{01}^i$  равняется  $\frac{1}{n-k} * (1 - \frac{1}{n-k}) = \frac{n-k-1}{(n-k)^2}$ . Тогда

$$F_p^H(t) = P(\rho^H(X, Y) < t) = \sum_{\substack{m: \frac{m}{n} < t \\ m: \frac{m}{n} < t}} C_n^m \frac{2^{b+c} (n-k-1)^{b+c}}{(n-k)^{2b+2c}} \times \frac{((n-k)^2 - 2(n-k-1))^{a+d}}{(n-k)^{2a+2d}} = \sum_{\substack{m: \frac{m}{n} < t \\ m: \frac{m}{n} < t}} C_n^m \frac{2^{b+c} (n-k-1)^{b+c}}{(n-k)^{2b+2c}} * \frac{2^{b+c} (n-k-1)^{b+c}}{(n-k)^{2b+2c}}, \quad (3)$$

$$\sum_{\substack{m: \frac{m}{n} < t \\ m: \frac{m}{n} < t}} C_n^m \frac{2^m (n-k-1)^m (n-k)^{2a+2d} - 2^n (n-k-1)^n}{(n-k)^{2n}} = \sum_{\substack{m: \frac{m}{n} < t \\ m: \frac{m}{n} < t}} C_n^m \frac{2^m (n-k-1)^m}{(n-k)^{2m}} - \sum_{\substack{m: \frac{m}{n} < t \\ m: \frac{m}{n} < t}} C_n^m \frac{2^n (n-k-1)^n}{(n-k)^{2n}}.$$

### РАССТОЯНИЕ РОДЖЕРСА – ТАНИМОТО

Одним из часто используемых коэффициентов различия между бинарными векторами является расстояние Роджерса – Танимото, получаемое из одноименной меры близости [5] и равное

$$\rho^{RT}(X, Y) = 1 - \frac{a+d}{a+d+2(b+c)} = \frac{2(b+c)}{n+b+c} = \frac{2m}{n+m},$$

где  $m$  – количество исходов  $A_{01} \cup A_{10}$  в  $n$  испытаниях, то есть  $m = b + c$ .

Число исходов  $m$  рассчитывается аналогично предыдущему пункту, следовательно,

$$F_{\rho}^{RT}(t) = P(\rho^{RT}(X, Y) < t) = \sum_{\substack{m: \\ \frac{2m}{n+m} < t}} C_n^m \frac{2^m (n-k-1)^m}{(n-k)^{2m}} - \sum_{\substack{m: \\ \frac{2m}{n+m} < t}} C_n^m \frac{2^n (n-k-1)^n}{(n-k)^{2n}} \sum_{\substack{m: \\ \frac{2m}{n+m} < t}} C_n^m. \quad (4)$$

### ЧИСЛЕННОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ КВАНТИЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Для подсчета квантилей функций распределения расстояний была разработана специальная компьютерная программа. Результаты работы этой программы представлены в табл. 1, содержащей в себе квантили уровня  $\alpha$  для двух рассмотренных в статье расстояний, рассчитанные для различных  $n$ . Для каждого  $\alpha$  в табл. 1 представлены 2 квантиля, расположенные следующим образом: сверху – квантиль для расстояния Хэмминга, внизу – для расстояния Роджерса – Танимото.

Таблица 1

Квантили функции распределения для различных  $n$  (с точностью 0,001)

к/р	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,99
3	0,334 0,501	0,334 0,501	0,334 0,501	0,667 0,801	0,667 0,801	0,667 0,801
4	0,334 0,501	0,334 0,501	0,334 0,501	0,667 0,801	0,667 0,801	0,667 0,801
5	0,401 0,572	0,401 0,572	0,401 0,572	0,601 0,751	0,601 0,751	0,801 0,889
15	0,334 0,501	0,334 0,501	0,401 0,572	0,467 0,637	0,534 0,696	0,601 0,751
30	0,334 0,501	0,367 0,537	0,401 0,572	0,434 0,605	0,467 0,637	0,534 0,696
45	0,356 0,525	0,356 0,525	0,378 0,549	0,423 0,594	0,445 0,616	0,489 0,657
60	0,351 0,519	0,367 0,537	0,384 0,555	0,417 0,589	0,434 0,605	0,484 0,652

### АНАЛИЗ ДЕНДРОГРАММ ПРИ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕКСТОВ С РАЗНЫМ НАБОРОМ ПРИЗНАКОВ

Задача сравнения дендрограмм была поставлена в [4], где анализировались результаты кластеризации объектов с разным количеством при-

знаков. При проведении исследований по атрибуции текстов использовалось: распределение 16 частей речи на первых трех и последних трех позициях каждого предложения. Таким образом, каждому тексту соответствовал набор 96 (16 x 6) признаков; расширенный набор признаков за счет учета дополнительных морфологических характеристик, свойственных каждой части речи (например, падеж для существительных, форму и степень сравнения для прилагательных, вид, залог и лицо для глаголов и т. д.). В итоге стали использоваться 156 признаков, соответственно, текст стал характеризоваться набором в 936 (156 x 6) признаков.

Была обнаружена визуальная схожесть дендрограмм, полученных при иерархической классификации 60 текстов. Проверим эту схожесть с помощью предложенного метода. Коэффициенты близости между иерархическими деревьями приведены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты близости между иерархическими деревьями, построенными на основе различного числа признаков: 16 (1) и 156 (2)

	(1)	(2)
По всему тексту	0,877995	0,839487
По первому и последнему предложению абзаца	0,936056	0,914381
По первому предложению абзаца	0,910971	0,880166
По последнему предложению абзаца	0,941005	0,921237

Из табл. 2 видно, что коэффициенты близости текстов принимают значения немногим меньше 1. Сравнивая их с экспериментальными результатами (табл. 1), можно сделать вывод, что значения мер близости встречаются менее чем в 1 % случаев (уровень надежности – 0,99). Это означает, что увеличение числа грамматических признаков не позволяет эффективно решать задачу атрибуции анонимных и псевдонимных литературных произведений. Проведенное исследование показало статистически незначимое отличие классификации текстов по двум наборам признаков.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варфоломеев А. А., Кириков П. В., Рогов А. А. Вероятностный подход к сравнению расстояний между подмножествами конечного множества // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. № 8 (113). С. 83–88.
2. Дюрэн Б., Оделл П. Кластерный анализ. М.: Статистика, 1977. 128 с.
3. Орлов А. И. Нечисловая статистика. М.: МЗ-Пресс, 2004. 513 с.
4. Сидоров Ю. В. Математическая и информационная поддержка методов обработки литературных текстов на основе формально-грамматических параметров: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск, 2002. 19 с.
5. Ширяев А. Н. Вероятность. М.: Наука, 1980. 576 с.
6. Rogers D., Tanimoto T. A computer program for classifying plants // Science. 1960. Vol. 132. № 3434. P. 1115–1118.

**АНДРЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ ПЕЧНИКОВ**

кандидат физико-математических наук, доцент, научный сотрудник Центра ПетрГУ – Метсо систем автоматизации, Петрозаводский государственный университет  
*pechnikov@krc.karelia.ru*

**АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ ЧИРКОВ**

старший инженер-программист лаборатории телекоммуникационных систем Института прикладных математических исследований, Карельский научный центр РАН  
*avchirkov@krc.karelia.ru*

**ЮЛИЯ ВАСИЛЬЕВНА ЧУЙКО**

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории информационных компьютерных технологий Института прикладных математических исследований, Карельский научный центр РАН  
*julia@krc.karelia.ru*

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗНОСТИ НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ВЕБА**

Статья посвящена исследованию связности академического и университетского веб-подмножеств путем определения и анализа структуры связей внутри и между веб-подмножествами, оценки степени связанности подмножеств и взаимного влияния подмножеств на связанность.

Ключевые слова: вебометрика, веб-граф, компонента сильной связности

Рабочая группа по вебометрике Института прикладных математических исследований КарНЦ РАН [1] в течение нескольких лет проводит исследования Веба, основанные на анализе гиперссылок. В 2008–2010 годах исследования были поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 08-07-00023а).

Объектами исследования в данной работе являются определенные экспертным образом целевые множества, состоящие из официальных сайтов учреждений и организаций РАН и сайтов классических университетов РФ. Множества сайтов и соединяющих их гиперссылок представляются для исследования в виде ориентированного веб-графа, где вершины соответствуют сайтам, а дуги – уникальным гиперссылкам между ними. Уникальность гиперссылок обеспечивается путем объединения каждой группы кратных дуг в одну дугу. Кроме того, в графе нет петель, так как рассматриваются только внешние ссылки, то есть позволяющие переходить именно с одного сайта на другой, а не по страницам одного и того же сайта. Представление множества сайтов с гиперссылками в виде веб-графа сразу дает возможность визуальной оценки степени его связности на основании количества и структуры компонент слабой связности. Каждую компоненту слабой связности в веб-графе составляют сайты, соответствующие тем вершинам в графе, полученном из веб-графа заменой всех дуг на ребра, между любой парой которых существует маршрут. Компоненты сильной связности в таком графе представляют собой множества сайтов, связанных гиперссылками так, что по ним можно перейти с любого сайта на любой сайт данного множества. Вхождение сайта в компоненту силь-

ной связности достаточно большой мощности важно для него, так как повышает вероятность его посещения пользователями. Причем это касается не только так называемых интернет-серферов, которые просматривают веб-ресурсы, переходя между сайтами по попадающимся на веб-страницах гиперссылкам, поисковые роботы также скорее обнаружат и проиндексируют веб-ресурс, на который есть ссылка с уже известных им ресурсов.

В данной работе исследуются такие задачи, как определение структуры связей внутри и между веб-подмножествами, оценка степени связанности подмножеств, взаимное влияние подмножеств на связанность, позволяющие установить, насколько сильно связаны (или разделены) между собой исследуемые веб-сообщества. В свою очередь, это позволяет выдвинуть предположение о том, насколько развито интернет-сотрудничество между владельцами сайтов и отражает ли оно реальную картину сотрудничества между научными и образовательными учреждениями.

В ходе исследования решаются основные подзадачи: сбор исходной информации о веб-множествах, визуализация графов веб-подмножеств, выделение в них компонент сильной связности и определение их мощностей и диаметров, определение изменения структуры компонент связности при объединении подмножеств. Для этого экспертным образом формируются целевые множества сайтов. Путем сканирования веб-ресурсов, входящих в целевые множества, по протоколу http собирается информация о гиперссылках между их узлами. Далее находятся компоненты сильной связности для множеств и их объединений, а также их диаметры. Результаты

графически представляются в наглядном виде для визуальной оценки. Затем делаются выводы о степени связанности подмножеств сайтов между собой и их взаимного влияния.

Для автоматизации проведения исследований рабочей группой по вебометрике был разработан и постоянно развивается ряд инструментов. Для сбора, хранения и обработки информации о гиперссылках создана информационная система для вебометрических исследований (ИС4ВИ), работающая под управлением веб-сервера Apache с интегрированным модулем PHP и СУБД MySQL [5], [6]. Данная система позволяет автоматически сканировать страницы веб-сайта, начиная с указанной страницы первого уровня и переходя дальше на остальные страницы сайта. При этом система собирает со страниц гиперссылки двух видов – внутренние и внешние. Внутренние гиперссылки, позволяющие переходить между страницами одного и того же сайта, используются для составления очереди страниц сайта, подлежащих сканированию. Внешние гиперссылки на другие сайты собираются для дальнейшего исследования связности сообществ сайтов. Необходимо отметить, что сканирование выполняется только для ресурсов, разрешающих это делать. Если в силу технических проблем или административных запретов политики безопасности на стороне сканируемого ресурса системе не удастся последовательно получить содержимое запрашиваемых страниц, то дальнейшие попытки его сканирования прекращаются и ресурс помечается как неотсканированный.

Для автоматизации проведения исследований по анализу связности веб-подмножеств и визуализации результатов было разработано приложение Graph на языке Java 2 SDK, позволяющее в интерактивном режиме выбирать структуру веб-графа из множеств сайтов, находить и отображать компоненты связности и их характеристики. Процедура нахождения компонент связности основана на модификации алгоритма Флойда [2] поиска путей в ориентированном графе. Для визуализации представления веб-графов использована Java-библиотека Jung2 2.0 (<http://jung.sourceforge.net>).

Для исследования были сформированы целевые множества: V, состоящее из 349 официальных сайтов учреждений и организаций РАН, и U, содержащее 56 сайтов классических университетов РФ. Сканирование академического и университетского Веба позволило сформировать базу данных, содержащую информацию о 85 000 уникальных гиперссылок, сделанных с официальных академических сайтов, и о 40 000 уникальных гиперссылок, сделанных с официальных сайтов классических университетов. Информация об исследованиях академического Веба размещена на сайте [1]; некоторые результаты исследований университетского Веба приводятся в [4].

Каждое из исследованных целевых множеств было представлено в виде веб-графа, в котором, как выяснилось, почти все узлы объединены в единственную компоненту слабой связности, за исключением 20 изолированных узлов в веб-графе академического множества и 4 – университетского (рис. 1).

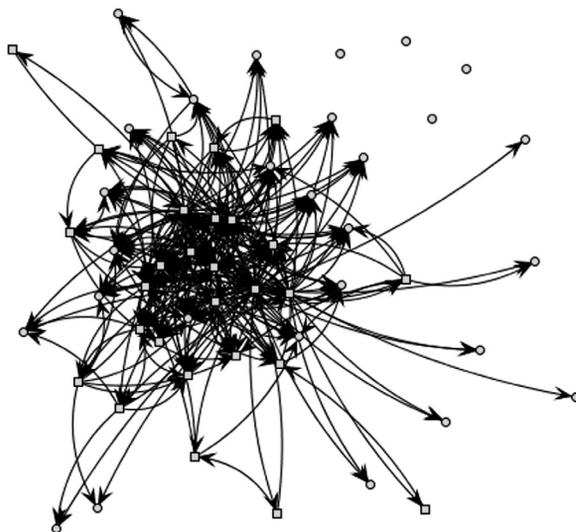


Рис. 1. Веб-граф множества U. Квадратами обозначены узлы, входящие в компоненту сильной связности множества U

Для каждого из целевых множеств были построены компоненты сильной связности. В веб-графе целевого множества V, состоящего из ресурсов академического Веба, была выделена единственная нетривиальная компонента сильной связности, объединяющая 180 узлов и имеющая диаметр 8. Все остальные компоненты тривиальны, то есть каждая состоит из единственного узла. Во множестве U также имеется единственная нетривиальная компонента сильной связности диаметром 5, объединяющая 28 узлов.

В результате можно наблюдать, что структура связанности веб-подмножеств аналогична для академического и университетского Веба:

- в обоих случаях в целевом множестве выделяется единственная нетривиальная компонента достаточно большой мощности и сильной связности;
- примерно совпадают характеристики компонент слабой и сильной связности для целевых множеств относительно мощностей этих множеств.

Однако важно заметить, что для академического Веба характерно вхождение в нетривиальную компоненту сильной связности сайтов наиболее значимых организаций (например, [www.gas.ru](http://www.gas.ru)), в то время как в университетском наблюдается их некоторая обособленность (в частности, [www.msu.ru](http://www.msu.ru), [www.spbu.ru](http://www.spbu.ru) не попадают в компоненту сильной связности).

Далее под термином «компонента сильной связности» будет подразумеваться именно нетривиальная компонента сильной связности.

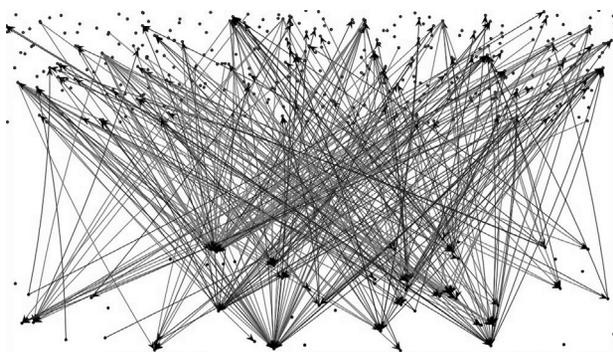


Рис. 2. Взаимные ссылки между подмножествами  $V$  и  $U$  (вверху – вершины  $V$ , внизу – вершины  $U$ , стрелки – дуги из множества  $E$ )

Следующая задача – объединить два множества с целью исследования структуры взаимной связности научно-образовательного Веба. Рассмотрим ориентированный двудольный веб-граф  $G = (V \cup U, E)$ , представленный на рис. 2, где  $V$  – множество вершин, соответствующих академическим сайтам,  $U$  – множество вершин, соответствующих университетским сайтам,  $E$  – множество дуг, соответствующих всем уникальным гиперссылкам, сделанным с сайтов из  $V$  на сайты из  $U$ , и наоборот. Гиперссылки между сайтами внутри множеств  $U$  и  $V$  здесь не рассматриваются. Веб-граф  $g = (V \cup U, E)$ , построенный средствами ИС4ВИ и Graph, имеет следующие характеристики:  $|V| = 349$ ,  $|U| = 56$ ,  $|E| = 353$ , то есть нельзя сказать, что граф сильно насыщен дугами. При этом 262 академических сайта (75 %) не имеют входящих гиперссылок с университетских сайтов, и наоборот, 20 университетских сайтов (36 %) не имеют входящих гиперссылок с академических сайтов. Такие данные являются если не показателем слабого взаимного интереса академических учреждений и классических университетов, то достаточно слабым отражением такого интереса в Вебе.

Аналогичный двудольный граф построен для подмножеств  $U$  и  $V$ , составляющих их компоненты сильной связности. Он позволяет увидеть, что в данных компонентах присутствуют большие группы узлов, ссылки между которыми связывают между собой обе компоненты сильной связности. Это гарантирует наличие единственной нетривиальной компоненты сильной связ-

ности в объединенном целевом множестве. Причем эта компонента, очевидно, полностью включает обе компоненты сильной связности множеств  $U$  и  $V$ . Такая компонента сильной связности имеет диаметр, равный 7, и включает 220 узлов – 36 университетских и 184 академических сайтов.

Можно заметить, что при объединении двух целевых множеств связность университетского Веба значительно возрастает (вместо 28 узлов в компоненту сильной связности теперь входят 36), когда в качестве коммуникаторов к нему добавляются академические сайты. Для академических сайтов такое изменение невелико – со 180 на 184.

Компонента сильной связности научно-образовательного Веба содержит все узлы таких компонент академического и университетского подмножеств. Дополнительно она включает в себя множество узлов, не попадавших ранее в компоненты сильной связности подмножеств (например, [www.philosophy.nsc.ru](http://www.philosophy.nsc.ru), [www.ipae.uran.ru](http://www.ipae.uran.ru), [www.ieie.nsc.ru](http://www.ieie.nsc.ru) из академических сайтов, [www.msu.ru](http://www.msu.ru), [www.kamgu.ru](http://www.kamgu.ru), [www.masu.ru](http://www.masu.ru) – из университетских). Наиболее значимые организации академического Веба входят в компоненты сильной связности как академического, так и научно-образовательного Веба. Часть значимых организаций университетского Веба, не входивших в его компоненту сильной связности, вошли в компоненту сильной связности научно-образовательного Веба ([www.msu.ru](http://www.msu.ru)), в то время как другая их часть осталась в компоненте слабой связности ([www.spbu.ru](http://www.spbu.ru)). Диаметр компоненты сильной связности научно-образовательного Веба меньше диаметра компоненты сильной связности академического Веба, несмотря на меньшую мощность последней.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие краткие выводы. Российская академия наук и классические университеты России сильно связаны между собой взаимным сотрудничеством, находящим свое отражение в Вебе. Связность университетского Веба с академическим значительно более важна для университетов, чем для организаций РАН. Высокая степень связности научно-образовательного Веба способствует увеличению посещаемости сайтов обоих целевых подмножеств.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ВЕБОМЕТРИКА. Институт прикладных математических исследований КарНЦ РАН [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://webometrics.krc.karelia.ru>
2. Кристофидес Н. Теория графов: алгоритмический подход: Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 429 с.
3. Общий рейтинг выборки классических университетов – Национальный рейтинг российских вузов [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://univer-rating.ru/rating\\_common.asp](http://univer-rating.ru/rating_common.asp)
4. Печников А. А. О некоторых результатах вебметрических исследований университетского Веба // IV Междунар. науч.-практ. конф. «Современные информационные технологии и ИТ-образование»: Сб. избр. тр. М.: ИНТУИТ.РУ, 2009. С. 530–537.
5. Печников А. А., Луговая Н. Б., Чуйко Ю. В., Косинец И. Э. Разработка инструментов для вебметрических исследований гиперссылок научных сайтов // Вычислительные технологии. 2009. Т. 14. № 5. С. 66–78.
6. Программа для ЭВМ «Информационная система для вебметрических исследований». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Информационная система для вебметрических исследований» Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам РФ № 2010610941 от 29 января 2010 г.

**ЛЮДМИЛА АЛЕКСАНДРОВНА АЛЕШИНА**  
кандидат физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*aleshina@psu.karelia.ru*

**ИННА ВЛАДИМИРОВНА ЛЮХАНОВА**  
инженер кафедры общей физики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*luhanova@yandex.ru*

**ВЕРА ВЛАДИМИРОВНА БУДАЕВА**  
кандидат химических наук, доцент, заведующий лабораторией биоконверсии Института проблем химико-энергетических технологий, Сибирское отделение РАН (г. Бийск)  
*budaeva@ipcet.ru*

**ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ ЗОЛОТУХИН**  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории биоконверсии Института проблем химико-энергетических технологий, Сибирское отделение РАН (г. Бийск)  
*ipcet@mail.ru*

**РОМАН ЮРЬЕВИЧ МИТРОФАНОВ**  
кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории биоконверсии Института проблем химико-энергетических технологий, Сибирское отделение РАН (г. Бийск)  
*ipcet@mail.ru*

**ГЕННАДИЙ ВИКТОРОВИЧ САКОВИЧ**  
доктор технических наук, академик РАН, советник РАН, научный руководитель Института проблем химико-энергетических технологий, Сибирское отделение РАН (г. Бийск)  
*admin@ipcet.ru*

## РЕЗУЛЬТАТЫ РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА НЕДРЕВЕСНЫХ ЦЕЛЛЮЛОЗ

Проведены рентгенографические исследования целлюлозы из мискантуса китайского и шелухи овса. Кристалличность образцов целлюлозы была определена по методу Руланда. Размер кристаллитов рассчитывался по формуле Шеррера. Методом полнопрофильного анализа проведено уточнение параметров элементарной ячейки. Установлено, что предложенные в данной работе способы получения целлюлозы из необработанных образцов мискантуса и шелухи не оказывают значительного влияния на атомную структуру выделенной из них целлюлозы.

Ключевые слова: целлюлоза, рентгенографические исследования, щелочная делигнификация, мискантус, шелуха овса

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальной задачей является поиск альтернативных источников целлюлозы недревесного происхождения. Одним из перспективных возобновляемых источников недревесного сырья является мискантус китайский, который может составить достойную конкуренцию древесине по такому параметру, как скорость роста [6].

Другим неисчерпаемым источником недревесной целлюлозы могут быть «концентрируемые» отходы растениеводства в виде соломы и плодовых оболочек злаков. Особый интерес вызывают плодовые оболочки (шелуха), которые являются официальным сырьем для получения фурфурола. Впервые они были исследованы в качестве перспективного источника целлюлозы для химической переработки в Институте проблем химико-энергетических технологий

Сибирского отделения РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск) [4].

Актуальность исследований мискантуса, шелухи злаков и целлюлоз, полученных из них, методами рентгенографического анализа связана с тем фактом, что технология получения целлюлозы из растительного сырья и свойства полимера обуславливаются в первую очередь его молекулярной структурой. Таким образом, полученная информация об атомном строении и степени кристалличности исследуемых образцов позволит обосновать не только выбор методов выделения целлюлозы, но и способность новых целлюлоз к химической модификации.

### ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ

Исследовались образцы мискантуса китайского (далее – мискантуса) и шелухи овса (далее – шелухи) в исходном состоянии. Образцы

целлюлозы были получены в результате двух видов обработки исходных объектов: 1) двухстадийного процесса щелочной делигнификации и обработки азотной кислотой (при атмосферном давлении) (ЩД + АК); 2) делигнификации в автоклаве и отбелики перекисью водорода в щелочной среде (Д + О) [5]. Образцы были предоставлены ИПХЭТ СО РАН.

**МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

Рентгенограммы образцов были получены на дифрактометре ДРОН-6.0 в геометрии на отражение в  $\text{CuK}_\alpha$  излучении с монохроматизацией падающих лучей кристаллом пиролитического графита, установленного в первичных лучах. Сканирование рентгеновских дифракционных картин осуществлялось в интервале углов рассеяния  $2\theta$  от 3 до  $145^\circ$  с шагом  $0,1^\circ$ . Время регистрации интенсивности в точке – 20 с.

Для исключения влияния условий съемки на дифракционную картину был проведен расчет интенсивностей рассеяния в электронных единицах (эл. ед.) при нормировке на состав  $\text{C}_6\text{O}_5\text{H}_{10}$ . В измеренные в эксперименте распределения интенсивности рассеяния  $I_{\text{изм}}(S)$  ( $S = 4\pi \cdot \sin\theta / \lambda$  – длина дифракционного вектора,  $\theta$  – угол скольжения,  $\lambda$  – длина волны падающего излучения) были введены поправки на рассеяние воздухом, поляризацию и поглощение. Подробно методика обработки экспериментальных данных изложена в [3].

Из интегральных интенсивностей отражений и диффузного фона аморфной составляющей рентгенограмм рассчитывались значения степени кристалличности (СК) по методу Руланда:  $\text{СК} = (I - I_a) / I$ , где  $I$  – суммарная интегральная интенсивность рассеяния кристаллической и аморфной фазами,  $I_a$  – интенсивность рассеяния аморфной фазой. Из ширины дифракционных линий по формуле Шеррера [7] рассчитывались размеры областей когерентного рассеяния (ОКР) (областей кристалличности) в направлении нормали к отражающим плоскостям [7]. Контуры линий аппроксимировались по Гауссу.

Для решения проблемы расчета кристаллографических характеристик целлюлозы, периодов и углов элементарной ячейки был успешно применен метод полнопрофильного анализа рентгенограмм поликристаллов (метод Ритвельда) [1].

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА**

На рис. 1 представлены картины рассеяния исходными образцами в сравнении с рентгенограммой, рассчитанной по координатам атомов моноклинной целлюлозы I  $\beta$ , на которой указаны индексы наиболее интенсивных отражений данной фазы. Видно, что в области значений  $S$  от  $0,5$  до  $2 \text{ \AA}^{-1}$  интенсивности рассеяния шелухой резко занижены вследствие размытия отра-

жений. Это означает, что в шелухе велика доля аморфной составляющей. Расчет степени кристалличности показал, что для мискантуса СК равна 46 %, а для шелухи она вдвое ниже и составляет 23 % (табл. 1).

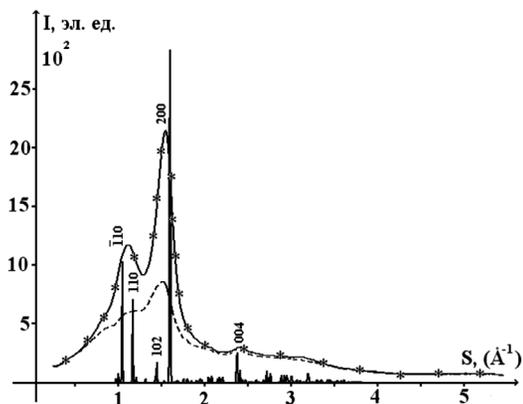


Рис. 1. Кривые распределения интенсивности рассеяния образцами в исходном состоянии: \*-\*-\* мискантус; - - - шелуха; ————— теоретическая рентгенограмма целлюлозы I  $\beta$

Кривые распределения интенсивности рассеяния от образцов целлюлозы, полученных в результате обработки исходных объектов, приведены на рис. 2.

Из рис. 2б видно, что картина рассеяния образцом делигнифицированной шелухи принимает вид, характерный для рассеяния целлюлозными объектами [2]. Анализ кривых распределения интенсивности рассеяния целлюлозами, выделенными из мискантуса и шелухи (рис. 2в, г) двумя разными способами, показывает, что в обоих случаях интенсивность рассеяния целлюлозой, полученной из шелухи, в области наиболее сильных отражений ниже, чем интенсивность рассеяния целлюлозой, полученной из мискантуса.

В табл. 1 представлены результаты расчета СК и размеров ОКР для исходных образцов мискантуса, шелухи и полученных из них целлюлоз.

Таблица 1

Образец		СК, %	Размер кристаллитов D (Å) в направлениях				
			[ $\bar{1}10$ ]	[110]	[102]	[100]	[001]
Исходное сырье (необработанное)	мискантус	46	38	43	50	34	30
	шелуха овса	23	-	-	-	24	46
ЩД + АК	мискантус	65	34	38	49	43	46
	шелуха овса	62	38	43	49	38	60
Д + О	мискантус	67	38	42	50	38	40
	шелуха овса	64	42	43	49	43	60

Погрешность:  $\Delta k = \pm 5 \%$ ,  $\Delta D = 5 \text{ \AA}$ .

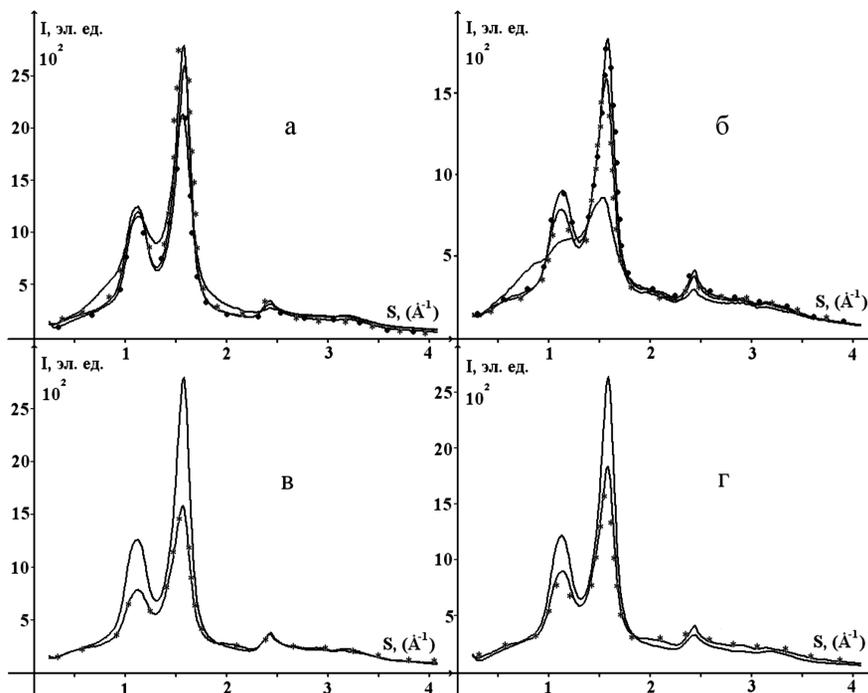


Рис. 2. Кривые распределения интенсивности рассеяния образцами мискантуса (а), шелухи (б):  
 —●—●— в исходном состоянии; \*—\*—\* после щелочной делигнификации и обработки азотной кислотой;  
 —●—●— после делигнификации и отбелки. Щелочная делигнификация и обработка азотной кислотой (в)  
 и делигнификация с отбелкой (г): — мискантус; \*—\*—\* шелуха

Как видно из табл. 1, СК целлюлоз, полученных в результате делигнификации мискантуса и шелухи, практически одинакова и лежит в интервале 62–67 %, то есть способ выделения целлюлозы не влияет на величину ее СК.

Размеры ОКР, рассчитанные из ширины отражения (200), определяют величину поперечного сечения элементарной фибриллы целлюлозы, а расчет ОКР из ширины отражения (004) позволяет определить ее длину.

Размеры ОКР целлюлозной составляющей исходного мискантуса и выделенной из него обоими способами целлюлозы в направлениях  $[110]$ ,  $[110]$ ,  $[102]$  в пределах погрешности эксперимента не зависят от состояния образца. В направлении  $[100]$  размер ОКР целлюлозы, полученной из мискантуса путем щелочной делигнификации и обработки азотной кислотой при атмосферном давлении, возрастает в 1,3 раза, а размер ОКР целлюлозы, полученной из мискантуса путем щелочной делигнификации в автоклаве и отбелки перекисью водорода, – в 1,1 раза по сравнению с таковым для исходного образца. Аналогично размер ОКР в направлении  $[001]$  возрастает в 1,5 раза для целлюлозы, полученной из мискантуса путем щелочной делигнификации и обработки азотной кислотой при атмосферном давлении, и в 1,3 раза для целлюлозы, полученной из мискантуса путем щелочной делигнификации в автоклаве и отбелки перекисью водорода. Следовательно, наибольшая длина элементарных фибрилл целлюлозы, полученной

из мискантуса, наблюдается при ее выделении путем щелочной делигнификации и обработке азотной кислотой при атмосферном давлении.

В необработанном (исходном) состоянии толщина элементарной фибриллы целлюлозной составляющей шелухи всего 24 Å (3 периода элементарной ячейки), что на 10 Å меньше, чем для целлюлозной составляющей мискантуса. Однако длина элементарной фибриллы целлюлозной составляющей шелухи в 1,5 раза больше, чем длина элементарной фибриллы целлюлозной составляющей мискантуса: 46 и 30 Å соответственно. Толщина элементарных фибрилл целлюлоз, полученных делигнификацией шелухи, в пределах погрешности совпадает с толщиной элементарных фибрилл целлюлоз, полученных делигнификацией мискантуса (табл. 1). Длина же элементарных фибрилл целлюлоз, полученных из шелухи, составляет 60 Å, что соответствует ~ 6 периодам с элементарной ячейки целлюлозы, то есть целлюлозные цепи в направлении оси волокна состоят из 6 целлобиозных остатков. Этот размер не зависит от способа выделения целлюлозы из шелухи. У целлюлозы, полученной из мискантуса путем щелочной делигнификации и обработки азотной кислотой при атмосферном давлении, целлюлозные цепи в направлении оси волокна состоят из 4,5 целлобиозных остатков, а у целлюлозы, полученной из мискантуса путем щелочной делигнификации в автоклаве и отбелки перекисью водорода, – из 4.

Было установлено, что модель атомной структуры кристаллической составляющей целлюлозы всех исследованных образцов соответствует антипараллельной упаковке целлюлозных цепочек и описывается моноклинной элементарной ячейкой. Результаты расчета кристаллографических характеристик приведены в табл. 2.

Таблица 2

Периоды  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и угол моноклинности  $\gamma$  элементарной ячейки, значение весового фактора  $R_{wp}$ , рассчитанные из рентгенограмм исследованных образцов

Образец	$a$ , Å	$b$ , Å	$c$ , Å	$\gamma$ (°)	$R_{wp}$ , %
Исходный мискантус	8,12	7,78	10,54	96,3	4,40
Мискантус (ЩД + АК)	8,08	7,86	10,54	95,7	5,55
Мискантус (Д + О)	8,06	7,86	10,54	95,7	5,54
Шелуха овса (ЩД + АК)	8,09	7,74	10,54	96,0	4,28
Шелуха овса (Д + О)	8,10	7,78	10,57	95,4	5,00

$$\Delta a = \Delta b = \Delta c = \pm 0,03 \text{ \AA}, \Delta \gamma = \pm 0,1^\circ.$$

Анализ результатов, приведенных в табл. 2, показывает, что у кристаллической составляющей целлюлозы, выделенной из мискантуса, по

сравнению с исходным состоянием возрастает период  $b$  и уменьшаются период  $a$  и угол моноклинности  $\gamma$ . Значения кристаллографических характеристик полученной из мискантуса целлюлозы не зависят от способа делигнификации.

Для целлюлозной составляющей исходной шелухи в силу ее низкого содержания в образце не удается рассчитать значения размеров элементарной ячейки. Периоды и угол моноклинности элементарной ячейки, рассчитанные для выделенной из шелухи целлюлозы, по своим значениям близки к таковым для целлюлозной составляющей исходного мискантуса.

Таким образом, результаты рентгеноструктурного анализа данных целлюлоз подтверждают возможность получения высококачественной целлюлозы из нетрадиционных источников (мискантуса российского происхождения и шелухи злаков), а также обуславливают достаточную реакционную способность новых целлюлоз к этерификации с образованием простых и сложных эфиров [3].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешина Л. А., Луговская Л. А., Филатов А. С., Фофанов А. Д., Глазкова С. В., Подойникова М. В. Исследование структуры целлюлоз методом полнопрофильного анализа рентгенограмм поликристаллов // Исследовано в России. 2002. С. 2237–2243 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/203.pdf>
2. Алешина Л. А., Мелех Н. В., Фофанов А. Д. Рентгенографические исследования и моделирование структуры целлюлоз и лигнинов древесных растений // Гелес И. С. Древесное сырье – стратегическая основа и резерв цивилизации. Петрозаводск: КНЦ РАН, 2007. С. 169–211.
3. Алешина Л. А., Фофанов А. Д. Рентгеноструктурный анализ аморфных материалов. Петрозаводск: Изд-во ПГУ, 1987. 85 с.
4. Будаева В. В., Митрофанов Р. Ю., Золотухин В. Н., Сакович Г. В. Новые сырьевые источники целлюлозы для технической химии // Современные проблемы технической химии: Материалы докладов Всероссийской науч.-техн. и метод. конф. Казань: Изд-во КГТУ, 2009. С. 275–281.
5. Будаева В. В., Сакович Г. В. Нетрадиционные целлюлозы для технической химии // Фундаментальные и прикладные проблемы технической химии: Сб. науч. тр. Новосибирск: Наука, 2011. С. 281–295.
6. Шумный В. К. и др. Новая форма Мискантуса китайского (Веерника китайского *Miscanthus sinensis* – Anders) как перспективный источник целлюлозосодержащего сырья // Информационный вестник ВОГиС. 2010. Т. 14. № 1. С. 122–126.
7. Thygesen A., Oddershede J., Lilholt H., Thomsen A. B., Stahl K. On the determination of crystallinity and cellulose content in plant fibres // Cellulose. 2005. № 12. P. 563–576.

АЛЕКСАНДР ЛИОНОВИЧ ПЕРГАМЕНТ

доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет  
 aperg@psu.karelia.ru

ПАВЕЛ АНАТОЛЬЕВИЧ БОЛДИН

аспирант кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет  
 arctus@sampo.ru

ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ КОЛЧИГИН

аспирант кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет  
 tukva45@yandex.ru

ТАТЬЯНА ГЕНРИХОВНА СТЕФАНОВИЧ

аспирант кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет  
 gstef@yandex.ru

## БИСТАБИЛЬНОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ И ЭФФЕКТЫ ПАМЯТИ В ОКСИДАХ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

В работе рассматриваются актуальные вопросы оксидной электроники. Представлены результаты исследования электрофизических свойств и эффектов переключения в тонкопленочных структурах на основе оксидов переходных металлов. Показано, что структуры на основе оксидов V и Nb перспективны для разработки новых элементов памяти.

Ключевые слова: переключение, элементы памяти, оксиды переходных металлов

В научной литературе по микроэлектронной тематике давно говорится об ограничениях кремниевой технологии при решении ряда задач, возникающих под давлением растущего рынка электронных устройств. Однако до последнего времени эти проблемы снимались дальнейшим развитием и совершенствованием технологических приемов изготовления кремниевых приборов и разработкой новых компонентов на основе эпитаксиальных слоев Si. Ситуация коренным образом изменилась при переходе к производству высокоинтегрированных микросхем с нанометровым масштабом отдельных элементов. Особенно это заметно в производстве микросхем компьютерной памяти. Развитие мобильной электроники требует разработки новой памяти, сочетающей в себе высокий объем хранимой информации (до нескольких терабайт, как у винчестеров) с быстрым временем доступа – единицы наносекунд (как у DRAM – dynamic random access memory, динамическая память с произвольной выборкой). Кроме того, эта память не должна содержать в своем составе механических устройств – в идеале это должна быть твердотельная микросхема [5].

Тонкие пленки оксидов переходных металлов, демонстрирующие эффект энергонезависимого резистивного переключения, были недавно предложены [6], [11] в качестве эффективных ма-

териалов для так называемой storage-class memory (памяти с длительным временем хранения информации). По виду ВАХ бистабильное переключение с памятью можно разделить на два типа: униполярная (неполярная) и биполярная память (рис. 1). При униполярном переключении скачок сопротивления зависит от амплитуды прикладываемого напряжения, при этом полярность напряжения роли не играет. При биполярном переключении изменение сопротивления структуры зависит от полярности прикладываемого напряжения.

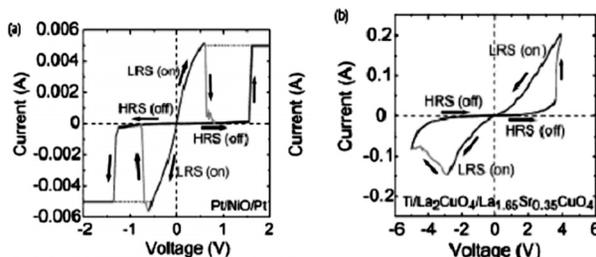


Рис. 1. Примеры (а) униполярного и (б) биполярного переключения с памятью в оксидных структурах [11]

Ячейку памяти на основе резистивного переключения можно классифицировать как сэндвич-структуру, в которой активный оксидный слой расположен между двумя металлическими электродами.

Такая простая конструкция ячейки памяти на основе МОМ-структуры позволяет легко реализовать масштабируемую, так называемую «cross-point» (рис. 2) архитектуру ReRAM (Re – резистивная) с нанометровыми размерами. Поскольку существуют низкотемпературные методы осаждения пленок оксидов с резистивным переключением (золь-гель [1], анодное окисление [2], [3], вакуумное испарение на холодные подложки [4]), это дает возможность формирования 3D интегрированной терабитной памяти с многослойной структурой (рис. 2) [8].

Важной проблемой cross-point памяти является взаимная интерференция ячеек памяти: ячейка, находящаяся в LRS (включенном) состоянии (рис. 1), может влиять на соседние ячейки в HRS-состоянии в процессе считывания информации. Для предотвращения этого паразитного явления необходимо включение в состав ячейки памяти дополнительного элемента – транзистора или диода. Использование транзистора (1T-1R memory) ухудшает масштабный фактор прибора, тогда как использование диода (1D-1R memory), подавляя интерференцию ячеек, способствует дальнейшему повышению интеграции приборов. Основными требованиями, предъявляемыми к таким интерфейсным элементам, являются соразмерность их масштабов и совместимость технологии изготовления с элементами памяти.

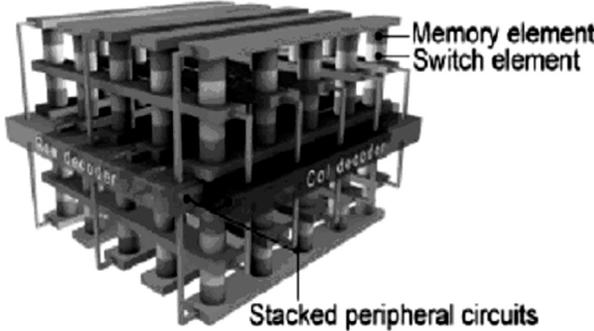


Рис. 2. Концептуальная схема многослойной (или наращиваемой – stackable) структуры памяти, которая включает периферийную управляющую схему [8]

В данной работе мы рассматриваем эффекты бистабильного резистивного переключения в МОМ- и МОП-структурах на основе оксидов переходных металлов. Оксидные пленки были изготовлены электрохимическим окислением V и Nb [2], [3], а также вакуумным испарением пятиоксида ванадия на подложки Si-SiO<sub>2</sub> [4] и анодно-катодной поляризацией ванадия в электролите [3]. Экспериментальные результаты для структур на основе ванадия представлены на рис. 3. В случае анодного оксида Nb наблюдается однополярное переключение с ВАХ, аналогичной той, что изображена на рис. 1а (рис. 4). Переключения с отрицательным дифференциальным сопротивлением N-типа в сэндвич-структурах «V/гидратированный аморфный оксид

ванадия / Au» (рис. 3а), описываются в терминах Н<sup>+</sup> ионного переноса [3]. Для объяснения эффектов памяти в структурах «Si / оксид ванадия / металл» [4] (рис. 3б) и «Nb / оксид ниобия / металл» (рис. 4) [2] предлагаются различные механизмы, в том числе на основе перехода Мотта, индуцированного изменением состава или образованием шнура высокопроводящей фазы.

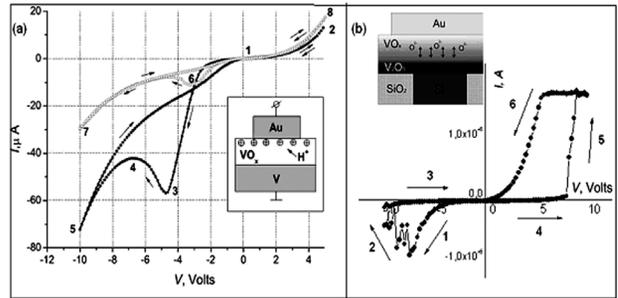


Рис. 3. ВАХ структур на основе (а) гидратированного оксида ванадия, полученного методом анодно-катодной поляризации в электролите [3], (б) оксида ванадия, полученного термическим осаждением в вакууме на холодные ( $T = 300\text{ K}$ ) подложки Si-SiO<sub>2</sub> [4]

Потенциальные прикладные возможности представленных в данной работе систем по сравнению, в частности, с теми, которые основаны на физических явлениях в оксидных гетеро-структурах [8] или на явлении перехода металл – изолятор в VO<sub>2</sub> [7], связаны прежде всего с простотой их изготовления и более высокой надежностью в работе.

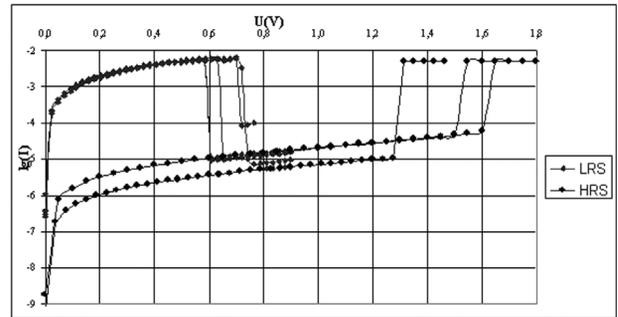


Рис. 4. Вольт-амперные зависимости структур Nb / Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> / Al после электроформовки. Толщина оксида d = 130 нм [2]

В заключение отметим, что электронные устройства, работа которых основана на физико-химических явлениях в оксидных материалах (это направление получило название «оксидная электроника» [5], [10]), являются одним из перспективных направлений альтернативной (не кремниевой) электроники, к числу которых относятся, например, молекулярная электроника, спинтроника и сверхпроводящая электроника [9]. С другой стороны, структуры типа Si-VO<sub>x</sub> (рис. 3б) могут служить примером гибридных устройств, основанных как на традиционной кремниевой технологии, так и на новых технологиях создания элементов памяти.

**БЛАГОДАРНОСТЬ**

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (2009–2013)», ГК № 14.740.11.0137, № П1156,

№ П1220, № 02.740.11.5179, № 02.740.11.039 и АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011)», проект № 12871. Авторы благодарят Г. Б. Стефановича и А. А. Величко за обсуждение и полезные замечания.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Березина О. Я., Казакова Е. Л., Пергамент А. Л., Сергеева О. В. Модификация электрических и оптических свойств тонких слоев гидратированного оксида ванадия при легировании водородом и вольфрамом // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2010. № 6(111). С. 77–85.
2. Кундозерова Т. В. Эффект резистивного переключения в оксиде ниобия // ВНКСФ-2010: Тез. докл. Волгоград, 2010. С. 456.
3. Путролайн В. В., Борисков П. П., Величко А. А., Кулдин Н. А., Пергамент А. Л. Эффект электрического переключения с памятью в гидратированном аморфном диоксиде ванадия // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 2. С. 88–91.
4. Путролайн В. В., Величко А. А., Кулдин Н. А., Стефанович Г. Б. Биполярное резистивное переключение в структуре Si-SiO<sub>2</sub>-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Au // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5. № 11. С. 99–102.
5. Стефанович Г. Б., Величко А. А., Пергамент А. Л., Стефанович Т. Г. Оксидная электроника: физические явления, материалы и компоненты // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Нанотехнологии-2010». Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. Ч. 2. С. 124–126.
6. Burr G. W., Kurdi B. N., Scott J. C., Lam C. H., Gopalakrishnan K., Shenoy R. S. Overview of candidate device technologies for storage-class memory // IBM Journal of Research and Development. 2010. Vol. 52. P. 449–464.
7. Driscoll T., Kim H.-T., Chae B.-G., Di Ventra M., Basov D. N. Phase-transition driven memristive system // Applied Physics Letters. 2009. Vol. 95.
8. Lee M.-J., Kim S. I., Lee C. B., Yin H., Ahn S.-E., Kang B. S., Kim K. H., Park J. C., Kim C. J., Song I., Kim S. W., Stefanovich G., Lee J. H., Chung S. J., Kim Y. H., Park Y. Low-Temperature-Grown Transition Metal Oxide Based Storage Materials and Oxide Transistors for High-Density Non-volatile Memory // Advanced Functional Materials. 2009. Vol. 19. P. 1587–1593.
9. Luryi S., Xu J. M., Zaslavsky A. Future Trends in Microelectronics: the Nano Millennium (Part II: The Future Beyond Silicon). N. Y.: Wiley, 2002.
10. Ramirez A. P. Oxide Electronics Emerge // Science. 2007. Vol. 315. P. 1377–1378.
11. Sawa A. Resistive switching in transition metal oxides // Materials Today. 2008. Vol. 11. Issue 6. P. 28–36.

## ХРОНИКА

■ В 2011 году в Петрозаводском государственном университете организована Лаборатория молекулярной генетики врожденного иммунитета в целях выполнения работ по гранту Правительства Российской Федерации по Постановлению № 220 «О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования» по договору № 11.G34.31.0052 от 19 октября 2011 года, заключенному между Министерством образования и науки России, ведущим ученым А. Н. Полтораком и Петрозаводским государственным университетом.

ПетрГУ стал победителем конкурса по привлечению ведущих ученых в российские вузы в направлении «биология» (Исследование рака. Апоптоз (программная смерть). Врожденный иммунитет. Воспаление, ожирение и его контроль). В конкурсе приняли участие 517 ведущих зарубежных и российских ученых совместно со 176 вузами России. Профессор А. Н. Полторака – один из 39 известных ученых, которые приглашены для работы в российские вузы по условиям мегагрантов правительства РФ.

Александр Николаевич Полторака закончил Санкт-Петербургский государственный университет, после защиты диссертации уехал работать в США. В настоящее время является профессором Департамента патологии Центра биомедицины Тафтского университета (Tufts University, Boston, USA). Занимаясь исследованиями в лаборатории профессора Б. Бойтлера (B. Beutler, нобелевский лауреат 2011 года по физиологии и медицине), он стал соавтором одного из самых значительных открытий современной иммунологии – идентификации рецептора к бактериальному эндотоксину (ЛПС, липополисахариду), что способствовало началу интенсивного изучения системы врожденного иммунитета, а также связи между врожденным и адаптивным иммунитетом.

А. Н. Полторака возглавил в ПетрГУ научно-исследовательскую Лабораторию молекулярной генетики врожденного иммунитета, способную эффективно проводить исследования, реализовывать разработки, создавать и проводить коммерциализацию продукции. Через 3 года инфраструктура Лаборатории будет объединять лабораторные комплексы и научные установки, с помощью которых будут проводить на самом

современном уровне молекулярно-генетические, биохимические и иммунологические исследования. Еще одним важным моментом является уникальная возможность соединить фундаментальную науку и клиническую практику, что, несомненно, внесет определенный вклад в научные достижения университета, повысит их востребованность, а также ускорит инновационную модернизацию региона. Основные направления деятельности Лаборатории: молекулярная биология онкогенов и опухолевых супрессоров; иммунология процессов воспаления, апоптоза, некроза; биохимический анализ активности генов различных путей метаболизма; мутагенез генов метаболизма; диагностика и прогнозирование опухолевых и аутоиммунных заболеваний; доклинические испытания новых фармакологических препаратов.

В данном проекте участвуют ученые ПетрГУ, среди которых член-корреспондент РАН, доктор биологических наук, профессор Н. Н. Немова, доктор медицинских наук, профессор И. Е. Бахлаев, кандидаты биологических наук Н. С. Зыкина, С. Н. Коломейчук, И. Е. Малышева; в состав коллектива также входят 4 аспиранта и 5 студентов. Со стороны ПетрГУ руководителем является Татьяна Олеговна Волкова, доктор биологических наук, профессор, член Российской Ассоциации специалистов по клеточным культурам (АСКК), член Европейского Общества тканевых культур, член Российской ассоциации аллергологов и клинических иммунологов, член Всемирной аллергологической организации (WAO-IAACI), член Российского общества онкологов-химиотерапевтов, эксперт общественно-научной организации «Российский сетевой интеллект».

**Желаем участникам проекта достижения поставленных целей!**

## CONTENTS

## BIOLOGY

*Fokina N. A., Ruokolainen T. A., Fomina O. V., Lesonen N. V., Shklyarevich G. A., Nemova N. N.*

**LIPID COMPOSITION OF INTERTIDAL BLUE MUSSELS *MYTILUS EDULIS* L. FROM DIFFERENT HABITATS IN KANDALAKSHA BAY OF WHITE SEA**

*Summary:* The lipid composition of the intertidal blue mussels *Mytilus edulis* L. collected from several habitats in Kandalaksha Bay of the White Sea was studied. The composition structure of the total lipids, separated fractions of phospholipids, fatty acid spectrum of the total lipids of digestive glands and gills dependent on the environmental and hydrological conditions in these habitats are shown. The possibility of using gained research results on fatty acid composition of some mussels' organs with additional indication of the unfavorable environmental effect and indications of the trophic relationship in marine communities are discussed.

*Key words:* Mussels *Mytilus edulis*, lipids, phospholipids, fatty acids, influence of environmental factors . . . . . 7

*Vasilevskaya Yu. M., Lukina N. V.*

**INFLUENCE OF TECHNOGENIC POLLUTION ON GROWTH DYNAMICS AND MESOSTRUCTURE OF LEAVES *BETULA CZEREPANOVII* ORLOVA (MURMANSK REGION)**

*Summary:* The influence of the technogenic pollution of the copper-nickel smelter «Severonickel» on growth indicators and anatomic structure of the leaf *Betula czerepanovii* Orlova were studied. It was determined that heavy metals cause inhibition of apical and marginal growth of the leaves. Quantitative changes of the mesostructure indicators of the leaf were revealed.

*Key words:* Heavy metals, *Betula czerepanovii*, growth, leaf, mesostructure . . . . . 14

*Tyrkin I. A., Shchurov I. L., Shirokov V. A., Gaida R. V.*

**STATUS OF ARTIFICIAL AND NATURAL REPRODUCTION OF ATLANTIC SALMON *SALMO SALAR* L. IN ONEGO LAKE RIVERS**

*Summary:* The article provides information on Onego lake tributaries where the *Salmo salar* spawning happens. Inventory of the density of the young *Salmo salar* colonization in the spawning areas was carried out, and dynamics of their change is retraced. The layout of the spawning areas in Onego lake tributaries is described. The sizes of the spawning areas are calculated. The exploitation analysis of the spawning areas in Onego lake tributaries is carried out.

*Key words:* Onego lake rivers, Atlantic salmon, density of colonization, spawning areas . . . . . 19

*Yakovleva G. A., Lebedeva D. I., Ieshko E. P.*

**ECHINOSTOMATIDAE TREMATODES IN KARELIAN BIRDS**

*Summary:* Trematode fauna in the birds of Karelia is studied. 14 species of the Echinostomatidae family were revealed. 11 species of the Echinostomatidae family are registered in the region for the first time.

*Key words:* Echinostomatidae, birds' parasites, infestation, specificity . . . . . 24

*Sergienko L. A.*

**ECOLOGICAL-DYNAMIC ROWS OF SALT MARSH VEGETATION ON POMORSKY AND KARELIAN COASTS OF WHITE SEA**

*Summary:* The research of the Arctic coastal zone has become essential in connection with the fast developing process of the climate transformation and active exploration in the regions. Monitoring studies of the flora and vegetation of the White Sea coasts are carried out. The changes in the floristic composition and in the structure of the salt marsh communities are shown.

*Key words:* Coastal ecosystems, halophytes, long-term changes. . . . . 29

**MEDICAL SCIENCE**

*Zhestyanikov A. L., Dorshakova N. V., Karapetyan T. A.*

**SOME FEATURES OF SEASONAL CHANGES OF MICROELEMENT STATUS IN BLOOD DONORS RESIDING IN KARELIA**

*Summary:* Research results on mass concentration of microelements in the whole blood in healthy residents of Karelia are presented. The results were obtained with the use of the atomic absorption spectrometry. Seasonal changes of the microelement status in healthy people are shown.

*Key words:* Microelement status, seasonal changes, blood donors . . . . . 33

*Meigal A. Yu., Potemina A. M., Shegelman I. M.*

**NEUROMUSCULAR STATUS IN HUMAN BEINGS UNDER CHRONIC AND ACUTE IMMERSION IN COLD WATER**

*Summary:* The objective of the study was to perform electromyography-based research of the neuromuscular status in human beings under severe chronic and acute immersion in cold water. It was determined that the 4-month winter swimming in cold water has minimal influence on the EMG characteristics when compared with the control group. Some EMG characteristics (the motor unit frequency and the non-linear parameters) change only after acute immersion in cold water. It was concluded that the motor system of the human being is rather resistant to severe chronic cold factor, but it reacts to severe acute cold by the change in the activity of the motor units.

*Key words:* Electrocardiogram, motor units, skeletal muscles, immersion, cold, adaptation . . . . . 37

*Sandugei A. V., Khrustalev O. A., Baranova N. S., Nizovtseva L. A., Pakhomova Yu. A.*

**DIFFICULT DIAGNOSIS: LYME BORRELIOSIS, CHARACTERISTIC FEATURES OF DIAGNOSTICS**

*Summary:* Causes of difficulties in diagnosing Lyme borreliosis, its main clinical symptoms and syndromes, some geographic features, as well as "mask-diagnosis" of Lyme borreliosis are reviewed in the study.

*Key words:* Lyme borreliosis, neyroboreliosis, Lyme carditis, Lyme arthritis . . . . . 42

*Skopets I. S., Vezikova N. N., Marusenko I. M., Malygin A. N.*

#### ACUTE CORONARY SYNDROME: ESTIMATION OF LONG-TERM EFFECT

*Summary:* The article deals with the estimation of the long-term effect caused by the acute coronary syndrome. The research results will be instrumental in identifying groups of risk. This in turn will help to develop preventive measures against complications, decrease mortality rate and improve quality of life in the patients suffering from the disease. The estimation of the long-term effect in the case of acute coronary syndrome was conducted on the patients treated in the regional vascular center.

*Key words:* Ischemic heart diseases, acute coronary syndrome, cardiovascular disease, myocardial infarction, distant consequences . . . . . 47

*Shegeglov E. A., Vezikova N. N., Kheifits I. V., Kondrichina S. N.*

#### ULTRASOUND AND X-RAY DATA IN PATIENTS WITH CHRONIC VENOUS INSUFFICIENCY AND KNEE OSTEOARTHRISIS

*Summary:* The article is concerned with the X-ray and ultrasound diagnostics in patients with the combination of the lower extremity pathology of the veins and osteoarthritis of the knee before and after conservative and surgical treatment.

*Key words:* Chronic venous insufficiency, osteoarthritis, ultrasound . . . . . 50

### AGRICULTURAL SCIENCE

*Konovalov M. P., Bolgov A. E.*

#### BREEDING QUALITY ASSESSMENT OF AISHIRSKY BULLS

*Summary:* The article presents assessment results on the breeding value of Aishirsky bulls. Assessments were carried out by two methods – transmitting ability, differences between indexes of daughters and their herdmates. A group of bulls with high breeding qualities was identified. The milk yield volumes define high compatibility of the two methods of bulls' breeding assessment. Low connection between methods is defined by the level of fat in the milk. It is noted that transmission ability indexes can be viewed as additional criterion for the evaluation of the servicing bulls' breeding value.

*Key words:* Breeding value, transmission ability, correlation, parameters of milk production . . . . . 55

*Egorov A. A., Burtsev D. S., Orlova L. V., Nikolaeva M. A.*

#### PRODUCTIVITY OF SPECIES AND INTRASPECIFIC TAXA OF *PICEA ABIES*, *P. FENNICA*, *P. OBOVATA* IN GEOGRAPHICAL CULTURES OF NORTHWESTERN RUSSIA

*Summary:* Assessment of taxonomic diversity and productivity of spruce plantations grown from seeds of different origin in Tosnensky district of Leningradsky region was carried out. Correlation for productivity and taxonomic affiliation of Siberian spruce, diversity of European spruce, and forms of the Finish spruce was established. The influence of the crown branching on taxation parameters was studied.

*Key words:* Introduction, spruce plantations, productivity, *P. abies*, *P. fennica*, *P. obovata*, taxa spruce . . . . . 59

*Nikiforov A. A., Zhukova A. I.*

#### GIS BASED PRODUCTIVITY CALCULATION AND SPATIAL ANALYSIS OF MUSHROOM GROWING SITES (CASE STUDY OF LESINSKII SCIENTIFIC-EXPERIMENTAL FORESTRY)

*Summary:* GIS technologies are instrumental in collection, storage, analysis, and geographic data visualization of mushroom growing sites located on the territory of Lesinskii scientific-experimental forestry. The analysis of the main types of mushroom growing sites in the existing types of forests is carried out.

*Key words:* Geoinformation systems, forest resources, mushrooms . . . . . 64

*Trishkin M. N., Lopatin E. V., Gavrilova O. I.*

#### ASSESSMENT OF SUSTAINABLE FOREST MANAGEMENT PRACTICES BASED ON EXPLORATION DATA ANALYSIS

*Summary:* The purpose of the study is to assess and test sustainable forest management practices on the territory of Russia. The sustainability criteria were identified based on the principles and criteria of the Russian Federal standards of the Forest Stewardship Counsel (FSC). 1/3 of the standard indicators can be assessed with the help of the remote sensing technique.

*Key words:* Sustainable management, forestry, remote sensing technique, forest certification . . . . . 70

*Cherkashina A. I.*

#### INFORMATION SUPPORT IN REGIONAL LAND MANAGEMENT AND INVENTORY ACTIVITIES

*Summary:* The article deals with the content of the information support for land use planning and cadastral activity. Effectiveness of the information technologies in the process of land management and cadastral activities are shown.

*Key words:* Cadastral activities, cadastral works, land management software, information, communication technology . . . . . 74

### ENGINEERING SCIENCE

*Gerasimov Yu. Yu., Seliverstov A. A., Sukhanov Yu. V., Syuney V. S.*

#### MAJOR FACTORS INFLUENCING PRODUCTION PLANNING OF WOOD FUELS FROM WOODY BIOMASS

*Summary:* The main and most important factors influencing the design of the technological process of woody biomass harvesting and wood fuel production are considered in the article. They are production costs, quality of wood chips, human factors, interaction of machines in the technological chain, and ecological factors.

*Key words:* Bioenergy, logging byproducts, low-grade wood, small-sized trees, stumps and roots, chip fuel . . . . . 77

*Galaktionov O. N., Kuznetsov A. V.*

#### STRUCTURE OF FOREST TRANSPORTATION ROUTES IN CORRELATION WITH FOREST TYPES

*Summary:* The article presents a method instrumental in calculation of the wood wastes volume required for the construction of skid roads. The formation of the logging area in the process of harvesting, depending on the forest type and conditions of its habitat are taken into account.

*Key words:* Forest machines, bearing capacity of soils, skid road, wood types, wood biomass . . . . . 81

*Krupko A. M., Belyi E. K.*

#### MATHEMATICAL MODEL OF VEHICLE FLEET CAPACITY MANAGEMENT

*Summary:* The article proposes a mathematical model instrumental in management of the vehicle fleet productive capacity with due account for seasonal factors.

*Key words:* Mathematical model, motor car park, productive capacity . . . . . 85

*Panov N. G., Rozhkov S. S., Pitukhin A. V.*

#### WATER RESISTANCE INCREASE IN THREE-PLY PARTICLEBOARDS BASED ON CARBAMIDE-FORMALDEGYDE RESIN RESULTING FROM INJECTION OF NANOSTRUCTURED SCHUNGITE FILLER INTO ADHESIVE

*Summary:* The article presents the research results on the influence of nanosized schungite filler modifying the adhesive based on carbamide-formaldehyde resin and tests results on three-ply particleboards manufactured with the use of carbamide-formaldehyde resin. The tests results on water resistance (swelling and water absorption) and on physical and mechanical properties are presented.

*Key words:* Wood-chip boards, nanosized schungite filler, physical and mechanical properties . . . . . 88

*Shapiro V. J., Grigor'ev I. V., Gul'ko A. E.*

#### CALCULATION METHOD ANALYSIS AND SUBSTANTIATION OF MATHEMATICAL MODEL OF BARK DESTRUCTION FOR GROUP DEBARKING

*Summary:* The article provides analysis of the results on debarking process modeling in drums. Possible ways of refinement of the mathematical model of the process are specified.

*Key words:* Debarking, shock interaction, group debarking, friction debarking . . . . . 92

*Shilovsky V. N., Kil'pelyaynen S. A., Kyal'viyaynen V. A.*

#### ON ESTIMATION METHODS OF WORKABILITY MAINTENANCE OF LOGGING MACHINES

*Summary:* The article is concerned with the estimation methods of the logging machines' workability. The troubleshooting technique is offered; the regression equation for calculation of operational labor intensity needed for maintenance is received; the method of the value analysis is considered.

*Key words:* Workability, average time for troubleshooting, correlation, labor intensity of maintenance, function cost, production cost . . . 97

*Vasil'ev V. V.*

#### PERFORMANCE INDICATORS OF RAFT SECTIONS WITH STABILIZED BUOYANCY

*Summary:* Correlation indicators for the calculation of performance indicators for raft sections with stabilized buoyancy are shown: buoyancy reserve coefficient and draft. In raft sections with stabilized buoyancy intensity of water absorption by timber does not influence the draft of the raft section, while at the same time, the coefficient of raft section density helps to reduce the draft.

*Key words:* Raft section, coefficient of raft section density, draft, buoyancy stabilization, flexible waterproof material . . . . . 100

### PHYSICS AND MATHEMATICS

*Zaika Yu. V., Kostikova E. K.*

#### PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THERMAL DESORPTION MODEL OF HYDROGEN

*Summary:* Degassing of the plate saturated with hydrogen is considered. The experiment is based on the thermal desorption spectrometry method. The model is a boundary-value problem with nonlinear boundary conditions. The main physical and chemical processes, such as diffusion and desorption, are taken into account. The parameters assessment method based on measurement results and numerical simulation results are presented.

*Key words:* Hydrogen permeability, nonlinear boundary-value problems, parameters' identification . . . . . 103

*Sidorov Yu. V., Kirikov P. V., Rogov A. A.*

#### COMPARISON DENDROGRAMS WITH EQUAL NUMBERS OF NODES

*Summary:* The article describes probabilistic approach to comparing the distances between dendrograms with equal numbers of nodes based on a number of classical metrics.

*Key words:* Distance between dendrograms, probabilistic approach, distance comparison . . . . . 108

*Pechnikov A. A., Chirkov A. V., Chuiko Yu. V.*

#### RESEARCH OF SCIENTIFIC AND EDUCATIONAL WEB CONNECTIVITY

*Summary:* The paper presents the study of the academic and university web-subsets connectivity. We determine and analyze the structure of connections inside and between web-subsets and estimate the connectivity degree and subsets' influence on it.

*Key words:* Webometrics, web-graph, reliable connectivity component . . . . . 111

*Aleshina L. A., Lyukhanova I. V., Budaeva V. V., Zolotukhin V. N., Mitrofanov R. Y., Sakovich G. V.*

#### RESULTS OF X-RAY STUDIES OF NON-WOOD CELLULOSE

*Summary:* The structure of Chinese miscanthus and oat hulls cellulose samples were studied by x-ray scattering. The crystallinity of the cellulose was determined by the Ruland method, and the sizes of the cellulose crystallites were calculated by the Scherrer equation. The unit cell parameters were refined by the full-profile analysis. It was determined that the method of producing cellulose from the untreated samples does not have any significant impact on the atomic structure of the derived cellulose.

*Key words:* Cellulose, x-ray studies, sodium hydroxide delignification, miscanthus, oat hulls . . . . . 114

*Pergament A. L., Boldin P. A., Kolchigin V. V., Stefanovich T. G.*

#### BI-STABLE SWITCHING AND MEMORY EFFECTS IN OXIDES OF TRANSITION METALS

*Summary:* The article is concerned with the current problems of oxide electronics. The research results on electrophysical properties and switching effects in thin-film structures based on transition of metal oxides are presented. It is shown that V and Nb oxide structures are instrumental in the development of new memory elements.

*Key words:* Switching effect, memory, transition metal oxides . . . . . 118

SCIENTIFIC INFORMATION . . . . . 121