
Министерство образования и науки
Российской Федерации

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

№ 8 (137). Декабрь, 2013

Серия: Естественные и технические науки

Главный редактор

А. В. Воронин, доктор технических наук, профессор

Зам. главного редактора

В. Б. Акулов, доктор экономических наук, профессор

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

В. С. Сюнёв, доктор технических наук, профессор

Ответственный секретарь журнала

Н. В. Ровенко, кандидат филологических наук

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

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

uchzap.petsu.ru

Редакционный совет

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

Редакционная коллегия серии
«Естественные и технические науки»

- О. Ю. БАРЫШЕВА**
доктор медицинских наук (Петрозаводск)
- А. Е. БОЛГОВ**
доктор сельскохозяйственных наук,
профессор (Петрозаводск)
- В. В. ВАПИРОВ**
доктор химических наук, профессор (Петрозаводск)
- Т. О. ВОЛКОВА**
доктор биологических наук (Петрозаводск)
- Е. Ф. МАРКОВСКАЯ**
доктор биологических наук,
профессор (Петрозаводск)
- А. Ю. МЕЙГАЛ**
доктор медицинских наук, профессор (Петрозаводск)
- Н. Н. НЕМОВА**
доктор биологических наук,
профессор, член-корреспондент РАН (Петрозаводск)
- В. И. ПАТЯКИН**
доктор технических наук,
профессор (Санкт-Петербург)
- Е. И. РАТЬКОВА**
ответственный секретарь серии
(Петрозаводск)
- А. А. РОГОВ**
доктор технических наук,
профессор (Петрозаводск)
- Г. Б. СТЕФАНОВИЧ**
доктор физико-математических наук,
профессор (Петрозаводск)
- В. И. СЫСУН**
доктор физико-математических наук,
профессор (Петрозаводск)
- В. В. ЩИПЦОВ**
доктор геолого-минералогических наук,
профессор (Петрозаводск)

Ministry of Education and Science
of the Russian Federation

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

№ 8 (137). December, 2013

Natural & Engineering Sciences

Chief Editor

Anatoly V. Voronin, Doctor of Technical Sciences, Professor

Chief Deputy Editor

Vladimir B. Akulov, Doctor of Economic Sciences, Professor

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

Vladimir S. Syunev, Doctor of Technical Sciences, Professor

Executive Secretary

Nadezhda V. Rovenko, Candidate of Philological Sciences

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

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

uchzap.petrSU.ru

Editorial Council

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

Editorial Board of the Series
“Natural & Engineering Sciences”

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

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЯ

- Марковская Е. Ф., Елькина Н. А., Сониная А. В.
Оценка состояния пыльцевых зерен у растений приливно-отливной зоны побережья Белого моря 7
- Теребова Е. Н., Марковская Е. Ф., Шмакова Н. Ю.
Некоторые особенности транспортной функции клеточной стенки растений Арктики 11
- Бахмет И. Н.
Характерные особенности адаптации мидии съедобной *Mytilus edulis* L. к поллютантам 17
- Пилипко Е. Н.
Влияние жизнедеятельности бобров (*Castor fiber* L.) на физико-химические свойства почвы и воды 20

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

- Дуданов И. П., Ахметов В. В.
Оптимальная хирургическая техника каротидной эндартерэктомии после дезоблитерации 25
- Антонен Е. Г., Буркин М. М., Хяникяйнен И. В., Коробков М. Н.
Психопатология сосудистых заболеваний головного мозга (обзор) 30
- Мельцер Р. И., Иванов Д. В., Лозовик И. П., Верховод А. Ю., Поченты Д. О.
Послеоперационное ведение больных с неопорными переломами костей голени в условиях контролируемой осевой нагрузки 37
- Стафеева И. В., Субботина Н. С.
Особенности внутриполусферных соотношений ЭЭГ у больных в остром периоде ишемического инсульта 40

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Поташева И. М., Чаженгина С. Ю., Светов С. А.
Возможности применения микрондогового анализа образцов круговой керамики к изучению технологии древнего гончарства карелов в эпоху Средневековья 44

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

- Федорец Н. Г., Солодовников А. Н.
Влияние Костомукшского горно-добывающего комплекса на почвы прилегающих территорий 51
- Лопатин Е. В.
Методика оценки динамики прироста основных лесообразующих пород по временным сериям космических снимков 58
- Сунгурова Н. Р., Сунгуров Р. В.
Продолжительность влияния параметров посадочного материала на рост лесных культур 64

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Герасимов Ю. Ю., Катаров В. К., Ковалёва Н. В., Рожин Д. В., Соколов А. П., Сюнёв В. С.
Совершенствование системы оптимального проектирования сети лесных автомобильных дорог 70
- Григорьев И. В., Никифорова А. И., Пельмский А. А., Хитров Е. Г., Хахина А. М.
Экспериментальное определение времени релаксации напряжений лесного грунта 77
- Питухин А. В., Петров А. Н., Степанов А. В.
Оценка надежности дорожного покрытия при воздействии предельной нагрузки с позиции механики разрушения 81
- Селютин Л. Ф.
Компьютерное моделирование многоэтажных зданий с учетом ветрового воздействия 84
- Марков Б. Г., Марков О. Б., Борисов А. Ю.
Особенности геометрического моделирования утраченных памятников архитектуры 88
- Архипов И. В.
Математические модели раскроя лесосырья в задачах планирования и управления лесопильным производством 93
- Гаврилов Т. А.
Экспериментальное исследование процесса измельчения мясного сырья при различных скоростях резания 98
- Забровский А. Л., Петров Е. А.
Веб-сервис для тестирования способности удаленных пользователей принимать мультимедийный поток с определенным битрейтом 102

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Пикалев А. А., Луизова Л. А.
Исследование влияния плазменно-пылевых структур на контур спектральной линии неона 106
- Пикулев В. Б., Логинова С. В., Логинов Д. В.
Модельная интерпретация свойств композитного материала на основе нанокристаллической целлюлозы и кремниевых наночастиц 110
- Гусев О. В., Жуков А. В., Пешикова И. В.
Способ идентификации перегрузки web-сервера при помощи нейронной сети 114
- Ломов А. А.
Взаимодействие программного агента на уровне сессии с интеллектуальными странами 118

Память

- Ю. Ю. Герасимов 122

Юбилей

- К 75-летию Ю. В. Лупандина 123
К 50-летию Н. Н. Везиковой 123

- Contents 124

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

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

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ РАН

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

**Требования к оформлению статей см.:
<http://uchzap.petrSU.ru/req.php>**

Учредитель: ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет»

Редактор С. Л. Смирнова. Корректор Е. В. Иванова. Переводчик Н. К. Дмитриева. Верстка М. А. Моросин

Подписано в печать 11.12.2013. Формат 60×90^{1/8}. Бумага офсетная. Печать офсетная.
10 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. (1-й завод – 165 экз.). Изд. № 475

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

ЕВГЕНИЯ ФЕДОРОВНА МАРКОВСКАЯ

доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
volev10@mail.ru

НАДЕЖДА АЛЕКСАНДРОВНА ЕЛЬКИНА

кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
z_nat2003@mail.ru

АНЖЕЛЛА ВАЛЕРЬЕВНА СОНИНА

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

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПЫЛЬЦЕВЫХ ЗЕРЕН У РАСТЕНИЙ ПРИЛИВНО-ОТЛИВНОЙ ЗОНЫ ПОБЕРЕЖЬЯ БЕЛОГО МОРЯ*

Изучено состояние пыльцевых зерен у видов сосудистых растений, типичных галофитов *Tripolium pannonicum* (Jacq.) Dobrocz. subsp. *tripolium* (L.) Greuter, *Triglochin maritima* L., *Glaux maritima* L., произрастающих в условиях приливно-отливной зоны побережья Белого моря. Проведенное исследование показало, что на побережье Белого моря у *Tripolium pannonicum* нарушения в развитии пыльцы составляют 5,0–15,0%, у *Glaux maritima* 6,0–30,0%, у *Triglochin maritima* 18,0–42,0%. Тератоморфная пыльца встречается у растений на всех пробных площадях вдоль трансекты. Однако у *Tripolium pannonicum* и *Triglochin maritima* наименьшее количество тератоморф отмечается у уреза воды, а у *Glaux maritima* – ближе к берегу, что связано с их приспособленностью выносить разную продолжительность заливания соленой водой. Адаптивный потенциал растений к условиям приливно-отливной динамики снижается в следующем ряду: *Tripolium pannonicum*, *Glaux maritima*, *Triglochin maritima*.

Ключевые слова: пыльцевые зерна, тератоморфная пыльца, галофиты, Белое море, приливно-отливная зона

У некоторых видов сосудистых растений приморских территорий, наряду с вегетативным, успешно осуществляется и репродуктивное семенное размножение [7]. Строение репродуктивных органов является широко используемым показателем для оценки онтогенетического развития растений [1], [2], [5]. Прямых исследований по оценке состояния полового поколения у растений разных экотопов приливно-отливной зоны нами не обнаружено. Цель работы – оценка состояния пыльцевых зерен у ряда доминирующих видов растений приливно-отливной зоны на побережье Белого моря.

МЕСТО ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводились в пределах приливно-отливной зоны побережья Белого моря в окрестностях пос. Растьяново Беломорского района Республики Карелия в июле 2012 года. Вдоль трансекты, проложенной от линии уреза воды (низкая вода в сизигийный отлив) до линии штормовых выбросов, были заложены три пробные площади (ПП). Пробные площади от-

личались положением на трансекте: около берега (1 ПП), в средней части (2 ПП) и около линии уреза воды (3 ПП), продолжительностью и временем заливания морской водой. Общая протяженность трансекты составила 300 м, размеры пробных площадей соответствовали размерам растительных сообществ галофитов.

Для исследования были выбраны следующие виды растений: *Tripolium pannonicum* (Jacq.) Dobrocz. subsp. *tripolium* (L.) Greuter (сем. *Asteraceae*), *Triglochin maritima* L. (сем. *Yuncagenaceae*), *Glaux maritima* L. (сем. *Primulaceae*) – типичные облигатные галофиты приморских территорий [7].

На пробных площадях для каждого вида было выбрано по 10 цветущих здоровых растений без признаков ингибирования роста и развития и взято по 10 цветков с каждого растения. Цветки фиксировали в 70% этиловом спирте.

Для анализа полученного материала была использована общепринятая методика исследования пыльцы ацетокарминовым методом [9]. Всего было исследовано по 500 пыльцевых зерен у каждого вида растения на каждой пробной

площади. Определено количество нормально развитой и аномальной пыльцы. Проведена статистическая обработка материала [3].

В качестве эталона были использованы описания пыльцевых зерен, приведенные в литературе [6], [10], [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Нормально сформированной считается пыльца (мужской гаметофит), представленная вегетативной клеткой, содержащей ядро и генеративную клетку, не имеющая отклонений в строении экзины. Цитоплазма вегетативной клетки окрашена в розовый цвет, хорошо структурирована [3]. Тератоморфная (дефектная) пыльца – неокрашенная, сморщенная, пустая и с другими видимыми повреждениями. Палинологи изучают тератоморфную пыльцу как показатель состояния окружающей среды. Морфологическая изменчивость пыльцевых зерен зависит от воздействия антропогенных факторов, таких как пожары, радиация, повышенная концентрация тяжелых металлов, иных вредных веществ. С другой стороны, пыльца как носитель генетической информации, казалось бы, должна обладать устойчивыми видовыми признаками, но известные данные свидетельствуют об обратном [8].

Triglochin maritima L. – триостреник морской, по литературным данным, имеет шаровидные, реже эллипсоидальные пыльцевые зерна. Средний диаметр пыльцевого зерна составляет 18–20 мкм. Пыльца безапертурная. Экзина тонкая, часто имеет складки и состоит из двух отдельных слоев. Эктэксина – сетчатая, гладкая или мелкоколючковатая [11].

Анализ пыльцевых зерен беломорских растений триостреника показал, что от 58,0 до 82,0% пыльцевых зерен соответствуют описаниям в литературе (см. таблицу). Единично в пробах с 1 и 2 ПП встречаются пыльцевые зерна, вдвое меньшие по размеру, но с признаками нормального развития (1,0–6,0%). Обнаружено несколько типов нарушений развития пыльцевых зерен триостреника. Чаще всего они связаны с отклонениями в структуре цитоплазмы (9,0–19,0%). Такие пыльцевые зерна встречаются во всех пробах. Пыльцевое зерно сохраняет свою форму, но цитоплазма отходит от стенок, сбиваясь к одному краю. Часто она выглядит вспененной. Ядра вегетативной и генеративной клеток не просматриваются, размер пыльцевых зерен нормальный. Второй по частоте встречаемости дефект развития – смятые пыльцевые зерна (1,0–4,0%) – обнаружен у растений 1 и 2 ПП. Такая пыльца прокрашивается неравномерно, содержимое комковатое. В небольших количествах встречаются пустые и мелкие пыльцевые зерна (менее 1,0%) – 1 ПП, 2 ПП. Не просматривается сетчатая структура экзины, хотя она окрашена интенсивно и равномерно. Меньшее

Анализ пыльцевых зерен прибрежных растений

Пробная площадь	Вид растения	Статистические показатели нормально развитой пыльцы	
		M ± m (%)	CV
1 ПП	<i>Tripolium pannonicum</i> (Jacq.) Dobroc.	87,6 ± 1,9	4,8
	<i>Triglochin maritima</i> L.	81,2 ± 3,4	9,2
	<i>Glaux maritima</i> L.	93,0 ± 1,7	4,0
2 ПП	<i>Tripolium pannonicum</i> (Jacq.) Dobroc.	84,8 ± 1,3	3,4
	<i>Triglochin maritima</i> L.	57,8 ± 12,5	48,4
	<i>Glaux maritima</i> L.	94,0 ± 0,7	1,7
3 ПП	<i>Tripolium pannonicum</i> (Jacq.) Dobroc.	94,6 ± 1,1	2,5
	<i>Triglochin maritima</i> L.	81,8 ± 2,3	6,2
	<i>Glaux maritima</i> L.	69,4 ± 4,9	15,9

Примечание. Расположение пробных площадей:

1 ПП – около берега, 2 ПП – в средней части трансекты,

3 ПП – около уреза воды во время отлива

число нарушений в развитии пыльцевых зерен у растений триостреника обнаружено на 3 ПП, произрастающих у уреза воды и чаще по сравнению с другими ПП находящимися в условиях затопления.

Пыльцевые зерна *Tripolium pannonicum* (Jacq.) Dobroc. subsp. *tripolium* (L.) Greuter – астры морской, описанные в литературе, имеют сфероидальную форму, чуть сплюснутые с полюса, трехбороздноапертурные. В очертании с полюса трехлопастные. Средний диаметр пыльцевого зерна до 30 мкм. Борозды длинные, глубокопогруженные. Поры округлые. Экзина толстая, с крупношиповатой скульптурой. Шипы в основании конические, к верхушке заостренные [11].

Анализ пыльцевых зерен растений астры морской показал, что 85,0–95,0% из них соответствуют нормально развитым, согласно литературным данным (см. таблицу). В пробе с 1 ПП встречаются мелкие пыльцевые зерна, но с признаками нормальной морфологии (около 0,5%). В пределах всей трансекты у растений данного вида чаще всего встречаются пыльцевые зерна без содержимого (8,0–11,0%). При этом скульптура экзины хорошо развита, форма зерна сохраняется. Однако такая пыльца не окрашивается ацетокармином и не имеет розового оттенка. Пустые пыльцевые зерна мелкого размера встречаются гораздо реже (1,0–4,0%) и обнаружены в двух пробах (1 ПП, 2 ПП). Нарушения строения цитоплазмы зафиксированы у растений 2 и 3 ПП, но их количество

невелико (0,4–1,4%). Цитоплазма таких пыльцевых зерен выглядит складчатой, неравномерно прокрашена. Это, возможно, связано со строением экзины, мешающей детальному исследованию содержимого пыльца. Только у растений на 2 ПП обнаружены нарушения развития экзины (0,5–6,0%) – шипы практически отсутствуют, пыльцевые зерна почти гладкие, плохо прокрашены. Смятая пыльца в небольшом количестве обнаружена в двух пробах (1 ПП, 3 ПП). Шипы расположены хаотично, их вершины могут срастаться. Наименьшее число всех типов нарушений в строении пыльцевых зерен выявлено у растений, произрастающих у уреза воды (3 ПП).

Glaux maritima L. – млечник морской. Пыльцевые зерна млечника морского – 3-бороздчато-оровидные, эллипсоидальной формы. Пыльцевые зерна в очертании с полюса треугольно-округлые, с экватора – эллиптические. Длина полярной оси составляет в среднем 26–30 мкм, экваториальной – 18–22 мкм. Борозды широкие, с заостренными концами. Оры слабо заметные, эллиптические. Экзина толстая, скульптура мелкосетчатая. Пыльцевые зерна глякса имеют в два раза более толстую экзину, чем другие насекомоопыляемые или самоопыляемые растения, относящиеся к семейству *Primulaceae* [6].

Анализ беломорских растений показал, что у *Glaux maritima* 70,0–94,0% пыльцевых зерен соответствуют описаниям, приведенным в литературе (см. таблицу). Мелкие пыльцевые зерна нормальной морфологии зафиксированы в двух пробах – 1 ПП, 3 ПП (0,4–1,0%). В двух пробах – 1 ПП, 2 ПП (0,3–0,8%) – было зарегистрировано наличие тетрад, что может быть связано с задержкой темпов развития и неполным в момент наблюдения расхождением зерен. Нарушения в развитии пыльца млечника чаще всего связаны с наличием пустых пыльцевых зерен (1,0–17,0%). Такие пыльцевые зерна встречаются в двух пробах (1 ПП и 3 ПП). Их интина не окрашена в розовый цвет (как в норме), пыльца более светлая. Реже встречаются пустые пыльцевые зерна меньших размеров (0,6–2,6%) (2 ПП и 3 ПП). Смятые пыльцевые зерна (1,5–2,5%) встречаются во всех пробах, форма пыльца более вытянутая, в области экватора около пор – вдавленная. Интина и цитоплазма слабо прокрашены. Нарушения строения цитоплазмы также выявлены во всех пробах (0,6–9,0%) – отчетливо просматривается комковатость, интина бесцветная. Возможно, более интенсивное окрашивание цитоплазмы в данном случае происходит из-за нарушения целостности экзины или разрушения пор. Следует отметить некоторые сложности анализа пыльцевых зерен млечника, а именно слабое прокрашивание ацетокармином [6] и веретенообразная форма пыльцевого зерна, которая может просматриваться только в экваториальном положении,

что снижает возможность получения более точных данных о ее строении. Наименьшее число нарушений отмечено в средней части трансекты (2 ПП) и у уреза воды (3 ПП).

Таким образом, на исследуемой территории приливно-отливной зоны побережья, рядом с которой нет очевидных загрязнителей, для изученных видов растений получены неоднозначные данные. Так, у астры морской нарушения в развитии пыльца составляют от 5,0 до 15,0%, у млечника – от 6,0 до 30,0%, у триостренника – от 18,0 до 42,0%. Наибольшее количество нарушений у всех видов растений приходится на изменения в цитоплазме пыльцевых зерен, с максимальными значениями у триостренника. Возможно, это связано с морфологией пыльца триостренника: безапертурная, с тонкой экзиной, что облегчает проникновение внутрь веществ, способных вызывать нарушения структуры цитоплазмы. С высокой частотой встречаются пустые и смятые зерна нормального и мелкого размера, что является следствием недоразвития внутриклеточных структур. Выявленные нарушения отмечаются у растений на всех пробных площадях. Однако пробные площади существенно различаются по условиям среды: время нахождения растений в затоплении, температура, условия освещенности в течение суток с учетом приливно-отливных событий, соленость (на 1 ПП впадает пресный ручей) и типы субстрата. В связи с этим выявлено, что для астры морской и триостренника морского наименьшее количество тератоморфной пыльца отмечается у уреза воды, а для млечника морского – у берега, что может быть связано с их приспособленностью к разной продолжительности заливания.

Диапазон варьирования количества нормально развитой пыльца у растений исследованных видов в трех точках различен. Значение коэффициента вариации (CV) нормально развитой пыльца в пределах трансекты у астры морской колебалось незначительно (3,0–5,0%), что свидетельствует об адаптации вида к широкому спектру условий, формирующихся на приливно-отливной зоне (см. таблицу). У млечника морского отмечена средняя степень варьирования данного коэффициента (2,0–16,0%). У триостренника морского значения CV по трансекте сильно варьируют: от 6,0 до 48,0%. Наиболее высокие значения коэффициента вариации отмечаются у растений триостренника в центральной части трансекты (2 ПП) (CV = 48,0%), которая представляет собой открытый участок с самой активной приливно-отливной динамикой [4].

Проведенное исследование показало, что состояние пыльцевых зерен (микрогаметофитов) у доминантных видов растений приливно-отливной зоны *Tripolium pannonicum*, *Triglochin maritima* и *Glaux maritima* отличается в разных условиях произрастания. По степени адаптиро-

ванности на уровне репродуктивной сферы их можно расположить в следующий ряд: астра морская, млечник морской, триостренник морской. Доминирование этих видов на побережье

Белого моря в условиях приливно-отливной динамики обеспечивается высоким уровнем пластичности, вклад в которую вносит и состояние репродуктивной сферы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности и проекта РФФИ 12-04-01008-а «Полиморфизм и стратегии адаптации видов в нестабильных условиях прибрежных экосистем Арктики».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батыгин Н. Ф. Онтогенез высших растений. М.: Агропромиздат, 1985. 100 с.
2. Василевская Н. В. Биология развития растений. Мурманск, 2008. 100 с.
3. Дзюба О. Ф. Палиноиндикация качества окружающей среды. СПб.: Недра, 2006. 198 с.
4. Ивантер Э. В., Коросов А. В. Введение в количественную биологию. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2011. 304 с.
5. Куперман Ф. М., Ржанова Е. И., Мурашов В. В., Львова И. Н., Седова Е. А., Ахундова В. А., Щербина И. П. Биология развития культурных растений. М.: Высш. шк., 1982. 343 с.
6. Куприянова Л. А., Алешина Л. А. Пыльца двудольных растений Европейской части СССР. *Lamiaceae-Zygophyllaceae*. Л.: Наука, 1978. С. 83–85.
7. Марковская Е. Ф., Сергиенко Л. А., Шкляревич Г. А., Сони́на А. В., Стародубцева А. А., Смолькова О. В. Природный комплекс побережий Белого моря. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2010. 84 с.
8. Мельникова Т. А. Аномальная пыльца рода *Pinus* L. как индикатор палеоклиматических флюктуаций в позднем голоцене // Вестник ДВО РАН. 2004. № 3. С. 178–182.
9. Паушева З. П. Практикум по цитологии растений. М.: Агропромиздат, 1980. 304 с.
10. Pires E. F., Medeanic S. Palynological implications of the preference of *Triglochin* in Holocene palaeoenvironmental reconstructions in the Coastal plain of Rio Grande do sul state, Brazil // Revista Española de Micropaleontología. 2006. 38 (1). P. 93–101.
11. Punt W., Hoен P. P. *Asteraceae – Asteroideae*. The Northwest European Pollen Flora // Review of Palaeobotany and Palynology. 2009. Vol. 10. P. 22–183.

Markovskaya E. F., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Elkina N. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Sonina A. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

ASSESSMENT OF POLLEN GRAINS STATE IN TIDAL ZONE PLANTS OF WHITE SEA COAST

The state of pollen grains in three halophytes species *Tripolium pannonicum* (Jacq.) Dobrocz. subsp. *tripolium* (L.) Greuter, *Triglochin maritima* L., *Glaux maritima* L., growing on the coastal tidal zone of the White Sea was studied. On three testing plots of tidal flat zone close to the low-water line and in the area of emissions, the samplings of inflorescent plants were studied. Due to our data, the percentage of imperfect pollen grains in *Tripolium pannonicum* is equal to 5,0–15,0 %, in *Glaux maritima* to – 6,0–30,0 %, in *Triglochin maritima* to – 18,0–42,0 %. The defects in the structure of the pollen grains are typical for all investigated species growing on the plots. However, the smallest amount of imperfect pollen grains was observed in *Tripolium pannonicum* and *Triglochin maritima* by the low-water line, and in *Glaux maritima* – by the seashore. These data point out to their ability to bear different duration of flooding. Assessments of various amount of normal pollen revealed different levels of adaptation in the studied plants to tidal conditions. These species are arranged according to the degree of their adaptive potential to the level of reproduction: *Tripolium pannonicum*, *Glaux maritima*, *Triglochin maritima*.

Key words: pollen-grains, imperfect pollen grains, halophytes, the White Sea, tidal zone

REFERENCES

1. Batygin N. F. *Ontogenez vysshikh rasteniy* [Ontogenesis of higher plants]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 100 p.
2. Vasilevskaya N. V. *Biologiya razvitiya rasteniy* [Biology of plant development]. Murmansk, 2008. 100 p.
3. Dzyuba O. F. *Palinoindikatsiya kachestva okruzhayushchey sredy* [Palynoindication of the quality of the environment]. St. Petersburg, Nedra Publ., 2006. 198 p.
4. Ivanter E. V., Korosov A. V. *Vvedenie v kolichestvennyuyu biologiyu* [Introduction into quantitative biology]. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2011. 304 p.
5. Kuperman F. M., Rzhanova E. I., Murashov V. V., L'vova I. N., Sedova E. A., Akhundova V. A., Shcherbina I. P. *Biologiya razvitiya kul'turnykh rasteniy* [Biology of cultivated plants' development]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1982. 343 p.
6. Kupriyanova L. A., Aleshina L. A. *Pyl'tsa dvudol'nykh rasteniy Evropeyskoy chasti SSSR. Lamiaceae-Zygophyllaceae* [Pollen dicotyledonous plants the European part of the USSR. *Lamiaceae-Zygophyllaceae*]. Leningrad, Nauka Publ., 1978. P. 83–85.
7. Markovskaya E. F., Sergienko L. A., Shklyarevich G. A., Sonina A. V., Starodubtseva A. A., Smol'kova O. V. *Prirodnyy kompleks poberezhnyy Belogo morya* [Natural complex of the White Sea coasts]. Petrozavodsk, Izd-vo KarNTS RAN, 2010. 84 p.
8. Mel'nikova T. A. Abnormal pollen genus *Pinus* L. as an indicator of paleoclimatic fluctuations during the Late Holocene [Anomal'naya pyl'tsa roda *Pinus* L. kak indikator paleoklimaticheskikh flyuktuatsiy v pozdnem golotsene]. *Vestnik DVO RAN*. 2004. № 3. P. 178–182.
9. Pausheva Z. P. *Praktikum po tsitologii rasteniy* [Practical work on plant Cytology]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1980. 304 p.
10. Pires E. F., Medeanic S. Palynological implications of the preference of *Triglochin* in Holocene palaeoenvironmental reconstructions in the Coastal plain of Rio Grande do sul state, Brazil. *Revista Española de Micropaleontología*. 2006. 38 (1). P. 93–101.
11. Punt W., Hoен P. P. *Asteraceae – Asteroideae*. The Northwest European Pollen Flora. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 2009. Vol. 10. P. 22–183.

Поступила в редакцию 18.10.2013

ЕЛЕНА НИКОЛАЕВНА ТЕРЕБОВА

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

ЕВГЕНИЯ ФЕДОРОВНА МАРКОВСКАЯ

доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
volev@sampo.ru

НАТАЛЬЯ ЮРЬЕВНА ШМАКОВА

доктор биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории физиологии и биохимии Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н. А. Аврорина, Кольский научный центр РАН (Апатиты, Российская Федерация)
shmanatalya@yandex.ru

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТРАНСПОРТНОЙ ФУНКЦИИ КЛЕТОЧНОЙ СТЕНКИ РАСТЕНИЙ АРКТИКИ*

Исследуются ионообменная способность (количество функциональных групп) и набухание клеточной стенки листа растений *Betula nana* L., *Salix polaris* Walenb., *Dryas octopetala* L. и *Cassiope tetragona* (L.) D. Don., произрастающих на острове Западный Шпицберген. Установлено, что клеточная стенка листа растений Арктики является катионообменником, который представлен сходным составом ионообменных групп (аминогруппы, карбоксильные и фенольные ОН-группы) с клеточными стенками растений тундровой зоны. У всех видов наибольший процент в структуре клеточной стенки листа приходится на карбоксильные группы гидроксикоричных кислот и фенольные ОН-группы, которые входят в состав соединений фенольной природы. Особенностью растений Арктики является увеличение в 2–3 раза количества ионообменных групп каждого типа и высокие коэффициенты набухания клеточной стенки листа по сравнению с видами других климатических зон. Делается предположение, что высокие значения ионообменной способности и коэффициента набухания клеточной стенки у всех исследованных видов способствуют более активному водному потоку по системе апопласта и усилению метаболических процессов в клеточной стенке у растений в условиях высоких широт.

Ключевые слова: клеточная стенка, ионообменные свойства, растения Арктики

Клеточная стенка является одной из наиболее важных структур растительной клетки, которая первой включается в адаптационные процессы, реагируя на условия произрастания. Ее сложный состав и активная функциональная деятельность [3] свидетельствуют о перестройках в зависимости от условий среды. Экстремальные условия Арктики диктуют особые требования к структуре, в том числе и к клеточной стенке тех видов, которые произрастают в этих условиях. Однако работ, выполненных на клеточной стенке растений, произрастающих и адаптированных к высоким широтам, практически нет. В задачу настоящего исследования входило изучение ионообменных способностей клеточной стенки листа растений, произрастающих в условиях Арктики.

МЕСТО, ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа выполнена в зоне тундровой растительности внутренних фьордов Западного Шпицбергена в 2009–2010 годах. Климатические

особенности включают: короткий вегетационный период (40–70 дней), продолжительность которого определяется временем схода снега в локальных местообитаниях; низкая среднесуточная температура (8 °С) и круглосуточный полярный день с 19 апреля по 24 августа [4].

Объектами исследования были виды естественной флоры архипелага Шпицберген – *Betula nana* L. (сем. *Betulaceae*), *Salix polaris* Walenb. (сем. *Salicaceae*), *Dryas octopetala* L. (сем. *Rosaceae*) и *Cassiope tetragona* (L.) D. Don. (сем. *Ericaceae*). Все виды собраны в районе залива Колсбей Западного Шпицбергена.

Для определения состава и количества ионогенных групп в клеточных стенках листа использовали метод потенциометрического титрования, количество групп оценивали по значению сорбционной емкости (S , мкмоль/г сух. массы клет. ст.), весовой коэффициент набухания клеточных стенок определяли гравиметрическим методом [10], расчет константы ионизации – по [6; 7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Транспортная функция растительной клеточной стенки состоит в передвижении веществ по апопласту и связана с образованием специальных структур клеточной стенки, которые отлагаются в период ее формирования и направляют и регулируют транспортные потоки [3], формирующиеся во время роста и развития растений. Клеточная стенка – слабый катионообменник, который способствует передвижению небольших водорастворимых молекул, куда входят вода, газы и различные низкомолекулярные вещества. Все они испытывают слабое сопротивление со стороны структур клеточной стенки (до 10–15%).

Исследования показали, что в структуре клеточных стенок листа исследованных растений Арктики выявлено четыре типа ионообменных или функциональных групп (табл. 1), которые включают одну анионообменную аминокислоту с константой ионизации ($pK_a \sim 3-4$) и три катионообменные группы: карбоксильные группы α -D-полигалактуронозой кислоты (СООН ПГУК) ($pK_a \sim 5-6$), карбоксильные группы гидроксикоричных кислот (СООН ГКК) ($pK_a \sim 7-8$) и фенольные ОН-группы ($pK_a \sim 9-10$). Количество и состав ионообменных групп клеточных стенок листа изученных растений сходен с составом клеточной стенки листа и корня других видов древесных [8] и травянистых растений [14; 6]. Общее количество ионообменных групп в структуре клеточной стенки листа растений определяет максимальные значения сорбционной емкости клеточной стенки. Эти группы выполняют транспортную функцию и принимают участие в реакциях обмена.

Таблица 1
Содержание ионообменных групп в клеточной стенке листа растений Арктики

Тип группы	Кол-во групп, ΔS мкмоль на г сухой массы клет. стенки			
	<i>Betula nana</i>	<i>Dryas octopetala</i>	<i>Salix polaris</i>	<i>Cassiope tetragona</i>
Амино-группы	1200 ± 50	500 ± 50	450 ± 30	400 ± 20
СООН ПГУК*	1900 ± 30	1100 ± 50	450 ± 20	600 ± 40
СООН ГКК**	2500 ± 90	3000 ± 60	1700 ± 90	750 ± 30
Фенольные ОН-группы	2700 ± 80	2600 ± 60	550 ± 25	950 ± 70
Общее кол-во катионообменных групп	7100 ± 100	6700 ± 80	2700 ± 50	2300 ± 50
Общее кол-во функциональных групп	8300 ± 100	7200 ± 90	3150 ± 50	2700 ± 50

Примечание. * – карбоксильные группы α -D-полигалактуронозой кислоты; ** – карбоксильные группы гидроксикоричных кислот.

Анализ количества аминокислотных групп клеточной стенки в листьях исследуемых растений показал, что максимально высокие значения (до 1200 мкмоль/г сух. массы клет. ст.) получены для *Betula nana* – редкого вида для Западного Шпицбергена, для остальных видов этот показатель значительно ниже и для *Cassiope tetragona* – широко распространенного, особенно на кальценозных почвах вида, было показано количество групп – 400 мкмоль/г сух. массы клет. ст. Ионообменные аминокислотные группы клеточной стенки входят в состав структурных белков и ферментов, содержание которых может достигать 15% от массы клетки. Как отмечает Т. А. Горшкова, они представляют непрерывный ряд от щелочных, минимально гликозилированных белков (пролин-богатые) до кислых, высокогликозилированных протеогликанов (арабиногалактоновые белки) [3]. Основной аминокислотой в гидролизате клеточной стенки является оксипролин, содержание которого может достигать 40% [13]. Ферментная система клеточной стенки представлена гидролазами, которые гидролизуют полисахариды, приводя к изменениям физических свойств клеточной стенки и ионного обмена. В формировании поверхностных слоев эпидермиса (кутина и суберина), которые присутствуют почти на всех листьях растений Арктики, участвуют трансацилазы.

В группу катионообменников входит карбоксильная группа α -D-полигалактуронозой кислоты (СООН ПГУК), максимальные значения которой обнаружены в клеточной стенке листа у *Betula nana*, высокие значения имеют виды *Salix polaris* и *Dryas octopetala*, а низкие величины отмечены у *Cassiope tetragona*. Основным полимером пектиновых веществ является полигалактуроновая кислота, полимеры которой находятся в пиранозной форме. Пектиновые вещества – природные ионообменники, основной их функцией является регуляция действия ферментов за счет создания подвижной системы локального изменения pH и электрического заряда. Так, именно полигалактуроновая кислота отвечает за отрицательный заряд клеточной стенки [3].

Второй катионообменной группой клеточной стенки листа является карбоксильная группа гидроксикоричных кислот (СООН ГКК). Исследуемые виды по количеству СООН ГКК в клеточной стенке листа объединились в две группы: наибольшие значения обнаружены у *Betula nana*, *Dryas octopetala*, во вторую группу вошли *Salix polaris* и *Cassiope tetragona* с более низкими значениями. Гидроксикоричные кислоты являются составляющей суберина, кутина и пектиновых полисахаридов. Кроме того, такие оксикоричные кислоты, как п-кумаровая, феруловая и синаповая, относят к лабильной метаболической составляющей клеточной стенки [3]. Благодаря образованию диферулатов феруловая

кислота может выполнять в клеточных стенках структурную функцию, связывая между собой полисахариды, уменьшая растяжимость клеточных стенок [9], [10], [11]. Фенольные кислоты клеточных стенок могут в качестве восстановителей участвовать в окислительно-восстановительных процессах, способствовать утилизации активных форм кислорода. Они также могут выполнять функции регуляторов роста и играть сигнальную роль при взаимодействии растений с микроорганизмами [9], [19].

Третья катионообменная группа – фенольные ОН-группы могут входить в состав компонентов вторичной клеточной стенки – лигнина и суберина. К видам с большим количеством этих групп в клеточной стенке относятся *Betula nana*, *Dryas octopetala* (2700 и 2600 мкмоль/г сух. массы кл. ст. соответственно); почти в 2 раза меньше у *Cassiope tetragona* и еще меньше у *Salix polaris*. Лигнин как структурная стабильная компонента клеточной стенки составляет до 40% ее сухой массы. Фенольные соединения – продукты вторичного метаболизма, выполняют множество функций в растительном организме, в том числе защитную, как от биогенных, так и от абиогенных факторов.

Общее количество ионообменных групп клеточной стенки листа у видов Арктики оказалось в 2–3 раза больше, чем в клеточной стенке хвои *Pinus sylvestris* [8], листьев видов рода *Betula*, произрастающих в более южных районах Европейского Севера России (по неопубликованным данным Н. А. Галибина). Значение общего количества всех исследованных функциональных групп клеточной стенки листа показало, что оно изменяется от максимального у *Betula nana* (8300 мкмоль/г сух. массы кл. ст.) до минимального у *Cassiope tetragona* (2700 мкмоль/г сух. массы кл. ст.). Среди исследованных видов более высокие и близкие значения оказались у *Betula nana*, *Dryas octopetala*; почти в 2–2,5 раза меньше у *Salix polaris* и *Cassiope tetragona*. По данным Т. А. Горшковой [3], количество функциональных групп видоспецифично и зависит от происхождения вида, особенностей структуры клеточной стенки, физиологических особенностей, географического ареала. Есть данные, что количество ионогенных групп в структуре клеточной стенки органов может изменяться при действии тяжелых металлов [8; 12], засоления [15; 16].

Анализ процентных соотношений групп в клеточной стенке листа показал, что у всех видов наибольший процент приходится на карбоксильные группы гидроксикоричных кислот (от 28% у *Cassiope tetragona* до 54% у *Salix polaris*) и фенольные ОН-группы (от 18% у *Salix polaris* до 35% у *Dryas octopetala*), которые в основном входят в состав соединений фенольной природы. Наиболее низкие значения полу-

чены по проценту аминогрупп у *Dryas octopetala* (7%), а самые высокие – по процентному содержанию СООН ГКК (54%) в клеточной стенке *Salix polaris*.

Одним из показателей функционального состояния клеточной стенки является константа ионизации ионообменных групп, значение которой зависит от качественного состава полимеров и степени их полимеризации.

Таблица 2

Константа ионизации ионообменных групп клеточной стенки листа растений Арктики

Вид растений	Константа ионизации ионообменных групп, рКа			
	Аминогруппы	СООН ПГУК*	СООН ГКК**	Фенольные ОН-группы
<i>Betula nana</i>	4,50 ± 0,62	7,04 ± 0,22	7,95 ± 0,15	9,40 ± 0,08
<i>Dryas octopetala</i>	3,38 ± 0,58	5,87 ± 0,35	7,79 ± 0,18	9,03 ± 0,09
<i>Salix polaris</i>	4,05 ± 0,45	6,42 ± 0,41	8,07 ± 0,10	9,73 ± 0,10
<i>Cassiope tetragona</i>	3,39 ± 0,32	6,22 ± 0,12	7,62 ± 0,10	9,35 ± 0,11

Примечание. * – карбоксильные группы α -D-полигалактуроновой кислоты; ** – карбоксильные группы гидроксикоричных кислот.

Наиболее высокие значения константы ионизации (рКа) отмечены для фенольных-ОН групп и СООН ГКК, входящих в состав фенольных соединений, несколько ниже для СООН ПГУК – компонентов пектиновых веществ и еще ниже для аминогрупп, которые включаются в белки и ферменты (табл. 2). Однако различия между видами растений по диапазону варьирования рКа оказались более значимыми по СООН ГКК и фенольным ОН-группам. Это может означать, что в метаболической составляющей клеточной стенки видов, обитающих в высоких широтах, в большей степени участвуют соединения фенольной природы. Вклад более высокомолекулярных соединений, несущих аминогруппу (белки) в состав клеточной стенки, выше у *Betula nana* и *Salix polaris*.

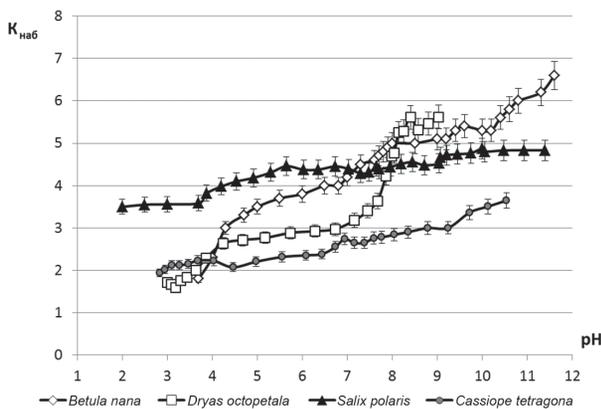
Для клеточной стенки как структурной единицы клетки характерно свойство набухания, которое определяет ее гидравлическую проводимость. Коэффициент $K_{наб}$ (г H_2O /г сухой массы клеточных стенок) является количественной характеристикой проницаемости полимерного матрикса клеточной стенки и зависит от степени сшивки полимеров (жесткости), общего числа функциональных групп, константы их ионизации и концентрации внешнего раствора [6].

Исследование показало, что самые высокие значения $K_{наб}$ в воде были получены на клеточной стенке *Salix polaris* (2,6 г H_2O /г сухой массы клеточных стенок). Более низкие у *Betula nana*

и *Dryas octopetala* (1,93 и 1,45 г H₂O/г сухой массы клеточных стенок соответственно), самые низкие (0,83 г H₂O/г сухой массы клеточных стенок) у *Cassiope tetragona*. Известно, что, чем выше степень сшивки полимерных цепей клеточной стенки, жестче и плотнее ее структура, тем меньше набухание. Этим свойствам отвечает клеточная стенка *Cassiope tetragona*, у которой высокая степень кутинизации и осмоления особенно покровных тканей, но также паренхимных клеток приводит к жесткости структуры. По представлениям Н. Р. Мейчик [6], у растений существует прямая связь между способностью к набуханию полимерного матрикса клеточной стенки и интенсивностью водного потока. Высокий коэффициент набухания у *Salix polaris* предполагает и наиболее слабую степень сшивки полимерных цепей клеточной стенки, и более интенсивный по сравнению с другими видами водный поток по системе клеточных стенок.

Из литературы известно, что процесс набухания клеточной стенки корней связан с величиной рН внешнего раствора [14], для листьев этих данных меньше.

Для растений Арктики максимальные значения коэффициента набухания клеточной стенки листа при изменении рН внешнего раствора значительно выше, чем для более южных районов. Так, в диапазоне рН от 2–3 до 9–11 $K_{\text{наб}}$ клеточной стенки изменяется у листа *Betula nana* от 1,8 до 6,5; *Salix polaris* от 3,5 до 5; *Dryas octopetala* от 1,8 до 5,5; *Cassiope tetragona* от 2 до 3,7 г H₂O/г сухой массы клеточных стенок (см. рисунок). $K_{\text{наб}}$ клеточной стенки листа ив г. Петрозаводска варьирует в более узком диапазоне: для *Salix alba* от 1,7 до 2,8 г и *Salix caprea* от 1,7 до 3,5 г H₂O/г сухой массы клеточных стенок. Сходные данные были получены из этого же района для листьев *Betula pendula*: коэффициент набухания изменялся в диапазоне от 1,5 до 3,5 г H₂O/г сухой массы клеточных стенок (устные данные Н. А. Галибиной).



Зависимость константы набухания (г H₂O/г сухой массы клет. ст.) клеточной стенки листа растений Арктики от рН раствора

Известно, что свойство набухания клеточной стенки лежит в основе механизма роста растения растяжением, который ингибируется в условиях Арктики [2]. Высокие значения $K_{\text{наб}}$, полученные в настоящей работе, могут свидетельствовать о важности этого свойства клеточной стенки как потенциальной ростовой функции растений при изменении климата. Большим потенциалом роста, согласно диапазону варьирования $K_{\text{наб}}$ клеточной стенки, обладают такие виды, как *Betula nana* и *Dryas octopetala*, размеры листа могут увеличиться в 3–4 раза. Меньший ростовой потенциал можно предположить у *Cassiope tetragona* и значительно меньший у *Salix polaris* (1,5 раза). Однако на современном этапе роста и развития исследуемых видов свойство набухания клеточных стенок важно для увеличения метаболической активности, которая тесно связана с водным режимом растения в системе апопласта.

Проведенное исследование показало, что клеточная стенка листа растений Арктики является катионообменником, который представлен сходным составом ионообменных групп с клеточными стенками других изученных растений, в частности тундровой зоны. Однако особенностью растений Арктики является увеличение (в 2–3 раза) количества ионообменных групп каждого типа в структуре клеточной стенки листа по сравнению с видами других климатических зон. Кроме того, установлена ведущая роль в метаболизме компонентов клеточной стенки соединений фенольной природы, в меньшей степени — пектиновых и белковых веществ. Это хорошо соотносится с ранее полученными данными о повышенном (почти в 5 раз) содержании суммы флавоноидов у растений Арктики [5]. Сравнительный анализ исследованных видов позволяет предположить два пути адаптации на уровне такой структуры, как клеточная стенка. Это структурная адаптация (избегание), которая отмечается у *Cassiope tetragona* и состоит в синтезе защитных веществ (кутина, суберина), предотвращающих прямое воздействие факторов среды на растительный организм, и функциональная адаптация (увеличение количества ионообменных групп), которая свойственна клеточной стенке листа *Betula nana*. Если структурная адаптация свойственна широко распространенному виду на территории Западного Шпицбергена, то метаболическая — виду, спорадически представленному на этой территории, которая является крайней точкой его ареала.

Полученные данные впервые показали, что имеются функциональные различия на уровне состава ионогенных групп клеточной стенки у видов Арктики, но все виды характеризуются показателями ее высокой функциональной активности по сравнению с растениями более низких широт. Этот результат согласуется с более ранними работами о высокой фотосинтетиче-

ской и дыхательной активности растений Арктики [17], [18].

В процессе эволюции одним из условий продвижения растений в Арктике было поддержание гомеостаза организма в экстремальных условиях среды. Гомеостаз внутренней среды достигался, в частности, и развитием покровных тканей и защитных структур, охраняющих организм от негативного воздействия факторов. Эволюция арктических растений сопровождалась развитием органов и механизмов, обеспечивающих селективную связь растений со средой, что могло идти через появление дополнительных функций у имеющихся структур.

В этот процесс могла быть включена и клеточная стенка, которая, помимо защитной функции, была включена и в метаболические процессы, что привело к повышению целостности организма [1]. Особенно актуально это оказалось для северных растений с их усилением роли апопластического потока, в котором большое значение отводится метаболическим процессам в свободном пространстве клеточной стенки [2]. Это совпадает и со стратегией приспособительной эволюции растений, которая идет по пути увеличения общей эффективности структур и минимизации негативного воздействия факторов внешней среды [1].

* Работа выполнена при финансовой поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ, Международного гранта Программы ЕИСП ПГС Карелия «Развитие лесных плантаций на отвалах карьеров, их облесение и фитоочистка в России и Финляндии».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков И. В. Введение в экологию высокогорных растений: Учеб. пособие. Томск: Изд-во ТГПУ, 2006. 416 с.
2. Гамалей Ю. В. Транспортная система сосудистых растений. Происхождение, структура, функции, развитие, анализ разнообразия типов по таксономическим и эколого-географическим группам растений, эволюция и экологическая специализация транспортной системы. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2004. 424 с.
3. Горшкова Т. А. Растительная клеточная стенка как динамическая система. М.: Наука, 2007. 429 с.
4. Королева Н. Е., Константинова Н. А., Белкина О. А., Давыдов Д. А., Лихачев А. Ю., Савченко А. Н., Урбанавиче И. Н. Флора и растительность побережья залива Грен-фьорд (архипелаг Шпицберген). Апатиты, 2008. 35 с.
5. Марковская Е. Ф., Шмакова Н. Ю. Содержание флавоноидов в листьях сосудистых растений Западного Шпицбергена // Растительные ресурсы. 2012. Вып. 4. С. 547–554.
6. Мейчик Н. Р. Ионный обмен и диффузия в клеточных стенках растений: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2007. 48 с.
7. Славинская Г. В., Хохлов В. Ю. Потенциометрическое титрование ионов: Учеб. пособие. Воронеж, 2004. 36 с.
8. Теребова Е. Н., Галибина Н. А. Структурно-функциональное состояние хвои *Pinus sylvestris* (*Pinaceae*) в условиях загрязнения диоксидом серы и тяжелыми металлами // Растительные ресурсы. 2010. Вып. 2. С. 61–73.
9. Шарова Е. И. Клеточная стенка растений. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2004. 156 с.
10. Galibina N. A., Terebova E. N. Characterization of cell wall properties in needles from scotch pine trees of various vigor // Russian Journal of Plant Physiology. 2008. Vol. 55. № 3. P. 419–425.
11. Iiyama K., Lam T., Stone B. Covalent cross-links in the cell wall // Plant physiol. 1994. Vol. 104. P. 315–320.
12. Krzeslowska M. The cell wall in plant cell response to trace metals: polysaccharide remodeling and its role in defense strategy // Acta Physiol Plant. 2011. Vol. 33. P. 35–51.
13. Lamport D. T. A. Cell wall metabolism // Plant physiol. 1970. Vol. 21. P. 235–270.
14. Meychik N. R., Yermakov I. P. Swelling of roots cell walls as an indicator of their functional state // Biochemistry (Moscow). 2001. Vol. 66. № 2. P. 178–187.
15. Meychik N. R., Nikolaeva Yu. I., Yermakov I. P. Ion-exchange properties of cell walls of *Spinacia oleracea* L. roots under different environmental salt conditions // Biochemistry (Moscow). 2006. Vol. 71. № 7. P. 781–789.
16. Meychik N. R., Yermakov I. P., Khonarmand S. D., Nikolaeva Y. I. Ion-Exchange properties of cell walls in Chickpea cultivars with different sensitivities to salinity // Russian Journal of Plant Physiology. 2010. Vol. 57. № 5. P. 620–630.
17. Muraoka H., Noda H., Uchida M. Photosynthetic characteristics and biomass distribution of the dominant vascular plant species in a high Arctic tundra ecosystem, Ny-Alesund, Svalbard: implications for their role in ecosystem carbon gain // J. Plant Res. 2008. Vol. 121. P. 137–145.
18. Semichatova O. A., Ivanova T. I., Kirpichnikova O. V. Comparative study of dark respiration in plants inhabiting arctic (Wrangel Island) and temperate climate zones // Russian Journal of Plant Physiology. 2007. Vol. 54. № 5. P. 582–588.
19. Wallace G., Fry S. C. Phenolic components of the plant cell wall // Int. Rev. Cyt. 1994. Vol. 151. P. 229–267.

Terebova E. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
 Markovskaya E. F., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
 Shmakova N. Yu., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

SOME FEATURES OF CELL WALL TRANSPORT FUNCTION IN ARCTIC PLANTS

Ion exchange of the leaves' cell walls in species *Betula nana* L., *Salix polaris* Walenb., *Dryas octopetala* L. and *Cassiope tetragona* (L.) D. Don. growing on the island of Western Spitsbergen were investigated. It was found out that the cell wall of arctic plants is a cation exchanger, which is comparable to the functional groups (amine groups, carboxyl groups and phenolic OH-groups) with the cell wall of plants from tundra zone. In all investigated species, the highest percentage in the structure of the cell wall was reported for the carboxyl groups of hydroxycinnamic acids and phenolic OH-groups, which are a part of the phenolic compound. In comparison with species from other climatic zones leaves' cell walls of arctic plants have 2-3 times higher amount of ion exchange groups of all types as well as a higher value of swelling coefficient. It was proposed that the high values of the ion-exchange capacity and swelling coefficient of the cell wall of all studied species contribute to greater water flow system by the apoplast and enhance metabolic processes in the cell wall of the plants growing in conditions of high latitudes.

Key words: plant cell wall, ion exchange capacity and swelling coefficient, arctic plants

REFERENCES

1. Volkov I. V. *Vvedenie v ekologiyu vysokogornyykh rasteniy* [Introduction of mountainous plants' ecology]. Tomsk, 2006. 416 p.
2. Gamaley U. V. *Transportnaya sistema sosudistykh rasteniy* [Transport system of vascular plants]. St. Petersburg, 2004. 424 p.
3. Gorshkova T. A. *Rastitel'naya kletchnaya stenka kak dinamicheskaya sistema* [The plant cell wall as a dynamic system]. Moscow, 2007. 429 p.
4. Koroleva N. E., Konstantinova N. A., Belkina O. A., Davydov D. A., Likhachev A. Yu., Savchenko A. N., Urbanaviche I. N. *Flora i rastitel'nost' poberezhya zaliva Gren-f'ord (arkhipelag Shpitsbergen)* [Flora and vegetation of the coast of the Gren-Fiord bay (Spitsbergen)]. Apatity, 2008. 35 p.
5. Markovskaya E. F., Shmakova N. Yu. The flavonoid content in leaves of vascular plants from the West Spitsbergen [Soderzhanie flavonoidov v list'yakh sosudistykh rasteniy Zapadnogo Shpitsbergena]. *Plant recourses*. 2012. Vol. 4. P. 547–554.
6. Meychik N. R. *Ionnyy obmen i diffuziya v kletchnykh stenkakh rasteniy*. *Avtoref. diss. dokt. biol. nauk* [Ion-exchange properties and diffusion in cell walls of plants]. Moscow, 2007. 48 p.
7. Slavinskaya G. V., Khokhlov V. Yu. *Potentsiometricheskoe titrovaniye ionitov* [Potentiometric titration of ionites]. Voronezh, 2004. 36 p.
8. Terebova E. N., Galibina N. A. Characterization of needles from Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) trees subjected to industrial pollutions with sulfur and heavy metals [Strukturno-funktsional'noe sostoyaniye khvoi *Pinus sylvestris* (*Pinaceae*) v usloviyakh zagryazneniya dioksidom sery i tyazhelymi metallami]. *Plant recourses*. 2010. Vol. 2. P. 61–73.
9. Sharova E. N. *Kletchnaya stenka rasteniy* [The plant cell wall]. St. Petersburg, 2004. 156 p.
10. Galibina N. A., Terebova E. N. Characterization of cell wall properties in needles from scotch pine trees of various vigor. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2008. Vol. 55. № 3. P. 419–425.
11. Iiyama K., Lam T., Stone B. Covalent cross-links in the cell wall // *Plant physiol*. 1994. Vol. 104. P. 315–320.
12. Krzeslowska M. The cell wall in plant cell response to trace metals: polysaccharide remodeling and its role in defense strategy // *Acta Physiol Plant*. 2011. Vol. 33. P. 35–51.
13. Lamport D. T. A. Cell wall metabolism // *Plant physiol*. 1970. Vol. 21. P. 235–270.
14. Meychik N. R., Yermakov I. P. Swelling of roots cell walls as an indicator of their functional state // *Biochemistry (Moscow)*. 2001. Vol. 66. № 2. P. 178–187.
15. Meychik N. R., Nikolaeva Yu. I., Yermakov I. P. Ion-exchange properties of cell walls of *Spinacia oleracea* L. roots under different environmental salt conditions // *Biochemistry (Moscow)*, 2006. Vol. 71. № 7. P. 781–789.
16. Meychik N. R., Yermakov I. P., Khonarmand S. D., Nikolaeva Y. I. Ion-exchange properties of cell walls in Chickpea cultivars with different sensitivities to salinity // *Russian Journal of Plant Physiology*. 2010. Vol. 57. № 5. P. 620–630.
17. Muraoka H., Noda H., Uchida M. Photosynthetic characteristics and biomass distribution of the dominant vascular plant species in a high Arctic tundra ecosystem, Ny-Alesund, Svalbard: implications for their role in ecosystem carbon gain // *J. Plant Res*. 2008. Vol. 121. P. 137–145.
18. Semichatova O. A., Ivanova T. I., Kirpichnikova O. V. Comparative study of dark respiration in plants inhabiting arctic (Wrangel Island) and temperate climate zones // *Russian Journal of Plant Physiology*. 2007. Vol. 54. № 5. P. 582–588.
19. Wallace G., Fry S. C. Phenolic components of the plant cell wall // *Int. Rev. Cyt*. 1994. Vol. 151. P. 229–267.

Поступила в редакцию 15.07.2013

ИГОРЬ НИКОЛАЕВИЧ БАХМЕТ

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологии рыб и водных беспозвоночных, Институт биологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
igor.bakhmet@gmail.com

ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АДАПТАЦИИ МИДИИ СЪЕДОБНОЙ *MYTILUS EDULIS* L. К ПОЛЛЮТАНТАМ

Проанализировано изменение частоты сердечных сокращений мидий в ответ на воздействие различных концентраций нефтепродуктов и тяжелых металлов Cd и Cu. Наблюдался резкий рост сердечной активности почти во всех экспериментальных группах моллюсков. Также были отмечены выраженные флуктуации сердечной ритмики животных при различных концентрациях поллютантов. Возросший сердечный ритм означает увеличение уровня потребления кислорода и, соответственно, рост уровня метаболизма. Данные изменения могут быть связаны с удалением загрязняющих веществ из тканей или их окисление. Общеизвестно, что адаптационный процесс имеет осцилляторный характер вследствие инерции адаптационных механизмов. По-видимому, флуктуации сердечного ритма при воздействии поллютантов указывают на активный процесс акклимации моллюсков к воздействию. Главный довод в поддержку данной гипотезы заключается в том, что сходный характер изменений сердечной активности отмечен во всех экспериментальных группах.

Ключевые слова: мидия, *Mytilus edulis*, сердечный ритм, флуктуации, нефтепродукты, тяжелые металлы

ВВЕДЕНИЕ

Физиологические методы, используемые при биомониторинге загрязнений окружающей среды, позволяют выявить не только токсическое действие загрязнителей, но и дают возможность объяснить механизмы ответной реакции организма на такие воздействия. К числу широко используемых физиологических параметров относится сердечная активность (частота сердечных сокращений, ЧСС) [5]. Показатели ЧСС позволяют достаточно точно охарактеризовать физиологический статус животного [10]. Ранее проведенные исследования показали наличие достоверной корреляции между изменениями сердечной ритмики и такими факторами, как потребление кислорода, варьирование температуры и солености [1], [6], [8]. Кроме того, установлена высокая чувствительность сердечной активности моллюсков к тяжелым металлам и аммиаку [3], [4]. В то же время отсутствуют работы по изучению реакций моллюсков на воздействие нефтепродуктов. Результаты исследований изменения ЧСС мидий при добавлении тяжелых металлов достаточно противоречивы.

Цель настоящей работы – оценка влияния различных концентраций нефтепродуктов и кадмия (тяжелый металл) на сердечную активность мидий *Mytilus edulis* L.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эксперименты были проведены на Беломорской биологической станции им. акад. О. А. Скарлато ЗИН РАН (губа Чула, Кандалакшский залив, Белое море). Сублитораль-

ные моллюски были собраны с установок для искусственного выращивания мидий. Сразу после сбора моллюски были измерены (размер раковин варьировал от 58,3 до 73,5 мм, средний размер составил 66,6 мм). Для акклимации к лабораторным условиям моллюски были помещены на 7 дней в аквариумы с морской водой с постоянной продувкой при температуре 10 °С. Ежедневно осуществлялась частичная смена воды. Кормление мидий не производилось, чтобы избежать специфического динамического действия пищи. За один день до эксперимента к раковинам моллюсков были приклеены оптические сенсоры CNY-70, после чего мидии были помещены в 11 аквариумов (по 9 экземпляров).

В качестве нефтепродуктов применялось тяжелое дизельное топливо. Легкие фракции нефти не использовались, так как они быстро испаряются и в долговременном эксперименте влияние данных компонентов было бы минимальным. Концентрации нефтепродуктов были выбраны с учетом всего спектра – от минимальной до сублетальной (см. таблицу). Были использованы следующие концентрации кадмия (концентрации даны по металлам): 10 (ПДК), 100 и 500 мкг/л.

Концентрации нефтепродуктов, используемые в эксперименте

	1	2	3	4	Контроль
Расчетные (мг/л)	700	210	70	0	0
Истинные (мг/л)	38,80	8,41	1,88	0,35	0,02

Регистрация ЧСС осуществлялась каждые 2 часа в течение первых суток перед добавлением поллютантов и в течение 6 суток после начала воздействия. Использовалась методика дистантной записи сердечной активности, основанной на излучении инфракрасного света в область расположения сердца и регистрации отраженных лучей [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ

После добавления нефтепродуктов в высоких концентрациях (38,0 и 8,0 мг/л) ЧСС мидий резко возрастала (рис. 1). Далее были отмечены циклические изменения сердечной активности с периодом в 1 и 2 суток. При этом сердечная активность не снизилась до контрольных показателей вплоть до конца эксперимента. В случае использования более низких концентраций нефтепродуктов (0,4 и 1,9 мг/л) только на четвертые сутки опыта было обнаружено достоверное понижение ЧСС мидий. К концу эксперимента сердечная активность вернулась к контрольным значениям (рис. 1). Флуктуации ЧСС, регистрируемые у мидий, находящихся в условиях влияния низкой концентрации нефтепродуктов, были сходны с изменением сердечной активности у моллюсков из аквариумов с высокими концентрациями нефтепродуктов.

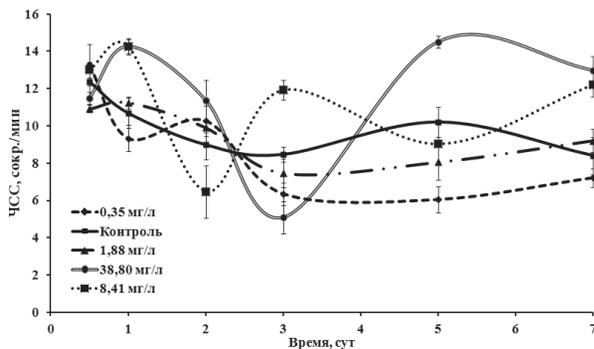


Рис. 1. Изменение ЧСС мидий при воздействии нефтепродуктов разной концентрации

В случае кадмия повышение сердечной активности сразу после воздействия составило 11, 17 и 31 % при концентрациях металла 10, 100 и 500 мкг/л соответственно (рис. 2). Таким образом, мы наблюдали зависимость выраженности реакции сердечной системы от концентрации металла. В то же время небольшое количество данных не позволяет вывести окончательное уравнение зависимости изменения ЧСС мидий от концентрации данного металла. На вторые сутки эксперимента сердечная активность животных понижалась до контрольного уровня с последующим достоверным повышением. Более того, на третьи сутки опыта наблюдался резкий, более чем в два раза, рост ЧСС (рис. 2). В дальнейшем сердечная активность вернулась к контрольному уровню во всех экспериментальных группах (рис. 2).

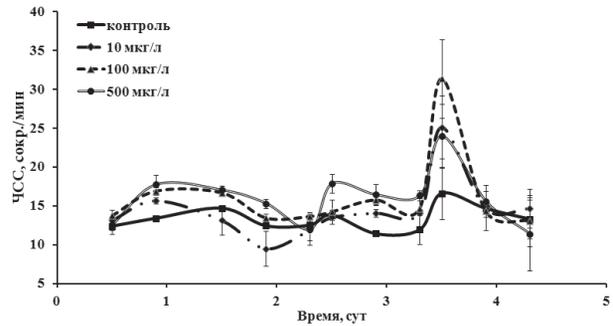


Рис. 2. Изменение ЧСС мидий при воздействии кадмием в разных концентрациях

ОБСУЖДЕНИЕ

Повышение ЧСС моллюсков в нашем эксперименте свидетельствует о возрастании уровня потребления кислорода и, соответственно, общего уровня обмена веществ. Учитывая, что мидия является активным фильтратором, возможны несколько причин данного эффекта. Первая – моллюскам необходима дополнительная энергия для выведения поллютантов из тканей. Вторая – дополнительный кислород используется при окислении загрязняющих веществ. Третья возможная причина заключается в том, что одним из важных аспектов детоксинации является синтез таких белков, как металлотioneины, белки теплового шока и глутатионы. Указанные вещества способны формировать устойчивые комплексы как с компонентами нефтяных углеводородов, так и с тяжелыми металлами [9].

Все вышеуказанные процессы, происходящие в организме мидий, связаны с адаптацией животных к воздействию загрязняющих веществ. Мы полагаем, что флуктуации сердечной активности поддерживают данную гипотезу. Ранее было доказано, что в процессе адаптации различные показатели организма животных колеблются вследствие инерции адаптационных механизмов [2]. Таким образом, флуктуирующий характер ЧСС при воздействии поллютантов свидетельствует о происходящем процессе адаптации животных к загрязняющим веществам. Сходное предположение было высказано также при оценке воздействия тяжелых металлов на мидий [7].

Еще один важный результат нашего исследования, на котором следует остановиться, это временная зависимость от воздействия поллютантов. К примеру, если бы мы регистрировали показатели сердечной активности через 24 ч после воздействия поллютантов, мы могли бы прийти к выводу об отсутствии реакции организма моллюсков. Таким образом, в экотоксикологических исследованиях следует учитывать временной фактор, и в особенности при оценке физиологических и поведенческих характеристик.

На основе полученных результатов можно сделать вывод о высокой чувствительности сердечной ритмики моллюсков к загрязняющим веществам. При этом реакция животных может заключаться не только в повышении или пони-

жении сердечной активности, но и в характере изменений ЧСС на протяжении воздействия.

Выражаем признательность сотрудникам ББС ЗИН РАН «Картеш» за неоценимую помощь при проведении экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bakhmet I. N., Berger V. Ja., Khalaman V. V. The effect of salinity change on the heart rate of *Mytilus edulis* specimens from different ecological zones // J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 2005. № 318. P. 121–126.
2. Berger V. J., Kharazova A. D. Mechanisms of salinity adaptations in marine molluscs // Hydrobiol. 1997. № 355. P. 115–126.
3. Bloxham M. J., Worsfold P. J., Depledge M. H. Integrated biological and chemical monitoring: in situ physiological responses of freshwater crayfish to fluctuations in environmental ammonia concentrations // Ecotoxicol. 1999. № 8 (3). P. 225–237.
4. Curtis T. M., Williamson R., Depledge M. H. Simultaneous, long-term monitoring of valve and cardiac activity in the blue mussel *Mytilus edulis* exposed to copper // Mar. Biol. 2000. № 136 (5). P. 0837–0846.
5. Depledge M. H., Andersen B. B. A computer-aided physiological monitoring system for continuous, long-term recording of cardiac activity in selected invertebrates // Comp. Biochem. Physiol. 1990. № 96. P. 474–477.
6. Marshall D. J., McQuaid C. D. Effects of hypoxia and hyposalinity on the heart beat of the in-tertidal limpets *Patella granularis* (Prosobranchia) and *Siphonaria capensis* (Pulmonata) // Comp. Biochem. Physiol. 1993. A. № 106. P. 65–68.
7. Nechev J., Stefanov K., Popov S. Effect of cobalt ions on lipid and sterol metabolism in the marine invertebrates *Mytilus galloprovincialis* and *Actinia equine* // Comp. Biochem. Physiol. 2006. A. № 144 (1). P. 112–118.
8. Santini G., Williams G. A., Chelazzi G. Assessment of factors affecting heart rate of the limpet *Patella vulgata* on the natural shore // Mar. Biol. 2000. № 137 (2). P. 291–296.
9. Snyder M. J., Girvetz E., Mulder E. P. Induction of marine mollusc stress proteins by chemical or physical stress // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 2001. № 41. P. 22–29.
10. Wedderburn J., McFadzen I., Sanger R. C., Beesley A., Heath C., Hornsby M., Lowe D. The field application of cellular and physiological biomarkers, in the mussel *Mytilus edulis*, in conjunction with early life stage bioassays and adult histopathology // Mar. Pollut. Bull. 2000. № 40. P. 257–267.

Bakhmet I. N., Institute of Biology, Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

CHARACTERISTIC PROPERTY OF BLUE MUSSEL *MYTILUS EDULIS* L. ADAPTATION TO POLLUTANTS

In our work, we analyzed blue mussels' heart rate in response to exposure of various oil product and such heavy metals as Cd and Cu. A sharp rise in HR was observed almost in all experimental groups. Strong fluctuations of cardiac activity were noted under all concentrations. Accelerated HR points to the increased oxygen consumption and, consequently, to the elevated rate of basic metabolism. These changes can be associated with the removal of pollutants from tissues or their oxidation. It is now common knowledge that any adaptation process has oscillatory nature due to inertia of adaptation mechanisms. It seems that in our experiment the oscillatory nature of HR, triggered by pollutants, indicates progressing acclimatization of mussels to external exposure. The main argument for this hypothesis is that the same effect was observed in all experimental groups.

Key words: blue mussel, *Mytilus edulis*, heart rate, oscillations, oil, trace metals

REFERENCES

1. Bakhmet I. N., Berger V. Ja., Khalaman V. V. The effect of salinity change on the heart rate of *Mytilus edulis* specimens from different ecological zones // J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 2005. № 318. P. 121–126.
1. Berger V. J., Kharazova A. D. Mechanisms of salinity adaptations in marine molluscs // Hydrobiol. 1997. № 355. P. 115–126.
1. Bloxham M. J., Worsfold P. J., Depledge M. H. Integrated biological and chemical monitoring: in situ physiological responses of freshwater crayfish to fluctuations in environmental ammonia concentrations // Ecotoxicol. 1999. № 8 (3). P. 225–237.
1. Curtis T. M., Williamson R., Depledge M. H. Simultaneous, long-term monitoring of valve and cardiac activity in the blue mussel *Mytilus edulis* exposed to copper // Mar. Biol. 2000. № 136 (5). P. 0837–0846.
1. Depledge M. H., Andersen B. B. A computer-aided physiological monitoring system for continuous, long-term recording of cardiac activity in selected invertebrates // Comp. Biochem. Physiol. 1990. № 96. P. 474–477.
1. Marshall D. J., McQuaid C. D. Effects of hypoxia and hyposalinity on the heart beat of the in-tertidal limpets *Patella granularis* (Prosobranchia) and *Siphonaria capensis* (Pulmonata) // Comp. Biochem. Physiol. 1993. A. № 106. P. 65–68.
1. Nechev J., Stefanov K., Popov S. Effect of cobalt ions on lipid and sterol metabolism in the marine invertebrates *Mytilus galloprovincialis* and *Actinia equine* // Comp. Biochem. Physiol. 2006. A. № 144 (1). P. 112–118.
1. Santini G., Williams G. A., Chelazzi G. Assessment of factors affecting heart rate of the limpet *Patella vulgata* on the natural shore // Mar. Biol. 2000. № 137 (2). P. 291–296.
1. Snyder M. J., Girvetz E., Mulder E. P. Induction of marine mollusc stress proteins by chemical or physical stress // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 2001. № 41. P. 22–29.
1. Wedderburn J., McFadzen I., Sanger R. C., Beesley A., Heath C., Hornsby M., Lowe D. The field application of cellular and physiological biomarkers, in the mussel *Mytilus edulis*, in conjunction with early life stage bioassays and adult histopathology // Mar. Pollut. Bull. 2000. № 40. P. 257–267.

Поступила в редакцию 09.07.2013

ЕЛЕНА НИКОЛАЕВНА ПИЛИПКО

кандидат биологических наук, доцент кафедры лесного хозяйства факультета агрономии и лесного хозяйства, Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н. В. Верещагина (Вологда, Российская Федерация)
Karlovnina@ukr.net

ВЛИЯНИЕ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ БОБРОВ (*CASTOR FIBER L.*) НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВЫ И ВОДЫ

Отмечена роль средообразующей деятельности бобра речного на биогеоценоз посредством особенности жизнедеятельности данного вида грызуна: строительство плотин и жилища. Рассмотрено влияние бобра на некоторые физико-химические показатели почв и параметры воды в Устюженском районе Вологодской области. Для достижения данной цели был изучен количественный и возрастной состав бобрового поселения, проанализировано влияние бобров на среду обитания, в частности на некоторые параметры физико-химических показателей почвы. Дана оценка влияния бобров на водную среду обитания. Были использованы стандартные методики маршрутного обследования, визуального исследования и анализ в лабораторных условиях проб почвы и воды. В результате исследований было выявлено, что деятельность бобровой семьи способствует существенному повышению органического вещества почвы и комплекса NPK. На показатели воды жизнедеятельность бобра практически не оказывает значительного влияния. Повышение органической части почвы способствует возобновлению фитоценоза на оставленной после переселения бобров территории. Таким образом, измененная бобровой семьей среда обитания имеет способность и возможность к восстановлению.

Ключевые слова: *Castor fiber* (L.), средообразующее влияние, физико-химические свойства почвы, параметры воды

ВВЕДЕНИЕ

Речной бобр (*Castor fiber* L., 1758) – представитель зооценоза, влияющий на весь пойменно-болотный комплекс своего местообитания. Появление и последующая жизнедеятельность бобров в водоеме влечет за собой существенные изменения всего прибрежного биогеоценоза. Прежде всего меняются растительность, характер берегов, рельеф, плодородие почв и даже ландшафты [1], [2], [8].

Влияние бобра на биогеоценозы сопряжено с его строительной деятельностью. Строительство плотин бобрами и образование бобровых запруд существенно меняют растительность пойм. Наиболее быстрым изменениям подвержена травянистая растительность. В результате запруживания водоема бобрами происходит подъем уровня воды, что вызывает переувлажнение прилегающих территорий. По истечении некоторого времени переувлажнение вызывает постепенную гибель фитоценоза. Подъем уровня грунтовых вод отрицательно влияет на корневую систему деревьев. Погибшие деревья падают в русло, создавая завалы. Ветровальные процессы приводят к угнетению наземного растительного покрова под упавшими стволами и к разрушению почвы в местах выворотов.

После ухода бобров на освободившейся от подтопления территории формируется совершенно новый тип фитоценоза [4].

Строительство бобрами плотин воздействует не только на сукцессионный ход прибрежной растительности, оно также меняет физико-химические показатели воды и почвы.

Жизнедеятельность бобров – мощный фактор почвообразования. В значительных масштабах наблюдается изменение почв, связанное с увеличением их гидроморфности.

Таким образом, жизнедеятельность бобров является своего рода движущей силой сукцессионных преобразований.

Целью исследований является оценка изменений физико-химических свойств почвы и воды под влиянием жизнедеятельности бобра речного. Для решения поставленной цели предусматривалось выполнение следующих **задач**: 1) изучение количественного и возрастного состава бобрового поселения; 2) анализ влияния бобров на физико-химические показатели почв; 3) оценка влияния бобров на водные показатели.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Выявление бобрового поселения и его осмотр проводились осенью путем маршрутного обследования всего ручья Безымянный. Производилось визуальное наблюдение за деятельностью бобра, определение численности и масштабов средообразующей деятельности животного. Маршрут прокладывался в соответствии с картографическими материалами и сообщениями местных охотоведов Устюженского района Во-

логодской области. Для определения количественного состава бобровой семьи использованы принципы методики, разработанной А. В. Федюшиным (1935) [9], Л. С. Лавровым (1952) [5] и дополненной Ю. В. Дьяковым (1975) [3].

Определялись границы затопленной территории, площадь кормовой базы и общая площадь поселения с помощью 50-метровой мерной ленты.

С целью выяснения особенностей изменений химических свойств почв, вызванных строительной деятельностью бобров в Устюженском районе, был произведен отбор почвенным буром (на глубину пахотного слоя 0–20 см) двух вариантов почвенных проб: первый вариант – два вида почвенных проб на территории, где была зафиксирована активная деятельность бобровой семьи, – на расстоянии не более 1 м от уреза воды (опыт), второй вариант – за пределами кормовой базы поселения, то есть на расстоянии 60 м от воды (контроль). Пробы отбирались согласно ГОСТ 28168-89 в 4-кратной повторности. Почвенные лабораторные анализы были произведены в Федеральном государственном учреждении государственного центра агрохимической службы «Вологодский» в аккредитованной испытательной лаборатории.

Содержание органического вещества определялось по И. В. Тюрину (ГОСТ 26213-91), рН солевой вытяжки – по методу ЦИНАО (ГОСТ 26483–85).

Для выявления влияния бобра на акваториальную часть среды обитания брались две разовые пробы воды 3 раза за год во все сезоны, кроме зимы, по методике ПНД Ф 12.15.1-08 [6]. Проба № 1 (контроль) отобрана выше расположения бобрового поселения, то есть там, где деятельность бобров не обнаружена, проба № 2 (опыт) – вниз по течению, недалеко от хатки. Пробы воды были переданы на микробиологический анализ (БПК₅) в филиал ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» (г. Череповец), на остальные рассматриваемые физико-химические показатели воды (NO_3^- ; NO_2^- ; NH_4^+ ; PO_4^{3-} ; Fe) – в аккредитованный испытательный лабораторный центр, в обособленное подразделение (г. Устюжна).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Нами проведены исследования влияния на местообитание одной бобровой семьи на ручье Безымянный Устюженского района. По результатам измерений резцов было определено, что в поселении обитает 4 особи – две взрослые и две молодые.

Хатка находится на расстоянии 1 м от берега, размеры 7 x 7 м, высота над уровнем воды (до вершины хатки) 3 м. Надводная часть хатки состоит из обломков ветвей, наваленных вразнобой деревьев, на хатке видны следы вылазов

бобров, примятая трава, свежий ил. Площадь затопления составляет 2,46 га (обследовано на лодке). В 15 м от хатки нами была обнаружена небольшая плотина, она перегораживала ручей Безымянный ниже по течению. Плотина состояла из ветвей, обрезков сучьев, листьев, травы, перемешанных с грязью и илом.

По мнению некоторых исследователей, сукцессионные изменения растительности, вызванные строительной деятельностью бобров, имеют следующие этапы:

- стадия действующих поселений, идет элиминация древесно-кустарниковой и формирование водно-болотной растительности;
- луговая стадия либо стадия сообществ болотного типа, образующихся на месте оставленных животными поселений;
- лесная стадия – возобновление древесно-кустарниковой растительности на месте оставленных бобрами поселений [8].

На первом этапе сукцессионных изменений, кроме появления водно-болотной растительности, представленной по большей части кубышкой желтой, таволгой, гравилатом, камышом и хвощами, происходит отмирание леса. Это постоянный процесс, поскольку различные виды растений обладают разной устойчивостью к переувлажнению.

ВЛИЯНИЕ СРЕДООБРАЗУЮЩЕЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ БОБРА НА ПОЧВУ

Почвообразовательной деятельности бобров посвящено немало работ. Это прежде всего исследования, связанные с изучением роющей деятельности зверей, которая, с одной стороны, способствует формированию микро- и нанорельефа, меняет температурный и водный режим, выполняет дренажную функцию в прибрежной зоне, влияет на направление почвообразовательных процессов [4].

Гибель хвойных пород, вызванная переувлажнением, отмечается через 2–3, а лиственных – через 3–4 года (рис. 1).



Рис. 1. Постепенное отмирание прибрежного древостоя вследствие затопления территории – местообитания бобра

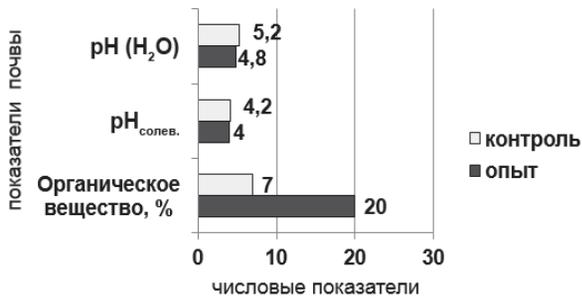


Рис. 2. Агрохимические и физико-химические показатели почвы (контроль – нет деятельности бобров, опыт – 1 м от уреза воды в месте поселения): pH_{солев.} – кислотность солевой вытяжки, ед. pH; pH_(H₂O) – кислотность водной вытяжки, ед. pH; органическое вещество – %

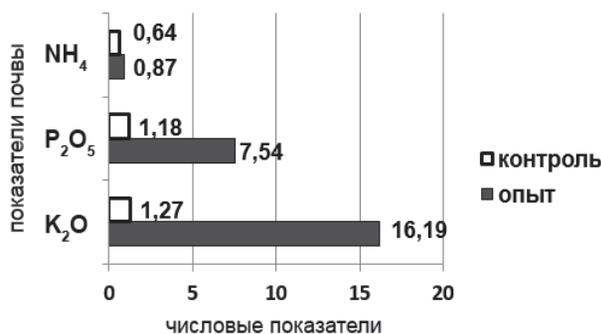


Рис. 3. Содержание минеральных элементов в почве: NH₄ – аммиачный азот, мг/100 г абсолютно сухой почвы; P₂O₅ – оксид фосфора, мг/100 г абсолютно сухой почвы; K₂O – оксид калия, мг/100 г абсолютно сухой почвы

Другая часть работ посвящена влиянию подтопления на почвы, в результате чего наблюдаются усиление процессов оглеения и торфонакопления, увеличение гумуса, изменение физико-химических свойств почвы и т. д. [8].

На основании проведенных анализов было выявлено местообитание бобров (опыт), характеризующееся более кислыми почвами, чем в местах их отсутствия (контроль) (рис. 2).

На территории, освободившейся от подтопления (опыт), происходит резкое, почти трехкратное увеличение содержания органических веществ в почве (20% к 7%) (рис. 2).

Средние данные по содержанию минеральных элементов в почве представлены на рис. 3.

Было зафиксировано (см. рис. 3) заметное увеличение содержания в почве основных элементов питания растений – фосфора на 16%, калия на 8%, что не противоречит данным некоторых исследователей Северо-Западного региона (П. И. Данилов, В. Я. Каньшиев, Ф. В. Федоров). Данные авторы отмечают повышение кислотности почвы – практически 10-кратное увеличение содержания органического вещества, а также повышение содержания нитратного азота, фосфора и калия. П. И. Данилов (1970) и Ф. В. Фе-

доров (2000) связывают факт повышения минеральных элементов с накоплением ила и других отложений в период существования бобров на данной территории.

Концентрация аммиачного азота выше в почвах на территории, где нет бобров, однако содержание в почве доступного для растений свободного азота, по всей видимости, сократилось.

ВЛИЯНИЕ БОБРА НА ВОДУ

В 2011 году были проведены исследования пробы воды, взятой выше территории проживания бобровой семьи (контроль) и ниже по течению, возле местообитания семьи (опыт). Для изучения динамики качества воды пробы отбирались 3 раза в год – весной, летом и осенью. Нами представлены результаты проб воды, отобранной осенью, то есть в период наибольшей активности животных и учетных работ. В результате было проанализировано несколько физико-химических свойств воды. Показатели физических свойств и минерализации воды представлены на рис. 4.

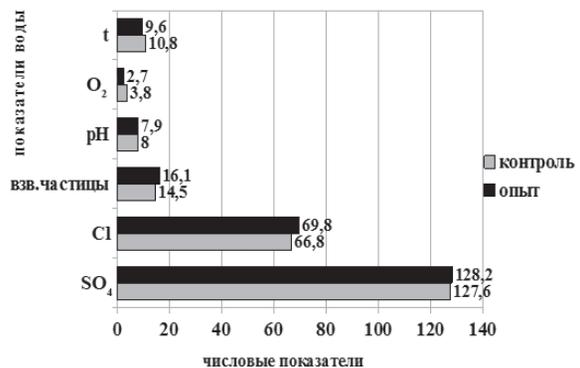


Рис. 4. Физические свойства и минерализация воды (контроль – 50 м выше по течению, опыт – 200 м ниже (после хатки)): t – температура, °С; O₂ – кислород; pH – кислотность; взвешенные вещества, мг/дм³; минерализация (Cl – хлориды, мг/дм³; SO₄ – сульфаты, мг/дм³)

В начале октября 2011 года произошли изменения качества воды, а именно: кислород в бобровом поселении снизился на 70%, что, возможно, связано с перегниванием древесных материалов, доставленных в воду бобром.

Жизнедеятельность бобров оказывает влияние и на взвешенные вещества, что, очевидно, связано с взмучиванием ила со дна в толщу воды. Увеличение содержания взвешенных частиц составило более 100%.

Показатели минерализации воды увеличились: хлориды – на 2 мг/дм³, а сульфаты – на 16,4 мг/дм³, но существенных изменений на качество воды не оказали. Мы предположили, что содержание взвешенных веществ увеличилось из-за активной подготовки бобровой семьи к зиме.

Показатели температуры и кислотности практически остались без изменений.

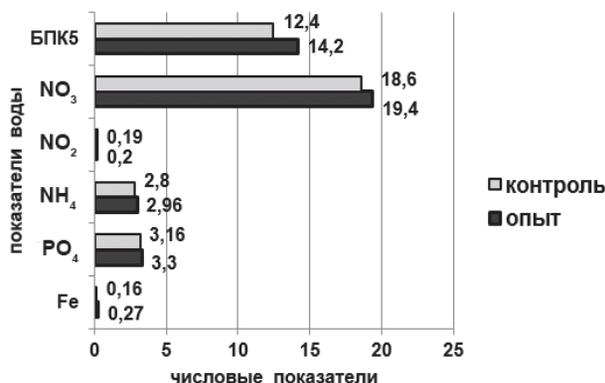


Рис. 5. Химические свойства воды (контроль – 50 м выше по течению, опыт – 200 м ниже (после хатки)):

БПК5 – количество кислорода в мг, израсходованное микроорганизмами на окисление жиров, белков, лактозы на 1 л воды, мг/дм³; NO₃ – нитраты, мг/дм³; NO₂ – оксид азота, мг/дм³; NH₄ – аммиачный азот, мг/дм³; PO₄ – оксид фосфора, мг/дм³; Fe – железо, мг/дм³

Существенная динамика выявлена в основном в химических показателях воды (рис. 5). Так, БПК5 (количество кислорода в 1 мг, израсходованное микроорганизмами на окисление жиров, белков, лактозы на 1 л воды) повышается почти на 2 мг/дм³. Это связано с появлением ряски и другой болотной растительности в застойных местах затопления. Содержание нитритов, нитратов, фосфатов, железа и аммиачного азота изменяется в сторону увеличения под влиянием бобра несущественно.

Таким образом, строительная деятельность бобра определяет различные виды разнообразия прибрежных биогеоценозов – флористическое, фаунистическое и эколого-топологическое. На месте прибрежного лесного фитоценоза формируются болотные сообщества, представляющие собой мозаичную структуру с разными типами растительности и характерами водно-минерального питания, химическими и физическими параметрами среды. Все это ведет к изменению в составе почвенной и наземной мезофауны [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бобр является видом-эдификатором, то есть видом, обладающим сильно выраженной средообразующей способностью [1], [8].

Преобразования посредством грызушей и строительной деятельности бобра претерпевают не только растительные сообщества, но и другие компоненты биогеоценоза – почва и водная среда. Было выявлено, что в результате жизнедеятельности бобров происходит обогащение почвы органическим веществом и комплексом NPK. Аналогичные результаты исследования были описаны в [1], [8]. Увеличение содержания данных почвенных показателей способствует повышению плодородия почв и созданию необходимых условий для восстановления прибрежного фитоценоза.

Изменения водной среды носят периодический характер и связаны исключительно с особенностью жизнедеятельности бобра как биологического организма. Так, например, выявлены снижение кислорода и увеличение содержания взвешенных частиц. Изменение других водных параметров незначительно и носит сезонный характер – появление водной растительности, повышение температуры при прогревании воды и т. д. Таким образом, бобры, заселяющие акваторию водоема и прибрежные территории, в течение некоторого периода (в среднем за 6 лет), благодаря грызушей деятельности и затоплению территории, активно способствуют превращению лесного биоценоза в болотный. Но после ухода со своего местообитания и снижения уровня воды физико-химические и агробиологические свойства почвы значительно улучшаются, что способствует постепенному восстановлению прибрежного фитоценоза. Сроки восстановления указать трудно, так как это зависит от многих факторов – климатических, микрорельефа и условий местопрорастания разных пород и видов древесно-кустарниковых и травянистых растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов П. И. Роль речного бобра в биоценозах // Средообразующая деятельность животных. М., 1970. С. 82–83.
2. Дежкин В. В., Дьяков Ю. В., Сафонов В. Г. Бобр. М., 1986. 255 с.
3. Дьяков Ю. В. Методы и техника количественного учета речных бобров // Тр. Воронежского гос. заповедника. Воронеж, 1975. Т. 1. Вып. XXI. С. 160–175.
4. Завьялов Н. А., Бобров А. А. Влияние жизнедеятельности бобра на организацию и динамику фитоценозов Дарвинского заповедника // Проблемы сохранения и оценки состояния природных комплексов и объектов: Материалы научно-практ. конф., посвящ. 70-летию Воронежского государственного биосферного заповедника. Воронеж, 1997. С. 159–160.
5. Лавров Л. С. Количественный учет речных бобров методом выявления мощности поселения // Методы учета численности и географического распространения наземных позвоночных. М., 1952. С. 147–155.
6. ПНД Ф 12.15.1-08. Методические указания по отбору проб для анализа сточных вод. М.: ФГУ «ФЦАО», 2008. 34 с.
7. Синицын М. Г., Русанов А. В. Воздействие речного бобра на фитоценозы и почвы долин малых рек Ветлужско-Унженского полесья // Бюл. МОИП. 1989. Вып. 5. 215 с.
8. Фёдоров Ф. В. Оценка экологических последствий жизнедеятельности бобров в прибрежных биоценозах средней тайги // Сохранение биоразнообразия и рациональное использование биологических ресурсов: Первая науч. молодежная школа и конф. Москва. 27–30 сентября 2000 г. М., 2000. С. 101.
9. Федушин А. В. Речной бобр. М., 1935. 356 с.

Pilipko E. N., Vologda State Dairy Farming Academy named after N. V. Vereshchagin (Vologda, Russian Federation)

EFFECT OF LIFE SUSTAINING ACTIVITY OF EUROPEAN BEAVERS (*CASTOR FIBER L.*) ON SOME ENVIRONMENTAL PARAMETERS

A transforming effect of European beavers' life sustaining activity (dams' building and inhabitation construction) on the biogeocenosis of the area was registered. The beavers' influence on some physicochemical soil characteristics and water parameters in Ustyug area of Vologda region was studied. To achieve this goal the following tasks were set and implemented: 1) to study quantitative and age composition of the beaver habitation; 2) to analyze the effect of the beavers' life sustaining activity on the habitat, in particular, on some parameters of physicochemical soil characteristics. The assessment of the beavers' effect on the water habitat was given. Standard methods of route investigation, visual examination, and analysis of the soil and water samples in laboratory conditions were used. In the process of the research it was revealed that life sustaining activity of the beaver family promotes considerable increase in the organic matter of the soil and in NPK-complex. Beavers' activity doesn't have any significant effect on water characteristics. The increase in the organic part of the soil assists in restoration of phytocenosis in the area left after beavers' migration. Thus, the habitat changed by the beaver family has the ability and opportunity for restoration.

Key words: *Castor fiber* (L.), environment transforming activity, physicochemical soil characteristics, water parameters

REFERENCES

1. Danilov P. I. The role of the beaver in ecosystems [Rol' rechnogo bobra v biotsenozakh]. *Sredobrazuyushchaya deyatel'nost' zhivotnykh* [Transforming activity of the animals]. Moscow, 1970. P. 82–83.
2. Dyezhdin V. V., D'yakov Yu. V., Safonov V. G. *Bobr* [Beaver]. Moscow, 1986. 225 p.
3. D'yakov Yu. V. Methods and techniques of quantity assessment of river beavers [Metody i tekhnika kolichestvennogo ucheta rechnykh bobrov]. *Trudy Voronezhskogo gos. zapovednika* [Proceedings of Voronezh State Reserve]. Voronezh, 1975. Vol. 1. Edition XXI. P. 160–175.
4. Zav'yalov N. A., Bobrov A. A. Influence of the life sustaining activity of beavers on the organization and dynamics of plants in Darwin reserve [Vliyaniye zhiznedeyatel'nosti bobra na organizatsiyu i dinamiku fitotsenozov Darvinskogo zapovednika]. *Problemy sokhraneniya i otsenki sostoyaniya prirodnnykh kompleksov i ob'ektov* [Problems the conservation and assessment of state natural complexes and objects]. Voronezh, 1997. P. 159–160.
5. Lavrov L. S. Quantitative account of river beavers by identifying power colony [Kolichestvennyy uchet rechnykh bobrov metodom vyyavleniya moshchnosti poseleniya]. *Metody ucheta chislennosti i geograficheskogo rasprostraneniya nazemnykh pozvonochnykh* [Methods of quantitative assessment and records of geographical distribution of terrestrial vertebrates]. Moscow, 1952. P. 147–155.
6. PND F 12.15.1-08. *Metodicheskie ukazaniya po otboru prob dlya analiza stochnykh vod* [Methodical instructions on the selection of samples for analysis of wastewater]. Moscow, FGU "FTSAO" Publ., 2008. 34 p.
7. Sinitsyn M. G., Rusanov A. V. The impact of beaver on the plant communities and soils of the valleys of small rivers Vetluzhsky-Unzhensky woodland [Vozdeystvie rechnogo bobra na fitotsenozy i pochvy dolin malykh rek Vetluzhsko-Unzhenskogo poles'ya]. *Byul. MOIP*. 1989. Edition 5. 215 p.
8. Fedorov F. V. Ecological assessment of the effect caused by life sustaining activities of the middle taiga beavers [Otsenka ekologicheskikh posledstviy zhiznedeyatel'nosti bobrov v pribrezhnykh biotsenozakh sredney taygi]. *Sokhraneniye bioraznoobraziya i ratsional'noe ispol'zovanie biologicheskikh resursov. Pervaya nauch. molodezhnaya shkola i konf.* Moscow. 27–30 sentyabrya 2000 g. Moscow, 2000. P. 101.
9. Feduyshin A. V. *Rechnoy bobr* [River beaver]. Moscow, 1935. 356 p.

Поступила в редакцию 18.03.2013

ИВАН ПЕТРОВИЧ ДУДАНОВ

доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой общей и факультетской хирургии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

ipdudanov@gmail.com

ВЛАДИМИР ВЕНИАМИНОВИЧ АХМЕТОВ

кандидат медицинских наук, заведующий отделением сосудистой хирургии, руководитель регионального сосудистого центра, Городская клиническая больница № 20 ДЗМ (Москва, Российская Федерация)

avv60@mail.ru

ОПТИМАЛЬНАЯ ХИРУРГИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА КАРОТИДНОЙ ЭНДАРТЕРЭКТОМИИ ПОСЛЕ ДЕЗОБЛИТЕРАЦИИ*

Представлены результаты исследований, направленных на снижение числа рестенозов при закрытии артериотомии после реконструкции ВСА. Использовали три методики выполнения обвивного шва. Первая методика: первый шов – поперечный фиксирующий шов на края стенки артерии, с последующим обвивным швом на протяжении с его завершением на другом конце. Вторая методика: швы – П-образные фиксирующие на края артериотомии, обвивной шов на протяжении навстречу друг другу с формированием узла посередине. Третья методика: первый шов – П-образный фиксирующий проксимальный и дистальный края артериотомии, далее прецизионный обвивной с подъемом вверх края сосуда. Выполнено 78 вмешательств с визуальной оценкой результата во время операции, измерениями диаметра сосуда и внутреннего просвета. Контрольные исследования – отдаленный результат с использованием ультразвукового сканирования через 3, 6, 12 месяцев. Применение обвивного шва по третьей методике является методом выбора при выполнении классической эндартерэктомии и дает лучшие отдаленные результаты.

Ключевые слова: каротидная эндартерэктомия, шов артерии, хирургическая техника, рестеноз

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Смертность от сосудистых заболеваний занимает одно из ведущих мест в Российской Федерации. Сосудистые заболевания головного мозга, а также летальность при них прочно удерживают первые строки в ежегодных отчетах [6], [7]. Причиной ишемических инсультов в 70–85% случаев является экстракраниальное атеросклеротическое поражение ветвей дуги аорты [5].

Наиболее эффективной операцией для коррекции мозгового кровотока, предотвращения развития ишемического поражения головного мозга является каротидная эндартерэктомия (КЭАЭ). Данная операция позволяет улучшить кровоток по магистральным артериям, питающим головной мозг, ликвидировать причину артерио-артериальных эмболий в мозговых артериях за счет удаления распадающейся атеросклеротической бляшки [5], [6], [7].

Непосредственные и отдаленные результаты КЭАЭ во многом зависят от техники выполнения этой операции. Важно не только то, насколько «аккуратно и качественно» будут удалены бляшка и ее элементы из сонной артерии, но и как будет завершено восстановление

целостности артерии при выполнении классической КЭАЭ.

Существует две техники выполнения КЭАЭ: классическая КЭАЭ с использованием заплаты (ангиопластики) или без нее и эверсионная КЭАЭ. Споры о превосходстве той или иной техники операции продолжаются до сих пор. Одни авторы отдают предпочтение эверсионной технике, другие – классической методике [1], [2], [4], [8], [9], [10].

Использование заплаты при закрытии артериотомического отверстия приводит к изменению «нативной геометрии» бифуркации сонной артерии, грубым деформациям этого сегмента сосуда, особенно в области дистальной части заплаты [8], [11], [12].

В последнее время многие хирурги стали чаще использовать обвивной прецизионный шов при закрытии артериотомии. Отмечен определенный ренессанс в отношении этой техники [3], [4], [12]. В доступной нам литературе мы не нашли описания подробной методики выполнения обвивного шва. В данной работе представлены результаты наших усилий по поиску оптимальной техники реконструкции ВСА при закрытии артериотомического отверстия обвивным швом.

МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЯ

Использовали три методики выполнения обвивного шва. Первая методика: первый шов – поперечный фиксирующий шов на края стенки артерии с последующим растягиванием его по длиннику за нити и обвивной шов на протяжении с его завершением на другом конце. Такая методика использована нами в 11 случаях хирургического вмешательства. На рис. 1 схематически представлена методика выполнения обвивного шва.

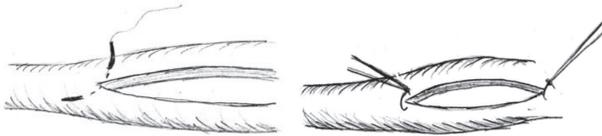


Рис. 1. Схема наложения швов на края артериотомии по первой методике

Вторая методика: первый шов – П-образный фиксирующий шов на края артериотомии, расстояние между вколами не более 1–1,5 мм, с последующим растягиванием его по длиннику за нити и обвивной шов на протяжении навстречу друг другу с формированием узла посередине. Такая методика использована в 11 случаях хирургического вмешательства. На рис. 2 схематически представлена методика выполнения обвивного шва по второй методике.



Рис. 2. Схема наложения швов на края артериотомии по второй методике

Третья методика: первый шов – П-образный фиксирующий шов на оба края артериотомии, расстояние между вколами не более 1–1,5 мм; второй – обвивной шов с обязательным подъемом вверх края стенки, вкол иглы на расстоянии не более 1,5 мм от края стенки. Такая методика использована при выполнении 29 операций.

Качество шва оценивали визуально во время операции и по данным дуплексного ультразвукового исследования после операции. Дуплексное сканирование проводили с использованием аппарата фирмы Siemens (Sonoline Omnia, Германия), используя мультислотный датчик 3,5–7 МГц. Исследование сосудов выполняли до операции, через 1, 3, 6, 12 месяцев после операции, далее каждый год. При визуальной оценке обращали внимание на изменение диаметра артерии в зоне вмешательства по краям артериотомического отверстия, изменение диаметра артерии по длиннику артериотомии до и после выполнения КЭАЭ. При дуплексном исследовании выделяли 5 областей интереса визуализации области операции (рис. 3).

По степени уменьшения диаметра артерии после закрытия артериотомии обвивным швом выделили следующие группы: I степень – без изменения диаметра артерии; II степень – уменьшение диаметра на 1 мм; III степень – уменьшение диаметра на 2 мм; IV степень – уменьшение диаметра на 3 мм и более.

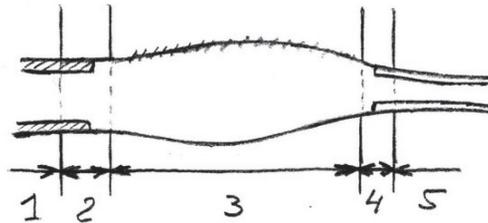


Рис. 3. Области интереса при оценке эффективности КЭАЭ: 1 – ОСА на протяжении 5 мм до проксимальной части артериотомии; 2 – область проксимальной части шва; 3 – область эндартерэктомии; 4 – область дистальной части артериотомии; 5 – ВСА на протяжении 3–5 мм за дистальной частью артериотомии

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 1, 2, 3 представлены данные визуальной оценки области артериотомии при различных методиках обвивного шва.

Таблица 1
Изменение диаметра артерии во 2, 3, 4-й областях при первой методике

Степень изменения диаметра	2-я область	3-я область	4-я область
I – нет изменений	0	0	0
II – уменьшение диаметра на 1 мм	0	3	0
III – уменьшение диаметра на 2 мм	3	8	7
IV – уменьшение диаметра на 3 мм	8	0	4
Всего	11	11	11

Таблица 2
Изменение диаметра артерии во 2, 3, 4-й областях при второй методике

Степень изменения диаметра	2-я область	3-я область	4-я область
I – нет изменений	5	2	11
II – уменьшение диаметра на 1 мм	6	8	3
III – уменьшение диаметра на 2 мм	4	6	2
IV – уменьшение диаметра на 3 мм	1	0	0
Всего	16	16	16

В дальнейшем с использованием этой методики были проанализированы результаты 76 реконструкций артерий, которые выполнялись спустя 3 года после освоения техники обвивного шва. Данные по использованию третьей методики обвивного шва представлены в табл. 4.

Таблица 3
Изменение диаметра артерии во 2, 3, 4-й областях при третьей методике

Степень изменения диаметра	2-я область	3-я область	4-я область
I – нет изменений	11	22	18
II – уменьшение диаметра на 1 мм	14	5	10
III – уменьшение диаметра на 2 мм	4	2	1
IV – уменьшение диаметра на 3 мм	0	0	0
Всего	29	29	29

Таблица 4
Изменение диаметра артерии во 2, 3, 4-й областях за 2004 год

Степень изменения диаметра	2-я область	3-я область	4-я область
I – нет изменений	57 (75 %)	70 (92 %)	57 (75 %)
II – уменьшение диаметра на 1 мм	16 (21 %)	6 (8 %)	19 (25 %)
III – уменьшение диаметра на 2 мм	3 (4 %)	0	0
IV – уменьшение диаметра на 3 мм	0	0	0
Всего	76	76	76

ОБСУЖДЕНИЕ

Уменьшение диаметра сосуда по сравнению с исходным размером принято выражать в процентах. В табл. 5 представлены результаты, свидетельствующие об уменьшении диаметра сосуда в абсолютных значениях (мм), а также степени стеноза просвета артерии.

В табл. 5 показано, какому проценту сужения артерии соответствует уменьшение диаметра ее внутреннего просвета в зависимости от диаметра артерии. Как представлено в табл. 1, 2, 3, наибольшие изменения диаметра артерии происходят при первой методике наложения артериального шва. Это вполне объяснимо: при такой технике шва полукруглая игла проходит поперек артерии. Для полноценного шва необходимо, чтобы игла проходила через все слои артерии, входила в просвет артерии и далее, также через все слои артерии, выходила наружу артерии.

Таблица 5
Соотношение степени уменьшения диаметра артерии к сужению ее просвета

Исходный диаметр артерии (мм)	Уменьшение диаметра артерии		
	на 1 мм	на 2 мм	на 3 мм
10	10 %	20 %	30 %
9	12 %	23 %	33 %
8	13 %	25 %	37 %
7	14 %	29 %	43 %
6	17 %	33 %	50 %
5	20 %	40 %	60 %

Учитывая кривизну иглы, толщину стенки артерии, расстояние между входом и выходом иглы из артерии получается достаточно большое. Завязывание фиксирующего шва при таком большом расстоянии и приводит к образованию выраженного сужения артерии в этом месте. Учитывая, что средний диаметр ОСА составляет 8 мм, сужение артерии на 1 мм приводит к формированию стеноза как минимум в 13% случаев. Сужение артерии на 3 мм приводит к образованию стеноза в 37%. А если в шов захватывается чуть больше стенки артерии, то локальный сформированный стеноз превышает 40–50%. Поскольку стеноз локальный и циркулярный, то в этой области возникает турбулентный поток с возможностью образования в последующем тромба и наложений фибрина в дистальном направлении артерии.

Применение П-образного шва по краям артериотомии при второй методике позволяет контролировать расстояние между вколами. Наиболее оптимальное расстояние между вколами – 1 мм. В зависимости от толщины стенки можно ориентировать выколы в поперечном или продольном направлении артерии. Визуальный контроль между вколами позволил избежать грубой деформации в области концевых фиксирующих швов, что отражено в табл. 1, 2, 3.

Другой проблемой, возникающей при применении первой и второй методики, оказался шов по длиннику артериотомии. При растягивании артериотомии за фиксирующие швы происходит складывание края стенки артерии с образованием своеобразной дубликатуры стенки. Схематически это представлено на рис. 4.

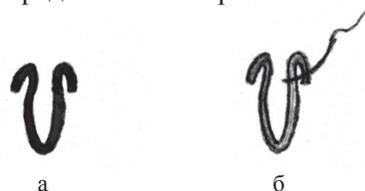


Рис. 4. Схема образования дубликатуры края стенки артериотомии при второй методике ушивания артериотомии:
а – дубликатура стенки на поперечном срезе сосуда;
б – схема наложения шва по второй методике

При этом адекватно оценить расстояние вкола иглы от края стенки достаточно затруднительно. В шов входит двойная длина стенки артерии. Происходит сужение артерии в месте наложения шва. Этот процесс нашел отражение и в результатах измерения (см. табл. 2). Грубой деформации, более 3 мм, в наших наблюдениях не отмечалось. Но сужение артерии до 2 мм в диаметре в месте наложения первого и последующих швов дистального сегмента артериотомии ВСА отмечено почти в половине случаев.

Наилучшие результаты получены при использовании третьей методики закрытия артериотомического отверстия. Применение П-образного фиксирующего шва по краям артериотомии

позволило избежать деформаций в этом месте. Контроль вкола за счет расправления и подъема края стенки обеспечил отсутствие деформаций шва. В последнее время закрытие артериотомии происходит преимущественно по третьей методике. Как видно из табл. 4, имеется минимальный процент сужений сосуда в зоне реконструкции. На рис. 5, 6, 7, 8 показаны результаты закрытия артериотомии отверстия обвивным швом по рассмотренным трем методикам.

Результаты дуплексного ультразвукового контроля, выполненного через 3 месяца после вмешательства, представлены на рис. 9, 10, 11.

Таким образом, при использовании обвивного шва для закрытия артериотомии после удаления бляшки и подшивания интимы необходимо по краям артериотомии использовать П-образный фиксирующий шов с последующим наложением обвивного шва по длиннику артериотомии. При

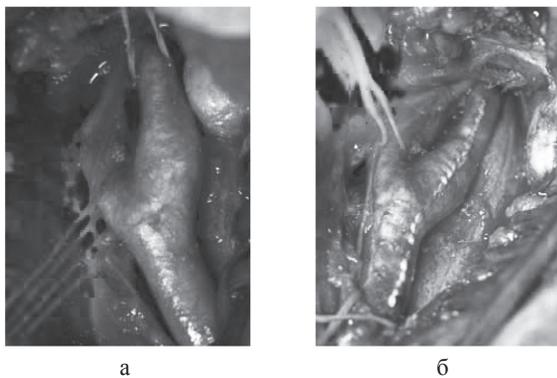


Рис. 5. Завершенный обвивной шов по третьей методике. Отсутствие деформаций в дистальной и проксимальных частях артериотомии и на протяжении обвивного шва: а – до операции; б – после операции

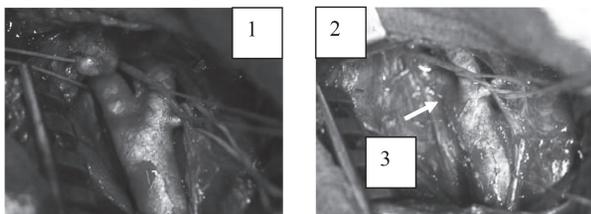


Рис. 6. Локальное сужение в области дистального отдела шва при второй методике: 1 – геометрия бифуркации до операции; 2 – геометрия бифуркации после выполнения КЭАЭ; 3 – сужение в дистальной части артериотомии

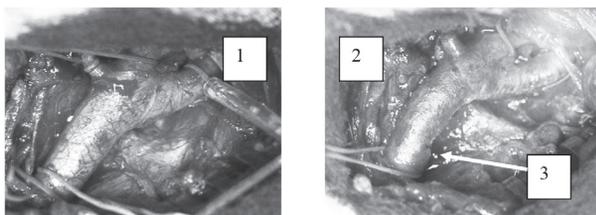


Рис. 7. Сужение в области проксимального отдела шва при второй методике: 1 – геометрия бифуркации до операции; 2 – геометрия бифуркации после выполнения КЭАЭ; 3 – сужение в проксимальной части артериотомии

наложении обвивного шва необходимо визуально с использованием бинокулярной лупы контролировать расстояние от края артерии до вкола иглы атравматической нити на всем протяжении шва.

Применение обвивного шва по третьей из описанных методик для закрытия артериотомического отверстия является методом выбора при выполнении классической КЭАЭ и дает лучшие отдаленные результаты в области реконструкции.

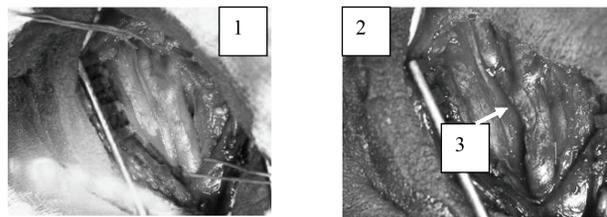


Рис. 8. Сужение на протяжении шва при второй методике: 1 – геометрия бифуркации до операции; 2 – геометрия бифуркации после выполнения КЭАЭ; 3 – сужение на протяжении артериотомии



Рис. 9. Динамическое дуплексное исследование обвивного шва по первой методике (стрелками обозначена грубая деформация в дистальном и проксимальном сегментах артериотомии)

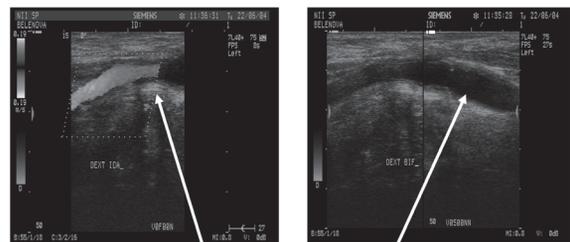


Рис. 10. Динамическое дуплексное исследование обвивного шва по второй методике (стрелками указано сужение в дистальной части артериотомии и по длиннику шва артерии)

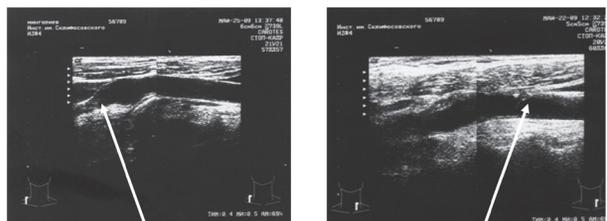


Рис. 11. Динамическое дуплексное исследование обвивного шва по третьей методике (стрелками указано место наложения первого шва в дистальном и проксимальном сегментах артерии – отсутствие изменений просвета артерии после каротидной эндартерэктомии)

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алехин Д. И. Пути улучшения непосредственных результатов реконструктивной хирургии экстракраниальных атеросклеротических поражений сонных артерий: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. Новосибирск, 2000. 28 с.
2. Верещагин Н. В., Гулевская Т. С., Моргунов В. А. Атеротромботическая ангиопатия головного мозга и тромбоз // *Атеротромбоз – проблема современности*: Сб. ст. М., 1999. С. 23–24.
3. Казанчан П. О., Попов В. А., Ларьков Р. Н., Рудакова Т. В. Отдаленные и ближайшие результаты эверсионной каротидной эндартерэктомии // *Бюллетень НЦССХ им. Бакулева РАМН*. 2002. Т. 3. № 2. С. 46–48.
4. Покровский А. В. «Классическая» каротидная эндартерэктомия // *Ангиология и сосудистая хирургия*. 2001. № 1. С. 101–104.
5. Покровский А. В. Эверсионная каротидная эндартерэктомия // *Ангиология и сосудистая хирургия*. 2001. № 2. С. 105–106.
6. Портной И. М., Зелманович Л., Шифрин Э. Особенности диагностики и хирургической тактики при стенозе сонной артерии с флотирующим компонентом // *Грудная и сердечно-сосудистая хирургия*. 1996. № 6. С. 134.
7. Скворцова В. И., Чазова И. Е., Стаховская Л. В. Вторичная профилактика инсульта. М., 2002. 225 с.
8. Archie J. P. Management of the external carotid artery during routine carotid endarterectomy // *J. Cardiovasc. Surg.* 1992. Vol. 33. № 1. P. 62–64.
9. Beneficial effect of carotid endarterectomy in symptomatic patients with high-grade carotid stenosis. North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial Collaborators // *N. Engl. J. Med.* 1991. 325. P. 445–453.
10. Khnaffal N., Khnaffal N., Karnik R., Winker W.-B., Valentin A. Embolic stroke by compression manager during transcranial doppler sonography // *Stroke*. 1994. Vol. 25. P. 1056–1057.
11. MRC European Carotid Surgery Trial: interim results for symptomatic patients with severe (70–99%) or with mild (0–29%) carotid stenosis // *Lancet*. 1991. 337. P. 1235–1243.
12. Riles T. S., Riles T. S., Lamparello P. I., Giangola C., Imparato A. M. Rupture of the vein patch: a rare complication of carotid endarterectomy // *Surgery*. 1990. Vol. 107. № 1. P. 10–12.

Dudanov I. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Akhmetov V. V., City Clinical Hospital № 20 (Moscow, Russian Federation)

OPTIMAL SURGICAL TECHNIQUE FOR CAROTID ENDARTEROCTOMY AFTER DESOBLITERATION

Here we present the results of our studies aimed at lowering the frequency of restenosis when closing an arteriotomy upon internal carotid artery (ICA) reconstruction. Three methods of performing continuous edge-to-edge suture were used. The first method consists of an initial perpendicular fixating stitch on the edges of the arterial walls, followed by a continuous suture up to the other end. The second method starts with fixating stitches at the arteriotomy edges, followed by two continuous sutures towards each other with a knot in the middle. In the third method, an initial suture is performed fixing the proximal and distal arteriotomy edges, followed by a continuous precision suture going up the edge of the blood vessel. We have performed 78 interventions with visual assessment of the result during the operation and measurements of the vessel diameter and lumen size. Remote results were assessed with ultrasound examination after 3, 6 and 12 months. Our data shows that the third variant of continuous suture is the method of choice when performing classical endarterectomy, as it leads to the best remote results.

Key words: Carotid endarterectomy, suture of an artery, surgical techniques, restenosis.

REFERENCES

1. Aleshin D. I. *Puti ulutsheniya neposredstvennykh resul'tatov rekonstruktivnoi khirurgii ekstrakranial'nykh ateroskleroticheskikh porazheniy sonnykh arteriy: Avtoferat dis. kand. med. nauk* [Ways to improve immediate results of reconstructive surgery of extrathoracic carotid atherosclerotic lesions. Autoref. diss. kand. med. nauk]. Novosibirsk, 2000. 28 p.
2. Vereshchagin N. V., Gulevskaya T. S., Morgunov V. A. Atherotrombotic angiopathy of brain and thrombosis [Aterotromboticheskaya angiopatiya golovnogo mozga i tromboz]. *Aterotromboz – problema sovremennosti*. Moscow, 1999. P. 23–24.
3. Kazanchan P. O., Popov V. A., Lar'kov R. N., Rudakova T. V. Long-term and immediate results of eversion carotid endarterectomy [Otdalennye i blizhaishie rezul'taty eversionnoy karotidnoy endarterektomii] // *Bulleten' NTSSSKH im. A. N. Bakuleva RAMN*. 2002. Vol. 3. № 2. P. 46–48.
4. Pokrovskiy A. V. "Classical" carotid endarterectomy ["Klassicheskaya" karotidnaya endarterektomiya]. *Angiologiya i sosudistaya khirurgiya*. 2001. № 1. P. 101–104.
5. Pokrovskiy A. V. Eversion carotid endarterectomy [Eversionnaya karotidnaya endarterektomiya]. *Angiologiya i sosudistaya khirurgiya*. 2001. № 2. P. 105–106.
6. Portnoy I. M., Zelmanovich L., Shifrin E. Peculiarities of diagnostics and surgical tactics in carotid artery stenosis with floating component [Osobennosti diagnostiki i khirurgicheskoy taktiki pri stenozе sonnoy arterii s flotiruyushchim komponentom]. *Grudnaya i serdechno-sosudistaya khirurgiya*. 1996. № 6. P. 134.
7. Skvortsova V. I., Chazova I. E., Stakhovskaya L. V. *Vtorichnaya profilaktika insul'ta* [Secondary prophylaxis of stroke]. Moscow, 2002. 225 p.
8. Archie J. P. Management of the external carotid artery during routine carotid endarterectomy // *J. Cardiovasc. Surg.* 1992. Vol. 33. № 1. P. 62–64.
9. Beneficial effect of carotid endarterectomy in symptomatic patients with high-grade carotid stenosis. North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial Collaborators // *N. Engl. J. Med.* 1991. 325. P. 445–453.
10. Khnaffal N., Karnik R., Winker W.-B., Valentin A. Embolic stroke by compression manager during transcranial doppler sonography // *Stroke*. 1994. Vol. 25. P. 1056–7.
11. MRC European Carotid Surgery Trial: interim results for symptomatic patients with severe (70–99%) or with mild (0–29%) carotid stenosis // *Lancet*. 1991. 337. P. 1235–1243.
12. Riles T. S., Lamparello P. I., Giangola C., Imparato A. M. Rupture of the vein patch: a rare complication of carotid endarterectomy // *Surgery*. 1990. Vol. 107. № 1. P. 10–12.

Поступила в редакцию 26.11.2013

ЕЛЕНА ГЕННАДЬЕВНА АНТОНЕН

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

МАРК МИХАЙЛОВЧ БУРКИН

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

ИГОРЬ ВИКТОРОВИЧ ХЯНИКЯЙНЕН

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

МИХАИЛ НИКОЛАЕВИЧ КОРОБКОВ

кандидат медицинских наук, доцент кафедры неврологии и психиатрии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
korobkov@karelia.ru

ПСИХОПАТОЛОГИЯ СОСУДИСТЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА (ОБЗОР)*

На основе анализа отечественных и зарубежных источников за последнее десятилетие и интерпретации результатов собственных исследований представлены современные воззрения на психические нарушения сосудистого генеза, усовершенствована их систематизация; подробно изучены психопатологические проявления при различных формах сосудистых заболеваний головного мозга, рассмотрены актуальные вопросы лечения, профилактики и организации помощи больным. С позиций биопсихосоциального подхода к пониманию сущности мультифакториальных заболеваний (в частности, цереброваскулярных расстройств) анализ сосудистых психических нарушений представляет клинический интерес для широкого круга специалистов (врачей общей практики, неврологов, психиатров, медицинских психологов).

Ключевые слова: психические нарушения, сосудистые заболевания головного мозга, экзогенно-органические и эндоформные психические расстройства

ВВЕДЕНИЕ

Психические расстройства при сосудистых заболеваниях головного мозга (СЗГМ) – группа патологических состояний, развивающихся вследствие нарушений мозгового кровообращения различной этиологии и патогенеза. Сегодня существенно расширилась диагностическая база СЗГМ за счет внедрения в практику методов прижизненной нейровизуализации СЗГМ (компьютерная, магнитно-резонансная томография головного мозга) с учетом стадийности их развития [15; 78], что позволяет качественно и количественно оценивать не только клиническую картину СЗГМ [11], но и структурные (генетико-патоморфологические) [12], гемодинамические (ультразвуковые) [21; 33] и метаболические (биохимические) [16; 7] нарушения в головном мозге. Это привело, с одной стороны, к выработке более строгих и четких критериев диагностики сосудистого мозгового процесса [11], а с другой – к значительному пересмотру подходов, принципов типологии и классифи-

кации психических нарушений при СЗГМ [13; 213]. Удельная частота психических нарушений при СЗГМ составляет, по данным различных авторов, от 22,9 [13; 214] до 74,3% [18; 20], преимущественно за счет тревожно-депрессивных расстройств вследствие выраженной алекситимии и повышенной напряженности психологических защит. В свою очередь, психическая патология и тревожные расстройства являются факторами риска сердечно-сосудистых заболеваний в целом [24]. Указанные обстоятельства определяют актуальность изучения психических нарушений сосудистого генеза, тем более что на современном этапе имеют место увеличение стрессогенной нагрузки неблагоприятных социально-экономических условий и ломка мировоззренческих стереотипов [7; 15], особенно в популяции лиц пожилого и старческого возраста.

Причинно-следственные связи между СЗГМ и нарушениями в психической сфере представляются сложными и неоднозначными. Даже при наличии явных симптомов сосудистого пораже-

ния головного мозга далеко не всегда имеются психические расстройства [13; 213]. Кроме того, корреляция психических нарушений с сосудистой патологией может иметь разную степень очевидности: от бесспорной (экзогенно-органические психические расстройства) до сомнительной (эндоформные психические нарушения) [13; 213]. Эти факты объясняются главным образом характером сосудистого поражения мозга (его локализацией, остротой, выраженностью) [11] и возможностью наличия у пациентов так называемых факторов сосудистого риска (артериальная гипертензия, атеросклероз) [19; 44], дегенеративных заболеваний мозга (болезнь Паркинсона, болезнь Альцгеймера и др.) [2], их сочетания [7; 20]. Важна роль и конституционально-генетических особенностей больного [10].

КЛАССИФИКАЦИЯ

Различают 3 группы психических нарушений сосудистого генеза: экзогенно-органические психические расстройства (преходящие и стойкие), сосудистая деменция и эндоформные психические расстройства [26]. Целесообразно выделять психические нарушения при синдроме сосудистого паркинсонизма [5; 59] (смешанная корково-подкорковая сосудистая деменция) [20].

ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Заболеваемость СЗГМ составляет 13,9 случая на 1000 взрослого населения с тенденцией к росту [23; 33]. Острые и хронические нарушения мозгового кровообращения могут сопровождаться появлением различных по глубине и характеру психических отклонений [13; 213], однако в 80% случаев проявляются психическими расстройствами непсихотического характера [1], [4], [26]. В структуре общей органической патологии психические нарушения сосудистого генеза встречаются у 10,4% мужчин и 37,6% женщин [19; 44]. Психические расстройства на фоне СЗГМ могут развиваться в любом возрасте, однако их частота значительно возрастает в пожилом и старческом возрасте, составляя 28,1% всех случаев психической патологии у лиц старше 60 лет и около 40% – у лиц старше 74 лет (в амбулаторной практике) [17; 46].

КЛИНИЧЕСКАЯ КАРТИНА

Клинически экзогенно-органические психические расстройства протекают полиморфно.

Так, патогномоничными критериями *сосудистой спутанности сознания* являются: тревога и двигательное беспокойство, преимущественно в ночное время; кратковременность, повторяемость, рудиментарность, атипичность – в течении [10], наблюдается в 33–50% случаев ишемического и в 53–88% случаев геморрагического

инсульта, а также в 29% случаев транзиторных ишемических атак [26]. При состоянии спутанности, наряду с обнубиляцией, отмечаются: выраженная истощаемость и неустойчивость внимания, фрагментарность мышления, дезориентировка во времени и месте, порой с ложной ориентировкой, ослабление памяти [10]. Часто наблюдаются делириозные и онирические элементы [26]. Спутанность может протекать как на вяло апатическом или благодушно-эйфорическом эмоциональном фоне, так и сопровождаться страхом, тревогой с выраженным двигательным беспокойством. Состояние спутанности сознания может быть (особенно в старости) основным клиническим проявлением острого нарушения мозгового кровообращения (ОНМК), чаще малого инсульта или лакунарного инфаркта при рудиментарной неврологической симптоматике, и является неблагоприятным прогностическим признаком, свидетельствующим о большой вероятности развития в последующем деменции или летального исхода при клинически значимом инсульте [10]. В генезе острой спутанности, возникающей при ОНМК, имеют значение угнетение функции холинергической системы, а также повышение уровня кортизола, связанные с ишемией мозга [30]. В редких случаях при ОНМК могут наблюдаться такие состояния, как синдром «запертого человека» [26], бодрствующая кома (апаллический синдром Е. Кречмера) [10], а также синдром Корсакова [26].

К стойким психическим состояниям при хронических формах СЗГМ относят астенические состояния и психоорганические расстройства. *Астения* – полиморфное психопатологическое состояние, характеризующееся слабостью, повышенной утомляемостью, усталостью, эмоциональной лабильностью, снижением аппетита, памяти, внимания, физической выносливости, а также нарушениями сна и сексуальной функции [10]. В патогенезе астенических расстройств ведущую роль играют изменение активности ретикулярной формации (чаще снижение активирующих влияний) и дисфункция лимбико-ретикулярного комплекса [6]. Выделяют гиперстеническую и гипостеническую формы астении [10]. При гиперстенической форме астении (более легкой) в клинической картине заболевания преобладают симптомы раздражения (вспыльчивость, взрывчатость, нетерпеливость, чувство внутреннего напряжения, неспособность сдерживаться). При гипостенической форме астении (более тяжелой) среди астенических симптомов доминируют утомляемость и чувство бессилия – астеноадинамическое состояние [26]. Астенические состояния развиваются либо на начальных этапах СЗГМ [1], либо после перенесенного ОНМК [22; 67]. Астения проявляется полиморфной психической, соматической и вегетативной дисфункцией и как состо-

яние психосоматической дезадаптации снижает устойчивость организма к патологическим экзогенным факторам, лежит в основе формирования различных заболеваний (например, СЗГМ), а в дальнейшем входит в структуру сложных синдромов в качестве «сквозной» симптоматики, ухудшающей качество жизни пациентов и прогноз течения болезни [10].

На долю *психоорганического синдрома* (ПОС; не достигающего степени деменции) сосудистого генеза приходится 25 % случаев психической патологии у лиц старше 60 лет в амбулаторно-поликлинической практике [10]. Установлено многообразие механизмов возникновения [17; 46], клинических проявлений [10], динамики течения и, как следствие, расходящихся представлений о типологии и систематизации ПОС [19; 44]. ПОС характеризуется триадой признаков (Вальтер-Бюэля): ослаблением памяти (преимущественно по типу гипомнезии, возможны конфабуляции и амнезии), снижением понимания, недержанием аффекта [26]. Наблюдается также снижение объема и концентрации внимания; страдает качество восприятия, ухудшается ориентировка в собственной личности и в пространстве; обеднены понятия и представления, нарушена оценка ситуации, своих возможностей при замедлении темпа мыслительных процессов, имеется склонность к персеверациям, застревание на деталях (торпидное мышление), нередки явления астении [10]. Выделяют астенический, эксплозивный, эйфорический, апатический варианты ПОС, которые часто являются стадиями развития синдрома, отражая различные глубину и объем поражения психической деятельности [10].

Диагноз не резко выраженных органических изменений психики сосудистого генеза ставится при наличии жалоб (общемозговой синдром), клинических (неврологических) признаков хронического нарушения мозгового кровообращения (хроническая ишемия мозга (ХИМ), рассеянная очаговая неврологическая симптоматика, нарушение высших мозговых функций), указаний в анамнезе на ОНМК (церебральный гипертонический криз, транзиторная ишемическая атака, инсульт) и на основании данных компьютерной и/или магнитно-резонансной томографии головного мозга: очаги лейкоареоза (шириной до 10 мм (I ст.), 10–20 мм (II ст.), более 20 мм (III ст. хронической ишемии мозга); количество лакун (1–2; 3–5; более 5 – соответственно стадиям ХИМ) с прогрессирующим нарастанием атрофии головного мозга ($\leq 1/8 \geq 1/4$ объема полушарий), свидетельствующих о сосудистом поражении мозга [16; 4], с учетом возрастных норм [15; 79]. Наличие в анамнезе гипертонической болезни, заболеваний сердца, сахарного диабета нередко сопровождается подпороговыми (диагностика экспериментально-психологическими

методами) признаками мнестико-когнитивной недостаточности, которые могут частично редуцироваться при их коррекции [2].

Сосудистая деменция – стойкий синдром дефицита когнитивных функций, приводящий к социальной и бытовой дезадаптации, вызванный деструктивным поражением головного мозга в результате нарушения его кровоснабжения [2]. Во всех западноевропейских странах, за исключением скандинавских, сосудистая деменция по распространенности занимает второе место после болезни Альцгеймера, на ее долю приходится 10–25 % всех деменций [14], частота ее резко возрастает в возрасте 60–70 лет, преобладая у мужчин [20]. В России распространенность сосудистого слабоумия выше, чем болезни Альцгеймера, однако частота среди лиц старше 60 лет составляет всего около 5,4 % [7; 15]. Сосудистая деменция определяется наличием диагностических критериев [20]: 1) нарушение памяти (ослабление способности запоминать новую информацию или вспоминать ранее усвоенную); 2) одно или более из следующих когнитивных расстройств: афазия, апраксия, агнозия; 3) нарушение исполнительных функций (планирование, организация деятельности, последовательные действия, абстрагирование). Для пациентов с сосудистой деменцией характерна неравномерная выраженность нарушений отдельных когнитивных функций. Когнитивный дефицит приводит к значительным нарушениям социального или трудового функционирования, проявляясь существенным снижением уровня функционирования. У пациентов с сосудистой деменцией выявляется синдром очаговой неврологической симптоматики (псевдобульбарные расстройства, атаксия, спастические гемипарезы), изменения, характерные для СЗГМ, в показателях лабораторных и инструментальных методов исследования [20]. Выделяют несколько видов сосудистой деменции: лакунарную (подкорковую), мультиинфарктную с острым началом (вследствие стратегически локализованного инфаркта мозга) и энцефалопатию Бинсвангера [2], [20].

Высокая частота психических нарушений регистрируется при *сосудистом паркинсонизме* (СП), частота которого составляет 9,3 % случаев от общего числа больных паркинсонизмом, возрастая у лиц пожилого возраста (54,2 %) [5; 56]. Среди популяции лиц, имеющих СЗГМ (мультиинфарктное поражение мозга (75 %), единственный инфаркт в проекции базальных ганглиев (17 %), геморрагический инсульт по типу паренхиматозного кровоизлияния (8 %)), сосудистый паркинсонизм встречается в 2,5 % случаев [14]. Течение СП имеет преимущественно подострый характер (80,3 %), в неврологическом статусе преобладает акинетико-ригидный синдром

(92,9%) в сочетании с признаками поражения других отделов нервной системы (пирамидной, мозжечка, коры головного мозга и др.). Основные нарушения высших психических функций выявляются в блоках экспрессивной речи, понимания речи, зрительного гнозиса, праксиса (динамического), счета, схемы тела; отмечено значительное снижение памяти и внимания. Психопатологический статус больных СП характеризуется тоскливой, адинамической и тревожной депрессией (64,5%), высоким уровнем личностной тревожности (53,8%), наличием легких и умеренных когнитивных расстройств (43%) [5; 59].

Среди эндоформных психических расстройств выделяют сосудистые психозы и сосудистые депрессии [26]. *Острые и подострые сосудистые (постинсультные) бредовые психозы* (ОСБП) развиваются непосредственно после инсульта и продолжаются от нескольких часов до нескольких дней, имеют сходство с острыми параноидами [10]. Клиническое состояние при ОСБП лабильно, характеризуется выраженным аффектом страха, иллюзорно-бредовым восприятием окружающей обстановки как несущей угрозу больному, отмечаются элементы спутанности, усиливается или провоцируется попаданием больного в незнакомую обстановку.

Сосудистая депрессия – подтип депрессивного нарушения, для которого характерно: дебют в позднем возрасте (чаще после 65 лет на фоне симптомокомплекса, характерного для СЗГМ), психомоторная заторможенность, апатия, депрессивное мышление с чувством вины и идеями самоуничтожения, плохая исполнительная активность, когнитивная дисфункция из-за снижения скорости мыслительных процессов [22; 67]. По степени тяжести проявлений выделяют большую (9%), малую (82%), субсиндромальную (9%) постинсультную депрессию (ПД) [9; 30]. Предиктором развития ПД являются тяжелый неврологический дефицит и психические нарушения в анамнезе. После однократно перенесенного ОНМК в течение года ПД развивается у 34% пациентов (в первые сутки (50%), в острый (12%), ранний восстановительный (29%) и поздний восстановительный (9%) периоды ОНМК). Выделяют 3 клинические разновидности ПД: тревожную, апатическую, тоскливую [24]. Длительность ПД зависит от размера очага поражения головного мозга. Наличие ПД в 2 раза увеличивает смертность пациентов в постинсультном периоде [22; 67]. Причиной развития сосудистой депрессии при ХИМ является микровазкулярное поражение субкортикального слоя префронтальной коры головного мозга [28; 16], что проявляется гиперинтенсивностью белого вещества глубинных отделов полушарий и субкортикального серого

вещества в Т2-режиме при магнитно-резонансной томографии [29; 84], приводя к дисфункции корково-субкортикальных невральных кругов, регулирующих настроение. Наличие депрессии у пожилых больных с ХИМ ассоциируется с увеличением риска развития в последующем сосудистой деменции [27; 246].

Психопатологические проявления видоизменяются в зависимости от предиктора СЗГМ (соматоформная вегетативная дисфункция [6]; артериальная гипертензия [24]; церебральный атеросклероз [15]; атеросклеротический каротидный стеноз [2]; патологические извитости магистральных артерий головы [3]; экстравазальные компрессии артерий при остеохондрозе шейного отдела позвоночника и краниовертебральных аномалиях [1]).

Синдромологические формы СЗГМ имеют определенные особенности *патопсихологических проявлений*. При инсультах локализация очага поражения в мозге определяет степень угнетения сознания и многообразие психических нарушений больных [11]. Больные с ОНМК плохо контролируют свои эмоции (патологическая плаксивость, эмоциональная лабильность или недержание, патологическая смешливость и псевдобульбарный аффект). Для начальных проявлений недостаточности мозгового кровообращения (инициальной стадии ХИМ) характерен лабильный церебрастенический синдром (общемозговые жалобы; в неврологическом статусе – признаки лабильности вегетативной нервной системы; легкие нейропсихологические и эмоциональные нарушения непсихотического уровня [1]). У больных с дисциркуляторной энцефалопатией (ДЭ; клинически очерченная стадия ХИМ) первичны астенические явления в структуре психоорганического синдрома [10]. ДЭ ассоциируется в МКБ-10 с понятием «сосудистая деменция» [20]. Выделяют три степени тяжести ДЭ: 1-я степень – наличие очаговой рассеянной неврологической симптоматики, которая сочетается с легкими когнитивными нарушениями нейродинамического характера; 2-я степень – наличие выраженного неврологического синдрома, который сочетается с клинически явными когнитивными нарушениями, обычно умеренной степени; 3-я степень – сочетание нескольких неврологических и нейропсихологических синдромов, свидетельствующих о многоочаговом поражении головного мозга, когнитивные нарушения достигают степени деменции [16; 7]. По мере прогрессирования ДЭ количество жалоб пациентов значительно уменьшается, что обусловлено снижением критики больных к своему состоянию (жалуются в основном на неустойчивость при ходьбе, шум и тяжесть в голове, нарушение сна). Возрастает выраженность социальной дезадаптации.

РЕАБИЛИТАЦИЯ

Одно из ведущих мест в терапии и профилактике психических расстройств при СЗГМ занимает лечение причины заболевания и вызванных им гемодинамических нарушений. На кафедре неврологии и психиатрии медицинского факультета ПетрГУ разработаны алгоритмы диспансерного наблюдения и комплексной реабилитации пациентов с СЗГМ с учетом этиопатогенетической мишени [1], пациентов с сосудистой деменцией [2]. Они включают назначение широкого спектра патогенетических средств (нейротрансмиттеры, нейрометаболиты, препараты нейротрофического и нейропротекторного действия, антигипоксанты, вазоактивные, сосудорасширяющие, ноотропы) для улучшения церебральной гемоперфузии, препараты, необходимые для купирования сосудистых психических и когнитивных нарушений (нейротрансмиттеры, антипсихотики, антидепрессанты, транквилизаторы). В клинической практике при СЗГМ используются методы психотерапевтической коррекции негативных эмоциональных переживаний: БОС-терапия, когнитивная терапия Бека, клинический гипноз [8]. Большая часть психических нарушений при СЗГМ (астенические состояния, неглубокие деменции, субдепрессии) лечатся амбулаторно (психиатрами, неврологами). Стационарному лечению подлежат больные со спутанностью, бредовыми психозами (психосоматические и геронтопсихиатрические отделения

больниц). Вопросы трудовой и судебной экспертизы решаются индивидуально [7; 20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возрастание интереса к проблеме взаимосвязи психопатологических расстройств и сосудистых заболеваний головного мозга связано с их широкой распространенностью, социальной значимостью, неблагоприятным влиянием на трудоспособность и высокой степенью коморбидности. Независимо от того, страдал больной психопатологическими расстройствами до развития СЗГМ или они развились вторично как реакция личности на соматическое заболевание, психические нарушения значительно отягощают течение заболевания.

В настоящее время улучшились возможности диагностики СЗГМ благодаря современным методам нейровизуализации. Это позволяет по-новому взглянуть на важную проблему когнитивных и эмоциональных нарушений при СЗГМ в плане коррекции психических нарушений в комплексных программах медико-психологической реабилитации и лечения. Активная пропаганда знаний о причинах развития СЗГМ (школы, публичные лекции, выступления в средствах массовой информации и др.) [1], плановое диспансерное наблюдение и своевременно проводимое профилактическое лечение достоверно улучшают состояние пациентов и предотвращают прогрессирование заболевания.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонен Е. Г., Хяникяйнен И. В. Актуальные вопросы диагностики и лечения начальных проявлений недостаточности мозгового кровообращения. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2011. 172 с.
2. Буркин М. М., Теревников В. А. Деменции позднего возраста. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2004. 144 с.
3. Буркин М. М., Кузьмина А. П. Клинико-психологическая характеристика пациентов с патологической извитостью внутренних сонных артерий // Материалы конференции по вопросам клинической общей, детской и судебной психиатрии «Медико-социальные приоритеты сохранения психического здоровья населения России». Петрозаводск, 02–05.06.2009. Петрозаводск, 2009. С. 33.
4. Буркин М. М., Хяникяйнен И. В. Психические нарушения при сосудистых заболеваниях головного мозга. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2012. 208 с.
5. Буркин М. М., Антонен Е. Г., Мейгал А. Ю., Вассель И. А. Структура, психопатологические и нейропсихологические характеристики сосудистого паркинсонизма в Республике Карелия // Экология человека. 2009. № 1. С. 56–59.
6. Вегетативные расстройства: Клиника, лечение, диагностика / Под ред. А. М. Вейна. М.: Медицинское информационное агентство, 2003. 752 с.
7. Гаврилова С. И., Калын Я. Б. Социально-средовые факторы и состояние психического здоровья пожилого населения (клинико-эпидемиологическое исследование) // Вестник РАМН. 2002. № 9. С. 15–20.
8. Голубев М. В. Когнитивно-поведенческая психотерапия при ранней стадии хронических сосудистых заболеваний головного мозга: Автореф. дис. ... д-ра мед. наук. М., 2009. 40 с.
9. Дубенко А. Е., Коростий В. И., Якушенко И. А. Когнитивные нарушения и депрессия больных пожилого возраста – дифференциальная диагностика и коморбидность // Здоровье Украины. 2008. № 7. С. 30–33.
10. Жмуров В. А. Психопатология. М.: Медицинская книга, 2002. 668 с.
11. Инсульг. Принципы диагностики, лечения и профилактики / Под ред. Н. В. Верещагина. М.: Интермедика, 2002. 208 с.
12. Кадыков А. С., Манвелов Л. С., Шахпоронова Н. В. Хронические сосудистые заболевания головного мозга (дисциркуляторная энцефалопатия). М.: ГЭОТАР-Медиа, 2006. 224 с.
13. Казакова С. Е., Бондарь Р. Б. Современные воззрения на психические расстройства сосудистого генеза (обзор) // Украинский медицинский альманах. 2008. Т. 11. № 5. С. 213–218.
14. Лаукс Г., Меллер Х.-Ю. Психиатрия и психотерапия: Пер. с нем. М.: Медпресс-информ, 2010. 512 с.
15. Левин О. С. Дисциркуляторная энцефалопатия: современные представления о механизмах развития и лечении // Consilium medicum. 2006. № 8. С. 72–79.

16. Маркин С. П. Современный подход к диагностике и лечению хронической ишемии мозга // Русский медицинский журнал. 2010. № 6. С. 1–7.
17. Михайлова Н. М., Соколова О. Н., Гаврилова С. И. Лечение пронораном психоорганического синдрома в позднем возрасте // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. 2004. № 10. С. 46–50.
18. Петрова Н. Н., Леонидова Л. А., Баранцевич Е. Р., Поляков И. А. Психические расстройства у неврологических больных // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. 2006. № 7. С. 20–23.
19. Пивень Б. Н., Шереметьева И. И. Экзогенно-органические психические расстройства у мужчин и женщин: сравнительный аспект // Российский психиатрический журнал. 2007. № 3. С. 44–47.
20. Попов Ю. В., Вид В. Д. Современная клиническая психиатрия. СПб.: Речь, 2002. 402 с.
21. Путилина М. В. Хроническая ишемия мозга // Лечащий врач. 2005. № 6. С. 28–33.
22. Савина М. А. Постинсультная депрессия // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. 2005. № 7. С. 67–76.
23. Скворцова В. И., Стаховская Л. В., Пряникова Н. А., Мешкова К. С., Шеховцова К. В. Первичная и вторичная профилактика инсульта // Фарматека. 2007. № 7. С. 33–36.
24. Смулевич А. Б., Сыркин А. Л. Психокордиология. М.: Медицинское информационное агентство, 2005. 784 с.
25. Суслина З. А., Варакин Ю. А., Верещагин Н. В. Сосудистые заболевания головного мозга. Эпидемиология. Основы профилактики. М.: Медпресс-информ, 2006. 254 с.
26. Цыганков Б. Д., Овсянников С. А. Психиатрия. М.: ГЕОТАР-Медиа, 2009. 384 с.
27. Bowirrat A., Oscar-Berman M., Logrosino G. Association of depression with Alzheimer's disease and vascular dementia in an elderly Arab population of Wadi-Ara, Israel // Int. J. Geriatr. Psychiatry. 2006. Vol. 21. № 3. P. 246–251.
28. Camus V., Kraehenbuhl H., Preisig M., Bula C. J., Waeber G. Geriatric depression and vascular diseases: what are the links // J. Affect. Disord. 2004. Vol. 81. № 1. P. 1–16.
29. Holley C., Murrell S. A., Mast B. T. Psychosocial and vascular risk factors for depression in the elderly // Am. J. Geriatr. Psychiatry. 2006. Vol. 14. № 1. P. 84–90.
30. Sapolsky R. M. Glucocorticoids and hippocampal atrophy in neuropsychiatric disorders // Arch. Gen. Psychiatry. 2000. Vol. 57. P. 925–935.

Antonен E. G., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Burkin M. M., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Hyanikyaynen I. V., Health Department of the Federal Security Service Directorate in Karelia (Petrozavodsk, Russian Federation)

Korobkov M. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

PSYCHOPATHOLOGY OF VASCULAR BRAIN DISEASES (review)

Based on the analysis of national and foreign research literature issued in the last decade and interpretation of the obtained research results contemporary understanding of mental disorders of vascular genesis is presented; their systematization is improved; psychopathological manifestations in various forms of vascular diseases of the brain are studied; pressing issues of treatment, prevention, organization, and provision of care to these patients are considered. From the standpoint of the biopsychosocial approach to the understanding of multifactorial diseases (in particular cerebrovascular disorders), analysis of vascular mental disorders presents a particular clinical interest for a wide range of professionals (general practitioners, neurologists, psychiatrists, psychologists, clinical psychologists).

Key words: mental disorders, vascular diseases of the brain, exogenous organic and endofornnye mental disorder

REFERENCES

1. Antonen E. G., Hyankyaynen I. V. *Aktual'nye voprosy diagnostiki i lecheniya nachal'nykh proyavleniy nedostatochnosti mozgovogo krovoobrashcheniya* [Current issues in the diagnosis and treatment of early manifestations of cerebrovascular insufficiency]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2011. 172 p.
2. Burkin M. M., Terevnikov V. A. *Dementsii pozdnego vozrasta* [Dementia in old age]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2004. 144 p.
3. Burkin M. M., Kuz'mina A. P. Clinical and psychological characteristics of patients with pathological tortuosity of the internal carotid arteries [Kliniko-psihologicheskaya kharakteristika patsientov s patologicheskoy izvitost'yu vnutrennikh sonnykh arteriy]. *Materialy konferentsii po voprosam klinicheskoy obshchey, detskoy i sudebnoy psikhii "Mediko-social'nye prioritye sohraneniya psikhicheskogo zdorov'ya naseleniya Rossii"* [Proceedings of the conference on general clinical, child and forensic psychiatry. "Medical and social priorities for conservation of mental health in Russia"]. Petrozavodsk, 2009. P. 33.
4. Burkin M. M., Hyankyaynen I. V. *Psikhicheskie narusheniya pri sosudistyykh zabolevaniyakh golovno mozga* [Mental disorders in vascular diseases of the brain]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2012. 208 p.
5. Burkin M. M., Antonen E. G., Meygal A. Ju., Vassel' I. A. The structure, psychiatric and neuropsychological characteristics of vascular parkinsonism in the Republic of Karelia [Struktura, psikhopatologicheskoe i neyropsihologicheskoe kharakteristiki sosudistogo parkinsonizma v Respublike Kareliya]. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2009. № 1. P. 56–59.
6. *Vegetativnye rassstroystva: Klinika, lechenie, diagnostika* [Autonomic disorders: clinic, treatment, diagnostics]. Moscow, Meditsinskoe informatsionnoe agentstvo Publ., 2003. 752 p.
7. Gavrilova S. I., Kalyn Ya. B. Social and environmental factors and mental health of the elderly population (clinical and epidemiological research) [Sotsial'no-sredovye faktory i sostoyanie psikhicheskogo zdorov'ya pozhilogo naseleniya (kliniko-epidemiologicheskoe issledovanie)]. *Vestnik RAMN* [Journal of Russian Medical Sciences Academy]. 2002. № 9. P. 15–20.
8. Golubev M. V. *Kognitivno-povedencheskaya psihoterapiya pri ranneye stadii khronicheskikh sosudistyykh zabolevaniy golovno mozga. Avtoref. diss. d-ra med. nauk* [Cognitive and behavioral psychotherapy in early-stage chronic vascular diseases of the brain. Abstract. dis. Dr. of med. sciences]. Moscow, 2009. 40 p.

9. Dubenko A. E., Korostiy V. I., Yakushenko I. A. Cognitive impairment and depression in elderly patients – a differential diagnosis and comorbidity [Kognitivnye narusheniya i depressiya bol'nykh pozhilogo vozrasta – differentsial'naya diagnostika i komorbidnost']. *Zdorov'e Ukrainy* [Health of Ukraine]. 2008. № 7. P. 30–33.
10. Zhmurov V. A. *Psihopatologiya* [Psychopathology]. Moscow, Meditsinskaya kniga Publ., 2002. 668 p.
11. *Insul't. Printsipy diagnostiki, lecheniya i profilaktiki* [Stroke. Principles of diagnosis, treatment and prevention]. Moscow, Intermedika Publ., 2002. 208 p.
12. Kadykov A. S., Manvelov L. S., Shakhporonova N. V. *Khronicheskie sosudistye zabolevaniya golovnogogo mozga (distsirkulyatornaya entsefalopatiya)* [Chronic disease of the brain (discirculatory encephalopathy)]. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2006. 224 p.
13. Kazakova S. E., Bondar' R. B. Modern concept of mental disorders of vascular origin (review) [Sovremennyye vozzreniya na psikhicheskie rasstroystva sosudistogo geneza (obzor)]. *Ukrainskiy meditsinskiy al'manakh* [Ukrainian medical almanac]. 2008. Vol. 11. № 5. P. 213–218.
14. Lauks G., Meller Kh.-Ju. *Psikhiatriya i psikhoterapiya* [Psychiatry and Psychotherapy]. Per. s nem. [Trans. from the german]. Moscow, Medpress-inform Publ., 2010. 512 p.
15. Levin O. S. Discirculatory tncephalopathy: modern understanding of mechanisms and treatment [Distsirkulyatornaya entsefalopatiya: sovremennyye predstavleniya o mekhanizmax razvitiya i lechenii]. *Consilium medicum*. 2006. № 8. P. 72–79.
16. Markin S. P. Modern approach to the diagnosis and treatment of chronic brain ischemia [Sovremennyy podkhod k diagnostike i lecheniyu khronicheskoy ishemii mozga]. *Russkiy meditsinskiy zhurnal* [Russian Medical Journal]. 2010. № 6. P. 1–7.
17. Mikhaylova N. M., Sokolova O. N., Gavrilova S. I. Pronoran treatment of psycho-organic syndrome in later age [Lechenie pronoranom psikhoorganicheskogo sindroma v pozdnem vozraste]. *Zhurnal neurologii i psikhiatrii im. S. S. Korsakova* [Journal of neurology and psychiatry named by S. S. Korsakov]. 2004. № 10. P. 46–50.
18. Petrova N. N., Leonidova L. A., Barantsevich E. R., Polyakov I. A. Mental disorders in neurological patients [Psikhicheskie rasstroystva u nevrologicheskikh bol'nykh]. *Zhurnal neurologii i psikhiatrii im. S. S. Korsakova* [Journal of neurology and psychiatry named by S. S. Korsakov]. 2006. № 7. P. 20–23.
19. Piven' B. N., Sheremet'eva I. I. Exogenous-organic mental disorders among men and women: a comparative perspective [Ekzogenno-organicheskie psikhicheskie rasstroystva u muzhchin i zhenshchin: sravnitel'nyy aspekt]. *Rossiyskiy psikhiatricheskyy zhurnal* [Russian Journal of Psychiatry]. 2007. № 3. P. 44–47.
20. Popov Yu. V., Vid V. D. *Sovremennaya klinicheskaya psikhiatriya* [Modern clinical psychiatry]. St. Petersburg, 2002. 402 p.
21. Putilina M. V. Chronic ischemia of the brain [Khronicheskaya ishemiya mozga]. *Lechashchiy vrach* [Attending physician]. 2005. № 6. P. 28–33.
22. Savina M. A. Post-stroke depression [Postinsul'tnaya depressiya]. *Zhurnal neurologii i psikhiatrii im. S. S. Korsakova* [Journal of neurology and psychiatry named by S. S. Korsakov]. 2005. № 7. P. 67–76.
23. Skvortsova V. I., Stakhovskaya L. V., Pryanikova N. A., Meshkova K. S., Shehovtsova K. V. Primary and secondary prevention of stroke [Pervichnaya i vtorichnaya profilaktika insul'ta]. *Farmateka*. 2007. № 7. P. 33–36.
24. Smulevich A. B., Syrkin A. L. *Psikhokardiologiya* [Psikhokardiologiya]. Moscow, Meditsinskoe informatsionnoe agentstvo Publ., 2005. 784 p.
25. Suslina Z. A., Varakin Yu. A., Vereshchagin N. V. *Sosudistye zabolevaniya golovnogogo mozga. Epidemiologiya. Osnovy profilaktiki* [Vascular diseases of the brain. Epidemiology. Fundamentals of prevention]. Moscow, Medpress-inform, 2006. 254 p.
26. Tsygankov B. D., Ovsiyannikov S. A. *Psikhiatriya* [Psychiatry]. Moscow, GEOTAR-Media, 2009. 384 p.
27. Bowirrat A., Oscar-Berman M., Logroscino G. Association of depression with Alzheimer's disease and vascular dementia in elderly Arab population of Wadi-Ara, Israel // *Int. J. Geriatr. Psychiatry*. 2006. Vol. 21. № 3. P. 246–251.
28. Camus V., Kraehenbuhl H., Preisig M., Bula C. J., Waeber G. Geriatric depression and vascular diseases: what are the links // *J. Affect. Disord*. 2004. Vol. 81. № 1. P. 1–16.
29. Holley C., Murrell S. A., Mast B. T. Psychosocial and vascular risk factors for depression in the elderly // *Am. J. Geriatr Psychiatry*. 2006. Vol. 14. № 1. P. 84–90.
30. Sapolsky R. M. Glucocorticoids and hippocampal atrophy in neuropsychiatric disorders // *Arch. Gen. Psychiatry*. 2000. Vol. 57. P. 925–935.

Поступила в редакцию 07.08.2013

РУДОЛЬФ ИОНТЕЛЕВИЧ МЕЛЬЦЕР

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

ДМИТРИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ ИВАНОВ

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математической упругости и биомеханики, Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского (Саратов, Российская Федерация)
ivanovdv@gmail.com

ИЛЬЯ ПЕТРОВИЧ ЛОЗОВИК

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

АЛЕКСЕЙ ЮРЬЕВИЧ ВЕРХОВОД

аспирант кафедры общей и факультетской хирургии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
verhovod3000@mail.ru

ДМИТРИЙ ОЛЕГОВИЧ ПОЧЕНТЫ

клинический ординатор кафедры общей и факультетской хирургии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
pochenty@mail.ru

ПОСЛЕОПЕРАЦИОННОЕ ВЕДЕНИЕ БОЛЬНЫХ С НЕОПОРНЫМИ ПЕРЕЛОМАМИ КОСТЕЙ ГОЛЕНИ В УСЛОВИЯХ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ОСЕВОЙ НАГРУЗКИ*

Диафизарная травма голени характеризуется большими сроками реабилитации и временной нетрудоспособности. Контроль осевой нагрузки на поврежденную конечность в послеоперационном и реабилитационном периодах активизирует восстановительный процесс. При использовании любого из методов остеосинтеза в послеоперационном периоде всегда возникает вопрос дозирования нагрузки на оперированную конечность. Предложена система (снабжена блоком для определения давления), которая обеспечивает определение величины давления, распределенного по поверхности контакта одного отломка трубчатой кости на другой.

Ключевые слова: голень, перелом, контролируемая осевая нагрузка, реабилитация

Одной из тенденций современной травматологии является стремление к адекватному совмещению этапов консолидации и реабилитации, которое может быть осуществлено не только за счет создания более стабильных послеоперационных систем «кость – фиксатор», но и с помощью обеспечения более качественного инструментального контроля дозированной нагрузки.

По мнению С. Н. Колчанова с соавт. [3], правильный тензометрический контроль осевой нагрузки на поврежденную конечность в послеоперационном и реабилитационном периодах значительно активизирует восстановительный процесс. Так, по данным В. Н. Крюкова [3], костной регенерации в условиях правильно дозируемой нагрузки способствует более ранняя дифференциация клеточных структур в области перелома.

Известной особенностью диафизарной травмы голени являются достаточно большие сро-

ки временной нетрудоспособности (5–7 месяцев и более) и, соответственно, частое развитие контрактур в смежных сочленениях этого локомоторного звена. Это обуславливает стремление к более ранней функциональной нагрузке, возможность которой реально обеспечивается применением современных методов погружного остеосинтеза и систем внеочаговой фиксации, обеспечивающих достаточную биомеханическую стабильность даже при характерной для последних десятилетий нарастающей частоте многооскольчатых вариантов этой травмы голени [4].

В послеоперационном периоде при использовании любого из методов остеосинтеза в процессе реабилитации всегда возникает вопрос дозирования нагрузки на оперированную конечность. В настоящее время какие-либо простые в эксплуатации и портативные устройства, позволяющие обучить больного дозированию

нагрузки в динамике восстановления процесса ходьбы, а не в статическом вертикальном положении, отсутствуют. Кроме того, в медицинской практике нет устройств, обеспечивающих обратную сигнальную связь, которые позволяли бы больному сразу получить информацию о превышении пороговой нагрузки, разрешенной ему на данном этапе реабилитации.

На практике рекомендации по дозированию нагрузки звучат следующим недостаточным определенным образом: а) ставить ногу на пол; б) слегка приступить на костылях; в) начинать нагружать и т. д.

Несложно сделать вывод, что больной не получает никакой объективной цифровой информации, а это, в свою очередь, может привести к разрушению послеоперационной системы «кость – фиксатор», в которой до образования костной мозоли почти вся нагрузка будет ложиться на имплантат.

По мере формирования костной мозоли вышеуказанная послеоперационная система будет становиться стабильнее, так как частичную нагрузку на себя будет принимать кость, но, поскольку этот процесс растянут во времени на срок от 3 месяцев и более, нагрузку приходится индивидуализировать с учетом всех параметров, влияющих на стабильность сегмента, в частности, в зависимости от характера перелома и степени его оскольчатости [1].

Для определения стресс-нагрузки, согласно рекомендациям В. Б. Лузянина, В. И. Савченко, С. Н. Колчанова [3], возможно использование напольных весов. Сущность способа заключается в надавливании оперированной конечностью на весы до появления болевых ощущений в зоне перелома. Этот показатель, по мнению авторов, являлся начальной стресс-нагрузкой, определяющей стабильность выполненного остеосинтеза. На основании сравнительного наблюдения, а также клинической и рентгенологической интерпретации стабильности выполненного остеосинтеза авторы статьи пришли к выводу, что стабильным можно считать остеосинтез, который выдерживает стресс-нагрузку 20% массы тела больного и более. Соответственно такой пациент может проходить функционально более активную реабилитацию.

Более осторожным является использование стартовой нагрузки, равной 10% массы тела больного. Больным рекомендуется ежедневная, по хроносхеме через 3–4 часа дозированная нагрузка установленной массой по 15–20 минут, чередуя надавливания в течение 1–2 минут с прекращением давления на 30–40 секунд. Клиническим критерием оптимальной рабочей массы является отсутствие усиления болей и отека в зоне перелома. Ежедневно с 5–7-х суток после операции до 21-го дня пациент увеличивает нагрузку на 1 кг, а с 4-й недели – на 2 кг. Эта усредненная схема нагрузки рассчитана таким образом,

чтобы поэтапно к 8–10-й неделе пациент достиг полной осевой нагрузки, ее принцип заключается в гармонизации требований к фиксации перелома и условий его консолидации. В этот период больные перемещаются на костылях и находятся под периодическим наблюдением оперировавшего хирурга, отслеживающего динамику процесса восстановления. Клиническим критерием консолидации является тест, при котором больные на оперированной конечности могут простоять в течение 5–7 минут без болевых ощущений в зоне перелома. Предложенный В. Б. Лузяниным с соавт. [3] вариант использования алгической стресс-нагрузки с последующим ее дозированием по показаниям напольных весов дает возможность лишь статического контроля обучения навыкам ходьбы. Использование напольных весов, предназначенных для решения немного более простых задач, является недостаточно корректным при дозировании нагрузки в динамическом режиме послеоперационного восстановления ходьбы, а иногда и обучения ей в изменившихся после тяжелой травмы условиях, так как устройство это не мобильно. Отсутствует перекал с пятки на передний отдел стопы, это мешает объективному измерению нагрузки. Кроме того, отсутствует какой-либо вариант обратной связи, который позволял бы больному осуществлять динамический контроль в ходе восстановления естественного алгоритма ходьбы.

В настоящее время реабилитационная фаза лечебного процесса в большинстве практических лечебных учреждений не обеспечена какой-либо измерительной инструментальной базой. Окончательной целью лечения является, как известно, не пребывание больного в статическом (взвешиваемом) положении, а именно восстановление навыка ходьбы, что возможно только в условиях динамизации обучения и последующего контроля.

В предложенной нами системе технический результат состоит в обеспечении возможности определения величины давления (в том числе максимального), распределенного по поверхности контакта одного отломка трубчатой кости травмированной конечности на другой в послеоперационном периоде, что необходимо для улучшения результатов лечения переломов за счет ограничения (дозирования) величины, цикличности и продолжительности нагрузки на нижнюю конечность пациента в послеоперационном периоде при лечении переломов трубчатых костей бедра и (или) голени, а также для профилактики ортопедических осложнений травм бедра и голени.

Указанный технический результат достигается тем, что предлагаемая система снабжена блоком (модулем) для определения давления (в том числе максимального), распределенного по поверхности контакта одного отломка трубчатой кости травмированного сегмента на другой (см. рисунок).

Указанное давление определяется в интерактивном режиме с использованием данных о взаимном положении отломков кости до и после остеосинтеза по результатам обработки рентгенограмм травмированной кости. Кроме того, в качестве исходных данных используются результаты определения центра давления каждой стопы на поверхность опоры и результаты анализа распределения нагрузок по поверхности контакта подступного устройства с использованием аналогово-цифрового преобразователя и IBM PC-совместимого компьютера. Для определения взаимного давления отломков и нагрузки на конечность результаты измерений обрабатываются в предлагаемом блоке с применением методов биомеханики и механики твердого деформируемого тела. Все устройство крепится к стопе, ортезу или жесткой фиксирующей повязке с помощью ленточных липучек. Дозирующее устройство соединено в единую цепь с зуммером.

Данное устройство может быть использовано для контролируемого процесса обучения больного ходьбе с дозированной нагрузкой перед выпи-



Прототип устройства для дозирования нагрузки в послеоперационном периоде

ской на амбулаторный этап лечения. В амбулаторных (поликлинических) центрах реабилитации нагрузка меняется в соответствии с этапом и ходом (по данным рентгенограмм) формирования костной мозоли, то есть будут устанавливаться очередные цифровые значения. В результате больной получает возможность поддерживать необходимый стереотип ходьбы с требуемой нагрузкой в динамике всего процесса лечения.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулич Ю. В., Акулич А. Ю. Контролируемое восстановление кортикальной костной ткани после лечения в аппаратах внешней фиксации // Известия Саратовского университета. Новая серия. Сер.: «Математика. Механика. Информатика». 2011. Т. 11. № 1. С. 50–59.
2. Крюков В. Н. Судебная медицина. М., 1998. Изд. 4-е. 462 с.
3. Лузянин В. Б., Савченко В. И., Колчанов С. Н. и др. Дозированная нагрузка в восстановительном лечении больных с диафизарными переломами костей голени // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры: Двухмесячный научно-практический журнал. 2002. № 4. С. 39–41.
4. Редько К. Г., Соломин Л. Н., Закутнев Ю. С. и др. Результаты лечения больных с закрытыми диафизарными переломами большеберцовой кости методом чрескостного остеосинтеза // Травматология и ортопедия России. 2007. № 1. С. 21–25.

Mel'tzer R. I., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Ivanov D. V., Saratov State University named after N. G. Chernyshevsky (Saratov, Russian Federation)
Lozovik I. P., Karelian Republican hospital named after V. A. Baranov (Petrozavodsk, Russian Federation)
Verkhovod A. Yu., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Pochenty D. O., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

POSTOPERATIVE MANAGEMENT OF PATIENTS WITH NON-REFERENCE TIBIAL FRACTURES UNDER CONTROLLED AXIAL LOAD

Diaphyseal tibia fractures are characterized by prolonged periods of temporary disability and rehabilitation. Axial load control on the injured limbs in postoperative and rehabilitation periods promotes regenerative processes. In the postoperative period, reasonable dose load on the operated limb is always an issue. We developed a system (provided with a unit for determining pressure), that measures pressure distributed over the contact surface of the one bone fragment to the other.

Key words: tibia, fracture, controlled axial load, rehabilitation

REFERENCES

1. Akulich Yu. V., Akulich A. Yu. Controlled restoration of cortical bone tissue after treatment in the external fixing devices [Kontroliruemoe vosstanovlenie kortikal'noy kostnoy tkani posle lecheniya v apparatakh vneshney fiksatsii]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Ser. "Matematika. Mekhanika. Informatika"*. 2011. № 1. P. 50–59.
2. Kryukov V. N. *Sudebnaya meditsina* [Forensic medicine]. Moscow, 1998. 462 p.
3. Luzyanin V. B., Savchenko V. I., Kolchanov S. N. Dosed load in recovery treatment of patients with diaphyseal tibia fractures [Dozirovannaya nagruzka v vosstanovitel'nom lechenii bol'nykh s diafizarnymi perelomami kostey goleni]. *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoy fizicheskoy kul'tury* [Questions in Health Resort, physical therapy and medical physical culture]. 2002. № 4. P. 39–41.
4. Red'ko K. G., Solomin L. N., Zakutnev Yu. S. i dr. Treatment results of the patients with diaphyseal tibia fractures with external fixator [Rezultaty lecheniya bol'nykh s zakrytymi perelomami bol'shebertsovoy kosti metodom chreskostnogo osteosinteza]. *Travmatologiya i ortopediya Rossii* [Traumatology and orthopedics of Russia]. 2007. № 1. P. 21–25.

Поступила в редакцию 28.05.2013

ИРИНА ВЛАДИМИРОВНА СТАФЕЕВА

кандидат медицинских наук, докторант кафедры неврологии и психиатрии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
istafeeva@inbox.ru

НАТАЛИЯ СЕРГЕЕВНА СУББОТИНА

доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой неврологии и психиатрии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
nataliyasubbotin@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ ВНУТРИПОЛУШАРНЫХ СООТНОШЕНИЙ ЭЭГ У БОЛЬНЫХ В ОСТРОМ ПЕРИОДЕ ИШЕМИЧЕСКОГО ИНСУЛЬТА*

У 63 пациентов с ишемическим инсультом в остром периоде проанализированы когерентные характеристики ЭЭГ. Сопоставлялась динамика внутриполушарной когерентности ЭЭГ и клинических показателей у пациентов с различной степенью тяжести заболевания. Показано, что особенности изменений показателей внутриполушарной когерентности в пораженном и клинически интактном полушариях в остром периоде демонстрируют четкую взаимосвязь с тяжестью ишемического инсульта и имеют важное прогностическое значение. У пациентов с тяжелым течением ишемического инсульта отмечались низкие показатели внутриполушарной когерентности в лобно-височных и лобно-центральных областях клинически интактного полушария.

Ключевые слова: ишемический инсульт, электроэнцефалография, внутриполушарная когерентность

Фундаментальным свойством головного мозга является его пластичность, проявляющаяся на протяжении всей жизни организма. Это механизмы, которые обеспечивают реагирование и изменение мозга на повреждение его самого и периферической нервной сети. Возникающие при поражении мозга симптомы нейродефицита отражают не проявления поврежденной области мозга, а функцию в оставшейся части мозга [10], [11]. В работе Г. Н. Крыжановского [7] показано, что в восстановительных процессах, происходящих в структурах мозга после его повреждения, важная роль принадлежит внутриклеточной регенерации. При этом между нейронами образуются новые связи благодаря регенерации их отростков. Пластические перестройки при ишемическом инсульте не ограничиваются областью повреждения, они возникают в других зонах мозга, следствием чего является выраженная в той или иной степени общая пластическая реорганизация мозга, обуславливающая новые отношения организма со средой [9]. Возможность возрождения утраченной функции после инсульта, которое часто наблюдается даже при оставшемся морфологическом дефекте, изначально вызвавшем дефицит, обусловлена исчезновением дисфункционального статуса, порожденного «диализмом» [3], [4], а также формированием новых полисинаптических связей [1], [2], [8].

Многолетние исследования ЭЭГ больных с очаговыми поражениями центральной нервной системы показали, что наиболее информативные параметры функционирования мозга могут быть получены на основании вычисления функции когерентности, позволяющей охарактеризовать тонус коры и мозаику межцентральных отношений [1], [2], [5], [6].

Целью нашего исследования явилось изучение динамики спектрально-когерентных показателей ЭЭГ у больных в остром периоде ишемического инсульта различной степени тяжести.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обследовали 63 пациента с первым в анамнезе нарушением мозгового кровообращения по ишемическому типу с полушарной локализацией инфаркта. Среди них мужчин было 41 (65,1%), женщин – 22 (34,9%). Средний возраст пациентов составил $69,13 \pm 9,8$ года. Все пациенты в остром периоде в зависимости от тяжести состояния были разделены на три клинические группы: малый инсульт (10 человек), инсульт средней тяжести (27 человек) и тяжелый инсульт (26 человек). Контрольную группу составили 35 практически здоровых лиц, сопоставимых по возрасту и полу, без неврологических нарушений. Все исследуемые были правшами. У всех больных проводили клинико-неврологическое исследование. Для объективизации характера и динамики изменений неврологической симптоматики использовали шкалу NIHSS (National

Institute of Health Scale), отражающую тяжесть острого периода и течение заболевания.

Для регистрации ЭЭГ использовали 20-канальный компьютерный электроэнцефалограф МБН-Нейрокартограф (Россия). Для количественной оценки спектра когерентности использовали программу «Нейрокартограф», которая позволяла методом быстрого преобразования Фурье рассчитать абсолютные значения когерентности для основных диапазонов частот ЭЭГ: дельта (0–4 Гц), тета (4–8 Гц), альфа-1 (8–10 Гц), альфа-2 (10–13 Гц), бета (13–30 Гц). Проводился анализ монополярных отведений ЭЭГ с референтными ушными электродами. Для оценки выбирали не менее 12 одиночных 2,5-секундных, свободных от артефактов фрагментов фоновой ЭЭГ после 5-минутной адаптации больного к условиям записи. Проводился анализ показателей внутриполушарной когерентности для Fp1-C3, Fp2-C4, C3-O1, C4-O2, Fp1-T3, Fp2-T4, T3-O1, T4-O2 – для каждого частотного диапазона и всей частотной полосы. Запись ЭЭГ проводилась на 1, 7, 14, 21-е сутки заболевания. Статистическая обработка данных осуществлялась при помощи пакета статистических программ S-Plus 2000 (MathSoft Inc.) с использованием методов непараметрической статистики. Для выявления достоверных различий между средними выборкой использовались критерии Вилкоксона и Колмогорова.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При анализе ЭЭГ пациентов с тяжелым инсультом (средний балл по шкале NIHSS $19,5 \pm 4,3$) в первые сутки заболевания показатели внутриполушарной когерентности во всех частотных диапазонах в большинстве областей обоих полушарий были выше по сравнению с группой здоровых испытуемых. Наиболее выраженные изменения отмечались в центрально-височных и затылочно-височных областях полушарий. К концу первой недели происходило резкое уменьшение показателей когерентности в интактном полушарии во всех частотных диапазонах по сравнению с предыдущим исследованием. Особенно выраженное уменьшение показателей наблюдалось в лобно-височных областях.

К концу второй недели заболевания отмечалось увеличение показателей внутриполушарной когерентности во всех частотных диапазонах в обоих полушариях с некоторым преобладанием изменений в интактном полушарии по сравнению с предыдущим исследованием. Наблюдалось достоверное увеличение ($p < 0,05$) когерентности в лобно-височной области интактного полушария по сравнению с показателями 7-х суток в альфа-1, бета- и тета-диапазонах. К концу острого периода отмечалось уменьшение показателей когерентности в обоих полушариях, более выраженное в передних

отделах интактного полушария по сравнению с предыдущим исследованием. Наиболее резкое уменьшение показателей внутриполушарной когерентности зарегистрировано в лобно-височной области интактного полушария, преимущественно в альфа-, тета- и дельта-диапазонах, по сравнению с показателями 14-х суток.

В первые сутки от начала заболевания у пациентов группы инсульта средней тяжести (средний балл по шкале NIHSS $11,4 \pm 2,7$) наблюдалось усиление внутриполушарных связей в клинически интактном полушарии. Были выявлены достоверно более высокие ($p < 0,05$) показатели внутриполушарной когерентности во всех частотных диапазонах в лобно-височной, центрально-височной и центрально-затылочной областях по сравнению с группой здоровых испытуемых.

К концу первой недели, начиная с 7-х суток от начала заболевания отмечалось резкое снижение показателей когерентности в пораженном полушарии. Зарегистрировано статистически значимое уменьшение ($p < 0,05$) внутриполушарной когерентности в центрально-затылочной, центрально-височной и височно-затылочной областях пораженного полушария в альфа-, тета- и дельта-диапазонах по сравнению с предыдущим исследованием. В конце второй недели происходило усиление внутриполушарных взаимосвязей в пораженном полушарии. Наблюдалось достоверное увеличение ($p < 0,05$) показателей в альфа-2-диапазоне в центрально-затылочной и височно-затылочной областях пораженного полушария по сравнению с предыдущим исследованием. В клинически интактном полушарии отмечалось незначительное увеличение показателей внутриполушарной когерентности во всех частотных диапазонах, более выраженное в центрально-височных и центрально-затылочных отделах. К концу острого периода наблюдалось уменьшение показателей внутриполушарной когерентности во всех частотных диапазонах в лобно-центральной и лобно-височной областях интактного полушария по сравнению с предыдущим исследованием. В центрально-височных областях, преимущественно на стороне очага поражения, выявлялось увеличение показателей внутриполушарной когерентности во всех частотных диапазонах по сравнению со второй неделей инсульта.

У пациентов группы малого инсульта (средний балл по шкале NIHSS $6,0 \pm 0,8$) в первые сутки инсульта была выявлена тенденция к повышению показателей внутриполушарной когерентности для альфа- и бета-диапазонов в пораженном полушарии по сравнению с группой здоровых испытуемых. Показатели внутриполушарной когерентности были значительно выше по сравнению с группой здоровых лиц во всех частотных диапазонах в центрально-височной

области обоих полушарий. К концу первой недели заболевания изменения внутрислоушарных связей в обоих полушариях принимали двунаправленный характер. В передних областях (лобно-центральной, лобно-височной) наблюдалось увеличение показателей внутрислоушарной когерентности во всех частотных диапазонах. В задних областях (центрально-затылочной, височно-затылочной) отмечалось уменьшение показателей внутрислоушарной когерентности. Начиная с 14-х суток отмечалось уменьшение показателей внутрислоушарной когерентности по сравнению с предыдущим исследованием. Наиболее выраженное уменьшение было зарегистрировано в тета- и, в большей степени, дельта-диапазонах, преимущественно на стороне очага поражения. К концу острого периода отмечалось дальнейшее уменьшение показателей внутрислоушарной когерентности в пораженном полушарии. Указанные изменения преобладали в передних областях. В интактном полушарии в большинстве частотных диапазонов, за исключением альфа-1-диапазона в центрально-затылочной области, наблюдалось увеличение когерентности в лобно-височной, центрально-затылочной, височно-затылочной областях по сравнению с предыдущим исследованием.

Таким образом, в рамках данной работы было проведено динамическое исследование показателей внутрислоушарной когерентности у пациентов в остром периоде ишемического инсульта различной степени тяжести. У больных с тяжелым неврологическим дефицитом (по шкале NIHSS) в первые сутки заболевания отмечалось достоверное увеличение показателей когерентности в большинстве областей обоих полушарий, за исключением лобно-височных. Однако начиная с 7-х суток после окончания острейшего периода было зафиксировано снижение показателей внутрислоушарной когерентности в интактном полушарии. Несмотря на некоторое увеличение этого показателя на второй неделе заболевания, к концу острого периода отмечалось дальнейшее его снижение, что можно рассматривать как неблагоприятный прогностический признак течения инсульта. По сравнению с пациентами группы неврологического дефицита средней тяжести наиболее выраженное снижение показателей когерентности наблюдалось в лобно-височных областях обоих полушарий, отмечена тенденция к снижению показателей в центрально-височных областях обоих полушарий. Для

пациентов с неврологическим дефицитом средней тяжести (по шкале NIHSS) было характерно достоверное компенсаторное увеличение внутрислоушарных взаимосвязей в большинстве, за исключением лобно-височных и лобно-центральных, областей клинически интактного полушария в течение острейшего периода инсульта. В конце острейшего периода отмечалось резкое статистически значимое уменьшение ($p < 0,05$) показателей внутрислоушарной когерентности в пораженном полушарии, однако в конце второй недели от начала заболевания отмечалось усиление взаимосвязей внутри пораженного полушария, что проявлялось увеличением показателей внутрислоушарной когерентности. Затем в конце острого периода выявлялось некоторое уменьшение взаимосвязей внутри пораженного полушария. Тем не менее показатели внутрислоушарной когерентности в клинически интактном полушарии оставались высокими по сравнению с группой здоровых испытуемых в течение всего острого периода ишемического инсульта, что, по нашему мнению, имело благоприятное прогностическое значение для восстановления нарушенных функций, прежде всего двигательной системы, у пациентов данной группы. Установлено, что для пациентов группы малого инсульта было характерным усиление внутрислоушарных связей в острейший период инсульта сначала в пораженном, а к концу первой недели – в интактном полушарии, преимущественно в передних областях. При этом увеличение показателей было достоверно больше ($p < 0,05$) по сравнению с группой неврологического дефицита средней тяжести. Указанные изменения, по-видимому, носили компенсаторный характер. К концу острого периода показатели когерентности приближались по своим значениям к показателям группы здоровых испытуемых. В течение первых двух недель в центрально-височных областях обоих полушарий у пациентов с легким и среднетяжелым неврологическим дефицитом отмечались высокие показатели когерентности, что, по нашему мнению, явилось благоприятным прогностическим признаком в плане восстановления утраченных функций и соответствует данным О. М. Гриндель [2]. Именно восстановление сочетанной активности височных и центральных отделов доминирующего полушария, то есть моторно-речевой зоны коры, играет важную роль для дальнейшей нормализации межцентральных взаимодействий.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болдырева Г. Н., Шарова Е. В., Добронравова И. С. Роль регуляторных структур мозга в формировании ЭЭГ человека // Физиология человека. 2000. Т. 26. № 5. С. 19–34.
2. Гриндель О. М., Коптелов Ю. М., Машеров Е. Л., Пронин И. Н. Очаги патологической активности в головном мозге и их влияние на пространственно-временные отношения ЭЭГ // Журн. высш. нервн. деят. 1998. № 4. С. 671–686.

3. Гусев Е. И., Скворцова В. И., Журавлева Е. Ю., Яковлева Е. В. Механизмы повреждения ткани мозга на фоне острой фокальной ишемии // Журн. неврол. и психиатр. 1999. Т. 99. № 5. С. 55–59.
4. Гусев Е. И., Скворцова В. И., Коваленко А. В., Соколов М. А. Механизмы повреждения ткани мозга на фоне острой фокальной церебральной ишемии // Журн. неврол. и психиатр. 1999. № 2. С. 65–69.
5. Зверева З. Ф., Советов А. Н. Электрофизиологическая характеристика показателей межполушарной асимметрии при восстановительных процессах в мозге после его одностороннего повреждения // Вестн. РАМН. 2000. № 3. С. 31–37.
6. Жаворонкова Л. А., Максакова О. А., Смирнова Н. Я., Кроткова О. А., Найдин В. Л. Межполушарные соотношения когерентности ЭЭГ при реабилитации больных с тяжелой черепно-мозговой травмой // Физиология человека. 2001. Т. 27. № 2. С. 5–14.
7. Крыжановский Г. Н. Пластичность в патологии нервной системы // Журн. неврол. и психиатр. 2001. № 2. С. 5–6.
8. Пекна М., Пекни М., Нильссон М. Модулирование нейрональной пластичности как основа реабилитации после инсульта // Журнал Национальной ассоциации по борьбе с инсультом / Stroke. Российское издание. 2013. № 1. С. 85–96.
9. Ago T., Kitazono T., Ooboshi H., Takada J., Yoshiura T., Mihara F., Ibayashi S., Iida M. Deterioration of pre-existing hemiparesis brought about by subsequent ipsilateral lacunar infarction // J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry. 2003. Vol. 74. (8). P. 1152–1153.
10. Cramer S. C., Bastings E. P. Mapping clinically relevant plasticity after stroke // Neuropharmacology. 2000. Vol. 39. P. 842–851.
11. Greifzu F., Schmidt K.-F., Kreikemeier K., Löwel S., Schmidt S., Witte O. W. Global impairment and therapeutic restoration of visual plasticity mechanisms after a localized cortical stroke // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2011. Vol. 108 (37). P. 15450–15455.

Stafeeva I. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Subbotina N. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

CHARACTERISTIC FEATURES OF HEMISPHERIC COHERENCE IN EEG PATIENTS DIAGNOSED WITH ISCHEMIC STROKE

Coherent EEG characteristics in 63 patients with ischemic stroke in the acute period were analyzed. Dynamics of intrahemispheric EEG coherence and clinical parameters in patients with varying severity of the condition were compared. It is shown that characteristics of changes in the values of the affected intrahemispheric coherence and clinically intact hemisphere in the acute phase have clear relationships with the severity of ischemic stroke. It also has an important prognostic value of the disease. In patients diagnosed with severe ischemic stroke, low rates of intrahemispheric coherence in the frontal-temporal and frontal-central areas of clinically intact hemisphere were observed.

Key words: ischemic stroke, electroencephalography, intrahemispheric coherence

REFERENCES

1. Boldyreva G. N., Sharova E. V., Dobronravova I. S. The role of the regulatory structures of the brain in the formation of human EEG [Rol' regulatorynykh struktur mozga v formirovaniy EEG cheloveka]. *Fiziologiya cheloveka*. 2000. Vol. 26. № 5. P. 19–34.
2. Grindel' O. M., Koptelov Ju. M., Masherov E. L., Pronin I. N. Pockets of abnormal activity in the brain and their effects on the spatial and temporal relationship of EEG [Ochagi patologicheskoy aktivnosti v golovnom mozge i ikh vliyaniya na prostranstvenno-vremennyye otnosheniya EEG]. *Zhurn. vyssh. nervn. deyat.* 1998. № 4. P. 671–686.
3. Gusev E. I., Skvortsova V. I., Zhuravleva E. Ju., Yakovleva E. V. The mechanisms of tissue damage in the brain of acute focal ischemia [Mekhanizmy povrezhdeniya tkani mozga na fone ostroy fokal'noy ishemii]. *Zhurn. неврол. i psikiatr.* 1999. Т. 99. № 5. С. 55–59.
4. Gusev E. I., Skvortsova V. I., Kovalenko A. V., Sokolov M. A. The mechanisms of tissue damage in the brain of acute focal ischemia [Mekhanizmy povrezhdeniya tkani mozga na fone ostroy fokal'noy tserebral'noy ishemii]. *Zhurn. неврол. i psikiatr.* 1999. № 2. С. 65–69.
5. Zvereva Z. F., Sovetov A. N. Electrophysiological characteristics of indicators of asymmetry in regenerative processes in the brain after unilateral ablation [Elektrofiziologicheskaya kharakteristika pokazateley mezhpulusharnoy asimmetrii pri vosstanovitel'nykh protsessakh v mozge posle ego odnostoronnego povrezhdeniya]. *Vestn. RAMN.* 2000. № 3. С. 31–37.
6. Zhavoronkova L. A., Maksakova O. A., Smirnova N. Ya., Krotkova O. A., Naidin V. L. Interhemispheric correlation of EEG coherence in the rehabilitation of patients with severe traumatic brain injury [Mezhpulusharnyye sootnosheniya kogerentnosti EEG pri reabilitatsii bol'nykh s tyazhelyo cherepno-mozgovoy travmoy]. *Fiziologiya cheloveka*. 2001. Vol. 27. № 2. P. 5–14.
7. Kryzhanovskiy G. N. Plasticity in the pathology of the nervous system [Plastichnost' v patologii nervnoy sistemy]. *Zhurn. неврол. i psikiatr.* 2001. № 2. С. 5–6.
8. Pekna M., Pekni M., Nil'sson M. The modulation of neuronal plasticity as a basis for stroke rehabilitation [Modulirovaniye neyronal'noy plastichnosti kak osnova reabilitatsii posle insulta]. *Journal of the National Association for the Stroke / Stroke. Russian Edition.* 2013. № 1. С. 85–96.
9. Ago T., Kitazono T., Ooboshi H., Takada J., Yoshiura T., Mihara F., Ibayashi S., Iida M. Deterioration of pre-existing hemiparesis brought about by subsequent ipsilateral lacunar infarction // J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry. 2003. Vol. 74. (8). P. 1152–1153.
10. Cramer S. C., Bastings E. P. Mapping clinically relevant plasticity after stroke // Neuropharmacology. 2000. Vol. 39. P. 842–851.
11. Greifzu F., Schmidt K.-F., Kreikemeier K., Löwel S., Schmidt S., Witte O. W. Global impairment and therapeutic restoration of visual plasticity mechanisms after a localized cortical stroke // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2011. Vol. 108 (37). P. 15450–15455.

Поступила в редакцию 25.07.2013

ИРИНА МИХАЙЛОВНА ПОТАШЕВА

аспирант, Институт языка, литературы и истории Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
irina.potashева@mail.ru

СВЕТЛАНА ЮРЬЕВНА ЧАЖЕНГИНА

кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории шунгитов, Институт геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
chazhengina@mail.ru

СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ СВЕТОВ

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

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОЗОНДОВОГО АНАЛИЗА ОБРАЗЦОВ КРУГОВОЙ КЕРАМИКИ К ИЗУЧЕНИЮ ТЕХНОЛОГИИ ДРЕВНЕГО ГОНЧАРСТВА КАРЕЛОВ В ЭПОХУ СРЕДНЕВЕКОВЬЯ

Излагаются результаты исследования образцов бело- и красноглиняной круговой керамики городищ Северо-Западного Приладожья с применением метода электронно-зондовой микроскопии (SEM). Задачи исследования состояли в определении технологии составления формовочных масс трех наиболее ранее появившихся типов посуды, установлении источника каолинового сырья для изготовления белоглиняной посуды и, наконец, в оценке возможностей указанного метода для изучения древней керамики. Исследовано шесть образцов теста гончарных изделий. Определен химический и минералогический состав глин и примесей для образцов формовочных масс круговой посуды с городищ Тиверск, Хямеенлахти-Линнавуори, Паасо и керамического теста сосуда из Новгорода. Установлено, что белоглиняные сосуды, выделившиеся в отдельную группу, отличную от остальных изделий по химическому составу теста, согласно проведенному ранее масс-спектрометрическому анализу (ICP-MS), являются продуктами импорта и, вероятно, происходят из Новгородской области.

Ключевые слова: Северо-Западное Приладожье, древние карелы, гончарная керамика, технология производства, микронзондовый анализ (SEM)

В статье излагаются результаты продолжающегося исследования, направленного на изучение технологии гончарного производства древних карелов в эпоху Средневековья, с использованием методов естественно-научных дисциплин. Объектом исследования является гончарная посуда древнекарельских городищ Северо-Западного Приладожья, функционировавших в XII–XIV веках. При раскопках указанных памятников обнаружены многочисленные фрагменты гончарной посуды (4125 обломков), из которых на данный момент восстановлено 156 кухонных горшков. В основном это небольшие емкости диаметром 14–22 см по венчику, которые использовались для приготовления пищи. Морфологические характеристики сосудов и технологические особенности производства посуды дали основания для выделения в керамическом комплексе разновременных групп и типов керамики с вариантами (рис. 1).

Горшки объединены в две группы, первая из которых представлена керамикой из красножгущихся глин (128 горшков), вторая – посудой из светложгущихся (каолиновых и слабожелезненных) глин (28 горшков), приобретающих светлый (белый, кремовый) цвет после обжига. Систематизация материала проводилась с использованием традиционного в археологии метода сравнительной типологии. Суть данного метода заключается в поиске аналогий среди датированных комплексов круговой посуды крупных средневековых городов для выделенных на городищенском материале типов сосудов с целью определения периодов их бытования. Вкратце представим основные типы гончарной керамики древних карелов и определим периоды их бытования. Тип I – восемь сосудов S-видной профилировки с округлым плечиком и коротким венчиком (рис. 1: I). По оформлению края венчика выделяются три

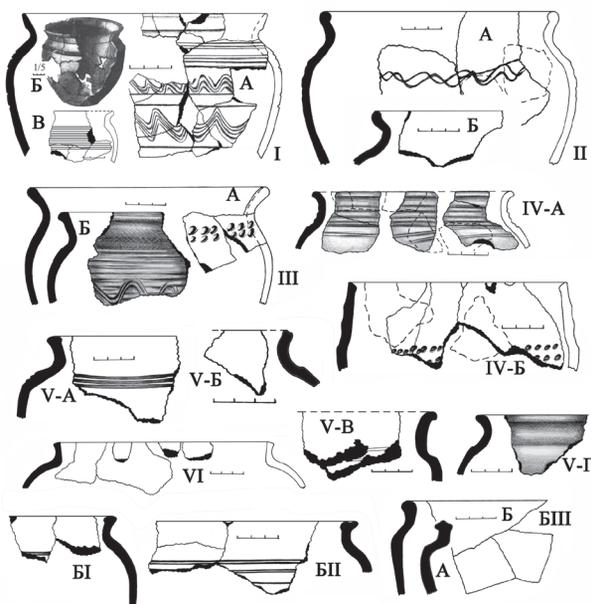


Рис. 1. Основные типы гончарной посуды городищ Северо-Западного Приладожья

варианта: А, Б, В. Отличительной чертой керамики типа I является значительная ширина орнаментального фриза на изделиях, что характерно для ранней посуды. Период бытования типа I, вероятно, выпадает на вторую половину X – первую половину XI в.² Тип II объединяет 50 сосудов S-видной профилировки с отогнутым наружу венчиком (рис. 1: II), имеющим валикообразное утолщение края с внутренней стороны. В рамках типа выделяется группа сосудов с ложбинкой на внутреннем крае венчика, предположительно предназначенной для фиксации крышек. Тип II является наиболее широко распространенной формой горшков средневековой Руси. Время появления типа II на городищах, по-видимому, следует связывать с XII в.; горшков с ложбинкой на венчике – с XIII в.³ Верхняя граница бытования типа размыта: в близлежащем Орешке сосуды подобной профилировки употребляются в XV и даже в XVI в. [6; 48. Рис. 16: 25]. Тип III – 13 горшков с выпуклым опущенным плечиком и часто удлиненным венчиком с утолщенным краем (рис. 1: III). По крутизне изгиба шейки выделяются два варианта. Посуда типа III может быть датирована XII–XIII вв., началом XIV в., тем не менее подобные архаичные формы изделий могли сохраняться в быту у населения древнекарельских городищ вплоть до XV в.⁴ Тип IV объединяет 21 горшок с характерной морфологической особенностью – гофрированным венчиком (рис. 1: IV). Вариант А представлен сосудами с отогнутым наружу венчиком, Б – горшками с наклоненным внутрь венчиком. Указанный тип изделий мог употребляться в XIII–XV вв.⁵ Сосуды с ребристым очертанием плечика объединены в тип V (32 горшка) с четырьмя вариантами (рис. 1: V-A–

Б), различающимися оформлением венчика и выраженностью излома в профиле плечика. Тип мог возникнуть в конце XIII в., учитывая наличие подобной посуды в Новгороде в 1235–1290 гг. [11; 97]; [13; 215, 216. Табл. 43: 5, 44: 2, 4, 5, 7], и существовать вплоть до XV в., по крайней мере это касается вариантов Б, В и Г, сохранившихся до середины XV в.⁶ Тип VI включает семь сосудов с хорошо профилированным выпуклым плечиком и коротким венчиком (рис. 1: VI). Горшки типа VI представляют наиболее поздний керамический материал и, вероятно, бытуют в XV в., заходя в последующий XVI в.⁷ В группе белоглиняной керамики выделяются три типа сосудов. Горшки типа BI схожи с посудой из красножгущейся глины типа II-A и имеют характерный венчик с валиком на внутренней стороне (рис. 1: BI). Тип BII – сосуды с высоким плечиком и вертикальным венчиком, имеющим оттяжки с обеих сторон (рис. 1: BII). У горшков типа BIII определятельным признаком является ребристое плечико. В зависимости от оформления края венчика в рамках типа выделяются два варианта (рис. 1: BIII-A, Б). Посуда, изготовленная из беложгущейся глины, появляется в хозяйстве древних карелов в XIV в.⁸ Верхняя хронологическая граница существования типа не определяется. В Орешке, на Рюрикском Городище и на поселениях Южного Заонежья белоглиняные горшки сходных форм употреблялись в XV–XVI вв. [4; 111]; [6; 99]; [13; 218. Табл. 46]; [16; 75, 113, 135, 136, 162. Рис. 9, 31, 32, 58: 2] и даже в Новое время [16; 77].

Таким образом, временной диапазон изучаемой нами керамики, возможно, охватывает период в 500 лет или более. Непосредственный интерес для нас представляет технология процесса изготовления бытовой посуды. Работа нацелена на решение следующих задач: во-первых, оценить возможности метода микрозондового анализа для исследования древней керамики; во-вторых, определить технологию составления формовочных масс трех наиболее ранних по времени появления типов посуды и, в-третьих, установить источник каолинового сырья, из которого изготовлена группа белоглиняной посуды городищ. Последняя задача непосредственно связана с исследованием, в ходе которого пробы гончарной керамики древнекарельских городищ изучались методом масс-спектрометрического анализа (ICP-MS) [14]. В результате удалось выделить три группы сосудов, глина для изготовления которых добывалась из трех разных источников: сосуды местного производства из красножгущейся глины, белоглиняные горшки и импортные изделия из красножгущейся глины. Напомним, что основным маркером для классификации формовочных масс стала концентрация редких и редкоземельных элементов (REE) в пробах.

Материал для исследования составили шесть образцов – два фрагмента сосудов из каолиновой

глины типов БII (М-2) и БIII (М-1), фрагменты гончарной керамики из красножгущейся глины типов I (М-5), II (М-4) и III (М-3), а также фрагмент новгородского горшка (М-6) из слабо ожезненной, но не каолиновой глины. Стадия подготовки образцов включала шлифование поверхности среза фрагмента с последующим ее напылением углеродом. Исследования состава и морфологии минералов осуществлялись на сканирующем электронном микроскопе VEGA 11 LSH фирмы Teskan с энергетической анализирующей приставкой INCA Energy Oxford Instruments. Каждый образец просматривался на предмет пористости, химического состава матрицы – основы формовочной массы (глины) и включений отошителя – дресвы или песка, для которого отдельно учитывались размеры и форма.

Итак, перейдем к результатам микронзондового анализа и рассмотрим группу образцов теста сосудов из красножгущихся глин (пробы М-3, М-4, М-5, М-6). Данные проведенного ранее ICP-MS анализа показали, что М-3 (рис. 1: III-Б) и М-4 (рис. 1: II-А) – пробы теста красноглиняных горшков являются продуктами местного гончарного производства, М-5 (рис. 1: I) – образец теста импортного сосуда, М-6 – образец теста сосуда, привезенный из Новгорода, обнаруженный там же в слоях Нутного раскопа 2010 г.

Основу формовочной массы всех проб, кроме М-6, составляют глинистые минералы иллит и монтмориллонит. Второстепенные минералы глинистых пород могут быть представлены кварцем, слюдами, полевыми шпатами и пр. Другими словами, естественной примесью в глине является мелкий или пылевидный песок (0,01–0,1 мм). По гранулометрической классификации частиц обломочных пород такая размерность зерен соответствует алевриту (0,001–0,05 мм) или тонкозернистому (0,05–0,1 мм) песку [9; 16]. В составе глинистой основы импортного (М-5) и новгородского (М-6) образцов присутствует биотит, однако зерна различаются размером и формой (М-5–0,03 мм, бесформенные зерна; М-6–0,15 мм, призматические кристаллы). Среди второстепенных минералов глинистой основы образца М-6, наряду с кварцем, был установлен альбит. Акцессорные минералы представлены цирконом и монацитом (М-5), апатитом и рутилом (возможно, анатазом) (М-6).

Образцы красноглиняной керамики местного производства отличаются по разнообразию состава второстепенных минералов глинистой основы. Для образца М-4 среди второстепенных минералов установлен только кварц, тогда как в состав формовочной массы образца М-3 входят такие второстепенные минералы, как мусковит, калиевый полевой шпат, альбит, олигоклаз (рис. 2). Акцессорные минералы представлены монацитом и ильменитом (М-4), а также гранатом (андрадитом) и магнетитом (М-3).

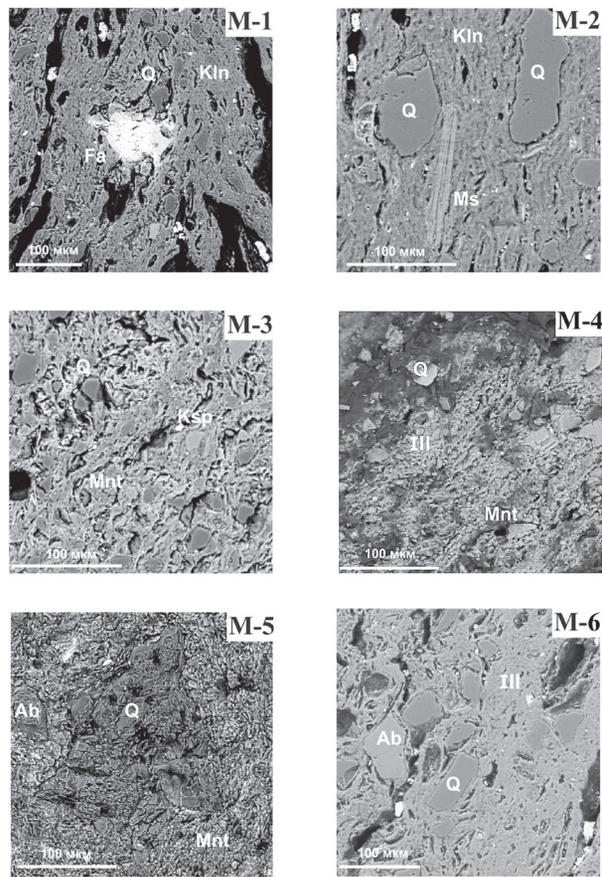


Рис. 2. Растровые электронно-микроскопические снимки образцов керамики. Обозначения минералов:

Kln – каолинит, Mnt – монтмориллонит, III – иллит, Q – кварц, Ms – мусковит, Fsp – калиевый полевой шпат, Fa – фаялит, Ab – альбит

Теперь перейдем к примесным фракциям – отошителю теста, который использовался гончаром в качестве добавки к глиняной массе и улучшал физико-технические характеристики сырья, т. е. глины, в процессе ее подготовки, и сосуда при формовке, сушке и обжиге. Для новгородского образца М-6 дресва представляет собой обломки породы, в состав которой входят кварц, альбит, калиевый полевой шпат, биотит с акцессорными минералами, такими как сфен и циркон. В качестве отошителя, вероятно, использовался элювий магматических пород кислого или среднего состава (возможно, гранит) или сами породы. Известно, что в гончарстве гранито-гнейсовая дресва широко употреблялась в качестве примесного компонента ввиду своей способности увеличивать огнестойкость изделий [1; 105]. В импортном образце М-5 примесь представлена зернами кварца, альбита и калиевого полевого шпата размером до 0,1–0,2 мм, однако различить отошитель и глинистую массу на шлифе данного образца крайне сложно (подробнее об этом будет сказано далее). Для образца красноглиняной керамики местного

производства М-4 отощитель просматривается в виде округлых или неправильной формы зерен кварца и альбита размером до 0,6 мм, а также короткопризматическими кристаллами калиевого полевого шпата. В образце М-3 примесью являются более крупные зерна кварца (0,5–2 мм) угловатой формы, а также округлые зерна плагиоклаза андезинового ряда. Состав примесной фракции указанных образцов, а также размер и форма зерен позволяют предположить, что в качестве отощителя для теста красноглиняной керамики местного производства использовался средний (М-4) и крупный песок (М-3).

Другая группа образцов представлена фрагментами сосудов, изготовленных из беложгущихся каолиновых глин (М-1 и М-2). Установлено, что в состав основы формовочной массы данных образцов М-1 (рис. 1: БП-Б) входит каолинит, хотя для образца М-2 (рис. 1: БП) он несколько обеднен алюминием и кремнием. Глина содержит естественную примесь кварца размером 0,03–0,05 мм. В качестве второстепенных минералов в составе глины образца М-1 присутствует микроклин, а для образца М-2 – мусковит. Акцессорные минералы представлены рутилом (М-1 и М-2) и ильменитом (М-2). Небольшое количество примесных минералов, преимущественно кварца, и устойчивых акцессорных минералов является характерной особенностью каолиновых глин [9; 146].

Как и в случае образца М-6, примесные фракции (отощитель) образцов М-1 и М-2 представлены обломками породы размером до 1 мм. Для образца М-1 состав обломков представлен альбитом, авгитом, фаялитом, микроклином, по которому развивается мусковит, а также акцессорными минералами альмандином и монацитом. Для образца М-2 в состав обломков входят альбит, калиевый полевой шпат, биотит, авгит с акцессорными минералами в виде апатита и циркона. Вероятно, в качестве отощителя для формовочной массы этих образцов использовался элювий магматических пород основного состава или сами породы. Особенность образца М-6 состоит в наличии некой органической примеси: в шлифе присутствуют образования, имеющие ячеистую структуру с углеродистыми стенками. По этнографическим и археологическим данным в качестве примеси для отощения керамического теста могли применяться древесная зола и толченый древесный уголь [1; 99]. Не исключено, что подобная примесь присутствует в составе теста образца М-6, однако этот вопрос требует уточнений.

Характеризуя структуру керамического теста, отметим, что для всех образцов, кроме импортного М-5, фиксируется наличие пористости массы, при этом у белоглиняных образцов пористость значительно выше, чем у красноглиняных. Особенность образца теста импортного сосуда (М-5)

заключается в том, что глина и примесь образуют почти монолитную массу. Несмотря на то что зерна калиевого полевого шпата и альбита дифференцируются на шлифе, границы их определить крайне трудно: визуально наблюдается практически полная спекаемость компонентов теста (рис. 2). Не исключено, что подобную структуру черепок приобрел вследствие обжига при более высокой температуре, чем изделия, с которых были взяты остальные пробы.

Изучив химический и минералогический состав глин и примесных фракций в образцах керамического теста отобранных образцов, можно сделать следующие заключения. Все красноглиняные сосуды, кроме новгородского (проба М-6), изготовлены из естественно отощенной или запесоченной глины⁹. Учитывая, что пробы теста М-3 и М-4 взяты с разнотипных горшков, употреблявшихся населением городищ, можно предполагать, что у средневековых карельских гончаров традиция отбирать сырье одинаковой пластичности сохранялась на протяжении длительного времени. Тем не менее проверка подобной гипотезы требует дальнейших работ в данном направлении. Итак, естественно запесоченная, или «тощая» (на языке гончаров), глина не требует введения грубого отощителя, например крупнозернистой дресвы. Видимо, поэтому в качестве примеси в керамическое тесто местные гончары использовали песок, который создает менее прочный кристаллический каркас для глиняной массы, не нарушая ее течение. В пластичную каолиновую глину, напротив, часто добавляется крупнозернистая дресва, предохраняющая глину от оползания при формовке сосуда и растрескивания в ходе интенсивной потери влаги при сушке и обжиге. Однако добавка песка не может расцениваться как особенность технологии, так как, отбирая образцы для анализа, мы сознательно выбрали несколько сосудов, в тесте которых просматривалась песчаная примесь.

Тем не менее все образцы теста красноглиняных сосудов отличаются по составу глинистой основы и входящих в нее второстепенных минералов. Забегая вперед, заметим, что различия наблюдаются и в составах примесных фракций. В отношении образцов теста сосудов местного производства (М-3 и М-4) можно заключить, что, несмотря на близость расположения источников сырья, гомогенного по происхождению, они не являлись единым местом добычи материала для производства керамических сосудов. В целом это закономерно – со временем поколения мастеров сменяли друг друга, изменялась технология составления формовочной массы, старые места добычи сырья забрасывались или истощались.

Образцы теста изделий из беложгущейся глины (М-1 и М-2) оказались несколько отлич-

ными друг от друга по минералогическому составу при общей принадлежности их глинистой основы к каолиновой группе. Как и в случае с образцами теста из красножгущейся глины, по-видимому, это связано с забором сырья из разных мест выходов пласта глин. Анализ примесного компонента образцов показал сходство в технологии изготовления белоглиняных сосудов (М-1 и М-2) и новгородского образца (М-6). В качестве примеси использована дресва, представляющая собой обломки породы размером до 1 мм. Подобное тождество может расцениваться как дополнительный аргумент в пользу утверждения о новгородском происхождении белоглиняных сосудов.

Задача определения источника каолинового сырья для производства белоглиняных горшков решалась путем сопоставления химического состава глинистого минерала с данными геохимии глин известных месторождений каолинитов. Для этого строились трехкомпонентные диаграммы, иллюстрирующие близость химических составов глин из различных месторождений на территории Российской Федерации. Наиболее значительные месторождения каолиновых глин находятся в Новгородской, Воронежской и Челябинской областях (рис. 3). При этом на Северо-Западе России, за исключением Новгородской области, обширных месторождений каолиновых глин нет [2; 19]. Крупные месторождения каолиновых глин имеются и на территории Украины. Результат сопоставления показал, что по химическому составу образцы теста белоглиняной керамики древнекарельских городищ близки глинам двух месторождений, расположенных в Воронежской и Новгородской (Боровичский район) областях. Мы склонны полагать, что само сырье, либо готовые изделия как предмет импорта, или тара для перевозки продуктов попадали на территорию древнекарельских городищ вероятнее из Новгородской, нежели Воронежской земли, учитывая тесные контакты древней Карелии и Новгорода в рассматриваемый период. Сходство также обнаруживается в технологии формовки служебной части белоглиняных сосудов из раскопок древнекарельских городищ и Новгорода: черновой край изделия прикреплялся к внутренней стороне венчика, после чего ему придавалась конечная форма. Сложность состоит в том, что появление керамики из каолиновых глин в Новгороде принято связывать со временем его вхождения

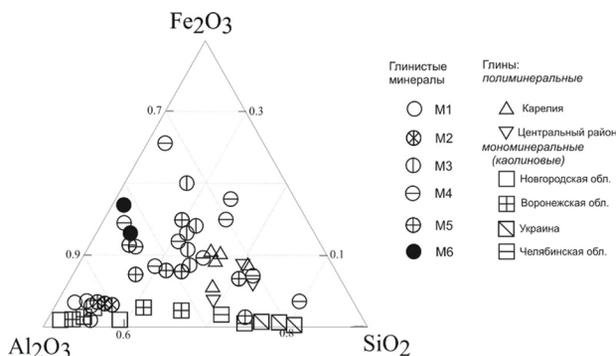


Рис. 3. Тройная диаграмма составов глинистых минералов керамики и глин различных месторождений [2], [3], [7], [12]

в состав Московского государства, т. е. с 1478 г. [15; 244, 247]; [11; 84], в то время как белоглиняные сосуды в близлежащем Орешке появляются с начала XIV в. [6; 99]. Несмотря на то что данный вопрос не представляется нам окончательно решенным и требует специального рассмотрения с привлечением надежных методик определения идентичности глинистого материала, мы предполагаем, что местом происхождения белоглиняных горшков, основу формовочной массы которых составляет каолинит, может считаться Новгородская область.

В результате проведенного исследования установлено, что микронзондовый анализ является эффективным инструментом для изучения технологии составления формовочных масс, используемых древними карелами в Средневековье для изготовления бытовой посуды. Абсолютное преимущество метода заключается в возможности точечного определения химического и минералогического состава как глинистой основы керамического теста, так и примеси – неорганических включений. Микронзондовый анализ образцов керамики позволяет вести наблюдения за структурой теста, а также подходит для выявления продуктов импорта в керамическом наборе памятника при наличии надежных образцов-эталонов. Недостатки метода электронно-зондовой микроскопии связаны в основном с временными затратами, обусловленными длительным процессом пробоподготовки и непосредственного анализа образцов. За пределами возможностей указанного метода остается идентификация органических примесей в тесте, хотя структура их успешно определяется.

ПРИМЕЧАНИЯ

¹ Римскими цифрами обозначены типы горшков из красножгущейся глины, аналогичными цифрами с индексом «Б» – типы белоглиняных горшков из светложгущейся глины.

² Сосуды аналогичной профилировки встречены в пластах второй половины X – начала XI века [13; 105, 284, 285. Табл. 112: 2; 113: 1, 2].

³ Сосуды типа II обнаруживают аналогии среди посуды Старой Лядоги XII–XIII веков [13; 307. Табл.: 135: 3]. Подобная форма керамики получает широкое распространение на Северо-Востоке Руси в XII веке [8; 128]. Сосуды с выемкой для крышки известны в Новгородской области с XIII века [11; 95]; [13; 72].

- ⁴ Схожая керамика встречена в слоях XII–XIII веков Старой Ладogi и Рюрикова Городища [13; 307. Табл. 135: 1; 210. Табл. 38: 5], в горизонтах начала XIV века обнаруживается в Новгороде и снова на Городище [11; 92, 95. Рис. 13], [13; 216. Табл. 44: 8, 14]. В Орешке аналогичные изделия бытуют вплоть до XV века [6; 47–49. Рис. 16: 26].
- ⁵ Аналогии формам посуды типа IV происходят из горизонтов XIII–XV веков Орешка, Новгорода, Рюрикова Городища [6; 47, 48. Рис. 16: 27]; [11; 87, 95]; [13; 213, 216. Табл. 41: 12, 44: 6].
- ⁶ Сосуды подобной формы зафиксированы в керамическом наборе Орешка [6; 47, 48. Рис. 16: 28].
- ⁷ Аналогии типу VI встречены в материалах керамической коллекции Орешка [6; 98. Рис. 31].
- ⁸ Белоглиняные сосуды обнаружены в Корельском городке в горизонтах 1310–1380 годов [6; 72, 73].
- ⁹ Установлено, что на запесоченность глины влияет присутствие в ней естественного песка с размером зерна до 0,5 мм [10; 55].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобринский А. А. Гончарство Восточной Европы. Источники и методы изучения. М.: Наука, 1978. 275 с.
2. Гальперина М. К. Глины России для производства керамических изделий: Обзорно-аналитический справочник. М.: ВНИИ-ЭСМ, 1992. 123 с.
3. Говорова Л. П. Физико-химические и структурно-минералогические особенности отечественного природного алюмосиликатного сырья // Ресурсоэффективным технологиям – энергию и энтузиазм молодых. Томск: Изд-во ТПУ, 2012. С. 9–11.
4. Кильдюшевский В. И. Об одном из типов керамики XIV–XVI вв. крепости Орешек // Краткие сообщения Института археологии. 1981. Вып. 164. С. 111–116.
5. Кирпичников А. Н. Историко-археологические исследования древней Корелы («Корельский город» XIV в.) // Финно-угры и славяне. Л., 1979. С. 52–74.
6. Кирпичников А. Н. Древний Орешек. Историко-археологические очерки о городе-крепости в истоке Невы. Л.: Наука, 1980. 124 с.
7. Крамаренко В. П. Каолиновая кора выветривания гранитоидных пород Украинского кристаллического щита // Каолиновые месторождения и их генезис. М., 1968. С. 46–53.
8. Лапшин В. А. Тверь в XIII–XV вв. (по материалам раскопок 1993–1997 гг.). СПб.: Факультет филологии и искусств СПбГУ, 2009. 540 с.
9. Логвиненко Н. В., Сергеева Э. И. Методы определения осадочных пород: Учеб. пособие для вузов. Л.: Недра, 1986. 240 с.
10. Лопатина О. А., Каздым А. А. О естественной примеси песка в древней керамике (к обсуждению проблемы) // Древнее гончарство: итоги и перспективы изучения. М.: ИА РАН, 2010. С. 46–57.
11. Малыгин П. Д., Гайдуков П. Г., Степанов А. М. Типология и хронология новгородской керамики X–XV вв. (по материалам Троицкого XI раскопа) // Новгород и Новгородская земля. 2001. Вып. 15. С. 82–97.
12. Митрофанов З. Т., Филинцев Г. П. Глины Карелии. Петрозаводск: Госиздат Карельской АССР, 1956. 160 с.
13. Носов Е. Н., Горюнова В. М., Плохов А. В. Городище под Новгородом и поселения Северного Приильменья // Труды Института истории материальной культуры РАН. Т. XVIII. СПб.: Изд-во «Дмитрий Буланин», 2005. 404 с.
14. Поташева И. М., Светов С. А. Геохимические исследования в археологии: ICP-MS анализ образцов круговой керамики древнекарельских городищ // Труды Карельского научного центра РАН. 2013. № 3. С. 136–142. [В печати].
15. Смирнова Г. П. Опыт классификации керамики древнего Новгорода: (По материалам раскопок 1951–1954 гг.) // Материалы и исследования по археологии. № 55. Труды новгородской археологической экспедиции. Т. 1. М., 1956. С. 228–248.
16. Спиридонов А. М., Герман К. Э., Мельников И. В. Южное Заонежье в X–XVI веках (археология центра Кижского погоста). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2012. 165 с.

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

Chzhengina S. Yu., Institute of Geology,
Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

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

**POSSIBILITIES OF USING ELECTRONIC MICROSCOPY (SEM) ANALYSIS
OF WHEEL-THROWN POTTERY SAMPLES IN STUDY OF ANCIENT KARELIAN
POTTERY PRODUCTION TECHNOLOGY USED IN MIDDLE AGES**

The paper is concerned with the research results of the white and red burned clay wheel-thrown pottery samples from ancient Karelian hillforts in North-Western Priladozhje. The results were obtained with the use of scanning electron microscope (SEM) techniques. The tasks of the research implied determination of ceramic paste composition technology used in production of the three earlier emerged types of vessels; identification of kaolinite deposits used for obtaining white-burning clay, and, finally; evaluation of the method's effectiveness in the study of ancient ceramics. Six specimens of ceramic pottery were examined. The method allowed us to determine the chemical and mineralogical composition of clays and admixtures in ceramic pastes' samples of wheel-thrown pottery from the following hillforts: Tiversk, Hämeenlahti-Linnavuori and Paaso. Ceramic paste specimens of Novgorod vessels were also studied. White-burned clay vessels, which composed a separate group, different from other ware in chemical composition of ceramic paste according to the ICP-MS analysis [Potasheva, Svetov 2013], are the products of import and most probably came from Novgorod region.

Key words: North-Western Priladozhje, ancient Karelians, wheel-thrown pottery, production technology, scanning electron microscope (SEM)

REFERENCES

1. Bobrinskiy A. A. *Goncharstvo Vostochnoy Evropy. Istochniki i metody izucheniya* [Pottery of Eastern Europe]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 275 p.
2. Gal'perina M. K. *Gliny Rossii dlya proizvodstva keramicheskikh izdeliy. Obzorno-analiticheskiy spravochnik* [Clays of Russia for ceramic production. Review and analytical reference book]. Moscow, VNII-ESM Publ., 1992. 123 p.
3. Govo-rova L. P. Physical-chemical and structural-mineralogical features of Russian natural aluminosilicate material [Fiziko-khimicheskie i strukturno-mineralogicheskie osobennosti otechestvennogo prirodno-go alyumosilikatnogo syr'ya]. *Resursoeffektivnym tekhnologiyam – energiyu i entuziazm molodykh* [Energy and enthusiasm of the young – to effective resources technologies]. Tomsk, TPU Publ., 2012. P. 9–11.
4. Kil'dyushevskiy V. I. On the one type of the XIV–XVI-th cc. pottery from Oreshek hillfort [Ob odnom iz tipov keramiki XIV–XVI vv. kreposti Oreshek]. *Kratkie soobshcheniya Instituta arkheologii* [Short messages of the Institute of Archaeology]. 1981. Is. 164. P. 111–116.
5. Kirpichnikov A. N. Historical-archaeological research of ancient Karelia (“Korela town” in XIV c.) [Istoriko-arkheologicheskie issledovaniya drevney Karelii (“«Korel'skiy gorod» XIV v.”)]. *Finno-ugry i slavyane* [Finno-ugrians and slavs]. Leningrad, 1979. P. 52–74.
6. Kirpichnikov A. N. *Drevniy Oreshek. Istoriko-arkheologicheskie ocherki o gorode-kreposti v istoke Nevy* [Ancient Oreshek. Historical-archaeological writing about the town-hillfort at the rise of the Neva river]. Leningrad, Nauka Publ., 1980. 124 p.
7. Kramarenko V. P. Kaolin weathering crust of Ukraine crystalline shield granitoid rocks [Kaolinovaya kora vyvetrivaniya granitoidnykh porod Ukrainskogo kristallicheskogo shchita]. *Kaolinovye mestorozhdeniya i ikh genesis* [Kaolonite deposits and its genesis]. Moscow, 1968. P. 46–53.
8. Lapshin V. A. *Tver' v XIII–XV vv. (po materialam raskopok 1993–1997 gg.)* [Tver in XIII–XV cc. On the materials of excavations in 1993–1997]. Saint Petersburg, Fakul'tet filologii i iskusstv SpbGU Publ., 2009. 540 p.
9. Logvinenko N. V., Sergeeva E. I. *Metody opredeleniya osadochnykh porod: Ucheb. posobie dlya vuzov* [Methods of sedimentary rocks determination. Course book for institutions of higher education]. Leningrad, Nedra Publ., 1986. 240 p.
10. Lopatina O. A., Kazdym A. A. On the natural sand admixture in ancient ceramics (on the problem discussion) [O estestvennoy primesi peska v drevney keramike (k obsuzhdeniyu problemy)]. *Drevnee goncharstvo* [Ancient pottery]. Moscow, IA RAN Publ., 2010. P. 46–57.
11. Malygin P. D., Gaydukov P. G., Stepanov A. M. Typology and chronology of Novgorodian pottery in X–XV cc. (on the material of Troitskiy XI excavation) [Tipologiya i khronologiya novgorodskoy keramiki X–XV vv. (po materialam Troitskogo XI raskopa)]. *Novgorod i Novgorodskaya zemlya* [Novgorod and Novgorodian land]. 2001. Is. 15. P. 82–97.
12. Mitrofanov Z. T., Filintsev G. P. *Gliny Karelii* [Clays of Karelia]. Petrozavodsk, Gosizdat Karel'skoy ASSR Publ., 1956. 160 p.
13. Nosov E. N., Goryunova V. M., Plokhov A. V. Hillfort near Novgorod and settlements of Northern Priilmenje [Gorodishche pod Novgorodom i poseleniya Severnogo Priil'men'ya]. *Trudy IIMK RAN* [Writings of Institute of Material Culture History]. Vol. XVIII. Saint Petersburg, Dmitriy Bulanin Publ., 2005. 404 p.
14. Potasheva I. M., Svetov S. A. Geochemical; research in archaeology: ICP-MS analysis of wheel-thrown pottery samples found in ancient Karelian hillforts [Geokhimicheskie issledovaniya v arkheologii: ICP-MS analiz obraztsov krugovoy keramiki drevnekarel'skikh gorodishch]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*. 2013. № 3 [Writings of the Karelian research centre of the Russian Academy of Sciences]. P. 136–142. [In press].
15. Smirnova G. P. Experience of ancient Novgorod pottery classification (On the materials of excavations in 1951–1954) [Opyt klassifikatsii keramiki drevnego Novgoroda: (Po materialam raskopok 1951–1954 gg.)]. *Materialy i issledovaniya po arkheologii* [Materials and studies on archaeology]. № 55. Trudy novgorodskoy arkheologicheskoy ekspeditsii. Vol. 1. Moscow, 1956. P. 228–248.
16. Spiridonov A. M., German K. E., Mel'nikov I. V. *Juzhnoe Zaonezh'e v X–XVI vekakh (arkheologiya tsentra Kizhskogo pogosta)* [Southern Zaonezhje in X–XVI centuries (archaeology of the Kizhskiy churchyard centre)]. Petrozavodsk, Karel'skiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2012. 165 p.

Поступила в редакцию 16.07.2013

НАТАЛИЯ ГЛЕБОВНА ФЕДОРЕЦ

доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры агрономии, землеустройства и кадастров агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
fedorets@krc.karelia.ru

АНТОН НИКОЛАЕВИЧ СОЛОДОВНИКОВ

ведущий почвовед лаборатории лесного почвоведения и микробиологии, Институт леса Карельского научного центра Российской академии наук (Петрозаводск, Российская Федерация)
solod@krc.karelia.ru

ВЛИЯНИЕ КОСТОМУКШСКОГО ГОРНО-ДОБЫВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА НА ПОЧВЫ ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ

Проведено исследование воздействия Костомукшского промышленного комплекса (ОАО «Карельский окатыш») на свойства почв в радиусе 10 км. Цель работы – получение количественных характеристик почвы для оценки ее состояния в условиях комплексного загрязнения серой и тяжелыми металлами. Полученные данные сравнили с почвенными характеристиками фоновой территории полигона интегрированного мониторинга «Камалаhti» в заповеднике «Костомукшский». Были зарегистрированы снижение почвенной кислотности и накопление серы, тяжелых металлов и железа по сравнению с почвами фоновых территорий. Основными источниками загрязнения являются карьер по добыче железной руды, центральная фабрика окомкования и отстойник промышленных вод. К приоритетным загрязнителям территории отнесены сера, железо, хром, никель, свинец, кобальт и марганец. Вокруг комбината сформировались зоны опасного и умеренного загрязнения, первая в радиусе 1–2 км, вторая – до 7–8 км вокруг комбината.

Ключевые слова: Костомукшское железорудное месторождение, почвы, вырубки, почвенная кислотность, сера, тяжелые металлы, железо, уровень загрязнения

ВВЕДЕНИЕ

Охрана окружающей среды от загрязнения является насущной задачей общества, прежде всего в странах с высокоразвитой индустрией. Среди основных загрязнителей почвы тяжелые металлы выделяются своей токсичностью. Они переносятся в атмосфере на большие расстояния от источников выбросов и при осадении оказывают негативное воздействие на окружающую среду. Сера, не являясь тяжелым металлом, при повышенных концентрациях в составе аэротехногенных поллютантов может оказывать отрицательное воздействие на природные объекты, подкисляя почвы. В последние годы наметилась тенденция прогрессирующего загрязнения почвенного покрова прилегающей к Костомукшскому горно-обогатительному комбинату (ОАО «Карельский окатыш») территории [11]. Поэтому систематические наблюдения за состоянием окружающей среды, в том числе почвенного покрова, в районе воздействия техногенных выбросов комбината являются важной задачей. Исследования проводились в рамках хозяйственного договора «Мониторинг геологической среды на Костомукшском железорудном месторождении» с ОАО «Карельский окатыш».

Целью работы являлась оценка состояния почвы в районе Костомукшского промышленного

узла в условиях комплексного загрязнения серой и тяжелыми металлами. Задачей – получение количественных характеристик состояния почвы путем литогеохимического опробования территории, включающей карьер по добыче руды, фабрику окомкования, отстойник промышленных вод и другие технологические структуры в радиусе 10 км.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Основными источниками загрязнения обследованной территории являются: горно-обогатительный комбинат, хвостохранилище, карьер, отвалы пустой породы, котельные и другие объекты Костомукшского промышленного узла, однако степень их воздействия на состояние почв не была определена. Программой выполнения научно-исследовательских работ были предусмотрены: сбор данных и анализ полученной информации в сопоставлении с литературными источниками и действующими нормативными материалами. Образцы почв отбирались в радиусе 10 км от отстойника обогатительной фабрики на различных категориях землепользования – это техногенные земли в районе промышленных объектов, почвы в лесных массивах, на вырубках, в районе дамбы обвалования, непосредственно возле отстойника, в районе



Схема расположения точек отбора почвенных проб в районе Костомукшского промузла

карьера по добыче железной руды и отвалов пустой породы. На рисунке показано расположение точек отбора проб.

В табл. 1 приводятся местонахождение точек отбора, названия почв, индексы генетических почвенных горизонтов, из которых отбирали пробы. Почвы различаются между собой по уровню увлажнения: подзолистые автоморфные, болотно-подзолистые полугидроморфные и торфяные гидроморфные. В сосновых, еловых и сосново-еловых лесах преобладают подзолы иллювиально-железистые песчаные, реже супесчаные, в условиях временного избыточного увлажнения распространены торфянистые подзолы иллювиально-гумусовые. Из гидроморфных почв широко представлены торфяные верхового и переходного типов. На вырубках почвы нарушены, особенно лесная подстилка, которая или уничтожена, или перемешана с минеральной частью почвы. Техногенные земли в районе дамбы, отстойника, фабрики окомкования и т. д. не имеют строения, присущего естественным почвам, генетические горизонты не выражены, а представляют собой слои, отличающиеся по цвету и плотности сложения.

В почвенных образцах по общепринятым методам [1], [2] определяли величину рН солевой вытяжки и валовое содержание серы, являющейся основным загрязнителем территории в районе Костомукшского горно-обогатительного комбината. Методом атомно-абсорбционной спектроскопии определили валовое содержание тяжелых металлов: марганца, кобальта, свинца, никеля, хрома, а также железа [12].

Оценка полученных результатов проводилась по нормативным документам [5], [6], [7], а также по литературным источникам [9].

Уровень подкисления почв и накопления серы установили путем сравнения данных почвенных показателей на полигоне Интегрированного мониторинга «Камалахти», расположенного на территории заповедника «Костомукшский» и считающегося условно чистой территорией, то есть фоном [3].

Основным критерием гигиенической оценки загрязнения почв химическими веществами, в том числе тяжелыми металлами, является предельно допустимая концентрация (ПДК) или ориентировочно допустимая концентрация (ОДК) их в почве. Оценка степени опасности загрязнения почвы химическими веществами проводится по каждому веществу, что может быть выражено коэффициентом $K_0 = C/ПДК$, где C – фактическая концентрация элемента в почве.

Также для оценки уровня загрязнения почвы использовались следующие показатели: коэффициент концентрации химического вещества (K_c), который определяется отношением его реального содержания в почве (C) к фоновому (C_f): $K_c = C/C_f$, и суммарный показатель загрязнения Z_c , рассчитываемый по формуле: $Z_c = \sum K_c - (n - 1)$, где n – количество загрязнителей. Оценка опасности загрязнения по приведенным коэффициентам проводится по разработанным оценочным шкалам [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние техногенного воздействия на почвенную кислотность. Исследованиями, проведенными до начала функционирования комбината, а также на полигоне «Камалахти» [3], установлено, что показатели рН верхних горизонтов подзолистых и торфяных почв находятся в пределах от 2,9 до 3,2. В большинстве точек исследования величина рН почв характерна для почв северной подзоны тайги Карелии, в которой и находится территория предприятия. Однако в районе ЦФО, товарной станции Костомукша, ЗРГО, а также на вырубках отмечено снижение почвенной кислотности до показателя рН от 4,0 до 5,5. В отдельных точках на территории дамбы обвалования пульпохранилища, карьера и отстойника отмечены показатели рН свыше 5,5. Особенно это касается грунтов дамбы, щелочность которых с глубиной повышается до рН 7–8 (точка 59). В целом следует отметить, что подщелачивание касается лесных подстилок и практически не затрагивает нижележащие почвенные горизонты. Выявленное подщелачивание лесных подстилок связано, вероятно, с выбросами щелочных и щелочно-земельных металлов как аэротехногенным путем [4], так и с пульпой пульпохранилища. Как известно, величина рН свыше 5,5 отрицательно отражается на росте и развитии древесных растений [4], [9].

Таблица 1

Характеристика местоположений точек отбора почвенных образцов

№	Месторасположение	Лес	Почва	Горизонты
1	Берег озера Подкова	С	подзол	A0, A2, Bf
4	Территория конторы лесхоза	Е+С	нарушенная	A0T, T1B, B2
5	Автоцех	С+Е	подзол	A0, A2, Bf
6	Центральный склад продукции	С+Е	подзол	A0, A2, Bf
7	2,5 км на сеv. от ГОКа	В	подзол	A0, A2, Bf
9	3,5 км на сеv. от ГОКа	Е	подзол	A0, A2, Bf
10	Дорога на водокачку	О+Б	нарушенная	Сл.1,Сл.2
11	Отстойник		торфяная	T1, T2
12	Отстойник	В	подзол	A0, A2, Bf
13	Отстойник	В	подзол	A0, A2, Bf
14	Отстойник	Е+С	подзол	A0, A2, Bf
15	Отстойник	О+Б	подзол	A0, A2, Bf
16	Дамба	О+Б	нарушенная	Сл. 1, Сл. 2, Сл. 3
17	Дамба	О+Б	подзол	A0, A2, Bf
18	Дамба	О+Б	насыпной грунт	Сл. 1, Сл. 2, Сл. 3
19	Товарная станция	М/л	торфяная	T1, T2
20	Юго-вост. от комбината	Е	подзол	A0, A2, Bf
21	Котельная	М/л	подзол	A0, A2, Bf
22	Электростанция	С	подзол	A0, A2, Bf
23	Котельная	М/л	торфяно-глеv.ая	A0T, B1g, B2g
24	ЗРГО, Болото		торфяная	A0T, T1, T2
25	Дорога на Вокнаволок	М/л	подзол	A0, A2, Bf
26	ЦФО	Е	подзол	A0, A2, Bf
28	Западный отвал	Е	подзол	A0, A2, Bhf
29	Дорога на пос. Боровой	С	подзол	A0, A2, Bf
30	Дорога на пос. Боровой	С	подзол	A0, A2, Bf
31	Дорога на пос. Боровой	С	подзол	A0, A2, Bf
32	Дорога на пос. Боровой	В	нарушенная	Сл. 1, Сл. 2, Сл. 3
33	Дорога на пос. Боровой, болото		торфяная	A0T, T1, T2
34	Дорога на пос. Боровой	Е	подзол	A0, A2, Bf
35	Дорога на Вокнаволок	С+Е	подзол	A0, A2, Bf
36	Дорога на Вокнаволок	В	подзол	A0, A2, Bf
37	Дорога на Вокнаволок	Е	подзол	A0, A2, Bf
38	Берег оз. Кореанги	С+Е	подзол	A0, A2, Bf
39	Дорога на Вокнаволок	С+Е	подзол	A0, A2, Bf
40	Сев.-зап. автомагистраль	С	подзол	A0, A2, Bf
42	ЦФО	М/л	подзол	A0, A2, Bf
43	Зап. от ГОКа. Перекресток	М/л	нарушенная	Сл. 1, Сл. 2, Сл. 3
44	Карьер	Б	подзол	A0, A1A2, A2
45	Склад в. в.	С+Е	подзол	A0, A1A2, A2
48	10 км сеv.-вост. от ГОКа	В	подзол	A0, A2, Bf
50	Лес у дамбы	С	подзол	A0, A2, Bf
52	11,5 км сеv. от ГОКа	В	торфянистый подзол	A0, A2g, Bh
53	10,5 км сеv.-вост. от ГОКа	В	подзол	A0, A2, Bf
54	11 км сеv.-вост. от ГОКа	С	торфяная	A0T, T1, T2
55	Берег оз. Окуневое	С	подзол	A0, A2, Bf
56	Берег оз. Попаляярви	С	торфяно-глеv.ая	A0T, T1, G
57	Дорога на Вокнаволок	В	подзол	A0, A2, Bf
58	7 км сеv.-вост. от ГОКа	С+Е	подзол	A0, A2, Bf
59	Дамба	М/л	насыпная	Сл. 1, Сл. 2, Сл. 3
60	Район дамбы	М/л	нарушенная	A0, A2Bf, A2B2
61	Восточный отвал	М/л	торфяная	A0T, T1, T2

Примечание. Сл. – слой; С – сосна; Е – ель; О – осина; Б – береза; В – вырубка; М/л – мелколесье; ГОК – горно-обогатительный комбинат; ЦФО – центральная фабрика окомкования; ЗРГО – завод по ремонту горного и обогатительного оборудования; склад в. в. – склад взрывчатых веществ.

Накопление серы в почвах. Проведенные нами исследования показали значительное накопление серы в лесных подстилках, практически во всех точках, превышающее фоновые показатели (табл. 2). Наименее загрязненными являются почвы, удаленные от комбината на расстояние более 7–8 км. Чем ближе к фабрике окомкования, тем накопление серы в подстилках выше. Наиболее загрязненными оказались лесные подстилки в точках, расположенных к юго-востоку от фабрики (табл. 2), где концентрация серы в почвах превышала фон в 2–9 раз.

Тяжелые металлы и железо. Основным источником металлов, поступающих в атмосферу и на поверхность почвы, является техногенная пыль. Попадая в атмосферу с пылью, тяжелые металлы рассеиваются вокруг источника. В районе комбината образовалась зона техногенного запыления и загрязнения тяжелыми металлами в радиусе 5–9 км [10], [11]. Определение содержания тяжелых металлов в почвах в радиусе 10 км позволило выявить особенности накопления различных металлов, их локализацию на обследованной территории,

Таблица 2

Коэффициенты концентрирования (K_c) тяжелых металлов, железа и серы в органогенных горизонтах почв в районе Костомукшского железорудного месторождения (радиус 10 км)

№ точки	Pb	Cr	Co	Ni	Fe	Mn	S
1	1,3	4,5	3,7	3,1	8,6	0,9	2,6
4	1,1	0,7	0,7	2,0	2,9	0,2	2,8
5	0,8	6,0	6,7	5,6	26,4	1,3	2,5
6	1,4	2,9	2,7	3,3	10,6	0,9	2,8
7	1,0	3,9	1,6	4,0	28,2	0,1	2,6
9	0,8	4,4	1,6	5,0	19,6	1,9	2,7
11	0,6	6,0	2,5	4,6	16,8	6,5	2,9
12	1,6	5,0	5,1	4,2	14,7	1,3	2,1
13	1,1	2,8	1,8	2,4	10,2	1,4	2,5
14	0,6	3,8	3,2	3,0	11,4	1,5	2,3
15	0,8	5,5	4,6	3,8	35,7	2,2	1,9
17	1,0	4,8	3,0	3,3	14,8	1,5	1,5
18	0,6	5,0	4,2	5,8	15,7	1,6	2,2
19	0,4	1,4	0,7	1,1	4,5	0,4	9,1
20	0,4	1,9	1,6	3,0	14,8	0,6	4,1
21	1,3	6,3	5,3	5,1	28,7	2,0	5,9
22	1,5	2,5	2,2	4,0	19,1	0,8	2,8
23	1,3	6,7	3,8	17,1	54,0	1,4	6,8
24	0,5	3,3	2,8	3,5	39,4	0,5	6,1
25	1,4	5,6	3,2	6,1	59,1	3,2	6,4
26	1,1	7,5	6,3	7,8	27,2	2,4	8,0
28	0,9	3,0	3,1	2,9	4,8	0,4	2,0
29	1,2	2,5	1,9	1,2	4,1	0,4	3,5
30	0,8	0,7	0,4	0,5	2,9	0,1	4,0
31	0,4	0,4	0,3	0,3	1,8	0,1	2,8
33	0,5	0,3	0,4	0,6	1,3	0,1	3,3
34	0,6	0,5	0,3	0,5	3,0	0,1	2,0
35	1,1	2,5	1,9	1,7	3,9	0,8	2,7
36	1,0	6,3	2,5	1,7	3,6	0,9	2,2
37	0,7	1,0	1,2	1,4	3,2	2,2	2,3
38	0,8	2,4	1,7	2,6	6,8	0,7	2,7
39	1,5	2,8	2,5	2,4	8,6	0,9	3,4
40	1,5	3,2	3,2	2,7	1,8	1,0	1,6
42	0,8	9,1	4,6	5,1	50,5	1,4	2,0
43	0,8	11,8	9,2	8,8	21,9	1,3	4,2
44	0,4	6,4	4,6	8,2	18,8	4,3	3,5
45	1,3	2,8	2,6	2,9	12,4	0,3	2,6
48	1,2	0,8	0,7	1,6	3,7	0,2	2,1
50	0,8	0,9	0,9	1,8	6,2	1,3	2,8
52	1,1	1,3	1,2	1,5	3,3	1,0	2,8
53	1,0	0,8	0,9	1,5	4,1	1,5	3,0
54	0,7	0,9	0,8	1,1	5,6	0,4	1,8
55	1,7	1,9	1,4	2,3	13,6	1,0	1,6
56	0,4	0,6	0,5	0,4	2,6	0,1	2,4
57	1,3	1,3	1,5	1,4	2,8	0,8	1,7
58	1,5	1,0	1,7	1,4	4,5	0,9	1,5
60	0,4	4,1	4,6	5,7	21,0	3,5	4,1
61	0,6	1,7	1,7	2,3	6,6	0,5	1,4

величину накопления, миграцию в глубь почвы, а также оценить уровень загрязнения почв комплексом загрязнителей. В табл. 3 показано среднее содержание тяжелых металлов и железа в почвах обследованной территории и колебание их концентраций.

Содержание свинца в почвах в радиусе 10 км вокруг Костомукшского месторождения невелико и составляет в органогенных горизонтах 1,75–46, среднее значение для обследованной территории – 23,8 мг/кг, то есть находится на уровне средних показателей для Карелии [10]. В минеральных горизонтах почв количество его колеблется от 7 до 45 (среднее – 21,8 мг/кг) (см. табл. 3). В почвах вокруг большинства объектов комбината отмечено его повышенное накопление, до 1,4 ПДК. Превышение фоновых показателей для Карелии выявлено в почвах ЦФО, отстойника, а также основных дорог и магистралей преимущественно в северо-восточном направлении от ГОКа. Наглядное представление о накоплении металлов в лесных подстилках дает коэффициент K_c , приведенный в табл. 2. Следует отметить, что повышенное содержание

свинца выявлено не только в лесных подстилках, которые служат геохимическим барьером на пути проникновения загрязнителей в более глубокие слои почвы, но и в минеральных горизонтах. Однако это наблюдается только в тех случаях, когда почвы нарушены и подстилка либо перемешана с нижележащими горизонтами, либо вовсе отсутствует.

Количество хрома в органогенных горизонтах исследованных почв колеблется от 2,3 до 118 (среднее – 29,2), в минеральных – от 10 до 230 мг/кг (среднее – 60,5). В большинстве точек вокруг комбината выявлено превышение концентрации хрома над фоновыми показателями для лесных подстилок, составляющее 25–600%. Несмотря на это, только на перекрестке дорог в 500 м на запад от ГОКа (точка 43) концентрация хрома в верхнем слое слегка превышает ПДК ($K_0 = 1,2$), то есть соответствует начальной стадии загрязнения.

Содержание кобальта в органогенных горизонтах почв на обследованной территории варьирует от 0,6 до 46,6, а в минеральных горизонтах от 8,0 до 100. Среднее содержание

Таблица 3
Средние показатели и пределы колебаний содержания тяжелых металлов в почвах (радиус 10 км) в районе Костомукшского железорудного месторождения, мг/кг

Элементы	Органогенные горизонты			Минеральные горизонты		
	Max	Min	Middle	Max	Min	Middle
Pb	45,9	1,7	23,8	45	7	21,8
Cr	118	2,3	29,2	230	10	60,5
Co	46,6	0,6	5,4	100	8,0	12,7
Ni	123,1	2,1	20,7	120	10	35,6
Fe	131 599	27 438	30 401	126 400	4300	27 738
Mn	2653	11,5	413	780	120	367,2

в лесных подстилках и торфяных горизонтах составляет 5,4, в минеральных – 12,7 мг/кг. Несмотря на достаточно низкие показатели содержания кобальта в нативных почвах изучаемого района, в органогенных горизонтах почв в радиусе 10 км от источников загрязнения отмечена значительная концентрация кобальта в отдельных случаях до 500–600 % по отношению к региональным фоновым показателям. Однако, несмотря на превышение над фоновыми показателями, концентрация кобальта в почвах не превышает ПДК.

В изучаемых почвах содержание никеля значительно выше, чем в среднем по Карелии, и колеблется в органогенных горизонтах от 2,1 до 123,1, среднее значение составляет 20,7 мг/кг. В минеральных горизонтах колебания составляют 10–120, среднее значение – 35,6 мг/кг. Превышение концентрации никеля над фоном в отдельных случаях близко к 800 %. Это перекрестки дорог на запад от ЦФО (точки 26, 43) и возле карьера (точка 44). В этих точках количество никеля превышает ПДК, что является начальной стадией загрязнения, причем в точке 23 составляет 2 ПДК. В целом в исследуемом районе накопление никеля редко достигает предельно допустимых концентраций.

Содержание марганца в обследованных почвах достаточно низкое. Количество соединений марганца в органогенных горизонтах почв колеблется от 11,5 до 2653, среднее значение – 413 мг/кг. Содержание данного элемента в минеральных горизонтах варьирует от 120 до 780, среднее составляет 403,8 мг/кг. В почвах вокруг комбината выявлено превышение фоновых показателей для лесных подстилок на 100–300 %. В лесных подстилках в районе 44-й точки (карьер) превышение составляет 400 %, а в районе точки 11, расположенной недалеко от отстойника у дороги на Вокнаволок, загрязнение подстилки марганцем составляет 600 %, что соответствует 1,2–1,8 ПДК.

Количество железа в исследуемых почвах высокое и колеблется в органогенных горизонтах в широких пределах от 2963 до 162 000, в среднем составляя 30 401 мг/кг. В минераль-

ных горизонтах – от 4300 до 126 400, средний показатель – 27 738 мг/кг. Превышение фоновых показателей отмечено практически на всей обследованной территории и составляет в лесных подстилках или верхних почвенных горизонтах на отдельных точках 39–59 раз. Это точки 23, 24, 25, расположенные к северо-востоку от главной фабрики окомкования, возле котельной и ЗРГО. В остальных местах содержание железа в подстилках выше, чем в среднем по Карелии, от 1,5 до 30 раз. Наименее загрязненными железом являются почвы в точках 31 и 32, находящиеся на значительном удалении от комбината и карьера (7–8 км).

Оценку показателя Zc проводили по ориентировочной оценочной шкале загрязнения почв [5], в которой выделены следующие категории загрязнения: допустимая (Zc менее 16), умеренно опасная (16–32), опасная (32–128), чрезвычайно опасная (более 128). К категории загрязнения, классифицируемой как «умеренно опасная», относятся районы обследования возле следующих объектов: склад готовой продукции (1 км на запад от ЦФО), отстойник, дамба обвалования пульпохранилища, склад взрывчатых веществ. Опасный уровень загрязнения почв выявлен в основном возле ЦФО и в отдельных точках, возле дамбы и отстойника (табл. 4).

Исследования почв в районе железорудного месторождения выявили, что основными аэротехногенными загрязнителями являются железо, хром, никель, свинец и кобальт. Интенсивное воздействие аэрополлютантов прослеживается примерно в зоне 1,5 км, умеренное загрязнение – в радиусе 5 км. По мере удаления от источника техногенных выбросов их воздействие на почвы ослабевает.

Опасное загрязнение почв выявлено в районе центральной фабрики окомкования, умеренное – на расстоянии до 1 км от карьера. Основными загрязнителями являются железо, марганец и никель.

Побережье отстойника промышленных вод характеризуется как опасно или умеренно загрязненное, приоритетные загрязнители – это железо, марганец, свинец, хром и кобальт.

Таблица 4

Суммарный показатель загрязнения органогенных горизонтов почв в районе Костомукшского железорудного месторождения (радиус 10 км)

№ точки	Горизонт	Zc	№ точки	Горизонт	Zc	№ точки	Горизонт	Zc	№ точки	Горизонт	Zc
1	A0	17	18	A0	28	31	A0	0	45	A0	17
4	A0	2,5	19	A0T	3,5	33	A0T	0	48	A0	3
5	A0	42	20	A0	17	34	A0	0	50	A0	7
6	A0	17	21	A0	43	35	A0	7	52	A0	4,5
7	A0	34	22	A0	25	36	A0	11	53	A0	5
9	A0	28	23	A0T	79	37	A0	5	54	A0T	4,5
11	T1	53,	24	A0T	45	38	A0	10	55	A0	17
12	A0	27	25	A0	73,5	39	A0	14	56	A0T	0
13	A0	15	26	A0	47	40	A0	8	57	A0	4
14	A0	18	28	A0T	10	42	A0	66,5	58	A0	6
15	A0	48	29	A0	6	43	A0	49	60	A0	34
17	A0	23	30	A0	0,2	44	A0	38	61	A0T	8,5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение почвенного покрова в 10-километровой зоне вокруг Костомукшского железорудного месторождения показало, что вместо ожидаемого подкисления происходит подщелачивание почв, особенно лесных подстилок, связанное с поступлением щелочных и щелочноземельных металлов аэротехногенных выбросов комбината. В связи с антропогенными нагрузками, которые испытывает данная территория, происходит деградация морфологического строения почв. В почвах возросло общее содержание серы, которое превышает фоновые показатели в 2–9 раз.

Выявлено накопление тяжелых металлов в почвах по сравнению с фоновыми территориями. Основными загрязнителями почв являются центральная фабрика окомкования, отстойник и карьер.

Вокруг комбината сформировались зоны опасного и умеренного загрязнения, первая в радиусе 1–2 км, вторая – до 7–8 км.

В зависимости от источника меняются приоритетные загрязнители. Вокруг комбината выстраивается следующий ряд по мере снижения интенсивности накопления тяжелых металлов: железо, хром, никель, свинец, кобальт, марганец. Вокруг карьера: железо, никель, марганец, хром, кобальт, свинец. В районе отстойника промышленных вод: железо, марганец, свинец, хром, кобальт, никель.

Установлена необходимость сохранения лесных подстилок, являющихся геохимическим барьером на пути поступления аэротехногенных загрязнителей в минеральные горизонты почвы.

В связи с вышеизложенным авторы считают нежелательным проведение рубок леса на территории, которая испытывает существенные антропогенные нагрузки, связанные с деятельностью комбината.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агрохимические методы исследования почв / Под ред. А. В. Соколова. М.: Наука, 1975. 656 с.
2. Ариушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1961. 491 с.
3. Интегрированный экологический мониторинг в Карелии / Под ред. В. А. Коломыцева, Г. В. Шильцовой. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1998. 115 с.
4. Лазарева И. П., Кучко А. А., Кравченко А. В., Габукова В. В., Литинский П. Ю., Поташева М. А., Калинин Н. М. Влияние аэротехногенного загрязнения на состояние сосновых лесов северной Карелии. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1992. 51 с.
5. Руководство по санитарно-химическому исследованию почвы: (Нормат. материалы). М.: Гос. ком. сан.-эпидемиол. надзора России, Рос. респ. информ.-аналит. центр, 1993. 130 с.
6. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) тяжелых металлов и мышьяка в почвах с различными физико-химическими свойствами (валовое содержание, мг/кг) (Дополнение № 1 к перечню ПДК и ОДК № 6229–91). Гигиенические нормативы. ГН 2.1.7.020-94. М., 1994.
7. Методические указания МУ 2.1.7.730-99 «Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест». М., 1999. 38 с.
8. Методические указания по оценке степени опасности загрязнения почвы химическими веществами. М.: Минздрав СССР, 1987. 25 с.
9. Рэуце К., Кырстя С. Борьба с загрязнением почвы. М.: Агропромиздат, 1986. 222 с.
10. Федорец Н. Г., Дьяконов В. В., Литинский П. Ю., Шильцова Г. В. Загрязнение лесной территории Карелии тяжелыми металлами и серой. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1998. 47 с.
11. Федорец Н. Г. Загрязнение почвенного покрова тяжелыми металлами и серой в районе Костомукшского железорудного комплекса // Материалы VI съезда Общества почвоведов им В. В. Докучаева, Всероссийской с международ-

- ным участием конференции «Почвы России: современное состояние, перспективы изучения и использования». Кн. 3. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2012. С. 253–254.
12. Manual for Integrated Monitoring. Environment Data Centre / National Board of Waters and the Environment. Helsinki, 1993. 114 p.

Fedorets N. G., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Solodovnikov A. N., Forest Research Institute, Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

EFFECT OF KOSTOMUKSHA MINING AND ORE DRESSING COMPLEX ON SOILS IN ADJACENT AREAS

The effect caused by Kostomuksha industrial complex (Karelian Pellet JSC) on the properties of soils within the 10 km radius was studied. The aim was to obtain quantitative characteristics of the soil and to assess its quality in conditions of combined sulphur and heavy metal pollution. Soil acidity (salt extract pH) and sulphur content in the soil were determined by the techniques widely used in soil science. The amount of heavy metals was determined by atomic absorption spectrophotometry. The resultant data were compared with the soil characteristics from the reference area of the integrated monitored polygon Kamalahti in Kostomuksha Nature Reserve. We observed reduction in soil acidity, accumulation of sulphur, heavy metals, and iron when compared with the soils from the reference areas. The main pollution sources are the iron ore quarry, the pelletizing plant, and the wastewater sump. Major pollutants of the territory are sulphur, iron, chromium, nickel, lead, cobalt, and manganese. The complex is surrounded by heavy and moderate pollution zones – the former within the 1–2 km radius, and the latter within the 7–8 km radius.

Keywords: Kostomuksha industrial complex, soils, cutting area, soil acidity, sulfur, heavy metals, iron, pollution

REFERENCES

1. *Agrokhimicheskie metody issledovaniya pochv* [Agrochemical methods of soil studies] / Ed. A. V. Sokolov. Moscow, Nauka Publ., 1975. 656 p.
2. Arinushkina E. V. *Rukovodstvo po khimicheskoy analizu pochv* [Manual of soil's chemical analysis]. Moscow, MGU Publ., 1961. 491 p.
3. *Integrirovannyi ekologicheskiy monitoring v Karelii* [Integrated ecological monitoring in Karelia] / Ed. V. A. Kolomytseva, G. V. Shil'tsova. Petrozavodsk, 1998. 115 p.
4. Lazareva I. P., Kuchko A. A., Kravchenko A. V., Gabukova V. V., Litinskiy P. Yu., Potasheva M. A., Kalinkina N. M. *Vliyaniye aerotekhnogennogo zagryazneniya na sostoyaniye sosnovykh lesov severnoy Karelii* [Effect of air-borne industrial pollution on condition of pine forests in northern Karelia]. Petrozavodsk, 1992. 51 p.
5. *Rukovodstvo po sanitarno-khimicheskoy issledovaniyu pochvy: (Normat. materialy)* [Manual on sanitary chemical soil surveys: (standards)]. Moscow, 1993. 130 p.
6. *Orientirovochno dopustimyye kontsentratsii (ODK) tyazhelykh metallov i mysh'yaka v pochvakh s razlichnymi fiziko-khimicheskimi svoystvami (valovoye sodержание, mg/kg) (Dopolneniye № 1 k perechnyu PDK i ODK № 6229-91). Gigienicheskiye normativy. GN 2.1.7.020-94* [Approximate allowable concentrations (AAC) of heavy metals and arsenic in soils with different physical-chemical properties (gross content, mg/kg)]. Moscow, 1994.
7. *Metodicheskiye ukazaniya MU 2.1.7.730-99 "Gigienicheskaya otsenka kachestva pochvy naselennykh mest"* [Procedural guidelines MY 2.1.7.730-99 Hygienic assessment of the soil quality in populated areas]. Moscow, 1999. 38 p.
8. *Metodicheskiye ukazaniya po otsenke stepeni opasnosti zagryazneniya pochvy khimicheskimi veshchestvami* [Procedural guidelines on the assessment of the degree of hazard of soil chemical pollution]. Moscow, 1987. 25 p.
9. Reutse K., Kyrstya S. *Bor'ba s zagryazneniem pochvy* [Tackling soil pollution]. Moscow, 1986. 222 p.
10. Fedorets N. G., D'yakonov V. V., Litinskiy P. Yu., Shil'tsova G. V. *Zagryazneniye lesnoy territorii Karelii tyazhelymi metallami i seroy* [Heavy metal and sulphur pollution of forest land in Karelia]. Petrozavodsk, 1998. 47 p.
11. Fedorets N. G. Heavy metal and sulphur pollution of the soil cover around Kostomuksha mining and ore-dressing complex [Zagryazneniye pochvennogo pokrova tyazhelymi metallami i seroy v rayone Kostomukshskogo zhelezorudnogo kompleksa]. *Materialy VI s'yezda Obshchestva pochvedovedov im V. V. Dokuchaeva, Vserossiyskoy s mezhduнародnym uchastiem konferentsii "Pochvy Rossii: sovremennoye sostoyaniye, perspektivy izucheniya i ispol'zovaniya"* [Proceedings of the 6th Congress of the Dokuchaev Soil Science Society, national with international participation "Soils of Russia: Current State, Perspectives for Study and Use"]. Petrozavodsk, 2012. P. 253–254.
12. Manual for Integrated Monitoring. Environment Data Centre / National Board of Waters and the Environment. Helsinki, 1993. 114 p.

Поступила в редакцию 30.08.2013

ЕВГЕНИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ ЛОПАТИН

кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник Школы лесных наук, Университет Восточной Финляндии (Йоенсуу, Финляндия)
lopatin@forgis.ru

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ ПРИРОСТА ОСНОВНЫХ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ПОРОД ПО ВРЕМЕННЫМ СЕРИЯМ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ*

Потребность в качественной актуальной информации о лесах регионов России постоянно возрастает. Цель исследования – разработать методику идентификации изменения продуктивности лесов Северо-Запада России путем использования комбинации данных дистанционного зондирования и дендрохронологического анализа. Значительные корреляционные коэффициенты между годовыми кольцами в Республике Коми и интегрированными значениями NDVI с июня по август показывают, что интегрированные значения NDVI могут быть использованы в качестве косвенных данных для оценки трендов роста леса в масштабе целого региона.

Ключевые слова: текущий прирост, ель, сосна, возраст дерева, космические снимки

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время информация о лесном фонде в Российской Федерации собирается в ходе проведения лесоустройства и государственной инвентаризации лесов. По данным Канадской службы лесов, информация о лесном фонде территории устаревает в среднем на 10% в год [7]. При этом активизация деятельности лесозаготовителей и интенсификация лесопользования на арендованных участках требуют постоянной актуализации информации о лесном фонде.

Согласно нормативам, лесоустройство должно проводиться раз в 10 лет. В настоящее время объем лесоустроительных работ резко сократился, а государственная инвентаризация лесов не дает результатов, позволяющих компенсировать сокращение лесоустроительных работ. На Всероссийской конференции по лесоустройству, проводившейся в Новосибирске в ноябре 2012 года, было заявлено, что на 70% территории России срок давности проведения лесоустройства более 20 лет. Поэтому использование устаревшей информации о состоянии лесов региона дает заведомо ложные показатели.

Ключевым параметром, определяемым при лесоустройстве, является запас насаждения. При проведении государственной инвентаризации лесов большее значение имеет динамика изменения прироста. Проведенные нами исследования показали большую вариативность в приросте по диаметру и высоте, а также в факторах, влияющих на него при оценке больших регионов, таких как Северная Европа. Было показано, что существует статистически значимая корреляция между значениями временных серий вегетационного индекса и данным по приростам древесины [6]. Для осуществления анализа этой связи на территории Северной Европы требуется база данных

по приростам древесины на всей этой территории. В настоящем исследовании проведен анализ связи приростов с вегетационными индексами и построена карта, отражающая изменение прироста древесины бореальных лесов Европы.

Цель исследования – разработать методику идентификации изменения продуктивности бореальных лесов Скандинавских стран и Северо-Запада России путем использования комбинации данных дистанционного зондирования и дендрохронологического анализа. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- гармонизировать дендрохронологические базы данных радиальных приростов по диаметру на территорию Северо-Запада России с собственными данными для совместного анализа;
- провести подбор временных серий космических снимков из Интернета для построения временных серий вегетационных индексов;
- провести анализ взаимосвязей между вегетационными индексами и шириной годичных колец за последние десятилетия;
- построить карту изменения продуктивности лесов Северо-Запада России на основе статистического анализа временных серий космических снимков и данных по радиальному приросту деревьев.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Для выполнения работы использованы космические снимки, дендрохронологические данные, доступные в Интернете и собранные в ходе проведения экспедиций. Доступные дендрохронологические базы данных на территорию Северной Евразии и материалы собственных по-

левых исследований были гармонизированы для совместного анализа и сведены в общую базу данных единого формата. На основании временных серий космических снимков из Интернета (спутники NOAA и Terra, ведущие съемку низкого пространственного разрешения) были рассчитаны временные серии вегетационных индексов. На основе анализа данных по росту лесов были получены зависимости между радиальным и апикальным приростами и временными сериями вегетационных индексов. Это позволило создать карту изменения продуктивности лесов Северной Европы. На основе статистического анализа взаимосвязей роста лесов и вегетационных индексов построена карта ошибки прогнозирования изменения продуктивности.

Материал для определения взаимосвязи между продуктивностью участка леса и динамикой вегетационных индексов был собран по трансекте с юга Республики Коми (подзона южной тайги бореальных лесов) до арктической границы распространения ели. Деревья отбирались в пяти природно-территориальных комплексах Республики Коми. Для оценки динамики прироста были выбраны здоровые деревья, находящиеся вне конкуренции, разных классов возраста, в средних условиях (II–III класс Крафта). Древостои были сгруппированы согласно их положению относительно подзона тайги. Всего для анализа было отобрано 118 деревьев в 6 древостоях. Измерение ширины годовых колец производилось в дендрохронологической лаборатории с использованием системы анализа изображений WinDENDRO (Regent Instruments Inc.). На территории Республики Коми пробные площади закладывались в крупных, нетронутых участках лесного фонда. Для этого производился поиск участков по материалам лесоустройства и данным дистанционного зондирования среднего разрешения (ASTER, Landsat ETM+). Целью этого поиска было найти участки площадью более 64 км², что соответствует одному пикселю базы данных GIMMS-NDVI.

Для проведения исследований была использована база данных Университета Восточной Финляндии (<http://www.joensuu.fi/kti/saima/jestoen.htm>), которая располагает данными измерений годовых колец около 5000 деревьев из Финляндии, Швеции, Норвегии и России. Всего в базе данных на исследуемый регион находилось 477 хронологий. В результате анализа периодичности и типа данных, который производился в программном продукте TSAP (Rinntech, Германия), было отобрано 38 хронологий. Они представлены общей шириной годового кольца и покрывают временной отрезок от 1990 года и далее. Временные серии, заканчивающиеся в 1990–1992 годах, были исключены из анализа. Для совместного анализа из базы данных на территорию Республики Коми и базы дендрохронологических данных на территорию Северо-Запада России (база данных из Финляндии) были отобраны хронологии годич-

ных колец за период с 1981 по 2005 год. При этом использовались не построенные хронологии, а сырые данные измерений годовых колец. Сырые измерения были кросс-калиброваны с целью выявления ошибок при измерениях с использованием программы COFETCHA [5].

После получения единого массива дендрохронологических данных в виде ширины годовых колец они были стандартизированы с помощью программного продукта ARSTAN [5]. Стандартизация дендрохронологических данных проводилась с целью очистки временных серий от эффектов старения деревьев, конкуренции, влияния различных эндогенных факторов, которые отражаются в годовых кольцах деревьев. Стандартизация позволяет сравнивать дендрохронологические данные, полученные в различных природно-климатических условиях [4]. Стандартизация была проведена по методу сплайна с частотой 60 лет и 50% функцией ответа. Этот подход позволяет значительно усилить общий сигнал в хронологиях, особенно в сериях с небольшим количеством деревьев. Более подробно процесс и методы стандартизации описаны в классической литературе по дендрохронологии [2], [3], [4]. Практическая реализация в специализированном бесплатном программном обеспечении дана в описании библиотеки дендрохронологических программ [5].

Так как многие современные системы дистанционного зондирования Земли осуществляют съемку в видимой красной и ближней инфракрасной частях спектра, распространенным методом является вычисление нормализованного вегетационного индекса (NDVI). Нормализованный вегетационный индекс показывает наличие и состояние растительности по соотношению отраженных энергий в двух спектральных каналах. Эта зависимость основана на различных спектральных свойствах хлорофилла в видимом и ближнем ИК-диапазонах. NDVI вычисляется для каждого пикселя снимка как отношение разности между каналами к их сумме: $NDVI = (ИК - К) / (ИК + К)$. Облака, снег и водные поверхности дают отрицательное значение индекса. Для растительности значение NDVI составляет 0,1–0,6.

Спутники NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, США) оборудованы сканером AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) с 4–5 широкими спектральными диапазонами, снимающим в видимом, ближнем и дальнем (тепловом) ИК-диапазонах, разрешением около 1,1 × 1,1–1,1 × 4 км в зависимости от диапазона и угла съемки. AVHRR обеспечивает глобальный сбор данных по всем каналам, полоса съемки имеет ширину 2400 км, спутник облетает Землю 14 раз в сутки. Обширные и актуальные данные в AVHRR (с 1981 года по настоящее время) с разрешением 8 км доступны в Интернете. Данные NOAA представляют очень большой

интерес с точки зрения картографирования динамики долговременных процессов, так как в настоящее время это единственный источник данных с необходимым временным разрешением за достаточно большой период времени. В работе использовались временные серии вегетационных индексов, полученные в рамках программы GIMMS (The Global Inventory Modeling and Mapping Studies, Глобальные исследования по обследованию, картографированию и мониторингу). База данных представлена информацией в растровом формате по значениям вегетационного индекса за период спутниковых наблюдений (22 года). Нормализованные вегетационные индексы GIMMS [1] получены на основе калибровки данных, включающей в себя геометрическую коррекцию, поправку на смещение орбиты, поправку на эмиссию вулканических аэрозолей и другие эффекты, связанные с изменением растительности. База данных GIMMS была получена через веб-сайт университета Мериленда (<http://glcf.umiacs.umd.edu/data/gimms>). Общий объем базы данных на территорию Евразии составил около 8 Гбайт (15-дневные средние значения NDVI). Растровые данные были импортированы в программный продукт ArcGIS, проведена оценка точности их совмещения. Так как значения NDVI представляют собой безразмерные индексные величины, варьирующие от -1 до 1, данные были усреднены по годам. Для усреднения использовались значения NDVI с июня по август. Значения NDVI за вегетационный период по годам были получены в растровом формате за период с 1982 по 2003 год (22 года). После усреднения из базы данных была подготовлена вырезка растровых данных на территорию Северо-Запада России (Северо-Запад Российской Федерации, Финляндия, Швеция, Норвегия).

Для анализа связи динамики радиального прироста и вегетационных индексов были отобраны пиксельные значения из базы данных GIMMS. В предыдущих исследованиях было показано [8], что во время основного периода роста (календарные дни с 90-го по 270-й с начала года) полученные данные со спутника NDVI сильно коррелировали с продуктивностью деревьев. Однако если рассматривать данные за целый год, корреляции были низкими, то есть большие отличия приходились на зимний период. Поэтому нами для расчета корреляционных коэффициентов между NDVI и стандартизированными сериями годовых колец были использованы среднемесячные суммы NDVI с июня по август за период с 1981 по 2003 год.

Корреляционные коэффициенты между суммами значений индекса NDVI были рассчитаны для всех отобранных хронологий на территорию Северной Европы. Для этого данные были экспортированы в программный продукт ERDAS Imagine в виде 22-канального растрового изображения. В геоинформационной системе построены

буферные зоны вокруг мест сбора проб деревьев (диски и керны), равные размеру одного пикселя GIMMS-NDVI (8 км). По построенным буферным зонам были извлечены годовые данные по пикселям в пределах, в которых располагались пробные площади. В программном продукте SPSS был выполнен их корреляционный анализ с данными по годовым приростам деревьев.

Тренды в GIMMS-NDVI-пикселях были определены посредством непараметрических корреляционных коэффициентов Спирмана (*r-Spearman*) с использованием ежегодных сумм значений NDVI с июня по август и одним временным рядом в годах (то есть в ряду GIMMS-NDVI 1982 год рассматривался как первый год, 2003-й – как двадцать второй год). Значения *r* показывают, были ли статистически значимыми тренды в развитии растительности. Положительные и высокие значения указывают на увеличение прироста, а отрицательные означают негативный тренд. Тренды считались статистически значимыми при $p < 0,1$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В Республике Коми стандартизированные серии ширины годовых колец коррелировали с суммами NDVI в июне – августе (табл. 1).

Таблица 1
Связь временных серий вегетационных индексов с временными сериями стандартизированной ширины годовых колец

Номер участка	Природно-территориальные комплексы	Ель европейская		Сосна обыкновенная	
		количество деревьев	корреляция Пирсона	количество деревьев	корреляция Пирсона
1	Лесотундра	12	0,565**	–	–
2	Северная тайга	14	0,522*	14	0,445*
3	Средняя тайга (восток)	40	0,453*	45	0,593*
4	Средняя тайга (запад)	51	0,272	5	0,056
5	Южная тайга	9	0,565*	21	0,085

Примечание. * – корреляция значима на уровне 0,05; ** – корреляция значима на уровне 0,01.

Корреляция не наблюдалась в западной части подзоны средней тайги. Кроме того, не обнаружено корреляции между шириной годовых колец сосны и временного ряда NDVI в подзоне южной тайги. Значительные корреляционные коэффициенты между шириной годовых колец и интегрированными значениями NDVI с июня по август показывают, что интегрированные значения NDVI могут быть использованы в Республике Коми в качестве косвенных данных для оценки трендов роста леса в масштабе целого региона.

Из международной базы данных Университета Восточной Финляндии были отобраны древесно-кольцевые хронологии на территорию Северной Европы. Всего были проанализированы 138 древесно-кольцевых хронологий ели, сосны и лиственницы.

Из 138 древесно-кольцевых хронологий были отобраны 42 хронологии, покрывающие период с 1990 года и далее (то есть 9 лет и более). Эти хронологии использовались для изучения связи временных серий вегетационных индексов со стандартизированной шириной годичных колец. Большинство хронологий показали отсутствие статистически значимой корреляции между значениями вегетационных индексов и шириной годичных колец. Однако анализ уровней статистической значимости (по критериям Пирсона и Спирмана), рассчитанный на основе этих данных, показал, что причиной отсутствия корреляции в данных является сравнительно малое количество лет в данных древесно-кольцевых хронологий. Большинство ядер и дисков в базе данных Университета Восточной Финляндии были собраны в период с 1990 по 1995 год. Это позволяет использовать для исследования корреляционных связей период в 9–14 лет. Все хронологии, покрывающие период 18 лет и более, показали статистически значимую корреляцию между радиальным годичным приростом и наблюдениями со спутников. Статистически значимые корреляции временных серий вегетационных индексов с временными сериями стандартизированной ширины годичных колец в Северной Европе приведены в табл. 2.

Таблица 2

Статистически значимая связь временных серий вегетационных индексов с временными сериями стандартизированной ширины годичных колец в Северной Европе

Код хронологии в ITRDB	Порода дерева	Коэффициент корреляции Пирсона	Уровень значимости
finl002	Сосна обыкновенная	0,335*	0,026
finl003	Сосна обыкновенная	0,852**	0,000
russ083	Сосна обыкновенная	0,657*	0,200
russ118	Сосна обыкновенная	0,588*	0,040

Примечания. * – корреляция значима на уровне 0,05; ** – корреляция значима на уровне 0,01.

Таким образом, анализ данных по Северной Европе позволяет сделать вывод, что есть статистически значимая связь между временными сериями годичного радиального прироста хвойных и временными сериями нормализованного вегетационного индекса. Это позволяет использовать NDVI как источник косвенных данных для оцен-

ки изменения продуктивности лесов. Отсутствие корреляции в большинстве серий на территорию Северной Европы объясняется отсутствием данных в сериях годичного прироста за последние десятилетия. Наши данные по Республике Коми показали, что в 7 современных хронологиях из 9 есть статистически значимая связь. Расширение сети современных хронологий и обновления имеющихся хронологий новыми данными позволит получить более детальные данные по силе и пространственному распределению связи годичного прироста различных древесных пород и вегетационных индексов.

Статистический анализ данных NDVI из базы GIMMS позволил построить карту изменения продуктивности лесов Северной Европы. Для этого были рассчитаны тренды в данных NDVI. Была построена карта ошибки прогнозирования (уровень статистической значимости 0,05). Причиной низкой статистической значимости трендов в данных NDVI на северные регионы являются высокодинамичная фенология растительности тундры и лесотундры, более короткий вегетационный период этих экотонных по сравнению с подзонами тайги и высокая облачность в высоких широтах.

Сравнение статистически значимых трендов в данных NDVI по странам Северной Европы и административно-территориальным единицам Северо-Запада России приведено в табл. 3.

Выявлено, что достоверно статистически значимое изменение продуктивности лесов за период с 1981 по 2003 год произошло на 23 % территории Северной Европы. При этом зарегистрировано как увеличение, так и сокращение продуктивности лесов. При использовании временных серий вегетационных индексов, построенных по архивным снимкам метеорологических спутников, изменение продуктивности лесов обнаруживается на 16 % территории Северо-Запада России. Однако нельзя утверждать, что изменения произошли только на этой части исследуемого региона, скорее всего, это лимитировано только качеством данных дистанционного зондирования. Тренды в данных NDVI были выявлены в 60 % пикселей, но статистически значимыми из них оказались только 16 %.

Общее среднее увеличение продуктивности лесов Северной Европы за период с 1981 по 2003 год произошло на 0,83 %. Полученный результат достоверен для 23 % территории района исследований. Наибольшее изменение продуктивности лесов – в Калининградской области (достоверно для 0,5 % территории). Продуктивность также увеличилась в других регионах Северо-Запада России: на 10 % – для 9 % площади Ненецкого автономного округа, на 25 % – для 2 % Псковской области, на 30 % – для 6 % Республики Карелия, на 5 % – для 15 % Республики Коми. Продуктивность сократилась на 7 % – для 11 % территории

Таблица 3

Изменение продуктивности лесов по данным NDVI в Северной Европе

Регион	Общее количество пикселей в базе данных GIMMS	% от территории региона	Количество пикселей со статистически значимыми трендами	% от общего числа проанализированных пикселей	Количество пикселей с увеличившейся продуктивностью лесов	% пикселей с увеличением продуктивности от общего числа пикселей с трендами	Количество пикселей с сократившейся продуктивностью лесов	% пикселей с сокращением продуктивности от общего числа пикселей с трендами	Увеличение продуктивности лесов по регионам, %
Архангельская область	4811	11,1	1564	32,51	732	46,80	832	53,20	-6,39
Калининградская область	210	0,5	80	38,10	62	77,50	18	22,50	55,00
Ленинградская область	1327	3,1	397	29,92	172	43,32	225	56,68	-13,35
Мурманская область	2255	5,2	104	4,61	47	45,19	57	54,81	-9,62
Ненецкий автономный округ	4287	9,9	20	0,47	11	55,00	9	45,00	10,00
Новгородская область	864	2,0	279	32,29	97	34,77	182	65,23	-30,47
Псковская область	847	2,0	277	32,70	173	62,45	104	37,55	24,91
Республика Карелия	2705	6,2	820	30,31	532	64,88	288	35,12	29,76
Республика Коми	6521	15,0	1683	25,81	888	52,76	795	47,24	5,53
Вологодская область	2281	5,3	817	35,82	310	37,94	507	62,06	-24,11
Финляндия	5243	12,1	1349	25,73	735	54,48	614	45,52	8,97
Норвегия	5035	11,6	662	13,15	306	46,22	356	53,78	-7,55
Швеция	6982	16,1	1953	27,97	979	50,13	974	49,87	0,26
Северная Европа (исследуемый регион)	43 368	100,0	10005	23,07	5044	50,41	4961	49,59	0,83

Архангельской области, на 13% – для 3% Ленинградской области, на 30% – для 2% Новгородской области, на 24% – для 5% Вологодской области.

Таким образом, наиболее значимые изменения продуктивности лесов произошли за период с 1981 по 2003 год в Республике Карелия и Республике Коми (увеличение продуктивности лесов), а также в Архангельской области (сокращение продуктивности лесов). В Скандинавских странах наиболее значимые изменения отмечены для Финляндии и Швеции (увеличение продуктивности лесов).

ВЫВОДЫ

Значительные корреляционные коэффициенты между годовыми кольцами в Республике Коми и интегрированными значениями NDVI с июня по август показывают, что интегрированные значения NDVI могут быть использованы в качестве косвенных данных для оценки трендов роста леса в масштабе целого региона.

Анализ данных по Северной Европе позволяет сделать вывод о том, что аналогично Республике Коми есть статистически значимая связь между временными сериями годичного радиального прироста хвойных и временными сериями нормализованного вегетационного индекса. Это позволяет использовать NDVI как источник косвенных данных для оценки изменения продуктивности лесов.

Отсутствие корреляции в большинстве серий на территорию Северо-Запада России объясняется отсутствием данных в сериях годичного прироста за последние десятилетия. Достоверно статистически значимое изменение продуктивности лесов за последние десятилетия произошло на 23% территории Северо-Запада России.

В регионах Северо-Запада России произошло как увеличение, так и сокращение продуктивности лесов. Изменения продуктивности лесов произошли в лесных регионах и очень слабо выражены в регионах со сравнительно небольшими площадями, покрытыми лесом (Ненецкий автономный округ, Мурманская область, север Норвегии).

Увеличение продуктивности леса на изучаемом участке вызвало увеличение интегрированных значений NDVI с мая по август. Это свидетельствует о том, что NDVI может использоваться в качестве косвенных данных для оценки трендов в росте леса за последние десятилетия и для обобщения в масштабе подзона тайги. Данные NDVI могут быть использованы для увеличения пространственного разрешения ряда ширины годичных колец. Сокращение количества осадков приводит к некоторому увеличению NDVI. Увеличение продуктивности, отраженное в данных NDVI, максимально

для участков с повышенными температурами и низкими осадками. Существует несколько возможных причин изменения продуктивности (изменения видового состава и распространения видов). Изучение изменений растительности с использованием космических снимков высокого разрешения могло бы предоставить информацию о причинах увеличения продуктивности.

Результатом работы стала карта изменения продуктивности лесов Северо-Запада России за период с 1981 по 2003 год масштаба 1:10 000 000. Карта представлена в растровом формате и может быть использована в качестве основы для поддержки принятия решений по развитию лесного сектора. Карта позволяет выявить участ-

ки лесного фонда с наибольшим увеличением продуктивности за последние десятилетия, что представляет важную коммерческую информацию при принятии решений об аренде участков лесного фонда в долговременной перспективе. Область применения карты – стратегическое планирование на региональном уровне. Предварительные результаты показали необходимость создания хронологий апикального прироста и проведения мониторинга камбиальной активности для сопоставления этих данных с данными дистанционного зондирования Земли. Разработанная методика и карта позволяют при незначительных затратах, связанных в основном с обработкой данных, проводить независимую оценку динамики продуктивности лесов.

*Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение 14.В37.21.1248).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bogaert J., Zhou L., Tucker C. J., Myneni R. B., Ceulemans R. Evidence for a persistent and extensive greening trend in Eurasia inferred from satellite vegetation index data // *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 2002. 107.
2. Cook E. R. A time series analysis approach to tree-ring standardization. 1985. 1–171. University of Tucson: Arizona.
3. Cook E. R., Briffa K. R., Jones P. D. Spatial Regression Methods in Dendroclimatology – A Review and Comparison of 2 Techniques // *International Journal of Climatology*. 1994. Vol. 14. P. 379–402.
4. Cook E. R., Kairiukstis L. A. Methods of dendrochronology. Applications in the environmental sciences. Dordrecht, Netherlands: International Institute of Applied System Analysis, Kluwer Academic Publishers, 1990.
5. Grissino-Mayer H., Holms R., Fritts H. International tree-ring data bank program library manual. Tucson, Arizona: Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, 1990.
6. Lopatin E., Kolström T., Spiecker H. Determination of forest growth trends in Komi Republic (Northwestern Russia): combination of tree-ring analysis and remote sensing data // *Boreal Environment Research*. 2006. Vol. 11. P. 341–353.
7. Lorenz M. et al. Forest assessment for changing information needs // *Forests in the global balance – changing paradigms // IUFRO World Series*. 2005. Vol. 17. P. 139–150.
8. Wang J., Rich P. M., Price K. P., Kettle W. D. Relations between NDVI and tree productivity in the central Great Plains // *International Journal of Remote Sensing*. 2005. Vol. 25. P. 3127–3138.

Lopatin Ev. V., School of Forest Sciences, University of Eastern Finland (Joensuu, Finland)

METHOD FOR FOREST GROWTH DYNAMICS' ASSESSMENT USING TIME SERIES OF REMOTE SENSING DATA

Information about the state of forest resources in Russia is collected in the process of national forest inventory and forest management inventory. Intensification of forest management on the leased areas requires provision of updated information about the state of forest resources. The need for the up-to-date and high quality information on forest regions of Russia is large and constantly increasing. The aim of the study was to develop a method instrumental in identification of changes in the productivity of forests located in the north-west of Russia by using a combination of remote sensing and dendrochronological analysis. Significant correlation coefficients between the ring width in the Komi Republic and integrated NDVI values from June to August showed that the integrated NDVI values could be used as proxy data to assess trends in forest growth on a scale of the whole region. Analysis of the data from Northern Europe showed statistically significant correlation between the time series of conifers' ring width and time series of normalized vegetation index. This allows the use of NDVI as a source of proxy data to assess changes in forest productivity.

Key words: increment, spruce, pine, age, satellite images

REFERENCES

1. Bogaert J., Zhou L., Tucker C. J., Myneni R. B., Ceulemans R. Evidence for a persistent and extensive greening trend in Eurasia inferred from satellite vegetation index data // *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 2002. 107.
2. Cook E. R. A time series analysis approach to tree-ring standardization. 1985. 1–171. University of Tucson: Arizona.
3. Cook E. R., Briffa K. R., Jones P. D. Spatial Regression Methods in Dendroclimatology – A Review and Comparison of 2 Techniques // *International Journal of Climatology*. 1994. Vol. 14. P. 379–402.
4. Cook E. R., Kairiukstis L. A. Methods of dendrochronology. Applications in the environmental sciences. Dordrecht, Netherlands: International Institute of Applied System Analysis, Kluwer Academic Publishers, 1990.
5. Grissino-Mayer H., Holms R., Fritts H. International tree-ring data bank program library manual. Tucson, Arizona: Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, 1990.
6. Lopatin E., Kolström T., Spiecker H. Determination of forest growth trends in Komi Republic (Northwestern Russia): combination of tree-ring analysis and remote sensing data // *Boreal Environment Research*. 2006. Vol. 11. P. 341–353.
7. Lorenz M. et al. Forest assessment for changing information needs // *Forests in the global balance – changing paradigms // IUFRO World Series*. 2005. Vol. 17. P. 139–150.
8. Wang J., Rich P. M., Price K. P., Kettle W. D. Relations between NDVI and tree productivity in the central Great Plains // *International Journal of Remote Sensing*. 2005. Vol. 25. P. 3127–3138.

Поступила в редакцию 03.07.2013

НАТАЛЬЯ РУДОЛЬФОВНА СУНГУРОВА

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов лесотехнического института, Северный арктический федеральный университет им. М. В. Ломоносова (Архангельск, Российская Федерация).

nsungurova@yandex.ru

РУДОЛЬФ ВАСИЛЬЕВИЧ СУНГУРОВ

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, старший научный сотрудник, Северный НИИ лесного хозяйства (Архангельск, Российская Федерация).

sungurov51@yandex.ru

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА НА РОСТ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР

Эффективность искусственного восстановления леса во многом обусловлена качеством посадочного материала при прочих равных условиях. С целью определения продолжительности влияния параметров посадочного материала на приживаемость и рост лесных культур изучались и анализировались опытные лесные культуры сосны и ели, созданные на свежих вырубках из-под ельников долгомошных, черничных свежих и влажных в условиях Северо-таежного района. Анализ выполненных исследований позволяет заключить, что влияние качества посадочного материала на состояние и рост лесных культур сосны и ели сказывается, по крайней мере, до 28-летнего возраста. Особенно это проявляется при использовании отборных семян и саженцев, которые характеризуются стабильным ростом и более устойчивы к неблагоприятным факторам среды.

Ключевые слова: лесные культуры, сосна, ель, семена, саженцы

Качество посадочного материала существенно влияет на эффективность искусственного восстановления леса. Причем такие результаты получены в разных географических условиях, с разными породами, при испытании конкурирующих технологических процессов и т. п. [1], [2], [3], [5], [11]. Ранее нами публиковались результаты подобных исследований для условий Северо-таежного района европейской части России [6], [7], [8], [9].

Анализировались опытные лесные культуры сосны и ели, созданные на свежих вырубках из-под ельников долгомошных (участок 4), черничных влажных (участок 1) и черничных свежих (участок 11) в условиях Северо-таежного района, с целью определения продолжительности влияния параметров посадочного материала на приживаемость и рост лесных культур.

Участок 4 площадью 5 га заложен на пологом северо-западном склоне верхней плоской части приручейной террасы. Вырубка 1974 года из-под ельника долгомошного с количеством пней 700 шт./га. Почва – торфянисто-подзолистая глеватая на мелком суглинке.

Подготовка вырубки заключалась в корчевке пней, полосной расчистке вырубки от порубочных остатков и валежа. На данном участке заложены следующие варианты: 1) обработка почвы двухотвальным плугом ПКЛ-70 по расчищенным и раскорчеванным полосам машиной МРП-2. Ширина полос 2 м, расстояние между их

серединами 6–8 м. В качестве посадочных мест использовались плужные пласты. 2) Фрезерование почвы на глубину 10–15 см фрезой болотной навесной ФБН-0,9 по расчищенным технологическим трассам машиной МРП-2. Для сбора верховодки через 6–8 м плугом ПКЛ-70 прокладывались дренарующие борозды, между которыми и были образованы фрезполосы.

Испытывались стандартные семена ели 2 лет, выращенные в полиэтиленовых теплицах, семена ели 3 лет, выращенные в открытом грунте питомника, саженцы ели 3+3 и саженцы ели 2+2. Последние, кроме того, рассортированы на 5 групп по относительной массе по методу комплексной оценки качества посадочного материала, разработанному учеными лаборатории лесных культур АИЛиЛХ (ныне ФБУ «СевНИИЛХ») [4]. В методических указаниях по описанию метода предложены критерии сортировки посадочного материала на группы по относительной массе, то есть отношению индивидуальной массы растения к средней массе всей испытываемой партии. При сортировке перед посадкой к первой группе относили растения с относительной массой менее 0,4 от средней, которые в последующем предлагалось браковать. Ко второй – растения с относительной массой 0,4–0,8, к третьей – 0,8–1,2, к четвертой – 1,2–1,6, к пятой – 1,6 и более. Сеянцы второй, третьей групп рассматривали как обычный стандартный посадочный материал;

Характеристика 28-летних культур ели

Таблица 1

Способ обработки почвы	Вид и возраст посадочного материала	Характеристика посадочного материала			Приживаемость, %	Показатели роста культур	
		диаметр, мм	высота, см	Д ² Н, см ³		высота, м	диаметр, см
						М ± m	М ± m
Фрезерованные полосы	Сеянцы 2 лет	1,8	10,6	0,36	49,6	2,71 ± 0,05	2,62 ± 0,07
	Саженцы 3+3	4,3	16,6	3,07	50,8	3,21 ± 0,21	3,28 ± 0,10
	Саженцы 2+2	3,2	12,8	1,60	60,0	2,99 ± 0,08	3,02 ± 0,14
	1-я группа	1,9	10,0	0,36	47,6	2,36 ± 0,08	1,75 ± 0,16
	2-я группа	2,5	11,4	0,71	58,0	2,43 ± 0,08	2,05 ± 0,15
	3-я группа	3,3	13,1	1,43	56,7	2,83 ± 0,07	2,51 ± 0,13
	4-я группа	3,6	13,6	1,76	66,9	3,00 ± 0,11	2,98 ± 0,18
5-я группа	4,6	14,3	3,03	53,2	3,29 ± 0,09	3,68 ± 0,15	
Пласты	Саженцы 3+3	4,3	16,6	3,07	61,1	5,00 ± 0,07	5,54 ± 0,10
	Саженцы 2+2	3,2	12,8	1,60	68,8	4,21 ± 0,07	4,74 ± 0,12
	Сеянцы 2 лет крупные	2,0	11,2	0,45	63,0	3,66	4,07

четвертой, пятой групп – отборные, высокопродуктивные растения, применяемые как крупномерный посадочный материал. В качестве контроля использовались несортированные сеянцы. Сортировка посадочного материала на 5 групп проводилась с целью поиска практически приемлемых решений для выполнения данных мероприятий.

Посадку сеянцев и саженцев проводили весной 1978 года вручную, под лопату. Густота посадки 4000 шт./га. В 1991 году в междурядьях и рядах культур проведены рубки ухода со сплошным удалением листовых пород мотокусторезом «Секор-3».

Основные результаты обследования данных культур приведены в табл. 1.

Анализ полученных результатов исследования позволил сделать следующие выводы:

1. Саженцы, в сравнении с сеянцами, более устойчивы к неблагоприятным факторам среды, таким как частое побивание заморозками в первые годы, выжимание и вымокание, и, как следствие, к конкурентной борьбе с листовыми породами. Сеянцы уступают в росте саженцам по высоте на 67,5%, диаметру – на 59,5%. С возрастом относительные различия увеличиваются.

2. Ранжирование саженцев ели по относительной массе до посадки сказывается на росте культур и в 28 лет. К примеру, различия между саженцами 1-й и 5-й групп по всем показателям существенное и составляет по высоте – 1,4 раза, по диаметру – 2,1 раза в пользу саженцев 5-й группы; различия между саженцами разного возраста по высоте составляет 1,1 раза, по диаметру – 1,2 раза в пользу крупномерных саженцев. Это связано в первую очередь с селекционными свойствами, а также с тем, что растения, попав под полог листовых пород, в последние годы не побивались морозом.

3. Ель периодически побивается поздневесенними и раннелетними заморозками. Полог листовых пород снижает данное негативное воздействие, угнетая при этом ель. В итоге, после проведения ухода посредством сплошного удаления листовых пород, деревья ели вновь начинают страдать от негативного влияния заморозков. Это проявляется в первую очередь в гибели центрального побега и его последующем замещении боковыми побегами. Ствол деревьев имеет кустистую форму и характеризуется многовершинностью. В то же время нами отмечено, что ряды, расположенные в непосредственной близости к рядам культур сосны, не побивались заморозками под хвойным пологом. Сосна, опережая по высоте ель в среднем в 4,7 раза, позитивно влияет на устойчивость ели к воздействию низких температур.

4. Культуры ели не менее чем в 3 раза отстают в росте от полога листовых пород и представлены в количестве, достаточном для формирования впоследствии второго яруса листово-хвойного древостоя. Лесоводственные ухода необходимо начинать в возрасте 10–15 лет, ухаживая только за рядами культур во избежание охлестывания центрального побега и побивания растений морозом.

Участок 1 опытных культур общей площадью 6 га заложен на 3-летней вырубке из-под ельника черничного влажного. Данный объект расположен на слабопокатых и пологих склонах невысокой волнистой гряды. Почва – подзолистая, супесчаная и легкосуглинистая, подстилаемая тяжелым суглинком. Задернение луговиком извилистым – от слабого до среднего, распространение его чаще куртинное. Почва обрабатывалась 3 способами: 1. Плугом ПКЛ-70 (в двухотвальном варианте) с посадкой в дно борозды. 2. Минерализованные полосы, подготовленные покровосдирателем ПДН-1. 3. Фрезерованные

Таблица 2

Характеристика 25-летних культур ели

Способ обработки почвы	Вид и возраст посадочного материала	Характеристика посадочного материала		Приживаемость, %	Показатели культур	
		высота, см	диаметр, мм		высота, м	диаметр, см
					M ± m	M ± m
Фрезерованные полосы	Сеянцы 2 лет	13,6	1,6	39,4	2,2 ± 0,09	1,94 ± 0,12
	Саженцы 2+2	17,9	4,4	81,3	3,3 ± 0,08	3,12 ± 0,09
	Саженцы 2+3	23,3	5,9	84,2	2,9 ± 0,07	2,88 ± 0,09
Целина между фрезерованными полосами	Сеянцы 2 лет	13,6	1,6	29,0	2,0 ± 0,09	1,71 ± 0,12
	Саженцы 2+2	17,9	4,4	40,2	2,7 ± 0,11	2,38 ± 0,12
	Саженцы 2+3	23,3	5,9	46,2	2,8 ± 0,10	2,63 ± 0,12
Минерализованные полосы ПДН-1	Сеянцы 2 лет	13,6	1,6	16,0	1,6 ± 0,10	1,04 ± 0,13
	Саженцы 2+2	17,9	4,4	66,6	2,0 ± 0,07	1,56 ± 0,09
	Саженцы 2+3	23,3	5,9	44,2	2,6 ± 0,09	2,31 ± 0,11
Борозды ПКЛ-70	Сеянцы 2 лет	13,6	1,6	51,3	1,6 ± 0,06	1,25 ± 0,08
	Саженцы 2+2	17,9	4,4	43,2	2,4 ± 0,10	2,07 ± 0,12
	Саженцы 2+3	23,3	5,9	47,6	3,0 ± 0,12	2,93 ± 0,14

полосы шириной 0,6–0,7 м, подготовленные вручную, под лопату.

В качестве контроля проводились посадки по целине между фрезерованными полосами.

На участке испытывался посадочный материал различного качества – сеянцы 2 лет, саженцы 2+2 и 2+3. Посадку сеянцев и саженцев проводили весной 1977 года вручную, под лопату. Агротехнических и лесоводственных уходов за культурами не проводилось. Все культуры ели до 5–8 лет периодически побивались поздневесенними и раннелетними заморозками, пока лиственные породы не сформировали защитный полог.

Характеристика обследованных культур приведена в табл. 2.

В результате обследования нами получены следующие результаты. Более высокими показателями обладают культуры, созданные сеянцами и 4-летними саженцами, на фрезерованных полосах. Самые низкие значения – в культурах, высаженных по минерализованным полосам. Это обусловлено тем, что минерализация почвы и посадка растений в тяжелые почвенные горизонты в условиях периодического переувлажнения не способствуют снижению негативных природно-климатических факторов (низкая прогреваемость почвы и избыток влаги), а более того, ухудшают гидротермический режим почвы в посадочных местах. В первые годы жизни культуры подвергаются вымоканию весной и осенью и выжиманию в осенне-зимний период. В итоге к 25 годам растения в этих вариантах имеют показатели средней высоты выше на 35–65%, диаметра – в 1,5–2,0 раза. Саженцы 2+3 оказались более устойчивыми к неблагоприятным факторам.

Культуры ели на целине хотя и растут несколько лучше, чем на минерализованных по-

лосах, но имеют низкую приживаемость. Это обусловливается сложностью заделки корневой системы растений при посадке.

Различие по биометрическим показателям у посадочного материала сказывалось на росте культур во все годы наблюдений. Выжиманию морозом, заглушению травянистой растительностью в первые годы были подвержены все растения. Однако саженцы оказались более жизнестойкими в сравнении с сеянцами.

В целом культуры ели в 1,5 раза отстают в росте от полога лиственных пород, представленных в основном березой, и устойчиво формируют второй ярус. Береза, представленная в количестве 7800 шт./га, имеет высоту 5,3 м, диаметр 4,4 см. В искусственно созданных молодняках требуется проведение лесоводственных уходов, но лишь в рядах культур – для предотвращения охлестывания березой. По нашему мнению, их следует начинать в возрасте 12–15 лет. Уже сейчас можно определить уровень и направление ведения лесного хозяйства на подобных объектах.

Участок 11 опытных культур площадью 10 га заложен на свежей луговиковой вырубке. Рельеф участка – повышенное плато с небольшим уклоном на север. Мезорельеф хорошо выражен вследствие карстовых явлений. Почва – подзол маломощный супесчаный гумусово-железистый на карбонатной глине, подстилаемой карбонатным песком. На вырубке проводилась расчистка полос от пней, порубочных остатков и валежа толкателем клиновидным ТК-1,2 в агрегате с трактором ЛХТ-55, почва обрабатывалась плугом ПШ-1 с формированием микрорельефов. На участке испытывались 2-летние тепличные сеянцы сосны и ели, рассортированные на 3 группы по методу комплексной оценки качест-

Таблица 3

Динамика роста культур ели

Группы по относительной массе	Характеристика посадочного материала			Показатели роста культур в возрасте, лет							
				4		6		16		23	
	Н, см	Д, мм*	Д ² Н, см ³	Н, см	Д, см*	Н, см	Д, см*	Н, м	Д, см	Н, м	Д, см
I (до 0,4)	6,0	1,9	0,22	19,1	0,5	32,4	0,9	0,9	-	1,7	1,21
II (0,4–1,2)	8,9	2,2	0,43	28,1	0,6	42,8	1,0	1,0	-	2,3	2,01
III (1,2 и >)	13,5	2,7	0,98	29,6	0,7	47,7	1,2	1,4	0,9	3,2	3,08
Несортиров.	10,7	2,4	0,62	24,4	0,6	41,5	1,0	1,0	-	2,1	1,71

* – диаметр растений у шейки корня.

ва посадочного материала, разработанному учебными лабораториями лесных культур АИЛЛХ (ныне ФБУ «СевНИИЛХ») [4]. В качестве контроля использовались несортированные семена. Посадку семян проводили весной 1986 года вручную, под лопату.

В 23-летнем возрасте приживаемость культур ели колеблется в пределах 56,3–72,9. Растения III группы на протяжении всего периода выращивания имеют наивысшую приживаемость, а у растений I группы отпад наибольший. Приживаемость культур сосны в 23-летнем возрасте не определялась, так как в возрасте 15 лет проведены рубки ухода. Количество учтенных в 23 года растений сосны варьирует от 1980 до 2456 шт./га в зависимости от вида посадочного материала. Наименьший отпад наблюдается у культур II группы.

Высота растений ели III группы в 2 раза больше растений I группы и в 1,5 раза растений II группы, диаметр выше в 2 раза (табл. 3). Как показали визуальные наблюдения, культуры ели меньше побивались морозом именно на микроповышениях плуга ПШ-1. Высота культур сосны III группы в 1,4 раза больше растений I группы и в 1,2 раза растений II группы, диаметр выше в 1,2 раза (табл. 4).

Поэтому данную технологию создания культур следует рассматривать как наиболее приемлемую для этих лесорастительных условий, что в конечном счете указывает на унификацию технологических решений для всего многообразия лесорастительных условий изучаемого района. В этой связи считаем, что на луговиковых вырубках Северо-таежного района использование

почвообрабатывающих орудий плужных конструкций не только допустимо, но и предпочтительно. Дальнейший поиск путей и средств повышения продуктивности искусственных насаждений целесообразно вести на фазе оптимизации первоначальной густоты лесных культур, то есть определении шага посадки и расстояния между рядами.

Поскольку береза как быстрорастущая порода формирует верхний ярус, она создает благоприятные условия для роста медленнорастущей ели во втором ярусе без негативных последствий заморозков. На участке лесных культур изучался ход естественного лесовозобновления в 23-летнем возрасте. Лиственный ярус представлен в основном березой в количестве 3602 шт./га. Береза имеет средние значения по высоте 5,6 м, диаметру 4,6 см, запас стволовой древесины в объеме 37,1 м³/га. Рассматривая результаты формирования березово-елового древостоя на луговиковой вырубке, следует отметить, что к 23 годам ель уступает в росте быстрорастущей березе, появившейся в последующие годы, на 32–61 % и растет по III классу бонитета, имея запас стволовой древесины 24,9 м³/га [10]. Общий состав древостоя 5Е5Б. Количество ели, составляющее 2220–3224 шт./га, позволит обеспечить к возрасту главной рубки формирование хвойного по составу древостоя.

Рассматривая результаты формирования сосново-березового древостоя на луговиковой вырубке, следует отметить, что к 23 годам сосна опережает в росте березу, появившуюся в последующие годы, на 44–62 % и растет по II классу бонитета, имея запас стволовой древесины 147 м³/га [10].

Таблица 4

Динамика роста культур сосны

Группы по относительной массе	Характеристика посадочного материала			Показатели роста культур в возрасте, лет							
				4		6		16		23	
	Н, см	Д, мм*	Д ² Н, см ³	Н, см	Д, см*	Н, см	Д, см*	Н, м	Д, см	Н, м	Д, см
I (до 0,4)	8,6	1,09	0,11	48,6	1,3	4,29	3,23	6,74	5,60	9,0	10,52
II (0,4–1,2)	11,3	1,71	0,34	58,7	1,6	4,58	3,46	6,81	5,65	10,2	11,06
III (1,2 и >)	15,9	2,60	1,12	76,7	2,1	5,31	3,75	7,42	5,80	12,5	13,06
Несортиров.	11,9	1,80	0,51	58,5	1,6	4,69	3,49	6,83	5,68	9,9	10,96

* – диаметр растений у шейки корня.

Следует подчеркнуть, что древостои естественного происхождения в данных лесорастительных условиях формируются по III классу бонитета. Общий состав древостоя 8С2Б. Количество сосны, составляющее 1980–2456 шт./га, позволит обеспечить к возрасту главной рубки формирование хвойного по составу древостоя.

Лесоводственные уходы в культурах сосны проводились, когда молодняки достигли 15-летнего возраста. Главная цель рубок ухода в сосновых молодняках, произрастающих в наиболее производительном черничном типе леса, – не допускать формирования березово-сосновых насаждений [12]. Авторы рекомендуют проводить разреживание таких молодняков и отмечают, что для формирования целевого состава насаждений искусственного происхождения к 25–30 годам должно оставаться 1,0–1,1 тыс. шт./га деревьев сосны и 0,2 тыс. шт./га деревьев березы.

Лесоводственные уходы в культурах ели не проводились. Вместе с тем исследования в этом направлении показывают, что главная цель рубок ухода в еловых молодняках, произрастающих в наиболее производительном черничном типе леса, – выращивание крупномерной пиловочной древесины, второстепенная задача – создание

условий для выращивания крупномерной высококачественной березы [12]. Авторы рекомендуют в первый прием рубок уход непосредственно за елью не проводить, оставлять исходное число стволов для ускорения естественной дифференциации и отбора наиболее жизнеспособных экземпляров. В таких насаждениях, по нашему мнению, необходимо начинать лесоводственные уходы в возрасте 12–15 лет, ухаживая за рядами культур и удаляя мягколиственные породы, во избежание охлестывания и побивания морозом.

Создание оптимальных условий по площади питания – задача последующих приемов рубок ухода; для формирования целевого состава насаждений искусственного происхождения к 30–40 годам должно оставаться 1,0–1,2 тыс. шт./га деревьев ели.

Анализ выполненных исследований позволяет заключить, что влияние качества посадочного материала на состояние и рост лесных культур сосны и ели сказывается по крайней мере до 28-летнего возраста. Особенно это проявляется при использовании отборных семян и саженцев, которые обладают стабильным ростом и более устойчивы к неблагоприятным факторам среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабикова Н. В. Создание лесных культур крупномерными сеянцами в Ладенопольском лесхозе // Лесохоз. информ. 1975. № 7. С. 12–13.
2. Градяцкас А. И. Рост культур ели в зависимости от возраста посадочного материала // Труды Литовского НИИ лесн. хоз-ва, 1977. Т. 17. С. 98–104.
3. Мойко М. Ф., Ковалев М. С. Рост культур в зависимости от размеров саженцев // Лесн. х-во. 1977. № 1. С. 52–53.
4. Пигарев Ф. Т., Беляев В. В., Сунгуров Р. В. Комплексная оценка качества посадочного материала и его применение на Европейском Севере: Методические указания. Архангельск, 1987. 16 с.
5. Родин А. Р., Мерзленко М. Д. Производительность культур ели, созданных крупномерным посадочным материалом // Лесохоз. информ. 1975. № 22. С. 17.
6. Сунгуров Р. В., Мочалов Б. А. Качество лесных культур, создаваемых саженцами разных размеров // Материалы отчетной сессии по итогам НИР за 1986 г. Архангельск, 1987. С. 36–37.
7. Сунгурова Н. Р., Сунгуров Р. В. Особенности создания и выращивания культур ели в условиях северной подзоны тайги // Сборник трудов ФГУ «СевНИИЛХ» по итогам научно-исследовательских работ за 2005–2009 гг. / Отв. за вып. Н. А. Демидова. Архангельск: Сев. (Арктич.) фед. ун-т, 2011. С. 114–126.
8. Сунгурова Н. Р., Сунгуров Р. В. Сравнительная оценка качества культур сосны и ели // Материалы II Международной конференции молодых ученых «Леса Евразии в XXI веке: Восток – Запад». М.: МГУЛ, 2002. С. 124–126.
9. Сунгурова Н. Р., Сунгуров Р. В. Выращивание культур сосны на луговиковой вырубке северной подзоны тайги // Лесной журнал. 2012. № 4. С. 56–63.
10. Таблицы хода роста березово-еловых насаждений в северной подзоне тайги // Лесотаксационный справочник по северо-востоку европейской части Российской Федерации: (нормативные материалы для Ненецкого автономного округа, Архангельской, Вологодской областей и Республики Коми). Архангельск: ОАО ИПП «Правда Севера», 2012. 672 с.
11. Цинкович Л. К., Синькевич М. С. Опыт создания культур ели крупномерным посадочным материалом // Труды Петрозаводской лесной опытной станции. Вып. 2. Петрозаводск: Карелия, 1973. С. 222–230.
12. Чибисов Г. А., Вялых Н. И., Минин Н. С. Рубки ухода за лесом на Европейском Севере: Практическое пособие. Архангельск, 2004. 128 с.

Sungurova N. R., Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov (Arkhangelsk, Russian Federation)

Sungurov R. V., Northern Research Institute of Forestry (Arkhangelsk, Russian Federation)

DURATION OF INFLUENCE OF PLANTING MATERIALS' PARAMETERS ON GROWTH OF FOREST CULTURES

The effectiveness of artificial forest recovery is largely determined by the quality of planting material under equal conditions. To determine the duration of the influence of planting material on the survival and growth of forest crops forest plantations of pine and spruce have been studied and analyzed. The studied plantations grew on fresh clearings of spruce forests, fresh and humid bilberry areas in the North-taiga region. Analysis of the performed research allows us to conclude that the impact of the quality of

planting material on the condition and growth of forest crops of pine and spruce affects forest cultures until they reach the age of at least 28 years old. This is particularly evident when using selected seedlings and saplings. These cultures have stable growth and are more resistant to adverse environmental factors.

Key words: forest cultures, pine, spruce, seedlings, saplings

REFERENCES

1. Babikova N. V. Establishment of forest crops by heavy forestry seedlings in Ladeynopolskom [Sozdanie lesnykh kul'tur krupnomernymi seyantsami v Ladeynopol'skom leschoze]. *Lesochoz. inform.* [Forestry inform]. 1975. № 7. P. 12–13.
2. Gradyatskaya A. I. The growth of spruce cultures according to the age of planting material [Rost kul'tur eli v zavisimosti ot vozrasta posadochnogo materiala]. *Trudy Litov. NII lesnogo chozyaystva* [Proceedings of the Lithuanian forest research Institute]. 1977. Vol. 17. P. 98–104.
3. Moiko M. F., Kovalev M. S. Growth of cultures according of the seedlings size [Rost kul'tur v zavisimosti ot razmerov sazhentsev]. *Lesnoe khoz.* [Forestry]. 1977. № 1. P. 52–53.
4. Pigarev F. T., Belyaev V. V., Sungurov R. V. The Complex estimation of the quality of planting material and its application in the European North [Kompleksnaya otsenka kachestva posadochnogo materiala i ego primeneniye na Evropeyskom severe]. Arkhangelsk, 1987. 16 p.
5. Rodin A. R., Merzlenko M. D. Productivity of spruce cultures created by large sized plant material [Proizvoditel'nost' kul'tur eli, sozdannykh krupnomernym posadochnym materialom]. *Lesochoz. inform.* [Forestry inform]. 1975. № 22. P. 17.
6. Sungurov R. V., Mochalov B. A. The quality of forest crops created by seedlings of different sizes [Kachestvo lesnykh kul'tur, sozdavaemykh sazhentsami raznykh razmerov]. *Materialy otchetnoy sessii po itogam NIR za 1986 god* [The materials of the reporting session on the results of research in the 1986]. Arkhangelsk, 1987. P. 36–37.
7. Sungurova N. R., Sungurov R. V. Features of the establishment and cultivation of spruce cultures in the northern taiga subzone [Osobennosti sozdaniya i vyrashchivaniya kul'tur eli v usloviyakh severnoi podzony taigi]. *Sbornik trudov FGU "SevNIILKH" po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot za 2005–2009 gg.* [Proceedings of the FGI "The Northern research Institute of forestry" according to the results of research works for 2005–2009]. Arkhangelsk, 2011. P. 114–126.
8. Sungurova N. R., Sungurov R. V. Comparative evaluation of the quality of the culture of pine and spruce [Svornitel'naya otsenka kachestva kul'tur sosny i eli]. *Materialy II Mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchenykh "Lesy Evrazii v XXI veke: Vostok-Zapad"* [Materials of II International conference of young scientists "Forests of Eurasia in the XXI century: East-West]. Moscow, 2002. P. 124–126.
9. Sungurova N. R., Sungurov R. V. Growing crops on pine lugovikovoy felling in the northern taiga subzone [Vyrashchivaniye kul'tur sosny na lugovikovoy vyrubke severnoi podzony taigi]. *Lesnoy zhurnal.* 2012. № 4. P. 56–63.
10. Tables of the growth rate of birch-spruce stands in the northern taiga subzone [Tablitsy choda rosta berezovo-elovykh nasazhdeniy v severnoy podzony taigi]. *Lesotaksatsionnyy spravochnik po severo-vostoku evropeyskoy chasti Rossiyskoy Federatsii:* [Forest shipment handbook on the northeast of the European part of the Russian Federation]. Arkhangelsk, 2012. 672 p.
11. Zinkovich L. K., Sin'kevich M. S. The experience of creating cultures of spruce by large sized plant material [Opyt sozdaniya kul'tur eli krupnomernym posadochnym materialom]. *Trudy Petrozavodskoy lesnoy opytnoy stantsii.* [Proceedings of the experimental station of Petrozavodsk]. Issue. 2. Petrozavodsk, 1973. P. 222–230.
12. Chibisov G. A., Vyalykh N. I., Minin N. S. *Rubki uchoda za lesom na Evropeyskom Severe* [Cutting maintenance of forests in the European North: a Practical guide]. Arkhangelsk, 2004. 128 p.

Поступила в редакцию 06.08.2013

ЮРИЙ ЮРЬЕВИЧ ГЕРАСИМОВ

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

ВАСИЛИЙ КУЗЬМИЧ КАТАРОВ

кандидат технических наук, проректор по воспитательной и социальной работе, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
vkatarov@psu.karelia.ru

НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА КОВАЛЁВА

аспирант кафедры тяговых машин лесинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
natalya.kowalyowa2010@yandex.ru

ДАНИЛА ВЛАДИМИРОВИЧ РОЖИН

кандидат технических наук, преподаватель кафедры промышленного транспорта и геодезии лесинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
hop@sampo.ru

АНТОН ПАВЛОВИЧ СОКОЛОВ

кандидат технических наук, доцент кафедры тяговых машин лесинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
a_sokolov@psu.karelia.ru

ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ СЮНЁВ

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тяговых машин лесинженерного факультета, проректор по научно-исследовательской работе, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
siounev@psu.karelia.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТИ ЛЕСНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ*

Представлена усовершенствованная компьютерная система оптимального проектирования сети лесных автомобильных дорог. Создана новая версия ранее разработанной системы, которая отличается большей степенью пространственной детализации с возможностью ее изменения, а также учетом рельефа местности при проектировании сетей автомобильных лесовозных дорог. Описываются примененные методы и модели, а также приводятся результаты апробации новой версии системы на примере лесосырьевой базы крупного лесозаготовительного предприятия Ленинградской области. Апробация подтвердила полезность проведенной модификации системы, которая позволяет одновременно учитывать большинство из существенно влияющих факторов и выбирать правильные решения. Результаты показали, что в рассматриваемых конкретных условиях применение системы повышает эффективность лесозаготовительного производства в целом, несмотря на некоторое увеличение затрат на строительство дорог.

Ключевые слова: лесозаготовки, сеть лесных дорог, планирование лесных дорог, строительство дорог, объектные пространственные модели, цифровые модели рельефа, географические информационные системы

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших факторов, определяющих эффективность работы лесозаготовительных предприятий, является транспортная доступность лесных участков, на которых ведутся лесозаготовительные и лесохозяйственные работы [2], [3], [11], [12]. В первую очередь она зависит от характеристик имеющейся сети лесных дорог. Плотность сети лесных дорог на северо-западе России низка и варьируется от 1,2 км/1000

га в Республике Коми до 10 км/1000 га в Ленинградской области, тогда как в Финляндии она составляет 12,3 км на одну тыс. га лесных земель [4], [13].

Отсутствие дорог значительно повышает затраты предприятий на заготовку и в определенных случаях делает нерентабельным освоение лесных территорий. Исправить ситуацию возможно только путем постоянного целенаправленного развития дорожной сети. В этом смысле

очень важным является обеспечение эффективного планирования дорожного строительства в тех объемах, которые позволят сохранить рентабельность предприятия и одновременно сделать доступным необходимый объем лесных ресурсов [8], [10].

Для решения этой задачи была разработана компьютерная система оптимального проектирования сети лесных автомобильных дорог. Работа выполнена при поддержке проектов «Новые трансграничные решения в области интенсификации ведения лесного хозяйства и повышения степени использования топливной древесины в энергетике», выполняемого в соответствии с программой добрососедства и партнерства KARELIA ENPI CBC как результат многолетнего российско-финского сотрудничества [14], и «Технико-экономическая и эколого-социальная оценка перспективности заготовки древесной биомассы для нужд местной энергетики с использованием логистического подхода и ГИС-технологий», выполняемого по заданию Минобрнауки в рамках Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 гг.

Рассматриваемая система базируется на ГИС-технологиях, использует для решения задач методы математического программирования и выполняет следующие основные функции, подробно описанные в работах [5], [6], [7]:

- ввод параметров выхода каждого вида продукции по породам, средних цен каждого вида лесоматериалов, параметров модели для расчета транспортных издержек на вывозке древесины, основных параметров проектируемых дорог и величин, необходимых для функционирования блока оптимизации конструкций альтернативных участков лесных дорог;
- редактирование баз данных слоев потребителей и карьеров;
- построение альтернативных участков лесных дорог;
- оптимизация конструкций альтернативных участков лесных дорог;
- оценка альтернативных участков лесных дорог;
- построение тематической карты и определение заданного числа ключевых точек лесосырьевой базы;
- коррекция ключевых точек лесосырьевой базы;
- построение оптимальной сети лесных дорог;
- расчет и вывод общих оценочных параметров найденной оптимальной сети.

На выходе данной системы пользователь получает план сети лесных дорог, который обеспечивает доступ к заданным лесным участкам при условии минимизации затрат на дорожное строительство с учетом характеристик лесных

участков, почвенно-грунтовых условий, расположения и характеристик карьеров, наличия водных преград и других факторов.

Опыт эксплуатации первой версии системы оптимального проектирования сети лесовозных автомобильных дорог позволил выявить ряд ее недостатков и определить пути ее совершенствования.

Первым недостатком системы было признано то, что информация о лесосырьевой базе используется на поквартальном уровне детализации. Это означает, что характеристики древостоев вводятся для каждого квартала и для каждой точки этого квартала считаются. Привязка проектируемой дорожной сети также осуществляется поквартально – к центральным точкам (центроидам) кварталов, которые соединяются между собой так называемыми альтернативными участками дорог – прямыми линиями от центроида данного квартала к центроидам всех соседних кварталов. В дальнейшем из этих альтернативных участков составляется искомая сеть дорог. Достаточно большие размеры кварталов (в Республике Карелия это, как правило, участки 1 x 2 км, в Ленинградской области – 1 x 1 км) приводят к тому, что проектируемая сеть лесных дорог получает довольно грубую пространственную привязку, которая не позволяет учитывать локальные особенности почвенно-грунтовых и гидрографических условий. Такой проект сети лесных дорог в дальнейшем требует достаточно существенного уточнения, что может привести к отклонениям от запланированного уровня эффективности.

Вторым существенным недостатком системы было признано отсутствие учета рельефа местности, в которой проектируются лесные дороги.

При подготовке новой версии системы оптимального проектирования сети лесных автомобильных дорог в нее был внесен ряд изменений, позволяющих исправить отмеченные недостатки. Данная статья посвящена описанию модифицированной системы, также в ней приведены результаты апробации новой версии программы в условиях лесозаготовительной компании, находящейся в Ленинградской области.

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ

Для устранения влияния размеров и конфигурации лесной квартальной сети на результаты работы системы оптимального проектирования сети лесных автомобильных дорог было предложено перейти к использованию регулярной сети одинаковых по размеру квадратных участков, размер которых может регулироваться пользователем. Эта сеть создается системой и равномерно покрывает всю территорию рассматриваемой лесосырьевой базы. В дальнейшем эти квадратные участки используются системой так же, как раньше использовались кварталы. Это не

требует кардинальных изменений в самой методике, заложенной в систему.

Преимущества использования сети таких участков заключаются, во-первых, в ее регулярности, тогда как кварталы могли иметь самую непредсказуемую форму и размеры, что накладывало свой отпечаток и на конфигурацию получаемой в конечном итоге сети лесных дорог.

Во-вторых, в этом случае пользователь может сам задавать шаг сети, то есть размер этих элементарных регулярных участков, в зависимости от требуемой степени детализации. Повышение степени детализации, конечно же, существенно увеличивает время, требуемое на осуществление расчетов.

В-третьих, благодаря специальной методике пересчета характеристик древостоя, применение регулярной сети элементарных участков дает возможность использовать данные о лесосырьевой базе как поквартального, так и повыделного уровня детализации. Использование информации в разрезе выделов значительно повышает точность оценки перспективности заготовки на лесном участке лесосырьевой базы любого размера.

В новой версии системы реализован инструмент, который позволяет пользователю выбирать один из трех возможных вариантов шага регулярной сети элементарных участков: 500, 750 и 1000 м.

При этом запас древесины (по породам), доступной в каждом элементарном участке регулярной сети, определяется как сумма произведений объемов в каждом участке лесосырьевой базы (квартале или выделе), полностью или частично попавшем на территорию этого элементарного участка, на долю площади участка лесосырьевой базы, попавшей на территорию элементарного участка:

$$V = \sum_{i=1}^n \left(V_i \cdot \frac{S_{ni}}{S_i} \right),$$

где n – число участков лесосырьевой базы (кварталов или выделов), полностью или частично попавших на территорию элементарного участка регулярной сети; V_i – объем древесины в i -м участке лесосырьевой базы; S_{ni} – площадь перекрытия i -го участка лесосырьевой базы и элементарного участка регулярной сети; S_i – площадь i -го участка лесосырьевой базы.

Учет рельефа местности системой базируется на утверждении, что при прочих равных условиях строительство дороги в ситуации со сложным рельефом сопряжено с большей величиной затрат, чем такое же строительство в условиях равнинной местности. Степень увеличения затрат было предложено оценивать с помощью так называемого коэффициента удлинения дорожного участка, значение которого увеличивается с увеличением уклона местности [1], [9]:

$$m = \frac{L_\phi}{L_e},$$

где L_ϕ – фактическая длина участка дороги; L_e – длина участка дороги по прямой линии.

Значения коэффициента удлинения принимаются в соответствии с табл. 1 [1], [9].

Таблица 1
Ориентировочные значения коэффициента удлинения трассы в зависимости от категории сложности рельефа

Категория рельефа	Рельеф (тип рельефа местности)	Наибольший уклон поверхности земли	Коэффициент удлинения трассы
1	Равнинный	1:15 (67 %)	1,1
2	Слабохолмистый	1:10 (100 %)	1,1–1,15
3	Холмистый (сильнопереесеченный)	1:5 (200 %)	1,15–1,25
4	Гористый	1:3 (333 %)	1,25–1,40
5	Горный	Больше, чем 1:3 (>333 %)	1,5

В системе коэффициенты удлинения определяются для каждого альтернативного участка дорог (от центроида каждого элементарного участка до центроидов всех соседних элементарных участков). Для этого сначала определяется высотное положение начала и конца альтернативного участка дороги, затем вычисляется уклон и по табл. 1 принимается коэффициент удлинения. Уклон ($tg \alpha = i$) вычисляется по формуле:

$$tg \alpha = i = \frac{h}{d} = \frac{H_{кон} - H_{нач}}{d}, \text{ доли единицы,}$$

где h – превышение одной точки над другой (вышей над низшей), м; $H_{кон}$, $H_{нач}$ – проектные отметки конечной и начальной точек участка, м; d – горизонтальное проложение участка, м.

Для определения проектных отметок начала и конца участков дорог используется цифровая модель рельефа – тематическое растровое изображение с шагом 200 м, значение каждого пикселя которого представляет собой высоту соответствующей точки рельефа.

Для построения модели рельефа используется стандартный инструмент ГИС MapInfo, на которой базируется вся система. Инструмент задействуется автоматически при работе исполняемого модуля системы, написанного на языке MapBasic.

Исходными данными для построения цифровой модели рельефа служат координаты и высоты задаваемых пользователем точек. Точки задаются пользователем на отдельном слое ГИС MapInfo. В базу данных этого слоя заносятся высоты этих точек. Чем больше таких точек будет использовано, тем точнее будет модель рельефа.

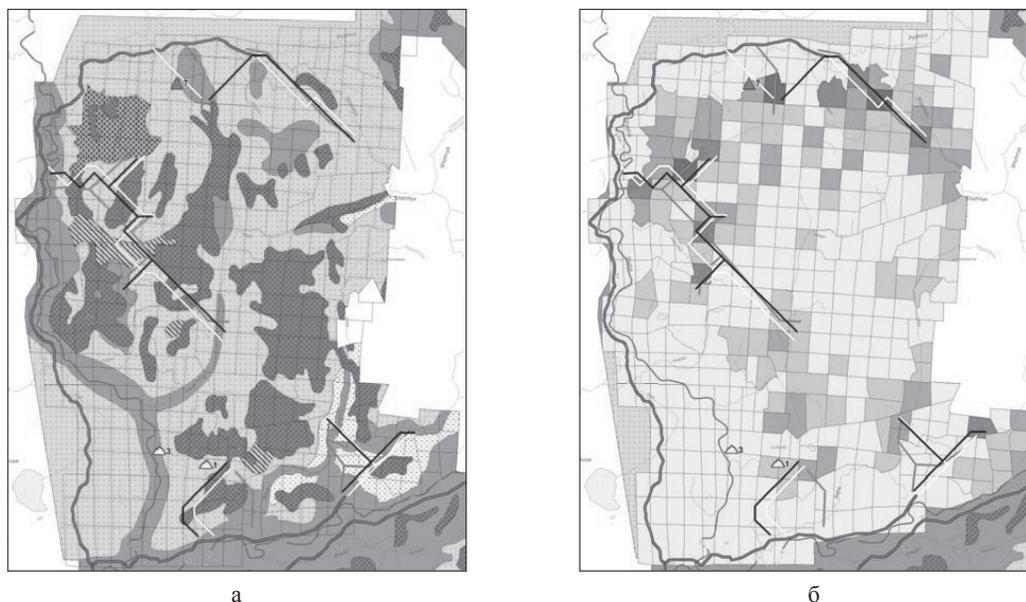


Рис 1. Проектные сети дорог: а – на карте грунтов; б – на тематической карте древостоев (чем темнее цвет, тем больше запас древесины). Серая линия – вариант 1; черная линия – варианты 2 и 3; белая линия – варианты 4 и 5; – пески; – песчано-гравийные; – валунные пески; – супеси; – суглинки; – валунные суглинки

РЕЗУЛЬТАТЫ

Апробация новой версии системы оптимального проектирования сети лесных автомобильных дорог была выполнена на примере части лесосырьевой базы крупного лесозаготовительного предприятия Ленинградской области. Данное предприятие работает в достаточно сложных с точки зрения дорожного строительства условиях. Суглинистые почвы, большое число болот и торфяников, а также рек существенно увеличивают затраты, связанные с дорожным строительством.

Была собрана и введена в систему вся необходимая информация о рассматриваемой лесосырьевой базе, природно-производственных и экономических факторах. В первую очередь это картографические слои квартальной сети, древостоев, почв, гидрографии, высотных отметок рельефа, существующих дорог, карьеров и потребителей продукции лесозаготовок в формате MapInfo. Базы данных этих слоев содержат всю необходимую информацию о параметрах древостоев, высотах

точек, виде и стоимости доступных в каждом карьере материалов, закупаемых потребителями видах лесоматериалов. Кроме того, в систему были введены цены на все виды лесоматериалов и тарифы на их перевозку. Было учтено, что рассматриваемое предприятие на момент сбора информации использовало традиционные российские методы дорожного строительства.

На первом этапе сравнивались 5 вариантов дорожных сетей, первый из которых был построен с помощью старой версии системы (с квартальной детализацией). Остальные 4 варианта использовали новую версию. Варианты 2 и 3 – с детализацией 750 м: 2 – без учета рельефа местности, 3 – с учетом рельефа. Варианты 4 и 5 – с детализацией 500 м: 4 – без учета рельефа, 5 – с его учетом. Полученные результаты приведены на рис. 1 и в табл. 2.

Учет рельефа местности не привел к изменению конфигурации сети дорог ни при детализации 750 м, ни при детализации 500 м, поэтому на рис. 1 приведены только 3 варианта сетей.

Таблица 2

Сравнительные характеристики 5 вариантов дорожных сетей

Вариант	Число элементарных участков, кварталов	Общая протяженность дорог, км	Затраты, млн руб.	Затраты на 1 км, млн руб.	Доступный объем, тыс. куб. м	Число километров на 1 доступную тыс. куб. м, км	Затраты на 1 доступную тыс. куб. м, млн руб.
1. Исходный	429	42,1	117	2,78	427,5	0,098	0,274
2. 750 м	977	43	134,4	3,12	527,9	0,081	0,255
3. 750 м с рельефом	977	47,3	148	3,13	527,9	0,090	0,280
4. 500 м	2185	42,9	140,4	3,27	587,2	0,073	0,239
5. 500 м с рельефом	2185	47,2	154,4	3,27	587,2	0,080	0,263

Сети по вариантам 2 и 3, а также по вариантам 4 и 5 полностью совпали. Было сделано предположение о том, что это связано с исключительно равнинным рельефом на рассматриваемой территории. Учет рельефа повлиял на увеличение объемов дорожного строительства и соответственно привел к удорожанию строительства и ухудшил показатели эффективности. Это можно заметить, анализируя табл. 2.

Анализ данных, приведенных в табл. 2, позволяет сделать вывод о том, что увеличение степени детализации в целом положительно сказывается на качестве получаемого проекта дорожной сети. Это связано в основном с ростом запаса древесины, который становится доступным в случае реализации проекта. Причем этот рост идет быстрее, чем рост протяженности сети дорог. Так, в исходном варианте, при использовании лесных кварталов в качестве элементарных участков, для получения доступа к одной дополнительной тыс. куб. м. древесины необходимо построить в среднем 98 м дорог, при использовании детализации 750 м этот показатель равняется 81 м без учета рельефа и 90 м с учетом рельефа, при 500-метровой детализации – 73 и 80 м соответственно.

Такая же ситуация наблюдается и со средними затратами на получение доступа к одной дополнительной тыс. куб. м. древесины. В исходном варианте это 274 тыс. руб., при детализации 750 м – 255/280 тыс. руб., при детализации 500 м – 239/263 тыс. руб. (здесь в числителе – значение без учета рельефа, в знаменателе – с учетом рельефа).

Такой результат достигается за счет возможности более гибко располагать трассы дорог с тем, чтобы они прошли через наиболее пер-

спективные с точки зрения заготовки участка. Проведенное сравнение показало, что в рассмотренных условиях этот фактор является преобладающим. Даже при некотором увеличении затрат на строительство в условиях менее благоприятных почв и рельефа достигается больший эффект за счет значительно лучших параметров древостоев, через которые проходят дороги. Затраты на строительство 1 км дорог растут с 2,78 млн руб. в исходном варианте через значения 3,12/3,13 при детализации 750 м до 3,27 млн руб. на 1 км при детализации 500 м.

Это подтверждает полезность проведенной модификации системы, которая позволяет одновременно учитывать большинство из существенно влияющих факторов и выбирать правильные решения. В нашем случае такое решение связано с допущением некоторого увеличения затрат на строительство дорог, так как в конечном итоге это позволит повысить эффективность лесозаготовительного производства в целом.

Для уточнения степени влияния рельефа местности на размещение дорожной сети была выполнена еще одна серия экспериментов. При этом использовались те же исходные данные, что и в предыдущем случае, однако для ускорения расчетов во внимание принимался меньший участок лесосырьевой базы. Для оценки влияния более пересеченного рельефа в слой точек была искусственно добавлена локальная возвышенность высотой 330 м, которой на самом деле в этом месте не имеется. Далее с помощью системы оптимального проектирования сети лесовозных автомобильных дорог были построены все 6 вариантов сетей, которые позволяет строить эта система. Результаты представлены на рис. 2 и в табл. 3.

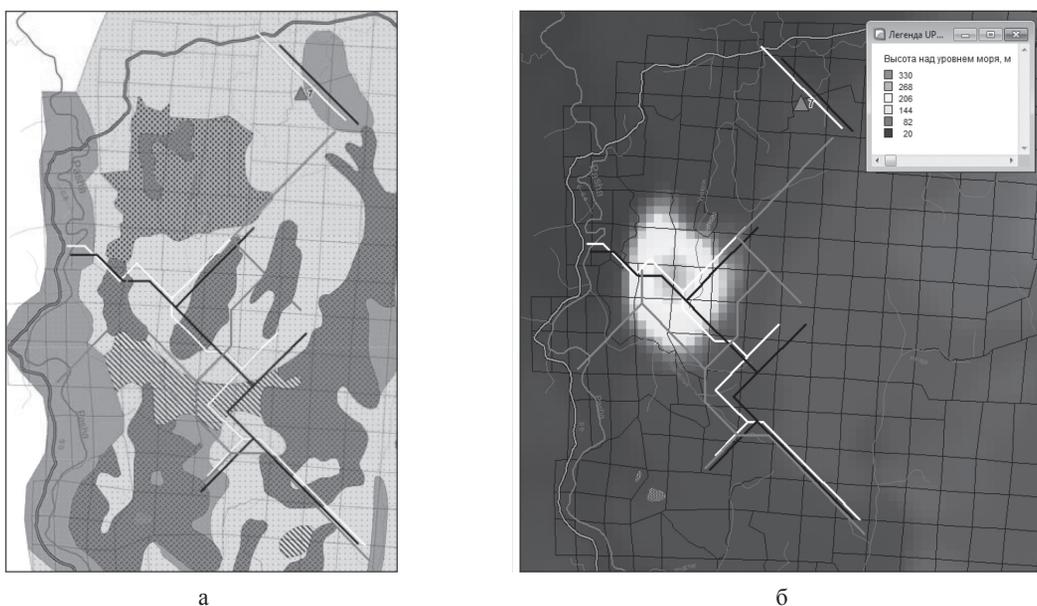


Рис. 2. Проектные сети дорог: а – на карте грунтов; б – на тематическом растре цифровой модели рельефа. Серая линия – варианты 1 и 2; черная линия – варианты 3 и 4; белая линия – варианты 5 и 6; – пески; – песчано-гравийные; – валунные пески; – супеси; – суглинки; – валунные суглинки

Таблица 3

Сравнительные характеристики 6 вариантов дорожных сетей

Вариант	Число элементарных участков	Общая протяженность дорог, км	Затраты, млн руб.	Затраты на 1 км, млн руб.	Доступный объем, тыс. куб. м	Число километров на 1 доступную тыс. куб. м, км	Затраты на 1 доступную тыс. куб. м, млн руб.
1. 1000 м	246	26,7	117,6	4,41	454,4	0,059	0,259
2. 1000 м с рельефом	246	29,5	129,6	4,39	454,4	0,065	0,285
3. 750 м	441	23,7	101,1	4,27	435,4	0,054	0,232
4. 750 м с рельефом	441	26,1	112,0	4,29	437,9	0,060	0,256
5. 500 м	997	23,0	91,1	3,97	435,4	0,053	0,209
6. 500 м с рельефом	997	26,5	102,3	3,86	450,3	0,059	0,227

Как и в предыдущем случае, сети дорог с учетом рельефа и без его учета практически совпали при всех уровнях детализации. Незначительные отличия наблюдались при использовании уровней детализации 750 и 500 м, однако на территории искусственной возвышенности трассы дорог полностью совпали. Более того, при высокой степени детализации система предлагает прокладывать дорогу практически прямо через вершину.

Более детальный разбор этой ситуации показал, что увеличение затрат при необходимости строить дорогу на заболоченной местности является намного более существенным, чем при необходимости пересечь холм. Кроме того, в нашем случае расположение перспективных для заготовки участков также было приурочено к этому холму.

Действительно, в соответствии с принятой классификацией даже такой сравнительно высокий холм в основном подпадает под характеристику «слабохолмистый рельеф». Только один небольшой участок дороги (длиной около 700 м) был охарактеризован как участок в условиях

холмистого рельефа, а это повышает затраты на строительство дороги всего на 13–20%, тогда как строительство на болоте требует в разы больших затрат. Таким образом, изменения трасс дорог следует ожидать в основном в условиях гористого и горного рельефа.

Общая эффективность сети дорог, как и в предыдущем случае, улучшается при увеличении степени детализации (см. табл. 3).

ВЫВОДЫ

Новая версия системы оптимального проектирования сети лесовозных автомобильных дорог за счет увеличения степени детализации и учета большего числа влияющих факторов позволяет на более высоком уровне эффективности обеспечить поддержку принятия решений по планированию транспортного освоения лесосырьевых баз. Учет рельефа местности, реализованный в новой версии системы, позволяет использовать ее не только в условиях равнинного и слабохолмистого рельефа, но и в условиях любого другого типа местности.

* Работа выполнена при поддержке проектов «Новые трансграничные решения в области интенсификации ведения лесного хозяйства и повышения степени использования топливной древесины в энергетике», выполняемого в соответствии с программой добрососедства и партнерства KARELIA ENPI CBC, и «Технико-экономическая и эколого-социальная оценка перспективности заготовки древесной биомассы для нужд местной энергетики с использованием логистического подхода и ГИС-технологий», выполняемого по заданию Минобрнауки в рамках Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булдаков С. И. Проектирование основных элементов автомобильной дороги: Учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2005. 311 с.
2. Буторин Н. Н. Транспортная сеть для освоения лесного массива // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2003. № 6. С. 40–45.
3. Герасимов Ю. Ю. Анализ развития лесозаготовок на северо-западе России // Лес и бизнес. 2007. № 3. С. 58.
4. Герасимов Ю. Ю., Сютнев В. С., Соколов А. П., Катаров В. К. Развитие транспортной инфраструктуры лесной отрасли – опыт Финляндии // Транспортное дело России. 2009. № 7 (68). С. 99–102.
5. Герасимов Ю. Ю., Соколов А. П., Катаров В. К. Разработка системы оптимального проектирования сети лесовозных автомобильных дорог // Информационные технологии. 2011. № 1 (68). С. 39–43.
6. Давыдков Д. Г., Рожин Д. В., Соколов А. П., Сютнев В. С. Система оптимального проектирования лесовозных автомобильных дорог с учетом динамики лесосырьевой базы // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2013. № 4 (133). С. 69–74.
7. Катаров В. К., Рожин Д. В., Туюнен М. В., Редозубов И. В. Расчет стоимости строительства альтернативных участков лесовозных дорог // Транспортное дело России. 2010. № 2. С. 106–111.
8. Рябова О. В., Скрыпников А. В. Оценка транспортно-эксплуатационных характеристик сложных участков плана и продольного профиля с переходными режимами движения потока // Resources and Technology. 2008. № 7. С. 102–103.

9. Салминен Э. О. Лесные дороги: Справочник. СПб.: Лань, 2012. 496 с.
10. Скрыпник В. И., Кузнецов А. В., Баклагин В. Н. Обоснование оптимальных планов заготовки и вывозки леса // *Resources and Technology*. 2012. № 9 (1). С. 47–49.
11. Шегельман И. Р., Скрыпник В. И., Кузнецов А. В. Минимизация затрат при строительстве усов с покрытием из древесных отходов // *Перспективы науки*. 2012. № 28. С. 103–106.
12. Шегельман И. Р., Щукин П. О., Петухов Р. А. Ресурсный подход к развитию региональной сети лесовозных дорог // *Перспективы науки*. 2011. № 26. С. 188–191.
13. Intensification of forest management and improvement of wood harvesting in Northwest Russia – Final report of the research project. Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute; Karjalainen T., Leinonen T., Gerassimov Y., Husso M. & Karvinen S. (eds.). 110. Joensuu, 2009. 151 p.
14. Leinonen T., Honkanen A. CONIFER – Connecting Finnish-Russian Forest Sector Expertise // *Resources and Technology*. 2013. № 10 (1). С. 39–43.

Gerasimov Yu. Yu., Finnish Forest Research Institute (Joensuu, Finland)

Katarov V. K., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Kovaleva N. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Rozhin D. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

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

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

IMPROVEMENT OF LOGISTIC SYSTEM FOR OPTIMAL ROADS' CONSTRUCTION AND FOREST ROADS' NETWORK PLANNING

Results of the improvement of the logistic system for optimal roads' construction and forest roads' network planning are described in the article. A new version of the previously developed system is created. The system is characterized by a greater degree of spatial accuracy with subsequent possibility for change. The new version takes into account a relief of the environment. This consideration is essential when designing effective network of forest roads. The methods and models, as well as the results of testing of the new system are described. Experimental results confirmed usefulness of the modified system, which takes into account the most significant factors affecting the complex. The model is also instrumental in choosing the right solutions. In these specific circumstances, the use of the modified system significantly increases efficiency of the wood harvesting industry as a whole, despite a slight increase in the cost of road construction.

Key words: wood harvesting, forest road network planning, forest road construction, spatial models, digital terrain models, geographical informational systems

REFERENCES

1. Buldakov S. I. *Proektirovanie osnovnykh elementov avtomobil'noy dorogi* [Design of the main elements of the road: a training manual]. Ekaterinburg: UGTU Publ., 2005. 311 p.
2. Butorin N. N. The transport network for the forest resources use [Transportnaya set' dlya osvoeniya lesnogo massiva]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*. 2003. № 6. P. 40–45.
3. Gerasimov Yu. Yu. An analysis of wood harvesting in northwest Russia [Analiz razvitiya lesozagotovok na severozapade Rossii]. *Les i biznes*. 2007. № 3. P. 58.
4. Gerasimov Yu. Yu., Syunev V. S., Sokolov A. P., Katarov V. K. The development of forest industry transport infrastructure – the experience of Finland [Razvitie transportnoy infrastruktury lesnoy otrasli – opyt Finlyandii]. *Transportnoe delo Rossii*. 2009. № 7 (68). P. 99–102.
5. Gerasimov Yu. Yu., Sokolov A. P., Katarov V. K. Development of a logistic system for optimal roads construction and planning of forest road net [Razrabotka sistemy optimal'nogo proektirovaniya seti lesovoznykh avtomobil'nykh dorog]. *Informatsionnye tekhnologii*. 2011. № 1 (68). P. 39–43.
6. Davydov D. G., Rozhin D. V., Sokolov A. P., Syunev V. S. The system for optimal roads construction taking into account the dynamics of forest stands [Sistema optimal'nogo proektirovaniya lesovoznykh dorog]. *Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences*. 2013. № 4 (133). P. 69–74.
7. Katarov V. K., Rozhin D. V., Tuyunen M. V., Redozubov I. V. The cost calculating of forest roads alternative sections construction [Raschet stoimosti stroitel'stva alternativnykh uchastkov lesovoznykh dorog]. *Transportnoe delo Rossii*. 2010. № 2. P. 106–111.
8. Ryabova O. V., Sкрыпников А. В. Estimation of road service qualities under conditions of movement transitive modes [Otsenka transportno-ekspluatatsionnykh kharakteristik slozhnykh uchastkov plana i prodol'nogo profilya s perekhodnymi rezhimami dvizheniya potoka]. *Resources and Technology*. 2008. № 7. С. 102–103.
9. Salminen E. O. *Lesnye dorogi. Spravochnik* [Forest roads. Handbook]. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2012. 496 p.
10. Скрыпник В. И., Кузнецов А. В., Баклагин В. Н. Feasibility of wood harvesting and hauling processes planning [Obosnovanie optimal'nykh planov zagotovki i vyvozki lesa]. *Resources and Technology*. 2012. № 9 (1). С. 47–49.
11. Shegel'man I. R., Sкрыпник В. И., Кузнецов А. В. Minimizing of construction cost for forest roads with pavement of logging residues [Minimizatsiya zatrat pri stroitel'stve usov s pokrytiem iz drevesnykh otkhodov]. *Perspektivy nauki*. 2012. № 28. P. 103–106.
12. Shegel'man I. R., Shchukin P. O., Petukhov R. A. Resource-based approach to the development of a regional forest roads network [Resursnyy podkhod k razvitiyu regional'noy seti lesovoznykh dorog]. *Perspektivy nauki*. 2011. № 26. P. 188–191.
13. Intensification of forest management and improvement of wood harvesting in Northwest Russia – Final report of the research project. Metlan työraportteja. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute*; Karjalainen T., Leinonen T., Gerassimov Y., Husso M. & Karvinen S. (eds.). 110. Joensuu, 2009. 151 p.
14. Leinonen T., Honkanen A. CONIFER – Connecting Finnish-Russian Forest Sector Expertise. *Resources and Technology*. 2013. № 10 (1). С. 39–43.

Поступила в редакцию 20.08.2013

ИГОРЬ ВЛАДИСЛАВОВИЧ ГРИГОРЬЕВ

доктор технических наук, профессор кафедры технологии лесозаготовительных производств, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
silver73@inbox.ru

АНТОНИНА ИВАНОВНА НИКИФОРОВА

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии лесозаготовительных производств, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
tlzp@inbox.ru

АЛЕКСАНДР АНДРЕЕВИЧ ПЕЛЫМСКИЙ

аспирант кафедры технологии лесозаготовительных производств, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
tlzp@inbox.ru

ЕГОР GERMANOVICH ХИТРОВ

аспирант кафедры технологии лесозаготовительных производств, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
tlzp@inbox.ru

АННА МИХАЙЛОВНА ХАХИНА

аспирант кафедры технологии лесозаготовительных производств, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
tlzp@inbox.ru

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ
РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ЛЕСНОГО ГРУНТА**

Исследуется вопрос экспериментального определения времени релаксации напряжений лесного почвогрунта. Даются сведения об использованной лабораторной установке, методике проведения опытов и обработки экспериментальных данных. На примере суглинки установлено влияние влажности и температуры грунта на время релаксации напряжений. Приведены составленные по результатам обработки экспериментальных данных уравнения регрессии, адекватность которых подтверждена с точки зрения математической статистики.

Ключевые слова: грунт, температура, влажность, деформации сжатия, релаксация напряжений

ВВЕДЕНИЕ

При определении глубины колеи, образующейся при проходе лесозаготовительной машины по лесному почвогрунту, получили распространение модели, основанные на решении задачи о вдавлении штампа в упругое полупространство (например, [2], [4]). В рамках этих моделей вначале рассчитывается величина вертикальной деформации сжатия почвогрунта под действием на него нормального давления со стороны машины, при этом важно учесть и время воздействия нагрузки на грунт [1], [3]. Для этого в расчетах пользуются значением удельного давления со стороны машины p , умноженным на коэффициент динамичности, который определяется по формуле [1]:

$$K_d = 1 - \exp\left(-\frac{t}{t_p}\right), \quad (1)$$

где t – время воздействия, определяемое скоростью движения машины и геометрическими параметрами движителя, t_p – время релаксации напряжений.

Время релаксации напряжений связано с механическими свойствами грунта и определяется экспериментально [1]. Исследования, проводившиеся ранее в этой области, не отражают влияния температуры почвогрунта и его влажности на время релаксации напряжений. Ввиду того что и температура, и влажность почвогрунта разрабатываемой лесосеки варьируются в широком диапазоне, проведение дополнительных экспериментальных исследований по определению влияния этих параметров на релаксационные свойства лесного грунта представляется актуальным.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения лабораторных опытов использован экспериментальный стенд, схема которого представлена на рис. 1.

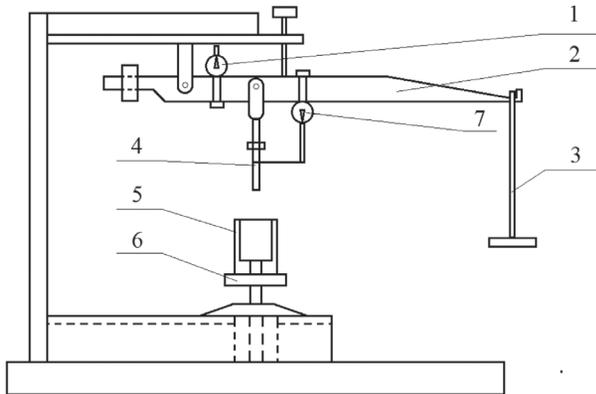


Рис. 1. Схема экспериментального стенда по исследованию развития деформаций лесного грунта во времени:
1 – индикатор; 2 – рычаг; 3 – подвеска; 4 – штамп;
5 – цилиндрическая форма с образцом грунта;
6 – столик; 7 – микрометр

Суть экспериментов заключалась в следующем. Экспериментальный грунт заданной массы m уплотнялся в цилиндрической форме 5, после чего форма с грунтом размещалась на столике 6. Штамп 4 опускался на образец грунта, включалась видеокамера (на рис. 1 условно не показана), затем на подвеске 3 размещался груз. Показания микрометра фиксировались при помощи камеры. Фотохронометрическая съемка показаний микрометра осуществлялась в течение 40 с, значения показаний в это время принимались за максимальные.

При проведении экспериментов по определению характера развития деформаций сжатия лесного грунта во времени при действии постоянной нагрузки в качестве контролируемых независимых параметров были приняты:

- тип грунта (определялся по стандартной методике, суглинок);
- влажность грунта на границе текучести и раскатывания (определялась как среднее значение соответствующих характеристик трех проб экспериментального грунта по стандартной методике, в опытах равнялась соответственно 50 и 20 %);
- масса и начальная плотность экспериментального грунта (масса определялась на электронных весах и составляла в среднем 100 г, плотность грунта достигалась при помощи стандартного прибора уплотнения грунта, среднее значение плотности в опытах – 1150 кг/м³);
- геометрические параметры цилиндрической формы 5 (рис. 1) – внутренний диаметр $d_{\text{внутр}} = 50$ мм;
- вес эталонного груза q , создающего давление на образец грунта ($q = 20$ Н).

Переменными факторами являлись:

- влажность экспериментального грунта (предварительно определялась как среднее значение влажности трех проб грунта по стандартной методике, после окончания каждого опыта образец подвергали отдельным испытаниям по определению влажности весовым методом);
- температура экспериментального грунта (принималась равной температуре воздуха, при которой грунт предварительно выдерживался, контролировалась при помощи термометра).

Основные уровни и интервалы варьирования переменных факторов в ходе исследований следующие:

- влажность экспериментального грунта, W , 30–60 %, интервал 15 %;
- температура экспериментального грунта, T , 5–25 °С, интервал 10 °С.

Число повторений каждого опыта равнялось пяти ($n = 5$).

Выходным параметром являлось время релаксации t_p напряжений в грунте, которое определялось косвенным путем способом, изложенным ниже.

Примем во внимание, что коэффициент K_d в формуле (1) является понижающим, то есть при K_d , равном единице, значение деформации сжатия максимально. Поскольку:

$$\Delta h(t) = \frac{p \cdot K_d}{E} h_0 = \frac{p}{E} h_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{t_p}\right) \right], \quad (2)$$

где h_0 – начальная высота размещенного в форме 5 образца грунта, E – модуль общей деформации грунта, справедливо следующее равенство:

$$\Delta h_{\max} = \frac{p}{E} h_0. \quad (3)$$

После расшифровки результатов видеосъемки рассчитывалось отношение показаний микрометра в определенный момент времени $\Delta h(t)$ к максимальному значению Δh_{\max} для каждого опыта.

По полученным данным для каждого образца грунта при помощи метода наименьших квадратов строились корреляционные уравнения вида:

$$\frac{\Delta h(t)}{\Delta h_{\max}} = \left[1 - \exp(-a_p t) \right], \quad (4)$$

откуда затем определялось время релаксации t_p в каждом опыте по формуле:

$$t_p = \frac{1}{a_p}. \quad (5)$$

Расчетное значение критерия Кохрена G_p для результатов опытов составляет 0,1721, что меньше табличного значения (0,3600). Таким образом, можно говорить о том, что опыты воспроизводимы.

Статистическая обработка результатов (средние значения $t_{p(средн)}$ для каждого опыта) позволила получить уравнение для времени релаксации напряжений лесного грунта в зависимости от влажности и температуры в виде линейной и квадратичной зависимости.

Линейное уравнение имеет вид:

$$t_p = 1,7 + 0,565 \cdot W - 0,0436 \cdot T - 0,000747 \cdot W \cdot T \quad (6)$$

Квадратичному уравнению соответствует формула:

$$t_p = 2,76 + 0,0314 \cdot W - 0,145 \cdot T - 0,000747 \cdot W \cdot T + 0,000279 \cdot W^2 + 0,00338 \cdot T^2 \quad (7)$$

В таблице представлены сведения об отклонении расчетных значений времени релаксации, получаемых по уравнениям (6), (7), от его среднего значения по результатам экспериментов.

Отклонение расчетного значения времени релаксации от экспериментального значения

W, %	T, °C	$t_{p(средн)}$, с	Расчеты по уравнению (6)		Расчеты по уравнению (7)	
			tp(расч), с	Δ, %	tp(расч), с	Δ, %
30	5	3,19	3,065	-3,9	3,201	0,3
45	5	3,915	3,856	-1,5	3,929	0,4
60	5	4,814	4,648	-3,4	4,784	-0,6
30	15	2,243	2,405	7,2	2,202	-1,8
45	15	2,824	3,084	9,2	2,819	-0,2
60	15	3,522	3,764	6,9	3,562	1,1
30	25	1,855	1,745	-5,9	1,88	1,3
45	25	2,4	2,312	-3,7	2,385	-0,6
60	25	3,031	2,88	-5	3,015	-0,5

Из таблицы видно, что максимальное отклонение расчетных значений времени релаксации, рассчитанных по уравнению (6), от данных опытов составляет 9,2%, по уравнению (7) – 1,8%.

При этом расчетное значение критерия Фишера, который характеризует адекватность полученных моделей данным экспериментов, при использовании уравнения (6) составит 4,75, уравнения (7) – 2,35.

Несмотря на то что с точки зрения статистики адекватным можно признать только квадратичную зависимость (7), на наш взгляд, на практике в приближенных расчетах можно пользоваться и уравнением (6), поскольку процентное отклонение получаемых по нему расчетных данных от экспериментальных не велико.

Графики на рис. 2–4 показывают отношение текущей деформации сжатия к максимальному значению, принятому за единицу, в зависимости от влажности грунта при различных температу-

рах (графики построены по уравнению (4), в котором использовано выражение (7) для определения времени релаксации t_p).

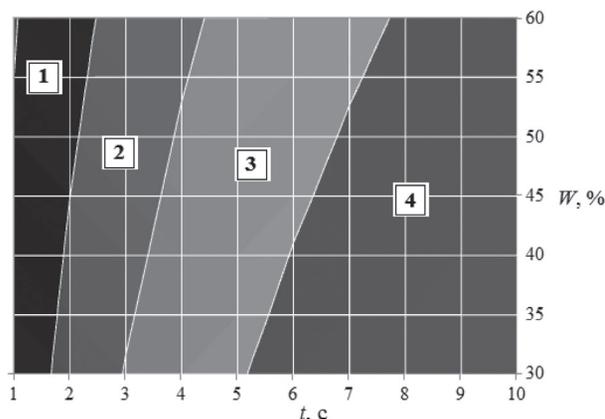


Рис. 2. Развитие деформаций во времени при температуре грунта 5 °C: 1 – 0,2–0,4; 2 – 0,4–0,6; 3 – 0,6–0,8; 4 – 0,8–1

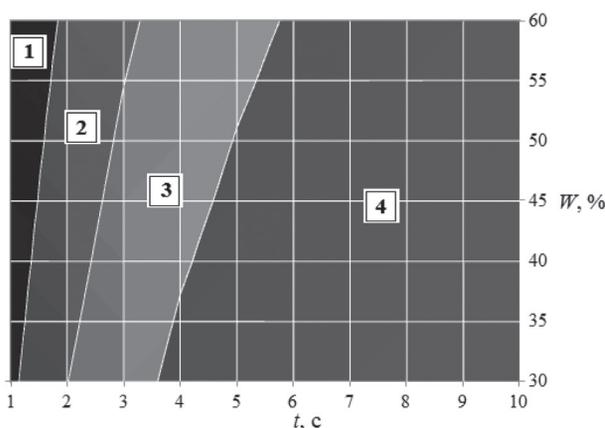


Рис. 3. Развитие деформаций во времени при температуре грунта 15 °C: 1 – 0,2–0,4; 2 – 0,4–0,6; 3 – 0,6–0,8; 4 – 0,8–1

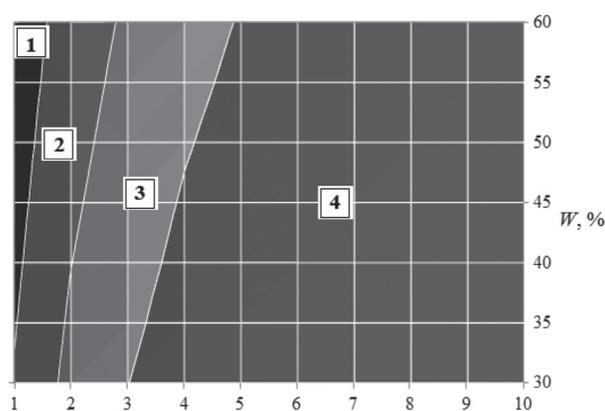


Рис. 4. Развитие деформаций во времени при температуре грунта 25 °C: 1 – 0,2–0,4; 2 – 0,4–0,6; 3 – 0,6–0,8; 4 – 0,8–1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют сделать следующие выводы:

– Результаты опытов по определению времени релаксации напряжений лесного грунта были воспроизводимы (расчетное значение критерия Кохрена составило 0,1721).

– Время релаксации напряжений в лесном почвогрунте зависит от температуры и влажности грунта. Полученная по результатам обработки регрессионная модель имеет вид уравнения (7). Модель адекватна полученным экспериментальным данным (расчетное значение критерия Фишера составляет 2,35).

– При снижении температуры грунта и увеличении его влажности деформации сжатия развиваются медленнее. Например, при температуре грунта 25 °С, по данным опытов, до 80% деформации сжатия приходится на первые 3 с действия нагрузки, а при 5 °С деформации достигнут той же величины за 5 с (рис. 2–4). Этот факт подтверждает важность учета скорости движения машины по грунту лесосеки при определении глубины образующейся колеи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агейкин Я. С. Вездеходные колесные и комбинированные движители: теория и расчет. М.: Машиностроение, 1972. 184 с.
2. Григорьев И. В., Лепилин Д. В., Барашков И. А., Киселев В. С., Киселев Д. С. Обоснование расчетных схем при теоретических исследованиях динамического уплотнения почвогрунта трелевочной системой // Технология и оборудование лесопромышленного комплекса: Межвузовский сборник научных трудов. Вып. 1. СПб.: ЛТА, 2008. С. 11–20.
3. Киселев Д. С. Уменьшение колееобразования при работе лесных колесных машин на переувлажненных почвогрунтах: Дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2013. 160 с.
4. Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Жукова А. И. Особенности динамического уплотнения почвы при ее циклическом нагружении // Актуальные проблемы современной науки. 2006. № 3 (30). С. 286–293.

Grigor'ev I. V., Saint Petersburg State Forest Technical University (Saint Petersburg, Russian Federation)
Nikiforova A. I., Saint Petersburg State Forest Technical University (Saint Petersburg, Russian Federation)
Pelymskiy A. A., Saint Petersburg State Forest Technical University (Saint Petersburg, Russian Federation)
Khitrov E. G., Saint Petersburg State Forest Technical University (Saint Petersburg, Russian Federation)
Khakhina A. M., Saint Petersburg State Forest Technical University (Saint Petersburg, Russian Federation)

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF STRESS RELAXATION TIME FOR FOREST SOILS

The article focuses on the experimental study of the stress relaxation time for forest soil. The paper provides information about used laboratory equipment, the way experiments have been conducted, and experimental data processing. On the example of loam the influence of soil moisture and temperature on the time of stress relaxation was determined. Further information is based on the results of experimental data obtained by the use of regression equations.

Key words: soil, temperature, humidity, strain compression, stress relaxation

REFERENCES

1. Ageykin Ya. S. *Vezdekhodnye kolesnyye i kombinirovannyye dvizhiteli: teoriya i raschet* [All-terrain wheels and dual propulsion theory and calculation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 184 p.
2. Grigor'ev I. V., Lepilin D. V., Barashkov I. A., Kiselev V. S., Kiselev D. S. Justification of design models in theoretical studies of dynamic compaction soil-ground skidding system [Obosnovanie raschetnykh skhem pri teoreticheskikh issledovaniyakh dinamicheskogo uplotneniya pochvogrunta trelevochnoy sistemoy]. *Tekhnologiya i oborudovanie lesopromyshlennogo kompleksa* [Technology and equipment of timber industry complex]. Issue 1. St. Petersburg, LTA Publ., 2008. P. 11–20.
3. Kiselev D. S. *Umen'shenie koleeobrazovaniya pri rabote lesnykh kolesnykh mashin na pereuvlazhnennykh pochvogrun-takh. Diss. kand. tekhn. nauk* [The decrease rutting when working forest wheeled vehicles on waterlogged soils. Diss. candidate. techn. science]. Arkhangelsk, 2013. 160 p.
4. Shapiro V. Ya., Grigor'ev I. V., Zhukova A. I. Features of dynamic compaction of soil during its cyclic loading [Osobennosti dinamicheskogo uplotneniya pochvy pri ee tsiklicheskom nagruzhении]. *Aktual'nye problemy sovremennoy nauki* [Actual problems of modern science]. 2006. № 3 (30). P. 286–293.

Поступила в редакцию 25.06.2013

АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ ПИТУХИН

доктор технических наук, профессор, декан лесоинженерного факультета, заведующий кафедрой технологии металлов и ремонта, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
pitukhin@psu.karelia.ru

АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ ПЕТРОВ

кандидат технических наук, преподаватель кафедры промышленного транспорта и геодезии лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
sssn20088@yandex.ru

АРТЕМ ВАЛЕРЬЕВИЧ СТЕПАНОВ

аспирант кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
jals@onego.ru

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПРЕДЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ С ПОЗИЦИИ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ*

Рассматривается метод оценки вероятности безотказной работы дорожных покрытий лесовозных автомобильных дорог вследствие появления трещины предельных размеров при однократном приложении нагрузки. В основу положены известные методы механики разрушения, применяющиеся ранее авторами для оценки надежности металлоконструкций. В отличие от классического подхода здесь предусмотрено вычисление не конкретной составляющей тензора напряжений, а интенсивности действующих напряжений в целом. Вероятность безотказной работы определена аналитическим методом для любого заданного закона распределения. Рассмотрены и частные случаи для закона нормального распределения Гаусса и двухпараметрического распределения Вейбулла. Представленные в статье результаты получены для статического нагружения. Предложенный вероятностный подход может быть полностью применен и для случая динамического нагружения. При этом вместо критического коэффициента интенсивности напряжений в полученных зависимостях следует использовать критический коэффициент интенсивности напряжений при динамическом нагружении.

Ключевые слова: предельная нагрузка, однократное воздействие, вероятность безотказной работы

Для описания процесса разрушения лесовозных [2] автомобильных дорог могут быть использованы структурные либо полуэмпирические модели. Структурные модели основаны на математическом описании физики процесса накопления повреждений на одном либо нескольких уровнях структуры [6], [7]. Развитие процессов поврежденности зависит как от внутренних, так и от внешних причин. Разрушение дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог [1] в данном случае будем рассматривать вследствие появления трещины предельных размеров при однократном приложении нагрузки.

Раскрытие трещины в твердом теле может быть осуществлено одним из трех известных путей (рис. 1): при нормальных напряжениях возникает трещина типа «разрыв» (тип I), при плоском сдвиге образуется трещина типа «сдвиг» (тип II), при антиплоском – типа «срез» (тип III).

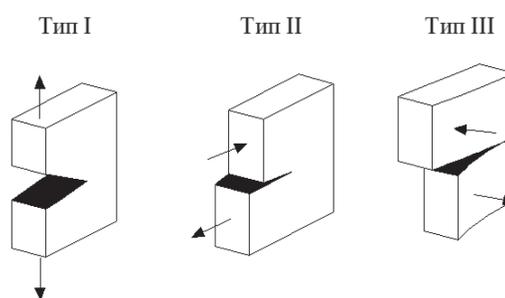


Рис. 1. Типы растрескивания

Примем допущение, что при взаимодействии колеса с поверхностью лесовозной дороги раскрытие трещины происходит по всем трем микромеханизмам в силу трехмерного напряженно-деформированного состояния [3]. Раскрытие трещины может происходить при однократном либо циклическом приложении нагрузки.

При однократном приложении постоянно возрастающей нагрузки (при движении транс-

портного средства с нагрузкой на ось выше критической) условия разрушения записываются в виде предельной поверхности:

$$\varphi(K_I, K_{II}, K_{III}) = 0. \quad (1)$$

Например,

$$\left(\frac{K_I}{K_{IC}}\right)^{m_1} + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIC}}\right)^{m_2} + \left(\frac{K_{III}}{K_{IIIC}}\right)^{m_3} = 1, \quad (2)$$

где $m_1, m_2, m_3, K_{IC}, K_{IIC}, K_{IIIC}$ – константы материала; K_I, K_{II}, K_{III} – коэффициент интенсивности напряжений по соответствующим типам растрескивания [4].

Или в частном случае:

$$\alpha_1 \frac{K_I}{K_{IC}} + \alpha_2 \frac{K_{II}}{K_{IIC}} + \alpha_3 \frac{K_{III}}{K_{IIIC}} = 1, \quad (3)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1,$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – весовые коэффициенты.

При допущении, что раскрытие трещины осуществляется по трем механизмам, коэффициент интенсивности напряжений K_i может быть определен по формуле:

$$K_i = Y_i(l) \sigma_i \sqrt{\pi l}, \quad (4)$$

где σ_i – интенсивность напряжений; $Y_i(l)$ – коэффициент, учитывающий размеры покрытия и вид дефекта; l – длина трещины.

Условие разрушения в этом случае запишется в виде:

$$K_i \geq K_{iC}. \quad (5)$$

Зная критический коэффициент интенсивности напряжений K_{iC} , можно определить вероятность безотказной работы P при предположении, что плотность распределения вязкости разрушения материала дорожной конструкции $f_1(K_{iC})$ и коэффициента интенсивности напряжений $f_2(K_i)$ известны. Кроме того, предположим их независимость. Тогда искомая функция определится уравнением:

$$P = \Pr \{K_{iC} - K_i \geq 0\}. \quad (6)$$

Вероятность того, что коэффициент интенсивности напряжений находится в интервале $\left(K_i^0 - \frac{dK_i}{2}, K_i^0 + \frac{dK_i}{2}\right)$, определяется известным равенством:

$$\Pr \left(K_i^0 - \frac{dK_i}{2} \leq K_i \leq K_i^0 + \frac{dK_i}{2} \right) = f_2(K_i^0) dK_i. \quad (7)$$

Вероятность того, что вязкость разрушения K_{iC} превышает некоторое значение коэффициента интенсивности напряжений K_i^0 , определится выражением:

$$P = \Pr(K_{iC} > K_i^0) = \int_{K_i^0}^{\infty} f_1(K_{iC}) dK_{iC}. \quad (8)$$

Вероятность того, что значение коэффициента интенсивности напряжений K_i заключено в малом интервале dK_i , а вязкость разрушения K_{iC} превышает коэффициент интенсивности напряжений, задаваемый этим интервалом, имеет вид:

$$f_2(K_i^0) dK_i \int_{K_i^0}^{\infty} f_1(K_{iC}) dK_{iC}. \quad (9)$$

Таким образом, зависимость для оценки вероятности безотказной работы при однократном нагружении путем интегрирования по вязкости разрушения запишется:

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(K_{iC}) \left[\int_{-\infty}^{K_{iC}} f_2(K_i) dK_i \right] dK_{iC}. \quad (10)$$

В случае, когда величины K_i и K_{iC} распределены по нормальному закону, с математическими ожиданиями K_i, K_{iC} и дисперсиями $D_{K_i}, D_{K_{iC}}$, вероятность безотказной работы P может быть определена по формуле:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (11)$$

$$z = -\frac{\bar{K}_{iC} - \bar{K}_i}{\sqrt{D_{K_{iC}} + D_{K_i}}}.$$

Если величины K_i и K_{iC} имеют двухпараметрическое распределение Вейбулла, вероятность безотказной работы определяется формулой:

$$P = 1 - \int_0^{\infty} \left(\frac{x}{\theta_i}\right)^{\alpha_i} \frac{\alpha_i}{x} \exp \left[-\left(\frac{x}{\theta_{iC}}\right)^{\alpha_{iC}} - \left(\frac{x}{\theta_i}\right)^{\alpha_i} \right] dx, \quad (12)$$

где α_i, θ_i – соответственно параметры формы и масштаба в распределении коэффициента интенсивности напряжений; α_{iC}, θ_{iC} – соответственно параметры формы и масштаба в распределении вязкости разрушения.

Представленные выводы верны для статического нагружения. Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{iC} определяется экспериментально при статическом нагружении. На практике имеет большое значение и ударное нагружение. Так, при движении лесовозных автопоездов по дороге, при проезде автомобиля через выступ неровности возникает динамический удар на покрытие на некотором расстоянии за ним, в результате чего нагрузка на покрытие значительно увеличивается. В случае динамического нагружения вычисляется динамический коэффициент интенсивности напряжений K_{iDP} , который сравнивается с критическим значением K_{iDC} . Параметр K_{iDC} является характеристикой материала, определяется экспериментально и зависит от скорости нагружения. Вероятностный подход, изложенный выше, может быть полностью применен и для случая динамического нагружения [5].

* Работа выполнена при поддержке международного проекта «Новые трансграничные решения в области интенсификации ведения лесного хозяйства и повышения степени использования топливной древесины в энергетике» ППС ЕИСП «Карелия» в рамках реализации Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурмистрова О. Н. Повышение надежности и эффективности лесовозных автомобильных дорог в условиях Северо-Запада: Дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2006. 392 с.
2. Петров А. Н., Степанов А. В. Оценка качества содержания лесовозных автомобильных дорог // Повышение эффективности лесного комплекса Республики Карелия: Материалы третьей республиканской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, докторантов. Петрозаводск, 2012. С. 33–35.
3. Питухин А. В., Петров А. Н. Влияние ровности покрытий на работоспособность автомобильных дорог // Транспортное дело России. 2010. № 5 (78). С. 71–75.
4. Питухин А. В. Вероятностно-статистические методы механики разрушения и теории катастроф в инженерном проектировании. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1998. 304 с.
5. Питухин А. В., Петров А. Н., Марков В. И., Степанов А. В. Метод определения вероятности безотказной работы участка лесовозной автомобильной дороги вследствие усталостного изнашивания дорожного покрытия // Транспортное дело России. 2013. № 2 (105). С. 15–18.
6. Pitukhin A. V. Optimal design problems using fracture mechanics methods // Computers and structures. 1997. № 4 (65). P. 621–624.
7. Pitukhin A. V. Fracture mechanics and optimal design // International journal for numerical methods in engineering. 1992. № 3 (34). P. 933–940.

Pitukhin A. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Petrov A. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Stepanov A. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

ESTIMATION OF ROAD COATING RELIABILITY UNDER LIMITED LOADS CALCULATED BY MEANS OF FRACTURE MECHANICS METHOD

The article considers a method evaluating reliability of the logging road coverings in consequence of the extreme size cracks' occurrences under single load application. The well-known methods of fracture mechanics are used. The authors of the article used this method earlier to assess reliability of steel structures. In contrast to the classical approach, the calculation of a particular component of the tensor directions is not considered, instead the intensity of the existing stresses as a whole is calculated. The probability of a non-failure work is defined by the analytical method for any given distribution law. Some special cases for the Gauss law of normal distribution and two-parametrical Weibull distribution are considered. The results presented in the article were obtained for static loading. The probability approach proposed in the article can be fully applied to the case of dynamic loading. Though it should be noted that instead of the critical stress intensity factor in the obtained dependencies the critical stress intensity factor under dynamic loading should be used.

Key words: limiting loads, single exposure, reliability function

REFERENCES

1. Burmistrova O. N. *Povyshenie nadezhnosti i effektivnosti lesovoznykh avtomobil'nykh dorog v usloviyakh Severo-Zapada. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Increase of reliability and efficiency of logging roads in the North-West. Dr. tech. sci. diss.]. Voronezh, 2006. 392 p.
2. Petrov A. N., Stepanov A. V. Quality estimation of the logging roads' maintenance [Otsenka kachestva sodержaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog]. *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa Respubliki Kareliya: Materialy tret'ey respublikanskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov, doktorantov* [Increase of the forest complex efficiency in the Republic of Karelia: Materials the third Republican scientific conference of young scientists, postgraduates, doctoral students]. Petrozavodsk, 2012. P. 33–35.
3. Pitukhin A. V., Petrov A. N. The influence of the coatings' flatness on the performance of roads [Vliyanie rovnosti pokrytiy na rabotosposobnost' avtomobil'nykh dorog]. *Transportnoe delo Rossii* [Russian carrying trade]. 2010. № 5 (78). P. 71–75.
4. Pitukhin A. V. *Veroyatnostno-statisticheskie metody mekhaniki razrusheniya i teorii katastrof v inzhenernom proektirovanii* [Probabilistic-statistical methods of fracture mechanics and the theory of catastrophes in engineering design]. Petrozavodsk, Izd-vo PetrSU, 1998. 304 p.
5. Pitukhin A. V., Petrov A. N., Markov V. I., Stepanov A. V. Reliability function estimation method of the timber road section due to road coating fatigue wear [Metod opredeleniya veroyatnosti bezotkaznoy raboty uchastka lesovoznoy avtomobil'noy dorogi vsledstvie ustalostnogo iznashivaniya dorozhnogo pokrytiya]. *Transportnoe delo Rossii* [Russian carrying trade]. 2013. № 2 (105). P. 15–18.
6. Pitukhin A. V. Optimal design problems using fracture mechanics methods // Computers and structures. 1997. № 4 (65). P. 621–624.
7. Pitukhin A. V. Fracture mechanics and optimal design // International journal for numerical methods in engineering. 1992. № 3 (34). P. 933–940.

Поступила в редакцию 21.10.2013

ЛЮБОВЬ ФЕДОРОВНА СЕЛЮТИНА

кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры, строительных конструкций и геотехники строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
selutinalf@mail.ru

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ С УЧЕТОМ ВЕТРОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ*

Рассмотрены здания многофункционального назначения высотой 13–23 этажа. Исследованы 6 моделей зданий в программном комплексе «Мономах». Модели зданий имеют сложную форму в плане, перепады по высоте, различные конструктивные системы, вертикальные временные нагрузки: полной величины и пониженного значения. Изучено влияние на перемещения верха здания: шага вертикальных несущих конструкций, расхода материалов, величины временных нагрузок, угла атаки ветра. По результатам моделирования установлено, что перемещения верха здания зависят в большей степени от шага несущих конструкций, в меньшей степени – от величины временной нагрузки. На перемещения верха здания влияет угол атаки ветра. При угле атаки ветра 135° перемещения максимальные. Для всех высот здания статическая составляющая больше пульсационной составляющей ветровой нагрузки.

Ключевые слова: метод конечных элементов, статическая составляющая, пульсационная составляющая ветровой нагрузки

Строительство многоэтажных зданий в Карелии и других регионах развивается по пути усложнения объемно-планировочных решений на основе комбинированных конструктивных систем с нерегулярной структурой по высоте, использования легких долговечных материалов для ограждающих конструкций. Вариантное проектирование в программных средах рассматривается специалистами как одно из главных направлений в создании эффективных конструктивных систем многоэтажных зданий [1], [2], [5].

Цель исследования – изучение возможностей применения компьютерных программ при вариантном проектировании многоэтажных зданий минимальной материалоемкости.

Метод исследования. Исследование выполнено в программном комплексе «Мономах 4.5». С помощью программы «Компоновка» реализован сбор и расчет конечно-элементных моделей. Варьируемыми параметрами являлись: тип несущих конструкций и их шаг, высота здания, величина и направление нагрузок.

Нагрузки. Вертикальные нагрузки рассмотрены для двух вариантов: при полной величине временной нагрузки и ее пониженном значении [3]. Направление ветровой нагрузки рассмотрено при угле атаки 90° (ветер 1) и при угле атаки 135° (ветер 2) [3].

Характеристика несущих конструкций зданий. Несущие вертикальные и горизонтальные конструкции запроектированы из монолитного бетона. Толщина стен цокольного этажа 400 мм, толщина стен вышележащих этажей 250 мм. Же-

лезобетонные плиты междуэтажных перекрытий и покрытия толщиной 160 мм. Рассмотрены шесть моделей компоновки несущих стен.

Характеристика наружных стен. Наружные стены двух типов: из монолитного железобетона и из газобетонных блоков, использована система вентилируемого фасада. Теплоизоляция: плиты ROCKWOOL марки ЛАЙТ БАТТС толщиной 130 мм и плиты ВЕНТИ БАТТС D толщиной 100 мм [4]. Наружная отделка стен плитами КраспанКолор и профилированными листами; отделка цокольной части запроектирована камнями «Меликонполар» толщиной 120 мм, утеплитель – «Техноплекс» марки 35 толщиной 120 мм.

Характеристики моделей здания. Исследованы шесть моделей здания (рис. 1). Модель здания № 1 постоянной высоты, модели № 2–6 имеют перепады по высоте. На 1–3-м этажах размещены помещения торгового и социального назначений, поэтому для этой части здания размеры в плане и высота этажей, а также временные нагрузки больше, чем на верхних (жилых) этажах [7].

Характеристики моделей (рис. 1) представлены в таблице.

В модель здания № 1 включены 6 вариантов, которые отличаются: шагом несущих конструкций (варианты 1, 2, 3, 4 – шаг несущих конструкций 3,55 м; варианты 5, 6 – шаг несущих конструкций 7,1–7,325 м) и величиной нагрузок (варианты 1, 2, 5 – полные значения вертикальной временной нагрузки; варианты 3, 4, 6 – пониженные значения [7]).

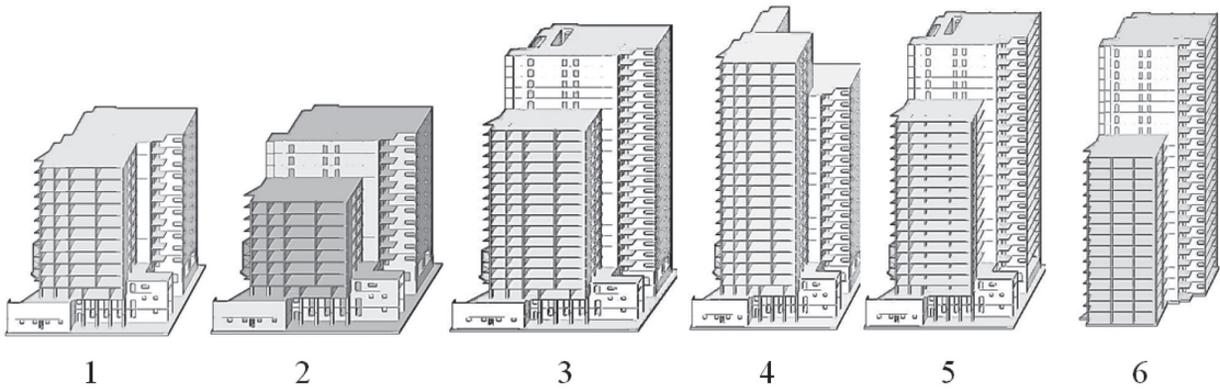


Рис. 1. Модели зданий

Общие характеристики моделей здания

№ модели здания	Высота, м	Перепад по высоте (отметка), м	Размеры, м		
			Нижняя часть (1–3-й этажи)	Средняя часть (от 3-го этажа до перепада)	Верхняя часть
1	38,02	нет	43,23 x 20,53	32,64 x 20,53 (с 3-го до верхнего этажа)	–
2	38,02	29,02	43,23 x 20,53	32,64 x 20,53	32,64 x 12,055
3	68,02	53,02	43,23 x 20,53	32,64 x 20,53	32,64 x 12,055
4	68,02	53,02	43,23 x 20,53	32,64 x 20,53	21,765 x 20,53
5	68,02	47,02	43,23 x 20,53	32,64 x 20,53	32,64 x 12,055
6	68,02	47,02	32,64 x 21,73	32,64 x 20,53	32,64 x 12,055

Характер изменения пульсационной составляющей по высоте здания. Результаты исследования изменения пульсационной составляющей по высоте здания представлены на рис. 2 для двух моделей с одинаковыми поэтажными планами, но различной высоты: модель здания № 2 высотой 38,02 м, модель здания № 3 высотой 68,02 м.

Анализ выполнен на основании результатов расчета в программе «Компоновка» для ветровой нагрузки, приведенной в узлы здания. Линия пульсационной составляющей на верхнем этаже

уходит резко вниз (рис. 2). Это связано с тем, что, в отличие от всех предыдущих этажей, высота грузовой площади на верхнем в два раза меньше (равна половине высоты этажа). Прогибы линии пульсационной составляющей ветровой нагрузки объясняются разной высотой этажей зданий: высота цокольного этажа – 3,27 м, высота первого этажа – 4,0 м, остальных этажей – 3 м.

Значения пульсационной составляющей при направлении «ветер 1» больше, чем при направлении «ветер 2». Во внимание принимались верхние, наиболее значительные величины пульсационной составляющей.

Влияние жесткости несущих вертикальных конструкций

Значения перемещений взяты по модулю. Для модели здания № 1 максимальные перемещения по оси X получены в варианте 2 – 0,0095 м, максимальные перемещения по оси Y в варианте 5 – 0,021 м.

Ветровое нагружение было принято одинаковым для всех моделей. С помощью программы «Компоновка» заданы два направления ветра: ветер 1, действующий под углом 90°, ветер 2 – 135° [5]. Ветровой район – II, тип местности – А.

Модель № 1

Перемещения верха здания (варианты 1–6) по оси Y больше, чем по оси X, на 45,24%, что

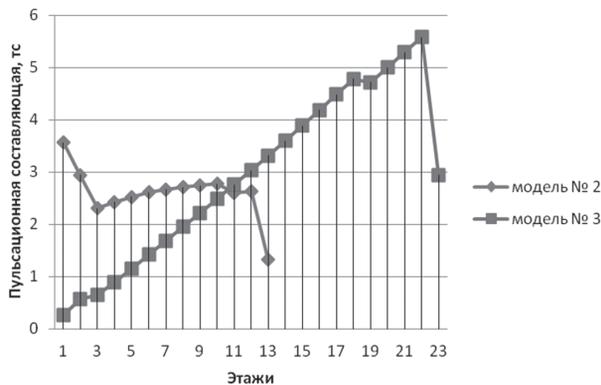


Рис. 2. Характер изменения пульсационной составляющей по высоте здания

связано с большой жесткостью здания в направлении оси X (шаг поперечных стен составляет 3,55 м).

Ось X направлена вдоль буквенных осей зданий, ось Y – вдоль цифровых осей зданий.

Из всех вариантов расчета модели № 1 варианты с максимальными значениями перемещений по оси X – вариант № 2 и по оси Y – вариант № 5.

Перемещения по оси X: модель № 1 – 0,0095 м; модель № 2 – 0,0087 м; модель № 3 – 0,048 м; модель № 4 – 0,051 м; модель № 5 – 0,064 м; модель № 6 – 0,11 м.

Перемещения по оси Y: модель № 1 – 0,021 м; модель № 2 – 0,027 м; модель № 3 – 0,12 м; модель № 4 – 0,14 м; модель № 5 – 0,2 м; модель № 6 – 0,64 м.

Перемещения верха здания (варианты 1–6) по оси Y больше, чем по оси X, так как жесткость вертикальных конструкций здания в направлении оси X больше, чем в направлении оси Y.

Исследования показали, что на перемещения значительное влияние оказывает высота здания и площадь этажа (то есть жесткость несущих конструкций). Рассмотрим это на примере моделей № 1 и 6.

Высота модели № 6 составляет 68,02 м, что в 1,789 раза больше высоты модели № 1. Перемещения верха здания модели № 6 больше перемещения модели № 1 в 23,704 раза. Это объясняется влиянием пульсационной составляющей ветровой нагрузки, а также размерами зданий в плане: модель № 1 – 43,23 x 20,58 м; модель № 6 – 32,6 x 21,78 м.

Нормативным требованиям (см. табл. Е. 4 [6]) отвечают модели здания № 1, 2 и 3. Модели № 4, 5 и 6 не отвечают нормативным и конструктивным требованиям: обеспечения целостности заполнения каркаса стенами, перегородками, оконными проемами и дверными элементами. Жесткость моделей № 4, 5 и 6 не обеспечена. Перемещения по оси Y для моделей больше, чем по оси X, несущих конструкций в этом направлении недостаточно.

Влияние расхода материалов на перемещение верха здания

Рассмотрим модели здания № 1 и 6. Модель № 1 – высота здания 38,02 м, без перепада по высоте. Модель № 6 – высота здания 68,02 м, перепад на отметке 44,02 м.

Максимальные перемещения при минимальном расходе бетона получены при расчете модели № 6.

Перемещения верха здания зависят от того, насколько рационально распределены бетон и арматура в конструкциях здания. Модель № 1 – шаг несущих конструкций составляет 3,55 м. Модель № 6 – шаг вертикальных несущих конструкций в среднем 7,1 м. Расход бетона модели № 6 (2993,72 куб. м) меньше, чем

модели № 1 (3267,35), в 0,916 раза. Расход арматуры для модели № 6 больше, чем для модели № 1, в 1,668 раза ($2993,72 / 3267,35 = 1,668$). Перемещения модели № 6 больше, чем модели № 1, в 23,704 раза.

Соотношение статической и пульсационной составляющих ветровой нагрузки

1. *Модель здания № 1.* На рис. 3 представлены графики изменения статической и пульсационной составляющих ветровой нагрузки.

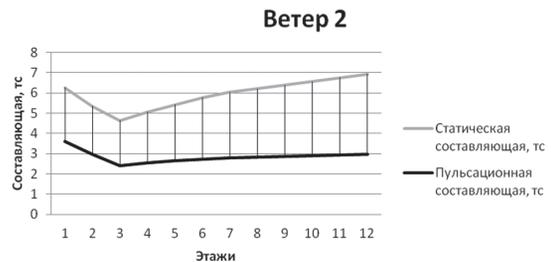


Рис. 3. Соотношение статической и пульсационной составляющих ветровой нагрузки для модели № 1

На цокольном этаже статическая составляющая превышает пульсационную в 1,72–1,73 раза. С ростом по высоте эта разница увеличивается до 2,3–2,37 раза.

2. *Модель здания № 6*

На цокольном этаже статическая составляющая превышает пульсационную в 21,59–25,72 раза (рис. 4). На других этажах соотношение уменьшается в 1,09–1,308 раза. Прогиб линий статической и пульсационной составляющих ветровой нагрузки появляется при уменьшении площади здания (перепад высоты на отметке 44,02 м, а следовательно, и уменьшение площади этажа на этой отметке в 1,703 раза).

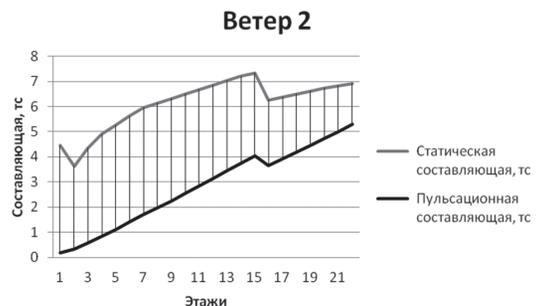


Рис. 4. Соотношение статической и пульсационной составляющих ветровой нагрузки для модели № 6

Таким образом, для всех рассмотренных моделей здания обе составляющие ветровой нагрузки больше для направления «Ветер 2».

Результаты исследования показали, что пульсационная составляющая ветровой нагрузки по высоте здания изменяется по линейному закону.

На перемещения верха здания значительное влияние оказывает шаг несущих вертикальных конструкций, величина временной вертикальной нагрузки – в меньшей степени.

Перемещения верха здания во всех случаях больше в направлении меньшей изгибной жесткости.

Горизонтальные перемещения верхних точек здания достигают наибольших по модулю значений при угле атаки ветровой нагрузки 135°.

Статическая составляющая ветровой нагрузки больше пульсационной для всех исследованных моделей.

Приемлемыми по критерию материалоемкости и жесткости являются модели № 1, 2, 3.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алевдин П. В., Мордич А. И., Симбиркин В. Н. Особенности работы несущих каркасов зданий при действии вертикальных и горизонтальных нагрузок // Белорусский конгресс по теоретической и прикладной механике «Механика-99». Минск: БелНИИС, 1999. 204 с.
2. Городецк и й А. С., Батрак Л. Г. и др. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона: проблемы, опыт, возможные решения и рекомендации, компьютерные модели, информационные технологии. Киев: Факт, 2004. 106 с.
3. Дроздов П. Ф. Конструирование и расчет несущих систем многоэтажных зданий и их элементов: Учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1977. 223 с.
4. Каталог строительной изоляции ROCKWOOL [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://guide.rockwool./media/121116/building_preview_16.11.12
5. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Киев: Сталь, 2012. 600 с.
6. Пособие по проектированию жилых зданий / ЦНИИЭП жилища Госпромархитектуры. Вып. 3. Конструкции жилых зданий (к СНиП 2.08.01–85). М.: Стройиздат, 1989. 304 с.
7. СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*» / Министерство регионального развития Российской Федерации. М.: ОАО ЦПП, 2011. 71 с.

Selyutina L. F., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

COMPUTER SIMULATION OF MULTISTORY BUILDINGS WITH ALLOWANCE FOR WIND IMPACT

The article is concerned with the problem of multi-purpose high-rise buildings of 13–23 floors. Six models of the high-rise buildings were studied with the help of the software package “Monomakh”. The models of the multistory buildings have a complex shape, height discontinuity, various structural systems. Vertical temporary loads are of full size and of low value. The influences on the movement of the top of the buildings are studied. They depend upon the strength of the vertical load-bearing structures, material consumption, and the angle of the wind attacks. Displacement of the top of the building depends to a greater degree upon its bearing structures and to a lesser extent upon the temporary load value. The angle of the wind attacks influences displacement of the top of the building. The displacement is maximal when the angle of wind attack equals 135 degrees. For all heights of the building the static constituent is bigger than the pulsating component of the wind load.

Key words: method of finite elements, static component, pulsation component of the wind load

REFERENCES

1. Alevdin P. V., Mordich A. I., Simbirkin V. N. Osobennosti raboty nesushchikh karkasov zdaniy pri deystvii vertikal'nykh i gorizonta l'nykh nagruzok [Features of the building base plates under the action of vertical and horizontal loads]. *Belorusskiy kongress po teoreticheskoy i prikladnoy mekhanike “Mekhanika-99”* [Belarusian Congress of Theoretical and Applied Mechanics “Mechanics-99”]. Minsk: BelNIIS Publ., 1999. 204 p.
2. Gorodetskiy A. S., Batrak L. G., etc. *Raschet i proektirovanie konstruksiy vysotnykh zdaniy iz monolitnogo zhelezobetona: problemy, opyt, vozmozhnye resheniya i rekomendatsii, komp'yuternye modeli, informatsionnye tekhnologii* [Calculation and design of high-rise buildings of reinforced concrete: challenges, experiences and possible solutions and recommendations, computer models, information technology]. Kiev, Fakt Publ., 2004. 106 p.
3. Drozdov P. F. *Konstruirovaniye i raschet nesushchikh sistem mnogoetazhnykh zdaniy i ikh elementov* [Design and calculation of load-bearing systems of multi-story buildings and their elements]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1977. 223 p.
4. *Catalog stroitel'noy izolyatsii ROCKWOOL* [Catalogue of building isolation ROCKWOOL]. Available at: http://guide.rockwool./media/121116/building_preview_16.11.12
5. Perel'muter A. V., Slivker V. I. *Raschetnye modeli sooruzheniy i vozmozhnost' ikh analiza* [Computational models structures and the possibility of their analysis]. Kiev, Stal' Publ., 2012. 600 p.
6. *Posobie po proektirovaniyu zhilykh zdaniy* [Manual on residential buildings design]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1989. 304 p.
7. *SP 20.13330.2011 “Nagruzki i vozdeystviya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07–85*”* [Code of Regulations – “Loads and effects. Updated edition of 2.01.07–85”]. Moscow, OAO TSPP Publ., 2011. 71 p.

Поступила в редакцию 07.08.2013

БОРИС ГЕОРГИЕВИЧ МАРКОВ

кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования и инженерной графики строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
bmarkov@psu.karelia.ru

ОЛЕГ БОРИСОВИЧ МАРКОВ

кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования и инженерной графики строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
markov@psu.karelia.ru, markovob@yandex.ru

АЛЕКСЕЙ ЮРЬЕВИЧ БОРИСОВ

научный сотрудник, Научно-исследовательский институт историко-теоретических проблем народного зодчества, преподаватель кафедры архитектуры, строительных конструкций и геотехники строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
balexey13@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УТРАЧЕННЫХ ПАМЯТНИКОВ АРХИТЕКТУРЫ*

Описаны особенности моделирования утраченных сооружений по иконографическим материалам. Приведен анализ факторов, влияющих на его точность, предлагаются способы, ее повышающие. Один из них предполагает замену идеальных геометрических элементов и понятий на нечеткие, вероятностные. Точка в этом случае представляется эллиптической областью, центр которой является ее номинальным положением, а граница – заданной ошибкой, описываемой нормальным законом распределения. Рассматриваемая модификация проективной геометрии учитывает представление информации, с одной стороны, как случайных величин, подчиненных нормальному закону распределения ошибок, с другой стороны, как нечетких множеств. На основе теории неравноточных измерений предложена методика решения задач геометрического моделирования утраченных архитектурных объектов по иконографическим материалам, основанная на статистической обработке результатов с применением нечеткой проективной геометрии, созданной на основе теории нечетких множеств. Ключевые слова: иконографические материалы, метризация, неравноточные измерения, нечеткая проективная геометрия

Актуальность изучения архитектурного наследия очевидна. Без этой работы невозможны реставрация и реконструкция как отдельных памятников, так и архитектурных комплексов, невозможна реабилитация исторически сложившейся архитектурно-природной среды. В настоящее время востребованными становятся методики, позволяющие проводить архитектурный анализ, направленный на моделирование и оценку исторической застройки [1].

Геометрическое моделирование утраченных сооружений по фотографиям представляет собой процесс реконструкции их облика. Определяются форма и размеры памятника архитектуры в целом, а также отдельных его деталей, то есть реконструируется геометрическая модель. Под геометрическим моделированием утраченных памятников архитектуры подразумевается процесс создания геометрической модели существовавшего в прошлом сооружения на основе различных источников информации.

Предпочтительной геометрической моделью утраченного памятника архитектуры является масштабный чертеж или трехмерная модель сооружения, но при недостатке исходной информации это может быть и безмасштабный чертеж или аксонометрическое изображение. Источниками информации для моделирования служат результаты полевых, библиографических или архивных изысканий, закономерности, выявленные при изучении приемов и канонов возведения аналогичных сооружений. Практически вся информация, используемая при моделировании, нуждается в критическом анализе, так как неясности выражения в тексте, нечеткости изображений, противоречивость различных источников придают ей вид случайных величин, подчиненных нормальному закону распределения ошибок. Даже авторский чертеж может быть недостоверным, так как часто серьезные изменения в облик сооружения вносились после разработки проекта в процессе строительства. То есть ни один источник информации в отдельности не

позволяет достигнуть качественного моделирования сооружения.

С точки зрения количества геометрической информации важнейшим ее источником являются иконографические материалы (архивные фотографии, литографии, рисунки и т. д.). Из них наиболее информационно емки и максимально объективны фотографические изображения (объективность может быть снижена при ретушировании), а также обмерные чертежи остатков объекта. Точность и достоверность информации зависят от вида и состояния фотографии, от особенностей съемочного оборудования. Например, негатив или репродукция, сделанная контактным способом, содержат более качественную информацию, чем репродукции, выполненные с помощью фотоувеличительного оборудования или литографией с применением ретуширования. Искажение прямолинейности на фотографии зависит от устройства объектива фотографического аппарата.

Моделирование утраченных памятников архитектуры по иконографическим материалам – это процесс, состоящий из трех этапов, каждый из которых является элементарной единицей системы этого процесса и приносит важные промежуточные результаты, составляющие при совместном чтении по определенным правилам конечный продукт – модель объекта [4].

Первый этап – *сбор информации и представление ее в стандартном виде*. Он состоит из натуральных и архивных исследований. Натурные исследования представляют собой составление обмерного чертежа сохранившейся части сооружения или его следов и обследование подобных памятников архитектуры с целью выявления особенностей конструкции. Архивные исследования – это поиск иконографических и текстовых материалов. Собранную информацию надо обработать, привести к удобному для использования на следующих этапах реконструкции виду. На фотоматериале надо опознать те элементы (точки, прямые, отрезки прямых и т. д.), размеры или положение которых в пространстве известно из других источников. Например, линии карнизов, окон, конька крыши горизонтальны и параллельны между собой, углы здания вертикальны и их положение определено на плане по чертежу остатков фундамента. Требуется привести к единой системе измерения всю собранную информацию о размерах, перевести все старинные меры измерения в современные, оценить ошибку каждого размера.

Второй этап – *метризация проекционной модели*. Модель может быть одномерной (прямолинейный ряд точек), двумерной (плоское поле точек), трехмерной (точки в трехмерном пространстве). Метризация (определение абсолюта и масштаба [13]) возможна, если известно достаточное количество информации. Каждый опознанный

на фотографии элемент обладает определенным количеством информации (параметров) [15], которое измеряется числом связей, наложенных на элемент в пространстве, минус единица. Например, прямая, у которой в пространстве известно только направление (две связи) – один параметр, точка в пространстве (три связи) – два параметра. Набор данных, достаточный для метризации изображения, будем называть репером [13].

Вопросы метризации исследовались многими авторами, по этой теме имеется обширная литература, в которой рассматриваются отдельные виды изображений [1] и реперов [13].

В зависимости от вида метризуемого изображения требуется различное количество параметров. Например, трехмерная задача, аксонометрическое изображение – пять параметров, центральная проекция – шесть параметров, растянутая по одному из направлений центральная проекция (анаморфная центральная проекция) – восемь параметров [15]. Существует бесчисленное множество видов реперов [7], на основе которых можно смоделировать проекционный аппарат. Сам процесс моделирования возможен различными путями, например по специальному алгоритму или методом итерации.

Третий этап – *моделирование объекта*. В зависимости от того, какая решается задача (одномерная, двумерная, трехмерная), применяется соответствующий алгоритм. Действия на этом этапе основаны на теории решения метрических задач [3], [5].

Достоверность модели утраченного памятника архитектуры измеряется величиной ошибок линейных и угловых размеров. Факторы, отрицательно влияющие на ее величину, делятся на три группы. Первая группа факторов – ошибки, вызванные тем, что такие геометрические понятия, как прямолинейность, перпендикулярность, параллельность и т. д., применяемые при моделировании, не существуют на реальных объектах. Практически невозможно построить здание абсолютно правильной геометрической формы. Технические средства и приемы работы мастеров прошлого не обеспечивали точную обработку материалов, полную повторяемость формы одинаковых деталей. Снижение влияния первой группы отрицательных факторов при моделировании возможно на основе глубокого изучения аналогичных сооружений, приемов работы. Следствием этого являются правильный выбор вида репера, а также обеспечение его избыточности. Если репер вместо шести требуемых параметров будет содержать семь или более параметров, то элементы проекционного аппарата можно определить шесть или более раз, а затем усреднить результаты.

Вторая группа неблагоприятных факторов – ошибки исходных данных. Они обусловлены ценой деления применяемых инструментов, сохранностью сооружения, степенью четко-

сти контуров постройки на фотоснимке или его литографической репродукции, величиной случайных наложений, закрывающих здание на фотоснимке. Пути снижения ошибок данной группы вытекают из их природы. Это применение более точных инструментов, повышение резкости фотоснимков с помощью специальных приемов и технологий, а также использование избыточной информации в виде нескольких фотографий, позволяющей определять положение элементов сооружения несколько раз, производить проверку и усреднение результатов.

Третья группа факторов – это ошибки, возникающие в процессе вычислений и построений. Они обусловлены методами округления промежуточных результатов, количеством операций, а также способом вычисления (графический или аналитический). Влияние этих факторов можно уменьшить, совершенствуя алгоритм вычисления или построения.

Повысить точность конечного результата моделирования можно, во-первых, традиционным путем: инструментально-технологическими способами и совершенствованием алгоритма. Существуют и нетрадиционные пути: 1) представление информации, с одной стороны, как случайных величин, подчиненных нормальному закону распределения ошибок, с другой стороны, как нечетких множеств; 2) использование для построений и вычислений избыточной информации [8]. Первый предполагает замену идеальных геометрических элементов и понятий на нечеткие, вероятностные. Так, точка представляется эллиптической областью, центр которой является ее номинальным положением, а границей – заданная ошибка, описываемая нормальным законом распределения [10]. Прямая – это область, ограниченная ветвями гиперболы. Номинальное положение прямой – мнимая ось гиперболы [9]. Любой геометрический элемент представлен нечеткой областью. Пересечение нечетких элементов есть нечеткий элемент. Например, пересечение двух нечетких прямых – это нечеткая точка.

Мера принадлежности двух собственных нечетких точек на плоскости (рис. 1) есть величина:

$$I(T_1^2, T_2^2) = \max\{\mu_{T_1^2}(m_2), \mu_{T_2^2}(m_1)\}, \quad (1)$$

где $\mu_{T_1^2}(u_1, u_2)$ – функция принадлежности нечеткому множеству T_1^2 , $\mu_{T_2^2}(u_1, u_2)$ – функция принадлежности нечеткому множеству T_2^2 .

Две нечеткие точки на плоскости назовем принадлежащими, если $I(T_1^2, T_2^2) \geq 0,5$, и непринадлежащими, если $I(T_1^2, T_2^2) < 0,5$.

Формула для подсчета принадлежности двух точек [7]:

$$I(T_1^2, T_2^2) = \max\left\{e^{-\frac{\ell^2}{2\sigma_{A1}^2\sigma_{B1}^2}}, e^{-\frac{\ell^2}{2\sigma_{A2}^2\sigma_{B2}^2}}\right\}, \quad (2)$$

где ℓ – расстояние между математическими ожиданиями нечетких точек.

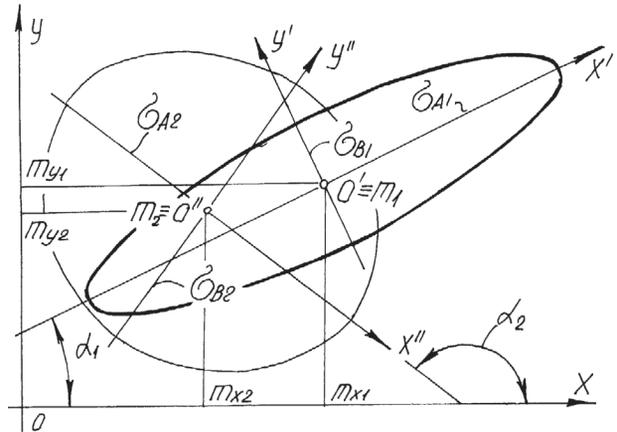


Рис. 1. Определение меры принадлежности пары двухмерных нечетких точек: m – математическое ожидание; σ – среднее квадратичное отклонение

Геометрия, применяемая для действий с такими объектами, является модификацией проективной геометрии, учитывающей вероятностные свойства экспериментальной геометрической информации и нечеткий характер множеств. Причина применения проективной геометрии объясняется тем, что проективное пространство [15] (евклидово пространство с присоединенными к нему несобственными – бесконечно удаленными элементами) пригодно для исследования центральных проекций, которыми являются фотографии.

Второй путь – использование избыточной информации – заключается в том, что исследователь не выбирает оптимальный алгоритм, а использует все или, по крайней мере, множество алгоритмов построения и вычисления. В итоге получаем множество результатов, которые обрабатываются методами математической статистики с учетом неравноточных измерений [14]. Применение подобных методов описано в работе [12]. Отличие предлагаемой модификации геометрии заключается в более полном учете влияния погрешности на конечный результат (учитывается неравноточность результатов опытов). Поясним данное утверждение на примере определения точки схода вертикальных прямых на фотографии. Точка схода определяется множеством раз как пересечение пар прямых. Каждая прямая представляет собой область, ограниченную ветвями гиперболы, где она может находиться с заданной вероятностью. Мнимая ось гиперболы проходит через центры эллиптических областей, представляющих точки T_{11} , T_{12} и T_{21} , T_{22} (рис. 2). Точкой пересечения пары прямых является точка-область T , где эта точка пересечения может появиться с заданной вероятностью (рис. 2). Результаты построения точки схода (точки-области) обрабатываются методами математической статистики (рис. 3).

На основе теории неравноточных измерений разработана методика решения задач геометрического моделирования утраченных ар-

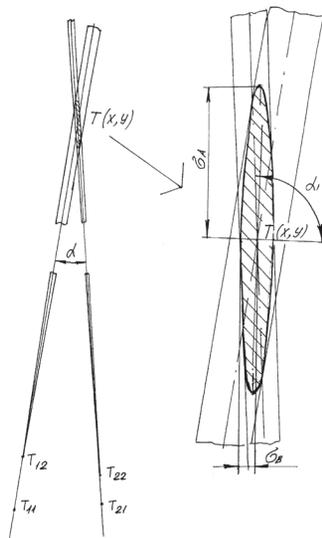


Рис. 2. Область возможных пересечений двух прямых. Т – точка пересечения пары прямых (точка-область); $T_{11}, T_{12}, T_{21}, T_{22}$ – точки (эллиптические области), через которые проходят нечеткие прямые; σ – среднее квадратичное отклонение

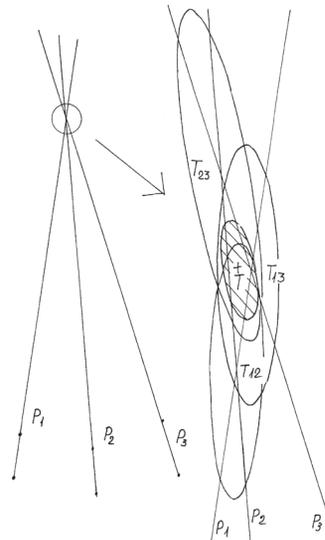


Рис. 3. Определение точки схода вертикальных прямых. P_1, P_2, P_3 – нечеткие прямые; T_{12} – область возможных пересечений прямых P_1, P_2 ; T_{13} – область возможных пересечений прямых P_1, P_3 ; T_{23} – область возможных пересечений прямых P_2, P_3 ; Т – область возможных пересечений прямых P_1, P_2, P_3

хитектурных объектов по иконографическим материалам, основанная на статистической обработке результатов с применением нечеткой проективной геометрии, созданной на основе теории нечетких множеств [7]. Создан комплекс программ, реализующих операции построений в нечеткой проективной геометрии и статистическую обработку результатов построения и предназначенный для решения практических задач геометрического моделирования утраченных памятников архитектуры.

Описанные методы использованы в ряде работ для геометрического моделирования утраченных и частично утраченных памятников архитектуры: часовня XVIII века в поселке Калевала (Ухта), церковь Иоанна Предтечи в селе Шуя, церковь Варлаама Хутынского в селе Рыбрека [6], церкви Коневской Богоматери и Ильи Пророка Валаамского монастыря, церковь Казанской Божьей Матери в деревне Росляково, Никольская церковь в селе Ладва, Сретенская церковь в поселке Соломенное, погост в селе Задняя Дуброва Архангельской области.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов А. Ю., Шлей М. Д., Матюшечев К. В., Рогов А. А. и др. Применение компьютерных технологий для комплексного историко-архитектурного анализа планировочной структуры традиционных поселений Русского Севера // Информационные системы для научных исследований: Сборник научных статей. Труды XV Всероссийской объединенной конференции «Интернет и современное общество». Санкт-Петербург, 10–12 октября 2012 года. СПб., 2012. С. 139–142.
2. Бирючевский Н. Д. Реконструкция проекционной системы по трем центральным проекциям, содержащим изображения четырех несобственных точек // Прикладная геометрия и инженерная графика. Киев: Будівельник, 1976. № 21. С. 32–36.
3. Вальков К. И. Введение в теорию моделирования. Л.: ЛИСИ, 1974. 151 с.
4. Воронов А. А. Вопросы теории реконструкции памятников архитектуры. Автореф. дис. ... канд. архитектуры. М.: ЦНИИТИА, 1978. 18 с.
5. Дралин Б. И. Решение метрических задач на основе анаморфированных изображений: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛИСИ, 1977. 18 с.
6. Макарова Т. Л. Графическая реконструкция Варлаамовской церкви в велском селе Рыбрека // Народное зодчество: Межвуз. сб. Петрозаводск, 1998. С. 213–223.
7. Марков Б. Г. Автоматизация геометрического моделирования утраченных памятников архитектуры по иконографическим материалам: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2000. 19 с.
8. Марков Б. Г. К вопросу о повышении точности графической реконструкции архитектурных объектов // Народное зодчество: Межвуз. сб. Петрозаводск, 1998. С. 203.
9. Марков Б. Г., Марков О. Б. Геометрическая интерпретация нечеткой прямой / ПетрГУ. Петрозаводск, 2003. 11 с. Деп. в ВИНТИ 16.07.03, № 1401-B2003.
10. Марков Б. Г., Марков О. Б. Геометрическая интерпретация нечеткой точки / ПетрГУ. Петрозаводск, 2003. 14 с. Деп. в ВИНТИ 16.07.03, № 1402-B2003.
11. Подъяпольский С. С., Бессонов Г. Б., Беляев Л. А., Постникова Т. М. Реставрация памятников архитектуры: Учебное пособие для вузов. 2-е изд., доп. М.: Стройиздат, 2000. 288 с.

12. Пшеничный В. В. Анализ вероятностных теоретических значений при восстановлении аппарата центрального проектирования // Прикладная геометрия и инженерная графика. Киев: Будівельник, 1990. № 49. С. 58.
13. Сухарев Ю. П. Некоторые проекционные аспекты проекционных метрик // Вопросы геометрического моделирования: Межвуз. темат. сб. науч. тр. ЛИСИ. 1977. № 1 (126). С. 78.
14. Чернецкий В. И. Анализ точности нелинейных систем уравнений. М., 1968. 248 с.
15. Четверухин Н. Ф. Полное и не полное изображения и параметрический метод их построения // Вопросы современной начертательной геометрии: Сборник науч. статей. М.; Л.: Гостехиздат, 1947. 334 с.

Markov B. G., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Markov O. B., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Borisov A. Yu., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

CHARACTERISTIC FEATURES OF GEOMETRIC MODELING OF LOST ARCHITECTURAL MONUMENTS

Characteristic features of lost architectural works' modeling with the help of iconographic materials are described in the article. In-depth analysis of the factors affecting its accuracy and possible ways of its accuracy improvement are presented. One method involves replacement of ideal geometric elements and concepts by fuzzy variables and probabilistic elements. The point in this case is an elliptical area, the center of which is its nominal position, and the border – defined error described by a normal distribution. The modification takes into account the probability of projective geometry properties of geometric information and fuzzy character sets. Based on the theory of measurement technique geometric modeling of lost architectural objects by iconographic materials is offered. A suggested modeling is based on a statistical analysis of the results obtained by fuzzy projective geometry, which in turn is based on the theory of fuzzy sets.

Key words: iconographic materials, metrization, technique of measurement not uniformly precise, fuzzy projective geometry

REFERENCES

1. Borisov A. Yu., Shley M. D., Matyushechev K. V., Rogov A. A. The use of computer technologies for the complex historical and architectural analyze of the planning structure of traditional settlements of the Russian North [*Primenenie komp'yuternykh tekhnologiy dlya kompleksnogo istoriko-arkhitekturnogo analiza planirovochnoy struktury traditsionnykh poseleniy Russkogo Severa*]. *Informatsionnye sistemy dlya nauchnykh issledovaniy: Sbornik nauchnykh statey. Trudy XV Vserossiyskoy ob'edinennoy konferentsii "Internet i sovremennoe obshchestvo"*. Sankt-Peterburg, 10–12 oktyabrya 2012 goda [The information systems for science: The articles of The XV All-Russian conference "Internet and contemporary community"]. St. Petersburg, 2012. P. 139–142.
2. Biryuchevskiy N. D. The reconstruction of the projection system on three central projections containing images of the four improper points [Rekonstruktsiya proektsionnoy sistemy po trem tsentral'nym proektsiyam, sodержashchim izobrazheniya chetyrekh nesobstvennykh tochek]. *Prikladnaya geometriya i inzhenernaya grafika* [The Applied Geometry and the Engineering Graphics]. Kiev, Budivelnik, 1976. № 21. P. 32–36.
3. Val'kov K. I. *Vvedenie v teoriyu modelirovaniya* [The introduction to the Modeling technology]. Leningrad, LISI Publ., 1974. 151 p.
4. Voronov A. A. *Voprosy teorii rekonstruktsii pamyatnikov arkhitektury. Avtoref. diss. kand. arkhitektury* [Problems in the theory of reconstruction of architectural monuments]. Moscow, TSNIITIA Publ., 1978. 18 p.
5. Dralin B. I. *Reshenie metricheskikh zadach na osnove anamorfovannykh izobrazheniy. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [The decision of the metric problems based on anamorphic image]. Leningrad, LISI Publ., 1977. 18 p.
6. Makarova T. L. *Graficheskaya rekonstruktsiya Varlaamovskoy tserkvi v vepsskom sele Rybreka* [The graphic reconstruction of the Varlaamovskoy church in the Veppian village Rybreka]. *Narodnoe zodchestvo. Mezhevuz. sb.* [The rural architecture. The interuniversity's digest]. Petrozavodsk, 1998. P. 213–223.
7. Markov B. G. *Avtomatizatsiya geometricheskogo modelirovaniya utrachennykh pamyatnikov arkhitektury po ikonograficheskim materialam. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [The automation of geometric modeling of the lost monuments over iconographic materials]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2000. 19 p.
8. Markov B. G. *K voprosu o povyshenii tochnosti graficheskoy rekonstruktsii arkhitekturnykh ob'ektov* [The increasing the accuracy of the graphical reconstruction of architectural objects]. *Narodnoe zodchestvo. Mezhevuz. sb.* [The rural architecture. The interuniversity's digest]. Petrozavodsk, 1998. P. 203.
9. Markov B. G. *Geometricheskaya interpretatsiya nechetkoy pryamoy* [The geometric interpretation of the fuzzy line]. Petrozavodsk, PetrSU, 2003. 11 p. (Dep. VINITI 16.07.03, № 1401-B2003).
10. Markov B. G. *Geometricheskaya interpretatsiya nechetkoy tochki* [The geometric interpretation of fuzzy terms]. Petrozavodsk, PetrSU, 2003. 14 p. (Dep. VINITI 16.07.03, № 1402-B2003).
11. Podyapol'skiy S. S., Bessonov G. B., Belyaev L. A., Postnikova T. M. *Restavratsiya pamyatnikov arkhitektury* [The restoration of monuments]. Tutorial for Universities. 2nd pbl. [*Uchebnoe posobie dlya vuzov. 2-e izd. dop.*]. Moscow, Stroyizdat Publ., 2000. 288 p.
12. Pshenichnyy V. V. The analyze of the theoretical probabilistic values in the recovery of the central apparatus of the design [Analiz veroyatnostnykh teoreticheskikh znacheniy pri vosstanovlenii apparata tsentral'nogo proektirovaniya]. *Prikladnaya geometriya i inzhenernaya grafika* [The Applied Geometry and the Engineering Graphics]. Kiev, Budivelnik Publ., 1990. № 49. P. 58.
13. Sukharev Yu. P. Some projection aspects of the projection metrics [Nekotorye proektsionnye aspekty proektsionnykh metrik]. *Voprosy geometricheskogo modelirovaniya* [The questions of geometric modeling]. *Mezhevuz. temat. sb. nauch. tr. LISI* [The interuniversity's digest of science articles]. 1977. № 1 (126). P. 78.
14. Chernetskiy V. I. *Analiz tochnosti nelineynykh sistem uravneniy* [The analyze of the accuracy of the non-linear systems of equations]. Moscow, 1968. 248 p.
15. Четверухин Н. Ф. *Polnoe i nepolnoe izobrazheniya i parametricheskoy metod ikh postroeniya*. [Complete and no complete image and parametric method of their construction]. *Voprosy sovremennoy nachertatel'noy geometrii. Sbornik nauch. statey* [The digest of science articles]. Moscow; St. Petersburg, 1947. 334 p.

Поступила в редакцию 12.09.2013

ИВАН ВЛАДИМИРОВИЧ АРХИПОВ

магистр математического факультета, программист
 IT-парка, Петрозаводский государственный университет
 (Петрозаводск, Российская Федерация)
 alien_aria@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСКРОЯ ЛЕСОСЫРЬЯ В ЗАДАЧАХ ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЛЕСОПИЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ*

Представлена математическая модель раскроя бревна на пиломатериалы прямоугольного сечения, используемая при решении задачи планирования лесопильного производства средствами генератора столбцов в линейном программировании. При составлении плана должно быть учтено большое количество ограничений производственного и экономического характера. Полученная задача эффективно решается методом декомпозиции и динамическим программированием.

Ключевые слова: лесопиление, динамическое программирование, линейное программирование

ОПИСАНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

В рамках модели к производственным ограничениям линий лесопиления относятся следующие [2]:

- ограничение сверху на количество пил 1-го и 2-го рядов для линии лесопиления;
- толщина пропила для каждой линии (мм);
- максимальная высота и ширина постова;
- минимальная ширина двухкантного бруса, получаемого при первом проходе из бревна путем срезания двух боковых частей, которая устанавливается для каждого диаметра.

К важнейшим ограничениям, обусловленным структурой заказов, можно отнести следующие:

- минимальная и максимальная длина пиломатериалов, а также шаг, с которым обрезается пиломатериал (например, при длине 2,7–6 м и шаге 30 см доска длиной 3,5 м должна быть обрезана до 3,3 м, что снижает полезный выход);
- специфические требования по размещению пиломатериала относительно бревна: в брусковую часть, то есть выпиливать только из двухкантного бруса [4]; в боковую часть, то есть размещать пиломатериал только для распила при 1-м проходе; $2 \times k$ Ex Log, то есть только в центре бревна и в количестве 2 k шт. (без центральной доски); $2 \times k + 1$ Ex Log, то есть только в центре бревна и в количестве 2 $k + 1$ шт. (с центральной доской); 2, 4, 6 Ex Log, то есть только в центре бревна и без центральной доски.

Предположим, что задано множество N всех возможных способов раскроя отрезка ствола дерева на пиломатериалы множества M [3].

Тогда полагаем b_i и B_i – ограничения сверху и снизу на объем пиломатериалов $i \in M$, c_j – ожидаемый доход от реализации 1 м³ пиломатериалов, распиливаемых по схеме $j \in N$, x_j – объем, распиливаемый по данной схеме. $A_{i,j}$ – выход пи-

ломатериала $i \in M$ при распиле единицы лесосырья по схеме $j \in N$. Получим следующую задачу оптимизации:

$$\begin{aligned} cx &\rightarrow \max, \\ b &\leq Ax \leq B, \\ x &\geq 0. \end{aligned}$$

Полученная задача весьма условна, ее вариантам будет посвящена следующая статья. В данной работе рассматривается частный вопрос построения столбцов матрицы A [N , M], необходимый при использовании симплекс-метода.

ФОРМАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО СТОЛБЦА

Введем обозначения, используемые в математической модели.

Исходные данные: N – множество пиломатериалов; t_j – толщина пиломатериала, $j \in N$; w_j – ширина пиломатериала, $j \in N$; l_j^m – минимальная длина пиломатериала, $j \in N$; l_j^M – максимальная длина пиломатериала, $j \in N$; s_j^l – шаг длины пиломатериала (например, длины 2,7–6,0 с шагом 0,3 м), $j \in N$; b_j – признак «брусовости» пиломатериала, 1 – «брусковый», 0 – иначе, $j \in N$; u^b – минимальная доля объема «брусковых» пиломатериалов; u^s – максимальная доля выхода пиломатериала из боковой части, $j \in N$; v_j^l – двойственная оценка пиломатериала, $j \in N$; v^w – двойственная оценка древесины; v^m – двойственная оценка линии лесопиления; v^b – двойственная оценка ограничения на минимальную долю брусковых пиломатериалов; v_j^s – двойственная оценка ограничений на максимальную долю для постановки пиломатериала в боковую часть, $j \in N$; d^m – диаметр бревна в узкой части (вершина дерева); d^M – диаметр бревна в широкой части (основание дерева); l^w – длина бревна; l^w – объем одного бревна; c^w – стоимость 1 м³

древесины; c_j^l – стоимость 1 м³ пиломатериала, $j \in N$; s_1 – толщина пилы при распиле двухкантно-го бруса; s_2 – толщина пилы при первом проходе.

Неизвестные

Разобьем постав на 2 части – брусовая часть и боковая часть при первом проходе. В случае развального способа распила боковая часть пуста – таким образом, математическая модель охватывает большое количество различных линий лесопиления (рис. 1).

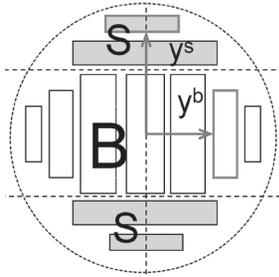


Рис. 1. Разбиение постава на 2 части, расстояние от центра до пиломатериалов

P^b – множество позиций для размещения пиломатериалов в брусовой части бруса (для пиломатериалов, расположенных симметрично относительно центра постава, итоговое количество пиломатериалов умножается на 2, для пиломатериала в центре (в случае наличия такого) прибавляется 1). Считаем, что позиции пронумерованы по удалению от центра бревна. P^s – множество позиций для размещения пиломатериалов в боковой части при первом проходе.

z_p^b – номер пиломатериала, помещенного на p -ю позицию постава в брусовой части. y_p^b – расстояние от центра постава до пиломатериала (который в сечении представляет собой прямоугольник) в брусовой части. Для центрального пиломатериала расстояние $y_p^b = -\frac{t_{z_p^b}}{2}$. На рис. 2 выделен пиломатериал, для которого расстояние $y_p^b = -\frac{t_{z_p^b}}{2}$.

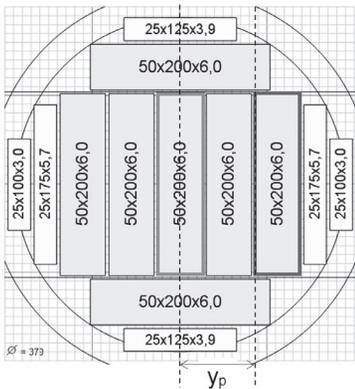


Рис. 2. Четное и нечетное размещение пиломатериала в поставе

l_p^b – длина пиломатериала на позиции p в брусовой части, рассчитывается следующим образом:

$$l_p^b = \begin{cases} \min\{l_p^w, l_{z_p^b}^M\}, & \text{если } y_p^b + t_{z_p^b} \leq r^m \text{ и } w_{z_p^b} \leq 2\sqrt{(r^m)^2 - (y_p^b + t_{z_p^b})^2}, \\ 0, & \text{если } t^* l^w < l_{z_p^b}^m, \\ l_{z_p^b}^m + \left[\frac{t^* l^w - l_{z_p^b}^m}{s_{z_p^b}^l} \right] s_{z_p^b}^l, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где $r^m = \frac{d^m}{2}$, $r^M = \frac{d^M}{2}$, $d^* = \sqrt{(y_p^b + t_{z_p^b})^2 + \left(\frac{w_{z_p^b}}{2}\right)^2}$,

$$t^* = \frac{r^M - d^*}{r^M - r^m}.$$

z_p^s – номер пиломатериала, помещенного на p -ю позицию постава в боковой части; y_p^s – расстояние от центра постава до пиломатериала в боковой части; l_p^s – длина пиломатериала на позиции p в боковой части.

Обозначим W^b – ширина полученного двухкантного бруса:

$$W^b = \max_{p \in P^b} \{w_{z_p^b}\}. \tag{1}$$

W^c – ширина центральной части двухкантного бруса:

$$W^c = 2 \max_{p \in P^b} \left\{ y_p^b + t_{z_p^b} \mid w_{z_p^b} = W^b \right\}. \tag{2}$$

q_p – кратность пиломатериала на позиции для брусовой части

$$q_p = \begin{cases} 1, & \text{если } y_p^b = -\frac{t_{z_p^b}}{2}, \\ 2, & \text{если } y_p^b \neq -\frac{t_{z_p^b}}{2}. \end{cases}$$

g_p – признак того, что пиломатериал на позиции $p \in P^b$ располагается в боковой части

$$g_p = \begin{cases} 1, & \text{если } w_{z_p^b} < W^b, \\ 0, & \text{если } w_{z_p^b} = W^b. \end{cases}$$

Ограничения

- Позиции пиломатериалов идут в порядке удаления от центра, и расстояние между пиломатериалами равно толщине пропила:

$$y_p^b - y_{p-1}^b = t_{z_{p-1}^b} + s_1 \quad \text{для каждого } p \in \{2..|P^b|\}.$$

$$y_p^s - y_{p-1}^s = t_{z_{p-1}^s} + s_2 \quad \text{для каждого } p \in \{2..|P^s|\}.$$

- Ширина пиломатериалов не возрастает:

$$w_{z_p^b} \leq w_{z_{p-1}^b} \quad \text{для каждого } p \in \{2..|P^b|\}.$$

$$w_{z_p^s} \leq w_{z_{p-1}^s} \quad \text{для каждого } p \in \{2..|P^s|\}.$$

- Пиломатериалы из двухкантного бруса не пересекаются с пиломатериалами из боковой части:

$$\forall p \in P^s \quad y_p^s \geq \frac{W^b}{2} + s_2.$$

- Размещение пиломатериала на первой позиции (база):

$$y_1^b = \frac{s_1}{2} \text{ или } y_1^b = -\frac{t_{z_1^b}}{2}, \quad y_1^s = \frac{W^b}{2} + s_2.$$

- Пиломатериал принадлежит группе $D_{2 \times k}$ (требование $2k \text{ Ex Log}$, $k \in \mathbf{N}$):

$$\forall j \in D_{2 \times k} \Rightarrow \begin{cases} y_1^b = \frac{s_1}{2}, \\ z_1^b = z_2^b = \dots z_k^b = j, \\ \sum_{p \in P^b, z_p^b = j} q_p = 2k. \end{cases}$$

- Пиломатериал принадлежит группе $D_{2 \times k+1}$ (требование $2k+1 \text{ Ex Log}$, $k \geq 0$, $k \in \mathbf{Z}$):

$$\forall j \in D_{2 \times k+1} \Rightarrow \begin{cases} y_1^b = -\frac{t_{z_p^b}}{2}, \\ z_1^b = z_2^b = \dots z_{k+1}^b = j, \\ \sum_{p \in P^b, z_p^b = j} q_p = 2k+1. \end{cases}$$

- Пиломатериал принадлежит группе D_e (требование четный Ex Log – распил без центральной доски, например 2, 4, 6 Ex Log):

$$\forall j \in D_e \Rightarrow \begin{cases} y_1^b = \frac{s_1}{2}, \\ \exists k \in \mathbf{N} : z_1^b = z_2^b = \dots z_k^b = j \text{ и } \sum_{p \in P^b, z_p^b = j} q_p = 2k. \end{cases}$$

- Пиломатериал принадлежит группе $D_{a,b}$ – не менее, чем $a \text{ Ex Log}$, но не более, чем $b \text{ Ex Log}$:

$$\forall j \in D_{a,b} \Rightarrow \begin{cases} \exists k \in \mathbf{N} : z_1^b = z_2^b = \dots z_k^b = j, \\ a \leq \sum_{p \in P^b, z_p^b = j} q_p \leq b. \end{cases}$$

- Пиломатериал принадлежит группе D_{nm} :

$$\forall p : z_p^b \in D_{nm} \Rightarrow y_p^b \neq \frac{s_1}{2} \text{ и } y_p^b \neq -\frac{t_{z_p^b}}{2}.$$

- Количество различных пиломатериалов в поставе не превышает M^d :

$$\left| \left\{ \left\{ z_p^b, p \in P^b \right\} \cup \left\{ z_p^s, p \in P^s \right\} \right\} \right| \leq M^d. \quad (3)$$

- В поставе отсутствуют близкие по размерам пиломатериалы, то есть разница по толщине между любыми двумя пиломатериалами

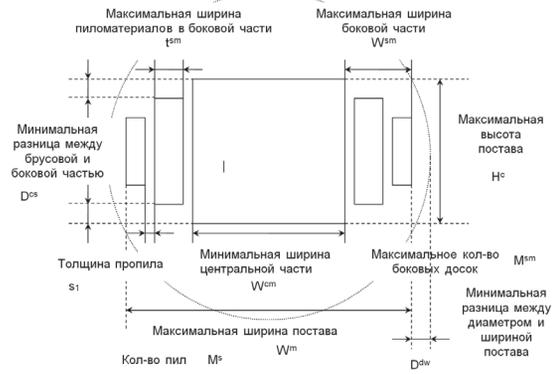


Рис. 3. Параметры постава на схеме

либо равна 0, либо не менее чем t^d , аналогично по ширине либо 0, либо не менее W^d :

$$\forall p, r \in \{P^b \cup P^s\} \Rightarrow t_{z_p} = t_{z_r} \text{ или } |t_{z_p} - t_{z_r}| \geq t^d. \quad (4)$$

$$\forall p, r \in \{P^b \cup P^s\} \Rightarrow w_{z_p} = w_{z_r} \text{ или } |w_{z_p} - w_{z_r}| \geq W^d. \quad (5)$$

Минимальная ширина центральной части бруса не менее заданной для линии лесопиления W^{cm} : $W^c \geq W^{cm}$.

- Максимальная ширина постава не превышает заданную для линии лесопиления W^m :

$$2 \max_{p \in P^b} \{y_p^b + t_{z_p^b}\} \leq W^m.$$

- Максимальная высота постава H^c : $W^b \leq H^c$.
- Разница между диаметром и шириной постава не менее заданного для линии лесопиления D^{d^w} (параметр необходим для того, чтобы в случае использования фрезерного станка для выпиливания боковой части не было слишком тонкой части):

$$d^m - 2 \max_{p \in P^b} \{y_p^b + t_{z_p^b}\} \geq 2D^{d^w}.$$

- Используемое количество пил не превышает заданные параметры для линии лесопиления M^{s_1} и M^{s_2} :

$$\sum_{p \in P^b} q_p + 1 \leq M^{s_1}, \quad 2|P^s| + 2 \leq M^{s_2}.$$

- Максимальное количество боковых досок в двухкантном брус M^{sm} :

$$\left| \left\{ p \in P^b : w_{z_p^b} < W^b \right\} \right| \leq M^{sm}.$$

- Максимальная ширина боковой части боковых досок в двухкантном брус W^{sm} :

$$\max_{p \in P^b} \left\{ y_p^b + t_{z_p^b} \mid w_{z_p^b} < W^b \right\} - \min_{p \in P^b} \left\{ y_p^b \mid w_{z_p^b} < W^b \right\} \leq W^{sm}.$$

- Максимальная толщина боковых досок в двухкантном брус t^{sm} :

$$\forall p \in P^b : w_{z_p^b} < W^b \Rightarrow t_{z_p^b} \leq t^{sm}.$$

- Аналогичные параметры по максимальному количеству боковых пиломатериалов, суммарной ширине боковой части и максимальной толщине боковых досок для позиций P^s .
- Минимальная разница между брусовой и боковой частями не более заданного для линии лесопиления D^{cs} :

$$W^b - \max_{p \in P^b} \left\{ w_{z_p}^b \mid w_{z_p}^b < W^b \right\} \geq 2D^{cs}.$$

Для поиска оптимального столбца необходимо решить задачу: $-vA_j + c_j \rightarrow \max$. В данном случае матрица A – генерируемая матрица, каждый столбец которой представляет собой выход продукции каждого вида из постава, а также вспомогательные элементы для прочих ограничений. Поскольку целевая функция c представляет собой суммарную долю выхода продукции из постава, то при расчетах нельзя брать ее как константу, так как в нее входят неизвестные выходы пиломатериалов [1]. Рассмотрим вариант целевой функции по оптимальному выходу, по доходу – аналогично.

Обозначим $P = \{P^b \cup P^s\}$ (считаем, что множества P^b и P^s не пересекаются по индексам).

В исходной задаче ограничения на брусовые пиломатериалы и на максимальную долю выхода боковых досок выглядят следующим образом:

$$\sum_{j \in N} \sum_{i \in L} A_{i,j} (u^b - b_i) x_j \leq 0, \sum_{j \in N} \sum_{i \in L} A_{i,j} x_j (b_{i,j}^s - u_i^s) \leq 0,$$

где $b_{i,j}^s$ – доля выхода пиломатериала i из постава j из боковой части.

Тогда целевая функция генератора выглядит следующим образом:

$$\sum_{p \in P} \frac{l_p q_p t_{z_p} w_{z_p}}{V^w} (-v_{z_p}^l + 1 - v^b (u^b - b_{z_p}) - v_j^s (g_p - u_{z_p}^s)) - v^w - v^m \rightarrow \max.$$

АЛГОРИТМ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО ПОСТАВА

Для решения данной задачи разобьем множество неизвестных позиций на блоки (рис. 4):

1. Центральная часть основного прохода $\{p \in P^b : w_{z_p} = W^b\}$;
2. Боковая часть основного прохода $\{p \in P^b : w_{z_p} < W^b\}$;
3. Боковая часть первого прохода $\{P^s\}$.

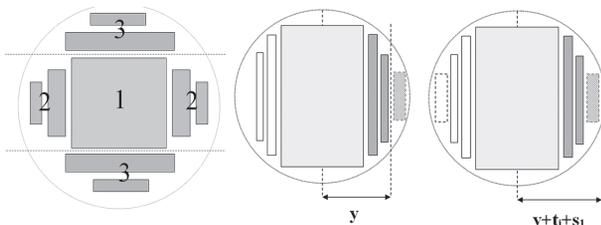


Рис. 4. Разбиение постава на блоки. Переход в динамическом программировании

Рассмотрим подзадачу поиска оптимального распила одной из частей бревна (возьмем для примера часть 2). Введем параметры: y – текущее расстояние от центра бревна; s – текущее используемое количество пиломатериалов.

Таким образом, для каждого состояния пытаемся добавить каждый пиломатериал и осуществить переход от состояния (y, s) к состоянию $(y + t_j + s_p, s + 2)$ (рис. 4).

В результате указанного разбиения задача может быть решена методом динамического программирования, а итоговое решение собирается из 3 частей. Укрупненная блок-схема алгоритма приведена на рис. 5.

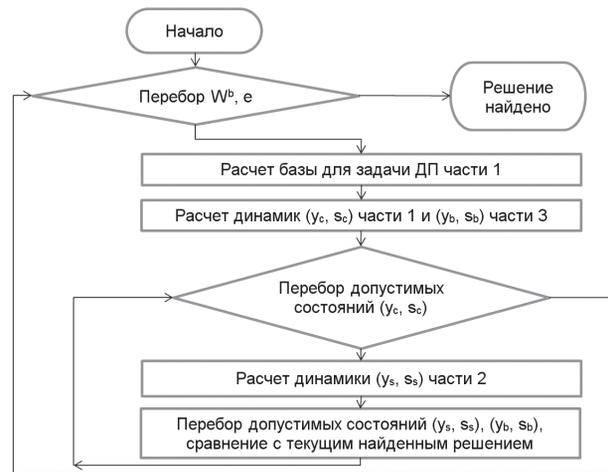


Рис. 5. Алгоритм решения поиска оптимального постава

Теорема 1. Алгоритм находит оптимальное решение исходной задачи.

Доказательство.

Рассмотрим оптимальное решение $(y^{b*}, z^{b*}, y^{s*}, z^{s*})$. Ему по формуле (1) соответствует W^{b*} . Поскольку в алгоритме перебираются все возможные W^b , искомое значение W^{b*} будет рассмотрено.

Далее пусть оптимальному решению соответствует W^{c*} (формула (2)). Поскольку в алгоритме перебираются все возможные значения W^c , то искомое значение также будет рассмотрено.

Осталось показать оптимальность для подзадач при расчете каждой из 3 частей.

Рассмотрим в качестве примера часть 2. Предположим, что в состоянии $(y + t_j + s_p, s + 2)$ последним был взят элемент j . Если состояние (y, s) не оптимальное, то можно взять другие элементы, улучшив решение для состояния $(y + t_j + s_p, s + 2)$, при этом не нарушив остальные ограничения. Следовательно, подзадача в данном случае оптимальна, и это означает, что алгоритм находит оптимальное решение.

Заметим, что в случае присутствия ограничений (3)–(5) указанный алгоритм не будет работать, поскольку появляется зависимость расчета 3 частей от взятых элементов, следовательно,

необходимо организовать перебор всех допустимых по ограничениям (4), (5) подмножеств элементов, а уже при выбранном подмножестве выполнить указанный алгоритм.

Теорема 2. Сложность алгоритма $O(N^2L^2S^2 + L^3S^3)$, где L – количество возможных позиций u_p (в случае вещественных позиций умножаем, чтобы получить целые части), $S = \max\{M^{s_1}, M^{s_2}\}$.

Доказательство.

В работе алгоритма на самом верхнем уровне осуществляется перебор всех возможных W^b , а поскольку их количество ограничено N , следовательно, в оценке получаем первый сомножитель N . Далее шаги по расчету динамики для части 1 добавляют в сложности LSN на каждой итерации перебора W^b в силу того, что состояний в динамическом программировании LS , а на переход необходимо N итераций. Аналогично шаги по расчету части 3 занимают LSN операций. После этого перебираются все возможные

состояния (y_c, s_c) , что занимает LS операций. Для каждой итерации необходим расчет части 2, что по аналогии с частью 1 и 3 занимает LSN итераций, и в конце работы необходим перебор состояний из частей 2 и 3, что занимает L^2S^2 операций, в результате: $O(N^2L^2S^2 + L^3S^3)$.

Заметим, что на практике алгоритм работает быстрее в силу следующих факторов:

- не все состояния достижимы;
- при расчете ч. 3 состояния начинаются с $\frac{W^b}{2}$;
- чаще всего множество позиций – просто целые числа, поскольку параметры t_j и w_j представляют собой целые числа в миллиметрах (редко миллиметры с десятными долями).

Система реализована средствами Microsoft Visual Studio 2012 и прошла опытную эксплуатацию на Соломенском лесозаводе (г. Петрозаводск), где она продемонстрировала экономический эффект 400–700 тыс. руб. в месяц.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булатов А. Ф., Воронин А. В., Кузнецов В. А., Пладов В. Н., Шегельман И. Р. Оптимизация в планировании и управлении предприятиями регионального лесопромышленного комплекса. Петрозаводск, 2001. 218 с.
2. Воронин А. В., Кузнецов В. А., Шабеев А. И., Архипов И. В., Кашевник А. М. Разработка и реализация системы планирования лесопильным производством // Труды СПИИРАН. СПб., 2012. С. 400–415.
3. Канторович Л. В., Залгаллер В. А. Рациональный раскрой промышленных материалов. Новосибирск, 1972. 300 с.
4. Соболев И. В. Управление производством пиломатериалов. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 184 с.

Arkhipov I. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

MATHEMATICAL MODELS AND GEOMETRICAL FEATURES OF WOOD SAWING IN PLANNING AND MANAGEMENT OF SAWMILL INDUSTRY

A mathematical model of log section sawing into sawn timber of rectangular section is presented in the article. To solve the task the suggested model based on the use of the generator of columns in linear programming is used. In making the plan, a large number of economic and production restrictions has to be considered.

Key words: wood sawing, dynamic programming, linear programming

REFERENCES

1. Bulatov A. F., Voronin A. V., Kuznetsov V. A., Pladov V. N., Shegel'man I. R. *Optimizatsiya v planirovanii i upravlenii predpriyatiyami regional'nogo lesopromyshlennogo kompleksa* [Optimization in planning and management of the enterprises of regional timber processing complex]. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2001. 218 p.
2. Voronin A. V., Kuznetsov V. A., Shabaev A. I., Arkhipov I. V., Kashaevnik A. M. Research and development of a software system for sawmill operation planning [Razrabotka i realizatsiya sistemy planirovaniya lesopil'nyim proizvodstvom]. *Trudy SPIIRAN*. St. Petersburg, 2012. P. 400–415.
3. Kantorovich L. V., Zalgaller V. A. *Ratsional'nyy raskroy promyshlennykh materialov* [Rational cutting of industrial materials]. Novosibirsk, 1972. 300 p.
4. Sobolev I. V. *Upravlenie proizvodstvom pilomaterialov* [Production management of timber]. Moscow, Lesn. prom-st' Publ., 1981. 184 p.

Поступила в редакцию 13.06.2013

ТИММО АЛЕКСАНДРОВИЧ ГАВРИЛОВ

аспирант кафедры механизации сельскохозяйственного производства агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
gavrilov@psu.karelia.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МЯСНОГО СЫРЬЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ РЕЗАНИЯ*

Исследуется влияние скорости резания материалов животного происхождения на работу измельчения. Измельчение по своей роли в технологическом процессе и энергопотреблении является основной операцией приготовления кормов для сельскохозяйственных животных, вследствие чего исследование факторов, оказывающих наибольшее влияние на работу измельчения, становится актуальным. Одним из таких факторов и является скорость резания. Состояние исследований в этой области в настоящее время недостаточное для эффективной работы. Мы опираемся на данные, полученные в результате экспериментального исследования. Исследуемый материал, субпродукты говядины (физико-механические свойства: влажность 72,1–72,9%, плотность 1160–1180 кг/м³, температура 270–272 К), помещался на экспериментальную установку и перерезался при различных скоростях, от 5 до 40 м/с, шаг 5 м/с. По результатам были получены данные о влиянии скорости резания на работу измельчения. Установлено, что с увеличением скорости резания работа измельчения снижается. Кроме того, по результатам экспериментального исследования получена функциональная зависимость работы измельчения от скорости резания.

Ключевые слова: измельчение, работа, скорость, говядина

ВВЕДЕНИЕ

Основными факторами, от которых зависит производительность оборудования для измельчения, энергоёмкость процесса и качество измельчения материалов, являются: скорость резания, угол заточки ножа, зазор в режущей паре, угол скольжения, параметры ножа и противорежущей пластины, параметры питателя [2].

Влияние скорости резания на энергоёмкость процесса – одна из основных закономерностей процесса измельчения кормов, причем под скоростью резания подразумевается скорость кромки лезвия ножа в данной точке в направлении резания. Поэтому связь энергоёмкости со скоростью резания является определяющей для технико-экономической оценки процесса измельчения. Почти во всех отраслях промышленности, где резание используется как процесс обработки материала, его скорость явилась предметом многосторонних экспериментальных и теоретических исследований [6].

По вопросу влияния этого фактора на процесс измельчения кормов до настоящего времени нет единого мнения. Результаты исследований, приведенные в различных источниках [2], [3], [4], [5], [6], [8], [10], очень противоречивы и часто не совпадают по своим значениям.

Так, Н. Е. Резник при рассмотрении измельчения листостебельной массы, Н. Ахметов – измельчения рисовой соломы, Н. А. Барсов – измельчения кости с/х животных экспериментально доказывают, что с увеличе-

нием скорости резания удельная работа резания снижается. А. Н. Познышев установил, что наряду со снижением усилия резания мясных продуктов при росте скорости улучшается и качество среза. Вместе с тем А. И. Пелеев отмечает возможность повышения температуры в зоне резания с увеличением скорости и, как следствие, денатурации содержащихся в мясе белков. А. А. Ивашко в результате многочисленных опытов по измельчению мяса с различной скоростью получил зависимости, отличающиеся наличием таких скоростей, при которых удельная работа резания резко возрастает, а затем снова падает.

Ряд авторов придерживаются противоположной точки зрения и считают, что при увеличении скорости резания удельная работа резания увеличивается и при скорости резания 27–28 м/с достигает максимума, а затем снижается. В. И. Курдюмов при измельчении корнеплодов, Б. В. Гарбарец при анализе измельчения минтая и китового мяса выявили увеличение удельной работы резания с возрастанием скорости. В. В. Кузьмин при измельчении мясного сырья обнаружил увеличение удельной работы резания в 2 раза. Аналогичные результаты при резании конины получены Ш. Н. Нуртаевым.

Одной из существенных причин разноречивости представленных в литературе результатов исследований влияния скорости резания на энергоёмкость процесса измельчения является техническая и моральная отсталость применя-

емого экспериментального оборудования. Большинство исследований, описываемых в литературе, осуществлялись на таких установках, как маятниковые и ротационные копры, характеризующиеся ограниченностью диапазона варьирования, скоростями резания, низкой точностью и высокой погрешностью измерений.

Отсутствие единого мнения на вопрос влияния скорости резания на процесс измельчения кормов является существенной преградой для повышения эффективности работы оборудования для измельчения, а значит, и важной проблемой, требующей решения.

Целью исследования, результаты которого отражены в статье, является решение данной проблемы. Эта цель достигается путем исследования процесса резания мясного сырья на различных скоростях. В соответствии с поставленной целью и с учетом теоретических предположений были определены следующие задачи:

- 1) разработать и изготовить установку для исследования параметров процесса резания;
- 2) провести экспериментальные исследования влияния скорости резания на удельную работу;
- 3) произвести анализ полученных данных и предложить рекомендации по выбору скорости резания материалов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исследуемого материала использовали субпродукты говяжьей, вследствие того что они являются одними из основных и наиболее распространенных компонентов кормовых рационов пушных зверей [1], [9]. Исследуемый материал имел следующие параметры: влажность 72,1–72,9%, плотность 1160–1180 кг/м³, температура 270–272 К.

В ходе данной работы автором были проанализированы недостатки существующих исследовательских установок и на основе этого разработана и изготовлена альтернативная (рис. 1 а, б). На установку получен патент на полезную модель № 131163 «Стенд для исследования параметров процесса резания лезвием», авторы Т. А. Гаврилов, В. Ф. Кондрашов, Е. А. Тихонов.

Исследования на установке выполняли следующим образом. В зажим электромагнитного устройства закрепляли исследуемый материал. Нажатием кнопки пуска осуществляли запуск электродвигателя; с помощью дисплея персонального компьютера, который посредством DAQ-контроллера получения и обработки экспериментальных данных и электрического провода соединен с датчиком частоты вращения, установленным напротив конца вала электродвигателя и обеспечивающим измерение частоты вращения электродвигателя, контролировали значение частоты вращения. Посредством преобразователя частоты вращения производили точную установку и поддержание частоты вращения (соответственно и скорости резания, при частоте 1000 мин⁻¹ скорость резания составляла 22 м/с), скорость резания варьировали в пределах от 5 до 40 м/с (максимальное и минимальное значения скорости резания были ограничены конструктивными возможностями станда), с шагом 5 м/с. По длине режущего элемента скорость резания меняется, поэтому для поддержания ее постоянной в каждом опыте исследуемый материал подавался в область, соответствующую середине лезвия режущего элемента. Нажатием кнопки пуска осуществляли подачу тока в электромагнитное устройство, и его сердечник выдвигался вместе с зажимом и исследуемым материалом в плоскость вращения режущего элемента, где материал перерезался. Результаты изменения частоты вращения фиксировали на персональном компьютере и обрабатывали. Повторность опытов пятикратная.

Располагая данными о частоте вращения n_1 до среза образца исследуемого материала и n_2 после среза, определяли удельную работу $A_{уд}$ резания по формуле

$$A_{уд} = \frac{k \times (n_1^2 - n_2^2)}{F}, \text{ кДж/м}^2, \quad (1)$$

где F – площадь сечения перерезаемого образца, м²; k – коэффициент, зависящий от полярного момента инерции всех вращающихся частей маховика и ротора:

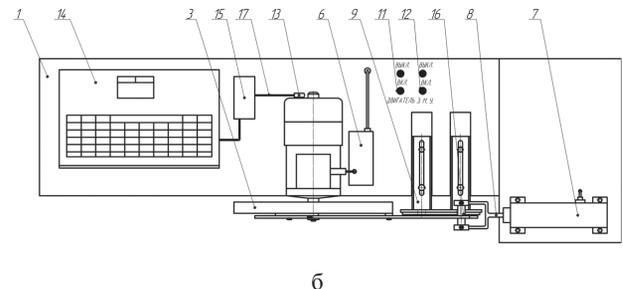
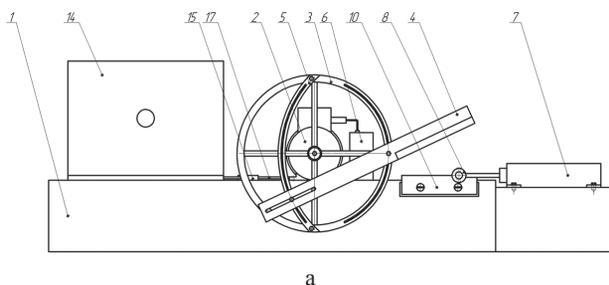


Рис. 1. Конструкция альтернативной установки: а – главный вид, б – вид сверху; 1 – рама, 2 – электродвигатель, 3 – маховик, 4 – нож, 5 – устройство для регулирования ножа, 6 – преобразователь частоты вращения, 7 – эл.-магн. устройство, 8 – зажим, 9 – устройство для регулирования контрножа, 10 – контрнож, 11 – кнопки вкл. и выкл. электродвигателя, 12 – кнопки вкл. и выкл. эл.-магн. устройства, 13 – датчик частоты вращения, 14 – персональный компьютер, 15 – DAQ-контроллер, 16 – измельчаемый материал, 17 – электрический провод

Значения удельной работы резания при различных скоростях, кДж/м²

Параметры	Скорость резания, м/с							
	5	10	15	20	25	30	35	40
Среднее арифметическое	5,08	2,75	1,82	1,34	1,15	0,98	0,87	0,77
Дисперсия	0,09	0,16	0,10	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
Среднее квадратическое отклонение	0,31	0,40	0,32	0,10	0,09	0,13	0,08	0,11
Коэффициент вариации, %	6,02	14,38	17,34	7,46	7,37	12,80	8,75	14,29
Ошибка среднего арифметического	0,18	0,23	0,18	0,06	0,05	0,07	0,04	0,06
Точность определения средней арифметической, %	3,48	8,30	10,01	4,31	4,26	7,39	5,05	8,25
Доверительный интервал	0,52	0,67	0,53	0,17	0,14	0,21	0,13	0,19

$$k = 2 \times \pi^2 \times (J_{\text{рот}} + J'_0),$$

где $J_{\text{рот}}$ и J'_0 – полярные моменты инерции соответственно ротора и маховика с ножом в кДж×с².

Формула (1) получена Н. Е. Резником [6] при исследовании на ротационном копре РК-1 ВИСХОМа процесса измельчения листостебельной массы и до сих пор является актуальной при исследовании процесса измельчения различных материалов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проведенных исследований была получена выборка данных удельных работ резания субпродуктов говяжьих при различных скоростях резания. Для полученных данных произведена статистическая обработка общепринятыми методами математической статистики [7] для доверительной вероятности 0,9, результаты представлены в таблице.

По данным таблицы построен график изменения удельной работы резания субпродуктов говяжьих в зависимости от скорости (рис. 2).

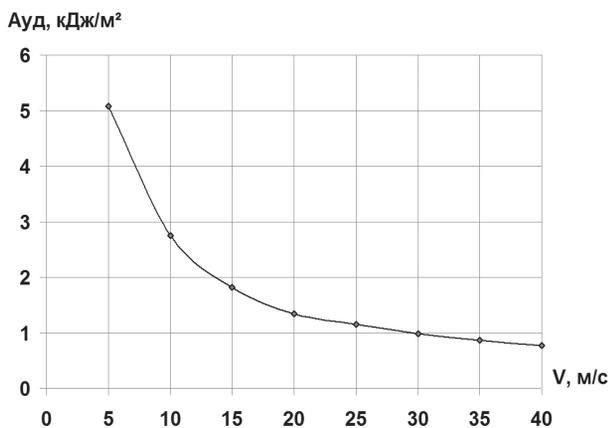


Рис. 2. График изменения удельной работы резания от скорости: $A_{уд}$ – удельная работа резания (кДж/м²), V – скорость резания (м/с)

Анализируя данные таблицы и рис. 2, можно отметить, что при измельчении субпродуктов говяжьих в рассмотренном диапазоне скоростей 5–40 м/с удельная работа резания снижается с увеличением скорости. Причем в пределах изменения скорости от 5 до 20 м/с она заметно снижается, после чего изменяется незначительно.

Наиболее близко описывает полученную кривую уравнение

$$A_{уд} = (-1,99) \times \ln(V) + 7,69, \text{ кДж/м}^2,$$

где $(-1,99)$ и $7,69$ – эмпирические коэффициенты.

Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными измельчения листостебельной массы Н. Е. Резника [6] и кости сельскохозяйственных животных Н. А. Барсова [2], что говорит об общности закономерностей процесса измельчения кормов растительного и животного происхождения.

Снижение удельной работы резания с повышением скорости можно объяснить следующими причинами: с увеличением скорости резания происходят локализация и концентрация разрушающей энергии у кромки лезвия, снижение работы предварительного сжатия материала лезвием, увеличение инерционного подпора прослойками материала, снижение коэффициента трения.

ВЫВОДЫ

1. Данные проведенного исследования свидетельствуют о том, что при измельчении субпродуктов говяжьих с увеличением скорости резания в диапазоне от 5 до 40 м/с удельная работа резания существенно снижается, с 5,08 до 0,77 кДж/м², практически в 5 раз.

2. Проведенные исследования указывают на то, что наименьшие затраты энергии при измельчении субпродуктов говяжьих наблюдаются при скоростях резания 15–25 м/с.

3. Выявленная зависимость удельной работы резания от скорости резания изменяется согласно уравнению: $A_{уд} = (-1,99) \times \ln(V) + 7,69$.

* Работа выполнена в рамках реализации комплекса мероприятий Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 гг. и проекта «Создание Центра ЕС в Баренц-регионе России».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипова Л. В., Глотова И. А., Рогов И. А. Методы исследования мяса и мясных продуктов // Современные проблемы науки и образования. 2009. № 1. С. 22.
2. Барсов Н. А. Ресурсосберегающие технологические процессы и технические средства переработки мясокостных кормов в звероводстве: Дис. ... д-ра техн. наук. СПб.: Пушкин, 1992. 607 с.
3. Булгаков В., Головач И. Уточненная теория ротационного режущего аппарата // *Agricultural Engineering. Research papers*. 2011. № 43. С. 43–57.
4. Кузьмин В. В. Совершенствование процесса резания мясного сырья на основе математического моделирования формы режущих инструментов: Дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2009. 272 с.
5. Курдюмов В. И., Аюгин П. Н., Аюгин Н. П. Снижение энергоемкости измельчения // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2008. № 5. С. 50–53.
6. Резник Н. Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов. М.: Машиностроение, 1975. 311 с.
7. Сидняев Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: Учебное пособие. М.: Юрайт, 2011. 399 с.
8. Handbook of meat processing / Edited by F. Toldrá. USA, Blackwell Publ., 2010. 561 p.
9. Hollander C. J., Vanholder T. New feeding strategy: individual total mixed ration based on metabolic state // The first North American conference on precision dairy management 2010. Available at: <http://www.precisiondairy2010.com/proceedings/s11vanholder2.pdf>
10. Nezhlukchenko T. I., Solyanyk M. B. Technology of making homogeneous feed suspensions and efficiency of their use while feeding pigs // *Visnyk Ahrarnoyi Nauky*. 2007. № 3. С. 52–53.

Gavrilov T. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

EXPERIMENTAL STUDY OF RAW MEAT GRINDING PROCESS AT DIFFERENT CUTTING SPEED

This article studies the influence of raw meat products' cutting speed on the shredding work effectiveness. Shredding, by its technological process and power consumption, is the main operation in the fodder preparation process for agricultural animals. Therefore, a research of the factors influencing effectiveness of the shredding work is of great importance. The cutting speed is one of these factors. At present, the problem is not researched enough to provide for effective operation of the fodder preparation process. In this article, the author makes conclusions based on the data obtained from a conducted experimental research. The studied material and beef by-products (physical and mechanical properties: humidity 72,1–72,9 %, density 1160–1180 kg/m³, temperature 270–272 K) were alternately placed into the experimental apparatus and cut with the cutting speed from 5 to 40 m/h, with a step of 5 m/h. As a result of the experiment, the data pertaining the influence of the cutting speed on the effectiveness of the shredding work were obtained. Analyzing these data the author showed that with the increase of the cutting speed the shredding work decreases. During experimental research, the author also obtained data reflecting functional dependences between the shredding work effectiveness and the cutting speed.

Key words: grinding, work, speed, beef

REFERENCES

1. Antipova L. V., Glotova I. A., Rogov I. A. Methods of study of meat and meat products [Metody issledovaniya myasa i myasnykh produktov]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2009. № 1. P. 22.
2. Barsov N. A. *Resursosberegayushchie tekhnologicheskie protsessy i tekhnicheskie sredstva pererabotki myasokostnykh kormov v zverovodstve. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Resource-saving processes and hardware for processing meat and bone feed in fur farming. Dr. tech. sci. diss.]. St. Petersburg, Pushkin Publ., 1992. 607 p.
3. Bulgakov V., Golovach I. Revised theory of rotary cutting apparatus [Utochnennaya teoriya rotatsionnogo rezhushchego apparata]. *Agricultural Engineering. Research papers*. 2011. № 43. P. 43–57.
4. Kuz'min V. V. *Sovershenstvovanie protsessa rezaniya myasnogo syr'ya na osnove matematicheskogo modelirovaniya formy rezhushchikh instrumentov. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Improving the process of cutting raw meat on the basis of mathematical modeling of shape cutting tools. Dr. tech. sci. diss.]. St. Petersburg, 2009. 272 p.
5. Kurdyumov V. I., Ayugin P. N., Ayugin N. P. Reduction of energy grinding [Snizhenie energoemkosti izmel'cheniya]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Vestnik of the Altai State Agrarian University]. 2008. № 5. P. 50–53.
6. Reznik N. E. *Teoriya rezaniya lezviem i osnovy rascheta rezhushchikh apparatov* [The theory of the cutting blade and the basis of calculation of cutting machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 311 p.
7. Sidnyaev N. I. *Teoriya planirovaniya eksperimenta i analiz statisticheskikh dannykh* [The theory of experimental design and statistical analysis of the data: a training manual]. Moscow, Yurayt Publ., 2011. 399 p.
8. Handbook of meat processing / Edited by F. Toldrá. USA, Blackwell Publ., 2010. 561 p.
9. Hollander C. J., Vanholder T. New feeding strategy: individual total mixed ration based on metabolic state // The first North American conference on precision dairy management 2010. Available at: <http://www.precisiondairy2010.com/proceedings/s11vanholder2.pdf>
10. Nezhlukchenko T. I., Solyanyk M. B. Technology of making homogeneous feed suspensions and efficiency of their use while feeding pigs // *Visnyk Ahrarnoyi Nauky*. 2007. № 3. P. 52–53.

Поступила в редакцию 17.07.2013

АНАТОЛИЙ ЛЕОНИДОВИЧ ЗАБРОВСКИЙ
ведущий программист РЦНИТ, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
z_anatoliy@petsu.ru

ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ПЕТРОВ
программист первой категории РЦНИТ, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
johnp@petsu.ru

ВЕБ-СЕРВИС ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ СПОСОБНОСТИ УДАЛЕННЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ПРИНИМАТЬ МУЛЬТИМЕДИЙНЫЙ ПОТОК С ОПРЕДЕЛЕННЫМ БИТРЕЙТОМ*

В работе представлены созданные веб-сервис Multimedia Quality Network (MQN) и веб-приложение Multimedia Quality Tester (MQT) для тестирования способности удаленных пользователей принимать мультимедийные потоки в реальном режиме времени с определенными битрейтами. Для определения способности клиентов получать тот или иной поток используется критерий оценки их качества. После прохождения тестирования на веб-сервисе MQN пользователь получает информацию о том, какой битрейт наиболее подходит для имеющегося сетевого канала. Представленный сервис MQN и приложение MQT можно использовать как в проводных сетях, так и в беспроводных Wi-Fi-сетях.

Ключевые слова: веб-сервис, тестирование, битрейт, качество, сеть, мультимедийный поток

ВВЕДЕНИЕ

Передача мультимедийного трафика становится неотъемлемой частью образовательной среды, бизнеса и других сфер жизни человека. Повсеместно организуются видеотрансляции и проводятся вебинары. Для качественного получения пользователями мультимедийных потоков необходимо иметь сетевой канал с определенными характеристиками. Под качеством воспроизведения мультимедийного потока в данном случае понимается отсутствие задержек и остановок в ходе воспроизведения потока.

Главной особенностью передачи мультимедийных потоков в реальном режиме времени являются более высокие требования к характеристикам сетевого канала между медиасервером и пользователем. Относительно небольшие потери сетевых пакетов, задержка и джиттер могут вызывать остановки в воспроизведении видеопотока до тех пор, пока буфер плеера заново не наполнится данными. Отсутствие плавного воспроизведения и остановки видео сильно ухудшает качество восприятия Quality of experience (QoE) [5]. Например, в работе [6] представлен способ предсказания QoE видео на основе оценок, полученных от пользователей.

Задача быстрого и удобного определения возможности удаленных пользователей получать мультимедийный поток с определенным битрейтом в заданном месте сети, например в здании, на сегодняшний день является актуальной.

Разработанное приложение MQT веб-сервиса MQN как раз предназначено для оценки качества воспроизведения мультимедийного потока

с заданным битрейтом. За основу работы приложения MQT взят разработанный ранее критерий оценки качества мультимедийных потоков [1]. Для оценки качества используются параметры воспроизведения плеера: время начала воспроизведения, минимальное количество кадров в секунду, максимальный скачок потери кадров и минимальный размер буфера в секундах, который был зафиксирован в течение воспроизведения мультимедийного потока. Предлагаемый критерий также был успешно апробирован для использования в беспроводных Wi-Fi-сетях.

ВЕБ-СЕРВИС MQN

Веб-сервис MQN – это веб-сайт, который доступен по адресу <http://mqnetwork.com> и предназначен для тестирования мультимедийных потоков. На сегодняшний день на указанном веб-сайте присутствует только одно функциональное приложение, которое называется MQT. Веб-сайт на момент написания данной статьи включает в себя верхнее меню, которое содержит следующие пункты:

- Домой (ссылка на главную домашнюю страницу).
- О проекте.
- Для пользователя.
- Для администратора.
- Контакты.

Пункт меню «О проекте» содержит общую информацию о сервисе MQN и приложении MQT.

На странице «Для пользователя» рассказывается о том, какие действия необходимо проде-

лать пользователю, чтобы протестировать свое соединение на возможность получения мультимедийного потока с заданным битрейтом.

На странице «Для администратора» говорится о том, что администраторы серверов видеотрансляций, например таких, как Wowza media server, могут заранее протестировать способности своих потенциальных зрителей получать тот или иной мультимедийный поток с заданным битрейтом.

Последний пункт меню «Контакты» ведет на страницу с контактами разработчиков портала. Сайт доступен на двух языках: русском и английском.

Веб-сайт расположен на собственном сервере Петрозаводского государственного университета (ПетрГУ) и доступен круглосуточно как в локальной сети университета, так и в сети Интернет.

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ MQT

MQT является частью веб-сервиса MQN и представляет из себя клиент-серверное приложение (рис. 1), состоящее из следующих элементов:

- Специально разработанный и скомпилированный Flash-плеер (Player).
- Набор PHP-сценариев.
- Веб-сервер Apache (Web Server) и база данных MySQL (Database).
- Веб-интерфейс управления (Management).

При создании приложения MQT частично использовались некоторые программные коды системы моделирования сетевых помех мультимедийных потоков, которая более подробно рассматривается в публикации [2].

FLASH-ПЛЕЕР

Flash-медиаплеер – программный видеоплеер, который используется для воспроизведения мультимедийных потоков на стороне пользователей. Он был разработан на основе бесплатного распространяемого плеера Strobe Media Playback [4] от компании Adobe с открытым исходным кодом. Плеер был запрограммирован таким образом, чтобы перед началом воспроизведения мультимедийного потока он накапливал буфер данных, равный 10 с, и затем начинал воспроизведение. Плеер отправляет параметры воспроизведения мультимедийного видеопотока в удаленную базу данных каждые 2 с.

Пользователи сервиса в качестве интернет-браузера могут использовать все основные популярные браузеры. Загрузка плеера на веб-сайт тестировалась в таких браузерах, как Internet Explorer 9.0, Google Chrome 28.0.1500.72m и Mozilla Firefox 22.0. Панель управления воспроизведением видео в созданном плеере не отображается, то есть кнопки проигрывания, остановки, паузы, перехода в полноэкранный

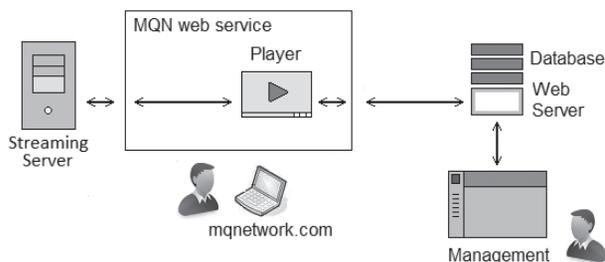


Рис. 1. Multimedia Quality Tester

режим не видны. Также отключена возможность перехода Flash-плеера в полноэкранный режим воспроизведения видео по двойному щелчку левой кнопки мыши. Все это сделано для того, чтобы пользователь не мог повлиять на процесс воспроизведения видеопотока стандартными способами.

НАБОР PHP-СЦЕНАРИЕВ

Разработанные PHP-сценарии используются для взаимодействия Flash-плеера, загружаемого на стороне пользователя, с удаленной базой данных MySQL, находящейся на удаленном сервере. Flash-плеер отправляет в базу данных параметры воспроизведения мультимедийного потока.

Данные о тестируемом битрейте видеопотока, идентификаторе эксперимента и адресе, на который необходимо отсылать параметры, передаются во Flash-плеер с помощью специально разработанного класса Params. Каждый 2 с Flash-плеер формирует список параметров для дальнейшей отправки в базу данных. Параметры Flash-плеер получает из стандартного класса NetStream:

- currentFPS (текущее количество кадров в секунду);
- droppedFrames (количество потерянных кадров);
- videoBufferByteLength (размер видеобуфера в байтах).

ВЕБ-СЕРВЕР АРАШЕ И БАЗА ДАННЫХ MYSQL

Все запросы к базе данных MySQL осуществляются через веб-сервер Apache HTTP Server. База данных, обеспечивающая работу приложения MQT, располагается на том же сервере, что и Apache HTTP Server, и состоит из шести таблиц: admins, data, event, experiment, status, university (рис. 2).

Таблица university содержит информацию об университетах и организациях, администраторы которых могут добавлять свои серверы в систему. Информация об администраторах хранится в таблице admins. Таблица status включает информацию о статусах экспериментов, которые могут быть двух типов: активный и неактивный.

Таблицы `experiment` и `event` содержат информацию о доступных и проведенных экспериментах соответственно. В таблице `data` хранятся значения параметров воспроизведения мультимедийных потоков, полученных от Flash-плеера в ходе эксперимента.

ВЕБ-ИНТЕРФЕЙС УПРАВЛЕНИЯ

Веб-интерфейс управления работает на основе PHP-сценариев, которые хранятся на веб-сервере. Он позволяет просматривать список всех проведенных экспериментов, получать подробную информацию о проведенном эксперименте в веб-браузере. Администратор может добавлять и удалять эксперименты, а также изменять параметры их проведения.

МЕДИАСЕРВЕР (STREAMING SERVER)

В качестве медиасервера используется Wowza Media Server 3.5.2, на котором располагаются видеофайлы, закодированные с заданными битрейтами.

Мультимедийные потоки с медиасервера на клиентские компьютеры отправляются по протоколу RTMP (Real-Time Messaging Protocol) [3]. В качестве медиасервера также можно использовать Flash Media Server.

РАБОТА С ПРИЛОЖЕНИЕМ MQT

Пользователю, для того чтобы оценить возможность своего компьютера или мобильного устройства получать мультимедийный поток с определенным битрейтом в некоторой точке сети, необходимо проделать следующие несколько простых шагов:

- Зайти на домашнюю страницу сервиса MQN по адресу <http://mqnetwork.com> и в приложении MQT выбрать сервер, до которого будет производиться тестирование. Для этого необходимо нажать на

картинку глобуса. По умолчанию тестирование будет производиться до сервера, находящегося в России, в ПетргУ.

- Выбрать битрейт видеопотока. В данный момент приложение MQT позволяет проводить тестирование для трех мультимедийных потоков с битовыми скоростями 148, 548 и 1548 Кбит/с.
- Нажать кнопку «Начать тест» и подождать 3 мин до завершения теста. Во время прохождения тестирования во Flash-плеере будет воспроизводиться видеопоток с выбранным битрейтом. Также длительность тестирования пользователей может задаваться администратором.

После завершения теста пользователю выводится результат пройденного тестирования. В ходе тестирования ему нельзя двигать, перемещать или сворачивать в панель задач окно интернет-браузера, а также переключаться между вкладками, в противном случае результаты теста не будут считаться объективными, о чем говорится на странице «Для пользователя» сайта <http://mqnetwork.com>. Возможны три варианта оценки качества мультимедийного потока приложением MQT:

- отличное качество воспроизведения;
- возможны проблемы во время воспроизведения;
- качественное воспроизведение видео для выбранного битрейта невозможно.

По завершении тестирования пользователю предоставляется возможность отправить результат тестирования системному администратору по электронной почте. Также пользователь может отправить результаты тестирования на свой электронный ящик. Электронное письмо включает в себя результат пройденного тестирования, а также графики основных параметров воспроизведения мультимедийного потока плеером.

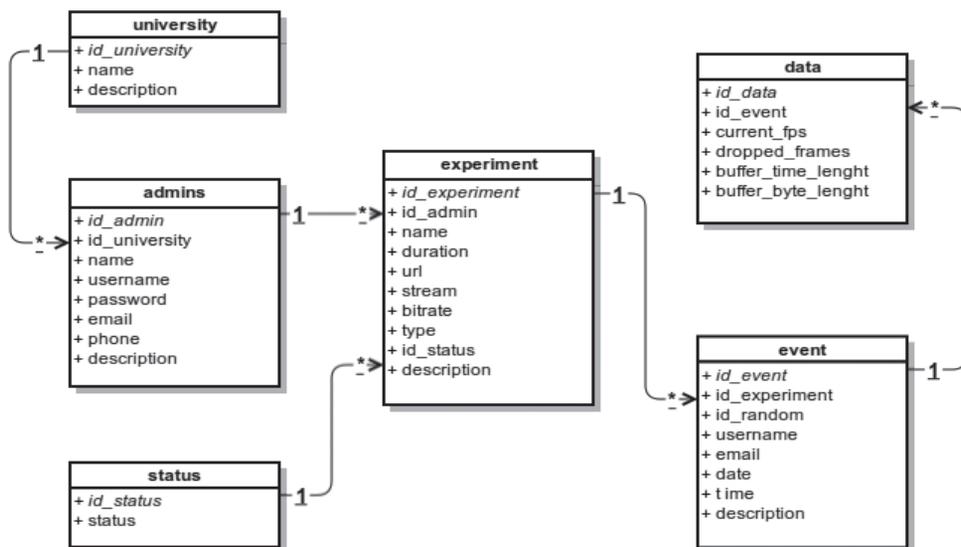


Рис. 2. UML-диаграмма базы данных

В случае если устройство пользователя не поддерживает технологию Flash, например iPhone или iPad от компании Apple, внизу плеера будет выведено сообщение: «Ваше устройство не поддерживает технологию Flash, поэтому результат тестирования не будет предоставлен». В таком случае пользователь может только визуально оценить качество мультимедийного потока с выбранным битрейтом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны веб-сервис MQN и приложение MQT для быстрого тестирования способности удаленных пользователей принимать мультиме-

дийные потоки с заданными битрейтами в проводных и беспроводных Wi-Fi-сетях. Разработанный сервис позволяет администраторам медиасерверов заранее протестировать своих потенциальных зрителей перед предстоящей видеотрансляцией.

Проверка работоспособности приложения MQT проводилась в сети ПетрГУ как в проводной, так и беспроводной Wi-Fi-сети.

В дальнейшем планируется расширение базы данных медиасерверов за счет российских и зарубежных университетов. Будет создана интерактивная карта географического расположения точек сети Интернет, до которых можно произвести тестирование.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Забровский А. Л. Критерий оценки качества образовательных мультимедийных потоков, транслируемых в реальном режиме времени // Труды Карельского научного центра РАН. 2013. № 1. С. 26–32.
2. Рогов А. А., Забровский А. Л. Система моделирования сетевых помех мультимедийных потоков // Информационно-управляющие системы. 2013. № 3 (64). С. 42–46.
3. Real-Time Messaging Protocol (RTMP) specification. Available at: <http://www.adobe.com/devnet/rtmp>
4. Strobe Media Playback. Available at: http://osmf.org/strobe_media playback.html
5. Data Traffic Monitoring and Analysis: From Measurement, Classification, and Anomaly Detection to Quality of Experience / Ernst Biersack (Editor), Christian Callegari (Editor), Maja Matijasevic (Editor). Springer, 2013. P. 219–224.
6. Holly French, Jie Lin, Tung Phan, Amy Csizmar Dalal. Video QoE analysis of RTMP streams. Paper presented at the meeting of the IPCCC, IEEE. 2011.

Zabrovskiy A. L., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Petrov E. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

WEB SERVICE FOR TESTING REMOTE USERS' ABILITY TO RECEIVE MULTIMEDIA STREAM WITH CERTAIN BIT RATE

This article presents a new web service Multimedia Quality Network (MQN) and a web application Multimedia Quality Tester (MQT) developed for quick testing of remote users' ability to receive multimedia streams transmitted in real time mode with a certain bit rate. To determine the ability of remote users to receive a certain stream a criterion assessing the quality of multimedia streams is used. Upon test completion on the web service MQN, the user obtains information about the most appropriate bit rate for the existing network connection. The web service MQN and the web application MQT can be used both in wired and Wi-Fi networks.

Key words: web service, testing, bit rate, quality, network, multimedia stream

REFERENCES

1. Zabrovskiy A. L. The criteria of quality assessment of educational multimedia streams transmitted in real time mode [Kriteriy otsenki kachestva obrazovatel'nykh multimediynykh potokov, transliruemykh v real'nom rezhime vremeni]. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2013. № 1. P. 26–32.
2. Rogov A. A., Zabrovskiy A. L. The Emulation System of Network Impairments of Multimedia Streams [Sistema modelirovaniya setevykh pomekh multimediynykh potokov]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*. 2013. № 3 (64). P. 42–46.
3. *Real-Time Messaging Protocol (RTMP) specification*. Available at: <http://www.adobe.com/devnet/rtmp.html>
4. *Strobe Media Playback*. Available at: http://osmf.org/strobe_media playback.html
5. *Data Traffic Monitoring and Analysis: From Measurement, Classification, and Anomaly Detection to Quality of Experience* / Ernst Biersack (Editor), Christian Callegari (Editor), Maja Matijasevic (Editor). Springer, 2013. P. 219–224.
6. Holly French, Jie Lin, Tung Phan, Amy Csizmar Dalal. Video QoE analysis of RTMP streams. Paper presented at the meeting of the IPCCC, IEEE. 2011.

Поступила в редакцию 04.10.2013

АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ ПИКАЛЕВ

аспирант, инженер кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
pikalev@dims.karelia.ru

ЛИДИЯ АНДРЕЕВНА ЛУИЗОВА

кандидат физико-математических наук, доцент, профессор кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
alim@karelia.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР НА КОНТУР СПЕКТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ НЕОНА*

Упорядоченные плазменно-пылевые структуры образуются из заряженных макрочастиц, левитирующих в плазме, и влияют на некоторые ее параметры. Это влияние может быть обнаружено по изменению спектральных характеристик плазмы при инъекции пылевых частиц. В частности, изменение атомной температуры ведет к изменению контуров спектральных линий. В работе исследовался контур спектральной линии неона 585 нм в пылевой плазме положительного столба тлеющего разряда при давлениях 50–150 Па и токах 1–9 мА. Контур регистрировался с помощью интерферометра Фабри – Перо, сканирование осуществлялось путем изменения давления воздуха между зеркалами интерферометра. Предложен алгоритм обработки интерферограмм с учетом шумов и непостоянства скорости сканирования. Найдено ограничение сверху на влияние пылевой структуры на ширину контура спектральной линии в исследованных условиях. Внесение пыли меняет атомную температуру плазмы менее чем на 10 К.

Ключевые слова: контур спектральной линии, пылевая плазма, плазменно-пылевые структуры, интерферометр Фабри – Перо

ВВЕДЕНИЕ

Пылевой плазмой, комплексной плазмой или плазмой с конденсированной дисперсной фазой называют плазму с левитирующими макрочастицами. Пылевая плазма широко распространена в природе и технике. Особый интерес представляют упорядоченные плазменно-пылевые структуры, возникающие из-за сильного взаимодействия между заряженными пылевыми частицами [5].

Макрочастицы значительно влияют на свойства плазмы. На них происходит рекомбинация электронов и ионов, а иногда они могут служить источником электронов за счет термо-, фото- или вторичной электронной эмиссии. Имея заряд, частицы создают вокруг себя электрическое поле, изменяя распределение концентрации электронов и ионов. Влияние пыли на плазму уже неоднократно исследовалось спектроскопическими методами (см., например, [1], [8]), однако влияние макрочастиц на контур спектральной линии исследовано слабо.

В работе [3] проводится моделирование влияния электрического поля, возникающего из-за заряженных макрочастиц на контур линии H_{β} . Показано, что Штарковское уширение существенно и позволяет определять заряд частиц по контуру спектральной линии. В работе [9]

исследовалось влияние пыли на контур линии H_{α} в смеси аргона и ацетилена. Оказалось, что в отсутствие пыли в плазме присутствуют «горячие» атомы водорода с энергиями в десятки эВ, вызывающие уширение основания контура спектральной линии. При появлении пыли «горячие» атомы водорода исчезают.

Одним из механизмов влияния пылевых частиц на контур может служить изменение температуры газа, которое ведет к изменению доплеровского контура линии. На пылинках гибнут заряженные частицы, что требует увеличения электрического поля для поддержания заданного тока [2], а значит, и большего энерговыделения. При этом поверхность частиц нагревается на десятки градусов из-за бомбардировки электронами и ионами [7], нагревая газ непосредственно в середине трубки, где свечение максимально.

Нами исследовался контур спектральной линии неона 585 нм в положительном столбе тлеющего разряда. Найдено ограничение сверху влияния пылевой структуры на ширину контура спектральной линии в исследованных условиях. Поскольку пылевые структуры образуются при низких токах и сильно сказывались шумы регистрирующей системы, был разработан алгоритм обработки интерферограмм, снижающий влияние шумов.

УСТАНОВКА

Пылевая структура формируется в газоразрядной трубке диаметром 3 см. В трубку введена сужающая вставка. Структура зависит от нижней границы светящейся области первой страты над вставкой. Для формирования структуры в разряд инжектировались частицы цинка размером 1–10 мкм. Длина пылевой структуры составляла 7–10 мм, диаметр – 3–5 мм.

Сканирование контуров производилось путем напуска воздуха в откачанную барокамеру с интерферометром Фабри – Перо толщиной 14 мм. Интерференционные кольца фокусировались линзой с фокусным расстоянием 10 см на входной щели спектрометра ИСП 51 с фотоэлектрической приставкой, который выделял линию 585 нм. Благодаря линзе между разрядной трубкой и интерферометром на входной щели спектрометра фокусировалось уменьшенное в 1,5 раза изображение разряда. Центр колец приходился на ту часть изображения разряда, в которой зависала пыль. На входной щели спектрометра стояла диафрагма, выделявшая центральную часть интерференционной картины. Ширина входной и выходной щелей спектрометра, а также диафрагмы составляла 0,15 мм, таким образом, регистрировалось излучение из области разряда 225 × 225 мкм. Регистрация излучения происходила на ФЭУ 106, сигнал с которого оцифровывался.

Перед экспериментом трубка откачивалась до 10^{-3} Па, тренировалась разрядом в течение часа и снова откачивалась. Затем в трубку напускался неон и зажигался разряд, который горел 30–90 минут до регистрации контуров. Как показала регистрация спектров, за это время из спектра исчезали молекулярные полосы примесей. Затем регистрировались интерферограммы при наличии пылевой структуры и при ее отсутствии. Для компенсации влияния возможного изменения условий разряда порядок регистрации менялся: если в один день сначала регистрировался контур с пылью, а затем без пыли, то в другой – наоборот.

Сигнал с ФЭУ оцифровывался со скоростью $2 \cdot 10^4$ отсчетов в секунду. Каждая экспериментальная точка получалась усреднением отсчетов за 600 мс. Регистрация одной интерферограммы занимала 1000 секунд. За это время регистрировалось 6–7 интерференционных максимумов.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Перед и после регистрации интерферограммы замерялся темновой сигнал. Затем он вычитался из данных, при этом считалось, что он изменялся со временем линейно. Затем интерферограмма разбивалась на отдельные контуры.

Для дальнейшей обработки необходимо определить положение максимума каждого контура. Просто взять максимальное значение нельзя из-за шумов. Для определения максимума брались

верхние 15% контура и аппроксимировались параболой. За максимум принималась вершина параболы.

Далее преобразовывались абсциссы. За время между соседними максимумами сканируется спектральный интервал, равный постоянной интерферометра $\Delta\lambda = \frac{\lambda_0^2}{2d} \approx 12,2$ пм, где $\lambda_0 = 585,2$ нм – середина спектральной линии, $d = 14$ мм – толщина интерферометра. Сложность в том, что скорость сканирования менялась со временем. Поскольку скорость сканирования менялась медленно, считаем, что за время сканирования двух постоянных интерферометра она меняется линейно. Пусть t – абсциссы точек интерферограммы в единицах времени. Для каждого контура интерферограммы, кроме крайних, перейдем к новым координатам x по правилу:

$$x = c_0 + c_1 t + c_2 t^2,$$

где коэффициенты c определяются из условия, что координата x для максимума данного контура равна нулю, а для максимумов соседних – -1 и $+1$ соответственно. Таким образом, x – координата в долях постоянной интерферометра. Так как для обработки необходимы соседние контуры, крайние контуры интерферограммы не обрабатывались.

Далее проводилась нормировка по оси ординат. Так как ординаты максимумов в одной интерферограмме могли различаться до 10%, при нормировке учитывался не только максимум данного контура, но и соседние. При этом каждое значение сигнала делилось на $y_{\text{norm}i}$, полученное по формуле:

$$y_{\text{norm}i} = k_0 + k_1 t_i + k_2 t_i^2,$$

где коэффициенты k определяются из условия равенства единице максимумов данного и соседних контуров после нормировки.

Далее обработка шла двумя путями:

1. Определение ширины контура. Для определения ширины контура отдельно определялась ширина для левой и правой частей контура. По точкам с ординатами после нормировки от 0,43 до 0,57 методом наименьших квадратов проводилась прямая. Для определения ширины использовалась абсцисса точки этой прямой с ординатой 0,5.

2. Усреднение контуров одной интерферограммы для сравнения формы контуров. Каждый контур (кроме крайних) разбиваем точками с шагом 0,01 от постоянной интерферометра. Значение в каждой точке получается путем аппроксимации экспериментальных данных между соседними точками прямой. Затем значения для всех контуров (кроме крайних) данной интерферограммы усредняются.

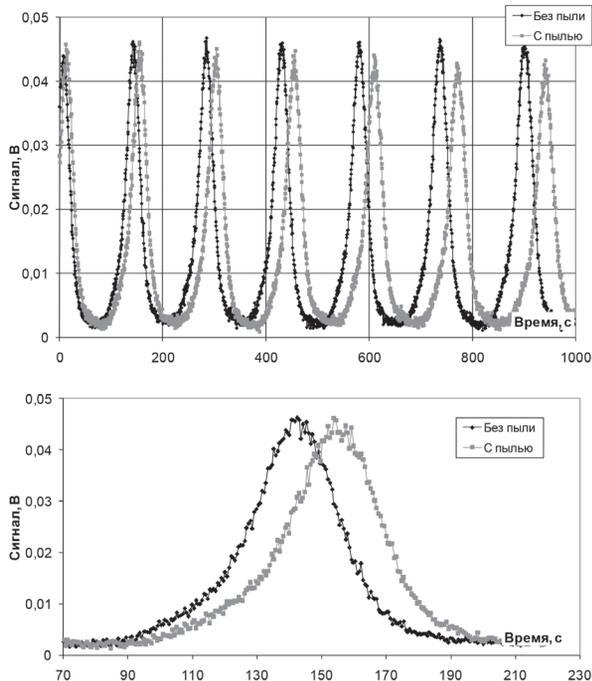


Рис. 1. Необработанные интерферограммы. $p = 50$ Па, $I = 6$ мА. Сверху – интерферограммы целиком, снизу – один из пиков

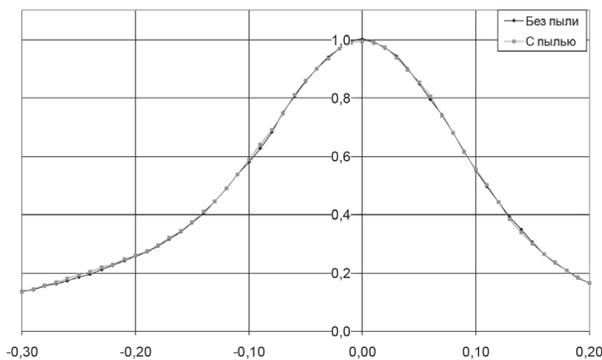


Рис. 2. Усредненные контуры, полученные из интерферограмм, показанных на рис. 1. $p = 50$ Па, $I = 6$ мА. Абсциссы в долях постоянной интерферометра

РЕЗУЛЬТАТЫ

Примеры необработанных интерферограмм приведены на рис. 1. Полученные из этих интерферограмм усредненные контуры показаны на рис. 2. Отличие исходных интерферограмм обусловлено разницей скорости сканирования и несовпадением моментов начала сканирования. Изменений формы контура при внесении пыли не обнаружено. Полученные контуры несимметричны вследствие изотопической структуры [6].

Для проверки влияния пыли на ширину контуров вычислялись разности ширин контуров без пыли и с пылью. Далее проверялась гипотеза о равенстве этой разности нулю. Полученные данные приведены в таблице.

Разности между ширинами контуров без пыли и при наличии пылевой структуры

Условия	Количество пар контуров	Средняя разность ширин, пм	Доверительный интервал для вероятности 90 %, пм
50 Па 1 мА	19	-0,019	0,032
50 Па 3 мА	16	-0,012	0,038
50 Па 6 мА	21	0,003	0,019
50 Па 9 мА	18	0,013	0,018
60 Па 3 мА	10	-0,031	0,044
100 Па 1 мА	18	-0,012	0,033
100 Па 3 мА	37	0,007	0,031
100 Па 6 мА	18	-0,010	0,026
150 Па 3 мА	19	-0,008	0,042

Как видно из таблицы, нулевая разность попадает в доверительный интервал для всех исследованных условий.

Величина доверительного интервала является оценкой сверху влияния пылевой структуры на ширину контура спектральной линии при данных условиях. Для сравнения было проведено моделирование контура в программе [8], показавшее, что изменение температуры газа на 10 К приводит к изменению ширины регистрируемого контура на 0,029 пм. При моделировании контур считался чисто доплеровским, а аппаратная функция установки – аппаратной функцией идеального интерферометра Фабри – Перо с коэффициентом отражения зеркал 0,8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами исследовалось влияние пылевой структуры на контур спектральной линии неона 585 нм в положительном столбе тлеющего разряда при давлениях 50–150 Па и токах 1–9 мА. Предложен алгоритм обработки интерферограмм, устойчивый к шумам и учитывающий непостоянство скорости сканирования. Данный алгоритм может быть использован как в дальнейших исследованиях влияния пылевых структур на контур спектральной линии, так и в других исследованиях при необходимости обработать зашумленные интерферограммы. Влияния пылевых структур на контур спектральной линии выявлено не было. Найдены ограничения сверху на изменение ширины контура, вызванного пылевой структурой в исследованных условиях.

* Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки РФ № 14.В37.21.0755 и проекта «Комплексная плазма: модификация поверхности» Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бульба А. В., Луизова Л. А., Подрядчиков С. Ф., Хахаев А. Д., Щербина А. И. Самоорганизация и рост пылевых структур в тлеющем разряде // Химия высоких энергий. 2006. Т. 40. № 2. С. 155–160.
2. Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Поляков Д. Н., Фортвов В. Е. Кооперативный характер образования пылевых структур в плазме // ЖЭТФ. 2002. Т. 121. № 3. С. 609–613.
3. Паль А. Ф., Сивохин Д. В., Старостин А. Н., Филиппов А. В. Определение заряда пылевых частиц по штарковскому уширению спектральных линий атомов водорода // Материалы школы-семинара «Методы и техника экспериментального исследования процессов самоорганизации упорядоченных структур в плазменно-пылевых образованиях». Петрозаводск, 2002 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://plasma.karelia.ru/pub/fntp/Sivohin.pdf>
4. Соловьев А. В. Программа «Apparat» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://plasma.karelia.ru/distort/apparat.ru.php>
5. Фортвов В. Е., Храпак А. Г., Храпак С. А., Молотков В. И., Петров О. Ф. Пылевая плазма // УФН. 2004. Т. 174. № 5. С. 495–544.
6. Connor T. R., Biondi M. A. Dissociative recombination in neon: spectral line-shapes studies // Phys. Rev. 1965. V. 140. № 3A. P. A778–A791.
7. Khrapak S. A., Morfill G. E. Grain surface temperature in noble gas discharges: Refined analytical model // Phys. Plasmas. 2006. V. 13. P. 104506–104510.
8. Mitic S., Pustynnik M. Y., Morfill G. E. Spectroscopic evaluation of the effect of the microparticles on radiofrequency argon plasma // New Journal of Physics. 2009. Vol. 11. Issue 8. P. 083020–083036.
9. Stefanovic I., Kovacevic E., Berndt J., Winter J. H α emission in the presence of dust in an Ar-C₂H₂ radio-frequency discharge // New Journal of Physics. 2003. Vol. 5. Issue 1. P. 39.1–39.12.

Pikalev A. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Luizova L. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

STUDY OF DUSTY STRUCTURES INFLUENCE ON SPECTRAL LINE PROFILE OF NEON

Charged macroparticles levitated in plasma can form ordered dusty structures which influence on plasma conditions. Changes in plasma spectral characteristics as dusty particles are injected can detect this influence. For instance, changing atomic temperature leads to changing spectral lines profiles. We study the profile of a 585 nm neon spectral line in the dusty structures. The structures are formed in a glow discharge positive column with 50–150 Pa pressure and 1–9 mA current. The profile is scanned with a Fabry – Perot interferometer by changing air pressure between interferometer mirrors. We present a data processing algorithm that is resistant to noise and scanning speed instability. We have found an upper bound of the dusty structures influence on the profile width. Appearance of macroparticles changes atomic plasma temperature less than by 10 K.

Key words: spectral line profile, dusty plasma, dusty structure, Fabry – Perot interferometer

REFERENCES

1. Bul'ba A. V., Luizova L. A., Podryadchikov S. F., Khakhaev A. D., Shcherbina A. I. Self-organization and growth of dust structures in a glow discharge [Samooorganizatsiya i rost pylevykh struktur v tleyushchem razryade]. *High Energy Chemistry*. 2006. Vol. 40. № 2. P. 125–130.
2. Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Polyakov D. N., Fortov V. E. Cooperative formation of dust structures in plasma [Kooperativnyy kharakter obrazovaniya pylevykh struktur v plazme]. *JETP*. 2002. Vol. 94. № 3. P. 521–524.
3. Pal' A. F., Sivokhin D. V., Starostin A. N., Filippov A. V. The determination of dusty particles charge with Stark broadening of hydrogen spectral lines [Opredelenie zaryada pylevykh chastits po shtarkovskomu ushirenuyu spektral'nykh liniy atomov vodoroda]. *Materialy shkoly-seminara "Metody i tekhnika eksperimental'nogo issledovaniya protsessov samoorganizatsii uporyadochennykh struktur v plazmenno-pylevykh obrazovaniyakh"* [Proc. of school "Methods and techniques of experimental research into self-organization of plasma dusty structures"]. Petrozavodsk, 2002. Available at: <http://plasma.karelia.ru/pub/fntp/Sivohin.pdf>
4. Solov'ev A. V. Programma "Apparat" [Software "Apparat"]. Available at: <http://plasma.karelia.ru/distort/index.en.php>
5. Fortov V. E., Khrapak A. G., Khrapak S. A., Molotkov V. I., Petrov O. F. Dusty plasmas [Pylevaya plazma]. *UFN*. 2004. Vol. 174. № 5. P. 447.
6. Connor T. R., Biondi M. A. Dissociative recombination in neon: spectral line-shapes studies // Phys. Rev. 1965. V. 140. № 3A. P. A778–A791.
7. Khrapak S. A., Morfill G. E. Grain surface temperature in noble gas discharges: Refined analytical model // Phys. Plasmas. 2006. V. 13. P. 104506–104510.
8. Mitic S., Pustynnik M. Y., Morfill G. E. Spectroscopic evaluation of the effect of the microparticles on radiofrequency argon plasma // New Journal of Physics. 2009. Vol. 11. Issue 8. P. 083020–083036.
9. Stefanovic I., Kovacevic E., Berndt J., Winter J. H α emission in the presence of dust in an Ar-C₂H₂ radio-frequency discharge // New Journal of Physics. 2003. Vol. 5. Issue 1. P. 39.1–39.12.

Поступила в редакцию 04.07.2013

ВИТАЛИЙ БОРИСОВИЧ ПИКУЛЕВ

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
pikulev@petsu.ru

СВЕТЛАНА ВЛАДИМИРОВНА ЛОГИНОВА

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
svlog@petsu.ru

ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ЛОГИНОВ

кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
logindm@mail.ru

МОДЕЛЬНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ И КРЕМНИЕВЫХ НАНОЧАСТИЦ*

Результаты модельного эксперимента свидетельствуют о принципиальной возможности локализации кремниевой частицы вблизи молекул целлюлозы. Это подтверждает гипотезу стабилизации люминесцентных свойств синтезированного нанокompозита как результат устойчивой водородной пассивации кремниевых наночастиц, находящихся в контакте с молекулами целлюлозы. Поскольку размеры кремниевых кластеров от 2 до 3 нм обуславливают фотолюминесценцию композита в видимой области спектра (с максимумом вблизи 1,85 эВ), нанокристаллическая целлюлоза выступает в качестве диэлектрической матрицы, стабилизирующей люминесцентные свойства кремниевых частиц даже в случае воздействия активных газофазных окислителей.

Ключевые слова: наночастицы кремния, нанокристаллическая целлюлоза, нанокompозит, люминесценция, компьютерное моделирование

Синтез и характеристика композитных материалов на основе органических полимеров и неорганических наночастиц в настоящее время представляется весьма перспективным направлением исследований, направленным на получение новых материалов с полезными или уникальными физико-химическими свойствами. Целью данной работы является попытка интерпретации ряда специфических свойств, обнаруженных в композитных материалах на основе наноструктурированной микрокристаллической целлюлозы и кремниевых наночастиц.

Нами [2] предложен способ стабилизации фотолюминесцентной активности кремниевых наночастиц, встроенных в матрицу целлюлозы. Актуальность интерпретации этих экспериментальных фактов представляется достаточно важной.

Технология приготовления образцов нанокompозита в целом повторяет описанную в [2] и состоит из двух этапов. На первом этапе предварительно измельченная химически чистая микрокристаллическая целлюлоза помещается в водный раствор соляной и серной кислот при комнатной температуре. Процесс химической деструкции проходит не менее 70 часов с перио-

дической кратковременной ультразвуковой обработкой раствора. Затем pH раствора повышается до 4 путем его многократного разбавления дистиллированной водой, далее взвесь целлюлозы отделяется от осадка и выпаривается для получения нанокристаллической целлюлозы (НКЦ).

Кремниевые наночастицы с размерами от единиц до сотен нанометров были получены ультразвуковым диспергированием порошка пористого кремния в изопропанол с последующей фильтрацией. Весь процесс от получения порошка до формирования композита происходит без контакта Si частиц с воздухом для предотвращения возможного окисления кремния. На втором этапе происходит смешивание наночастиц кремния и НКЦ в изопропиловом спирте с ультразвуковым перемешиванием смеси в течение 1 часа. Для приготовления объектов исследования использовались выпаривание при комнатной температуре и прессование полученного порошка под давлением 26 МПа. Плотность полученных образцов составила 1,42 г/см³. На рентгенограммах образцов присутствуют слабые отражения от кремния Si (JCPDS 5–565) [2]. Анализ кривых распределения парных функций, рассчитанных для различных значений концентрации кремния

из кривых распределения интенсивности рассеяния образцов нанокompозита, показал, что содержание кремния составляет ~ 22–26 вес. %.

Характерным свойством полученного материала является фотолюминесценция в желто-красной области видимого спектра, обусловленная квантоворазмерными эффектами в частицах кремния, стабильность которой при воздействии внешних газофазных окислителей существенно выше, нежели в случае фотовозбуждения кремниевых наночастиц или нанопроволок на воздухе [1], [9]. Очевидной причиной деградации люминесценции считается увеличение количества центров безызлучательной рекомбинации на поверхности кремниевых нанокристаллов. В частности, число таких центров зависит от качества пассивации поверхности кремниевых наноструктур, так что даже частичное разрушение водородной пассивации в результате воздействия внешних окислителей (например, озона) в силу окисления боковых связей кремния приводит к резкому снижению интенсивности люминесцентного сигнала [6].

Проведенные исследования кинетик фотолюминесценции нанокompозитов показали, что синтезированный материал существенно не меняет интенсивности высвечивания при воздействии ультрафиолетового облучения, повышенной температуры (до 90 °С), высоких концентраций озона, а также при комплексном воздействии ионов и активных окислителей (таких как монооксид азота и синглетный кислород) в низкотемпературной плазме. При этом в рамках проведенных ранее рассуждений высокую стабильность люминесценции нанокремниевых частиц можно объяснить сохранением водородной пассивации поверхности кремниевых кластеров, находящихся в окружении молекул целлюлозы. Наличие изначальной водородной пассивации кремниевых нанокристаллитов было подтверждено результатами ИК-спектроскопии [6].

На рис. 1 схематически показаны некоторые возможные позиции локализации кремниевой частицы вблизи микрофибриллы целлюлозы. Поскольку кристаллическая фаза микрофибриллы образована многочисленными водородными связями между молекулами целлюлозы, представляется крайне маловероятным внедрение кремниевой наночастицы в кристаллический фрагмент целлюлозы при рассмотренных выше условиях приготовления композита. Присутствие наночастицы рядом с фибриллой (позиция 1) представляется наиболее вероятным, однако закономерен вопрос о том, насколько устойчивым будет положение кремниевой наночастицы в этой позиции.

Результаты рентгенографических исследований нанокристаллической целлюлозы свидетельствуют, что средний размер областей когерентного рассеяния (ОКР) составляет ~ 5 нм, а степень кристалличности НКЦ – от 60 до 78 %

[2]. Принимая во внимание хорошо известную модель надмолекулярной структуры целлюлозы [10], определяющей элементарные фибриллы с чередующимися областями кристаллической и аморфной фазы, средние линейные размеры неупорядоченных областей будут находиться в диапазоне от 1,7 до 3,3 нм, то есть сравнимы с диаметром наночастицы кремния, излучающей фотон с энергией в максимуме наблюдаемого люминесцентного пика нанокompозита [3]. Но несмотря на это внедрение наночастицы в позицию 2 представляется статистически маловероятным.

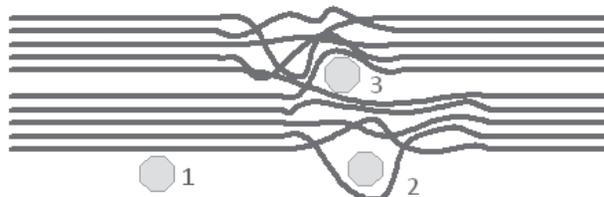


Рис. 1. Возможные позиции внедрения наночастицы кремния в структуру НКЦ: 1 – вблизи наружной поверхности микрофибриллы, 2 – в пустотах аморфной области элементарной фибриллы, 3 – между элементарными фибриллами

Наконец, позиция 3, когда наночастица кремния разместились в аморфной области внутри микрофибриллы, оптимальна с точки зрения формирования максимально стабильной водородной пассивации поверхности кремния. В частности, вероятность окисления поверхности кремниевых наночастиц, «укрытых» молекулами целлюлозы, при воздействии озона будет существенно уменьшена, поскольку активный кислород в первую очередь свяжется с самой молекулой целлюлозы или с продуктами ее деструкции [4], [7].

Присутствие избыточной воды, а также наличие мезопористой структуры традиционно связывают с перколяционным механизмом проводимости, ухудшающим диэлектрические свойства целлюлозных материалов. В нашем случае плотность материала существенно превышала типичный порог (0,2–0,4 г/см³) формирования водяных мостиков [5], однако особенности процесса приготовления композита предполагают наличие в объеме материала, наряду с кристаллизационной водой, малого количества протонсодержащих комплексов, что, возможно, обуславливает специфические свойства данного композита, связанные с переносом и накоплением заряда [2].

Для анализа характера внедрения кремниевой наночастицы в целлюлозную матрицу был построен ряд пространственных моделей с использованием программы HyperChem (HyperCube, Inc.), а также программ квантово-химических расчетов GAMESS (Iowa University) и MOPAC (Stewart Computational Chemistry). Расчеты проводились методом молекулярной динамики. Использовались метод силового поля MM+ и полупирические методы (AM1, MNDO, PM3, PM6)

в стандартной параметризации. Для созданных конфигураций сначала проводилась оптимизация геометрии расположения атомов с использованием метода ММ+ до достижения энергетического минимума. Далее следовала релаксация системы при температуре 300 К в течение 30–100 пс. В ходе моделирования осуществлялся контроль кинетической, потенциальной и полной энергии системы, а также температуры. Процесс релаксации системы считался завершенным, если в течение последних 10 пс этапа моделирования значения температуры изменялись не более чем на 5 К.

Пространственные конфигурации включали в себя кремниевые частицы диаметром от 1 до 3 нм и целлюлозные цепочки с размерами от $2c$ до $5c$, где c – период элементарной ячейки (ось c совпадает по направлению с осью фибриллы), различным образом ориентированные относительно наночастиц кремния. Выбор длины целлюлозных цепочек обусловлен тем, что в образцах НКЦ в направлении [001], совпадающем с осью элементарной микрофибриллы, размеры ОКР составляют порядка 4–5 элементарных ячеек (как было показано ранее [2]). Для построения целлюлозных цепочек были использованы координаты атомов для целлюлозы I β [10].

Исходные наночастицы кремния формировались на основе идеальной кубической решетки кремния с периодом $a = 5,431 \text{ \AA}$ (пространственная группа Fd3m) способом, подобным описанному в работе [8]. Для создания кластеров с формой, близкой к сферической, удалялись атомы, имевшие одну связь, и атомы, расположенные в вершинах кубов, образованных в результате трансляции элементарной ячейки кремния. Поверхностные атомы кремния, имевшие свободные связи, насыщались водородом, что исключало необходимость моделировать реконструкцию поверхности кластеров [1].

На рис. 2 приведены некоторые результирующие трехмерные модели взаимного расположения наночастиц кремния и целлюлозных цепочек, полученные в результате моделирования.

Для всех сформированных пространственных моделей характерно искривление целлюлозных цепочек вблизи кремниевых наночастиц: цепочки «оггибают» и «окружают» наночастицы Si. При этом структура кремниевых кластеров не претерпевает существенных изменений.

Был проведен расчет длин и углов связей для всех полученных моделей. Так, для модели, состоящей из наночастицы кремния диаметром 2,2 нм и двух целлюлозных цепочек длиной $3c$ (рис. 2г), анализ окружения атомов кремния в центральной части (радиусом 10 \AA) Si-кластера показал, что в сферическом слое радиусом 2,2–2,4 \AA все атомы кремния имеют четырех ближайших соседей. Угловое распределение, вычисленное по атомам из централь-

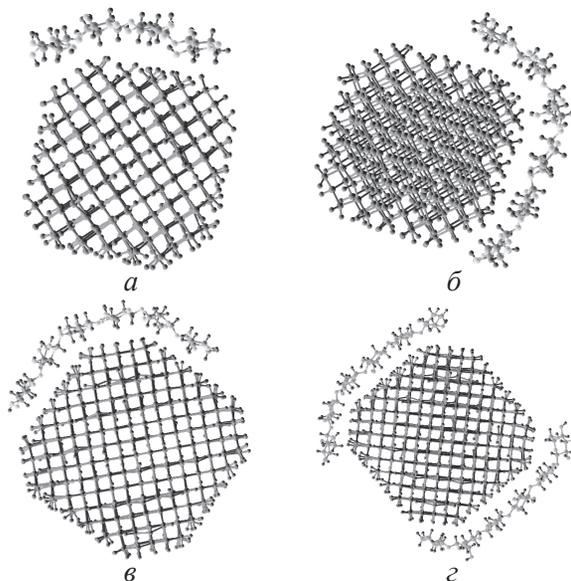


Рис. 2. Пространственные модели взаимного расположения наночастиц кремния и целлюлозных цепочек, полученные в результате моделирования: кластер диаметром 1,6 нм и цепочки длиной (а) $2c$ и (б) $3c$; кластер диаметром 2,2 нм и (в) одна, (г) две цепочки длиной $3c$

ной части кластеров, свидетельствует о том, что качественно ход распределения углов связи сохраняется. Таким образом, алмазоподобная структура кремниевых кластеров в результате моделирования сохраняется.

Целлюлозные цепочки с ориентировались относительно кремниевых кластеров таким образом, что элементарные целлюлозные звенья (усредненные плоскости колец) развернулись параллельно поверхности кремниевой частицы: максимальные отклонения в значениях соответствующих торсионных углов достигают 35° . При этом исходная конформация молекулы целлюлозы сохранилась. В глюкопиранозном звене различия в значениях межатомных расстояний C–C не превышают 0,06 \AA , расстояний C–O – 0,03 \AA , в значениях углов C–C–C – $0,2^\circ$, углов C–O–C – $0,6^\circ$ по сравнению с соответствующими значениями для исходного элементарного звена. Для гликозидной связи среднее расстояние C–O изменяется на $\pm 0,5 \text{ \AA}$, среднее значение угла C–O–C – на $\pm 2^\circ$ по сравнению с соответствующими исходными значениями.

Таким образом, полученные в ходе моделирования результаты говорят о том, что частицы кремния с размерами, характерными для проявления фотолюминесценции в видимой области спектра, имеют тенденцию удерживаться вблизи и внутри аморфных областей микрофибрилл (в пустотах соответствующего размера, образованных спутанными и беспорядочно расположенными цепями молекул целлюлозы). Анализ распределения электронной плотности в системе «кремниевый нанокристалл – молекула целлюлозы» (аналогичной рис. 2в) свидетель-

ствуется также о появлении дипольного момента, направленного от середины молекулы целлюлозы к центру нанокристалла с локализацией отрицательного заряда на кремниевом кластере. Результаты моделирования согласуются с высказанными выше предположениями, объясняющими особенности оптических свойств синтезированного композитного материала.

*Проект «Экспериментальное исследование нанокompозитов на основе матрицы целлюлозы и наноразмерных кремнесодержащих включений» в рамках НИР, проводимой в соответствии с государственным заданием МОН № 01201253375 (2012–2014 гг.), и при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ищенко А., Фетисов Г., Асланов Л. Нанокремний: свойства, получение, применение, методы исследования и контроля. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 648 с.
2. Пикuleв В., Логинова С., Гуртов В. Влияние естественного и стимулированного окисления на люминесцентные свойства нанокompозитов «кремний – целлюлоза» // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 15. С. 74–81.
3. Buuren T., Dinh L., Chase L., Siekhaus W., Terminello L. Changes in the electronic properties of Si nanocrystals as a function of particle size // Phys. Rev. Lett. 1998. Vol. 80. № 17. P. 3803–3806.
4. Lemeune S., Jameel H., Chang H.-M., Kadla J. Effects of Ozone and Chlorine Dioxide on the Chemical Properties of Cellulose Fibers // J. of Appl. Polymer Sci. 2004. Vol. 93. P. 1219–1223.
5. Nilsson M., Frenning G., Gräsjo J., Alderborn G., Strømme M. Conductivity Percolation in Loosely Compacted Microcrystalline Cellulose: An in Situ Study by Dielectric Spectroscopy during Densification // J. Phys. Chem. B. 2006. Vol. 110. P. 20502–20506.
6. Pikulev V., Tsyganenko A., Kuznetsov S., Saren A., Gurtov V. Peculiarities of ozone adsorption on a porous silicon surface at low temperature // Physica Status Solidi (c). 2007. Vol. 4. № 6. P. 2116–2120.
7. Potthast A., Rosenau T., Kosma P. Analysis of Oxidized Functionalities in Cellulose // Adv. Polym. Sci. 2006. Vol. 205. P. 1–48.
8. Qi W., Lee S. Core-shell structures of silicon nanoparticles and nanowires with free and hydrogenated surface // Chem. Phys. Lett. 2009. Vol. 483. P. 247–249.
9. Urbach B., Axelrod E., Sa'ar A. Correlation between transport, dielectric, and optical properties of oxidized and nonoxidized porous silicon // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 75. P. 205330:1–11.
10. Zugenmaier P. Crystalline Cellulose and Derivatives. Characterization and Structures. Springer, 2008. 285 p.

Pikulev V. B., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Loginova S. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Loginov D. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

MODEL INTERPRETATION OF PROPERTIES OF MATERIAL COMPOSED BY NANOCRYSTALLINE CELLULOSE AND SILICON NANOPARTICLES

Results of the simulation experiment that specify possibility of silicon particles' localization close to cellulose molecules are presented. These results confirm our hypothesis of stabilizing luminescence properties for synthesized nanocomposite as a result of steady hydrogen passivation of silicon nanoparticles in contact with cellulose molecules. Since silicon clusters with dimensions from 2 to 3 nm cause visible photoluminescence of materials (with maximum near 1,85 eV), nanocrystalline cellulose acts as a dielectric matrix that stabilizes luminescent properties of silicon particles including exposure of active gaseous oxidants.

Keywords: silicon nanoparticles, nanocrystalline cellulose, nanocomposite materials, luminescence, computer simulation

REFERENCES

1. Ishchenko A., Fetisov G., Aslanov L. *Nanokremniy: svoystva, poluchenie, primeneniye, metody issledovaniya i kontrolya* [Nanosilicon: properties, preparation, application, methods of research and monitoring]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2011. 648 p.
2. Pikulev V., Loginova S., Gurtov V. The influence of natural and stimulated oxidation on luminescent properties of silicon–cellulose nanocomposites [Vliyanie estestvennogo i stimulirovannogo okisleniya na luminescentnyye svoystva nanokompозитov “kremniy – tsellyuloza”]. *Pis'ma v ZHTF* [Tech. Phys. Lett.]. 2012. Vol. 38. № 8. P. 723–725.
3. Buuren T., Dinh L., Chase L., Siekhaus W., Terminello L. Changes in the electronic properties of Si nanocrystals as a function of particle size // Phys. Rev. Lett. 1998. Vol. 80. № 17. P. 3803–3806.
4. Lemeune S., Jameel H., Chang H.-M., Kadla J. Effects of Ozone and Chlorine Dioxide on the Chemical Properties of Cellulose Fibers // J. of Appl. Polymer Sci. 2004. Vol. 93. P. 1219–1223.
5. Nilsson M., Frenning G., Gräsjo J., Alderborn G., Strømme M. Conductivity Percolation in Loosely Compacted Microcrystalline Cellulose: An in Situ Study by Dielectric Spectroscopy during Densification // J. Phys. Chem. B. 2006. Vol. 110. P. 20502–20506.
6. Pikulev V., Tsyganenko A., Kuznetsov S., Saren A., Gurtov V. Peculiarities of ozone adsorption on a porous silicon surface at low temperature // Physica Status Solidi (c). 2007. Vol. 4. № 6. P. 2116–2120.
7. Potthast A., Rosenau T., Kosma P. Analysis of Oxidized Functionalities in Cellulose // Adv. Polym. Sci. 2006. Vol. 205. P. 1–48.
8. Qi W., Lee S. Core-shell structures of silicon nanoparticles and nanowires with free and hydrogenated surface // Chem. Phys. Lett. 2009. Vol. 483. P. 247–249.
9. Urbach B., Axelrod E., Sa'ar A. Correlation between transport, dielectric, and optical properties of oxidized and nonoxidized porous silicon // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 75. P. 205330:1–11.
10. Zugenmaier P. Crystalline Cellulose and Derivatives. Characterization and Structures. Springer, 2008. 285 p.

ОЛЕГ ВАЛЕРЬЕВИЧ ГУСЕВ

преподаватель кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
elesef@gmail.com

АРТЕМ ВЛАДИМИРОВИЧ ЖУКОВ

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
artem.v.zhukov@gmail.com

ИРИНА ВАЛЕРЬЕВНА ПЕШКОВА

кандидат физико-математических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
iaminova@psu.karelia.ru

СПОСОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЕРЕГРУЗКИ WEB-СЕРВЕРА ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ*

Рассматривается проблема диагностирования и предотвращения перегрузки при работе web-серверов. Установлено, что использование простых моделей не позволяет добиться точной идентификации перегрузки, а использование сложных – приемлемого уровня производительности алгоритма идентификации. К тому же при использовании реального web-сервера могут проявляться особенности, присущие конкретной аппаратно-программной платформе и оказывающие непосредственное влияние на ее способность противостоять перегрузкам. Предложен подход, основанный на идентификации состояния перегрузки сервера с использованием нейронной сети с архитектурой трехслойного персептрона прямого распространения. Обозначен круг исходных данных, необходимый для формирования набора входных данных нейронной сети. В работе предлагается алгоритм сбора входных данных, обработки полученных результатов и их применения для прогнозирования возникновения состояния перегрузки на web-сервере. Предложенный подход апробирован путем анализа данных работы web-сервера, полученных в ходе нагрузочного тестирования. Полученные результаты показали, что предложенный подход позволяет более точно предсказать состояние перегрузки, что дает возможность организовывать качественное управление запросами web-сервера с целью предотвращения его перегрузки и обеспечения стабильности работы.

Ключевые слова: перегрузка, нейронные сети, управление запросами, web-сервер, нагрузочное тестирование, запрос

К преимуществам реализации информационных систем в виде web-сервисов можно отнести минимальные требования к пользовательской части, возможность эффективно решать сложные ресурсоемкие задачи благодаря значительным аппаратным ресурсам сервера, отработанную технологию разработки подобных систем и т. д. Однако использование web-сервисов связано с необходимостью преодоления ряда сложностей, в частности с обеспечением устойчивой работы в режимах предельных нагрузок, то есть в ситуациях, когда интенсивность поступающих запросов к web-серверу (сервера) превышает имеющиеся возможности по их обработке [3].

Под состоянием перегрузки будем понимать состояние сервера, при котором время обработки запросов превышает некоторую установленную величину L и запрос не получает инфор-

мационную услугу (получает отказ) вследствие недостатка аппаратных ресурсов.

Несмотря на то что состояние перегрузки может достаточно успешно диагностироваться со стороны пользователей системы, прогнозирование возникновения состояния перегрузки на стороне сервера не всегда является тривиальной задачей. Прогноз возникновения состояния перегрузки сервера строится в момент принятия решения о дальнейшей обработке запроса, который может вызвать перегрузку, на основе имеющихся сведений о количестве обрабатываемых запросов и состоянии сервера.

Как правило, для решения такой задачи используется подход, основанный на количественном определении числа запросов, вызывающих перегрузку, и вычислении функции ресурсоемкости [2]. На практике такой подход не всегда применим ввиду того, что современный web-сер-

вер, как правило, является приложением, выполняемым в рамках контекста операционной системы, самостоятельно распределяющей ресурсы сервера среди множества различных задач, а выделить из общего количества используемых сервером ресурсов лишь те, которые применяются для обработки запроса, практически невозможно. В связи с этим актуальной становится задача идентификации состояния перегрузки с учетом состояния сервера и его текущей загруженности. Для решения данной проблемы предлагается использование аппарата нейронных сетей [4].

Архитектура нейронной сети представляет собой трехслойный перцептрон с одним скрытым слоем, входные данные которого отражают состояние сервера в конкретный момент времени, а выходные данные – время обработки запроса или его превышение над заданной величиной L (служат для идентификации состояния перегрузки).

Способность скрытых нейронов выделять статистические зависимости порядка особенно существенна, когда размер входного слоя достаточно велик, что актуально для решения нашей задачи.

В качестве входных данных использовались два вида набора значений:

- Данные, характеризующие загруженность программной части web-сервера как исполняемой программной задачи, а именно данные о количестве запросов, которые находятся в обработке в разрезе каждого сетевого сервиса.
- Данные, характеризующие загруженность сервера в целом как программно-аппаратного комплекса, распределяющего аппаратные ресурсы между всеми задачами, а именно предоставляемые операционной системой данные, характеризующие основные показатели работы сервера (счетчики производительности).

Выходной сигнал сигнализировал о наличии или отсутствии перегрузки в условиях заданного состояния сервера.

Для практического применения нейронной сети к задаче идентификации перегрузки необ-

ходимо решить проблему ее первоначального обучения и актуализации параметров модели в процессе использования.

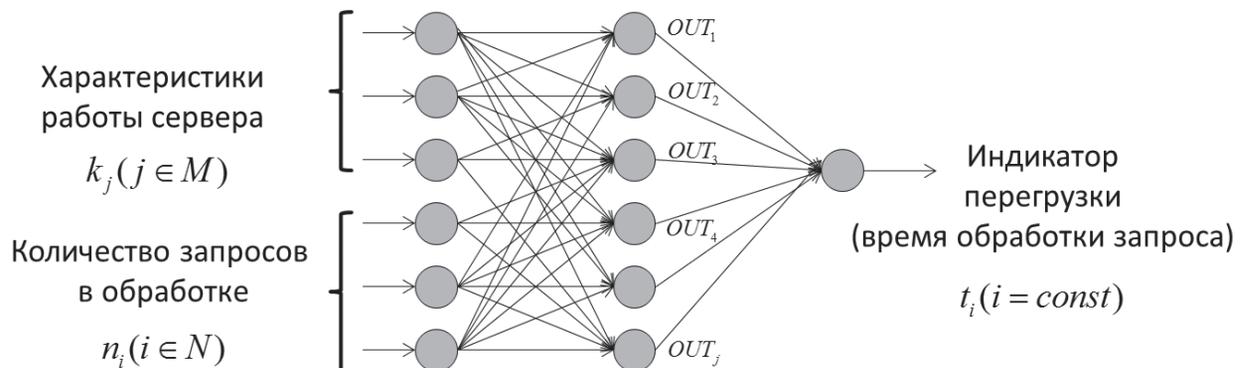
В качестве входных данных для расчета используются показатели, характеризующие работу сервера и предоставляемые операционной системой, а именно количество запросов в обработке на сервере к каждому из функционирующих сетевых сервисов и индикативные величины состояния ресурсов сервера (счетчики производительности), позволяющие охарактеризовать уровень его загруженности (см. рисунок).

В качестве функции активации нейронов промежуточного и выходного слоя использовалась логистическая функция вида

$$OUT_d = \frac{1}{1 + \exp\left(-\alpha \left(\sum_{j \in M} w_{1j} k_j + \sum_{i \in N} w_{2i} n_i \right)\right)},$$

где OUT_d – выходной сигнал искусственного нейрона; α – параметр наклона сигмоидальной функции активации; M – множество величин, характеризующих загруженность аппаратных ресурсов сервера ($j \in M$), существенных для оценки времени выполнения запросов; \bar{M} – множество величин, характеризующих загруженность аппаратных ресурсов сервера ($M \subset \bar{M}$); N – множество сетевых сервисов на сервере ($j \in N$); k_j – индикативная величина загруженности аппаратного ресурса сервера ($j \in M$); n_i – количество запросов в обработке к сетевому сервису ($j \in N$); w_{1j} , w_{2i} – синаптические веса.

Выбор индикативных величин должен быть таким, чтобы их значения оказывались в статистической связи с индикатором перегрузки, то есть временем обработки запроса. Одним из характеризующих параметров могло бы стать использование коэффициента линейной корреляции для установления такой связи. В то же время набор индикаторов в максимальной степени должен представлять собой набор базисных компонент. Поскольку набор влияющих факторов в общем случае различен для разных



Нейронная сеть прямого распространения для решения задачи идентификации перегрузки web-сервера

аппаратно-программных платформ, правильный выбор индикативных величин во многом может определить эффективность идентификации перегрузки для конкретного сервера.

Поскольку предельное время обработки запроса к каждому сетевому сервису известно, для каждого набора входных данных можно определить, находился ли сервер в состоянии перегрузки или нет.

Набор данных для обучения представляет собой набор числовых значений, характеризующих выполнение одного запроса, и включает следующие сведения: время обработки запроса к заданному сервису (наличие перегрузки), количество запросов, находящихся в обработке в момент поступления данного запроса на сервер, значения индикативных величин, характеризующих состояние сервера в момент поступления данного запроса на сервер.

В дальнейшем для поиска первоначальных значений весов синаптических связей используется метод обучения с учителем на основе полученных обучающих примеров.

В целом применение предлагаемой методики идентификации перегрузки состоит в последовательном выполнении следующих действий:

Этап 1. Производится нагрузочное тестирование сервера, в ходе которого формируется выборка значений индикативных величин k_j ($j \in M$), характеризующих состояние сервера, производится оценка наличия перегрузки для каждого случая обработки запроса в зависимости от заданного предельного времени его обработки.

Этап 2. Определяется множество индикативных величин k_j ($j \in M \subset \bar{M}$), в совокупности отражающих загруженность сервера, значения которых будут использоваться как входные данные для нейронной сети.

Этап 3. С использованием полученных обучающих примеров проводится первоначальный расчет синаптических весов нейронной сети w_{1j} , w_{2j} , например, при помощи метода обратного распространения ошибок.

Этап 4. При поступлении очередного запроса, если время обработки запроса t_j , рассчитанное на основе актуальных на момент поступления запроса входных данных нейронной сети, превышает значение L , запрос отклоняется, так как может вызвать перегрузку, иначе – принимается к обслуживанию.

Этап 5. Периодически с целью повышения точности идентификации перегрузки с учетом практических результатов управления запросами синаптические веса нейронной сети актуализируются.

Следует отметить, что этапы 1–3 являются подготовительными.

Для практической проверки предлагаемого подхода использовались данные, полученные по результатам нагрузочного тестирования

web-сервера (конфигурация сервера: одноядерный процессор AMD Athlon64 3500+, 2 ГБ ОЗУ, 1 ТБ НЖМД, операционная система Windows Server 2008 R2, web-служба IIS), запросы к которому направлялись с одной рабочей станции (конфигурация рабочей станции: одноядерный процессор Intel Celeron 440M, 2 ГБ ОЗУ, 120 ГБ НЖМД, операционная система Linux Ubuntu 13.04) с использованием специализированного программного средства генерации потока запросов Tsung. Сервер и рабочая станция были соединены друг с другом по технологии Ethernet максимальной пропускной способностью 100 Мбит/сек. В ходе тестирования загруженность канала связи в среднем составляла менее 1%, что позволяет не учитывать влияние фактора задержек по сети при оценке времени выполнения запросов.

В рамках web-сервера функционировали два различных сетевых сервиса, отличающиеся друг от друга по структуре ресурсоемкости.

Сетевой сервис № 1 выполнял операции по генерации псевдослучайных чисел программным способом. Структура ресурсоемкости была ориентирована на большое число вычислительных операций. В качестве ответа сетевой сервис возвращал уведомление об окончании выполнения операций.

Сетевой сервис № 2 выполнял операции по генерации псевдослучайных чисел программным способом и их последовательную запись в оперативную память. Структура ресурсоемкости была ориентирована на большое число вычислительных операций и активное использование оперативной памяти. В качестве ответа сетевой сервис возвращал уведомление об окончании выполнения операций.

Во время нагрузочного тестирования со стороны клиентского узла на web-сервер направлялись запросы к обоим сетевым сервисам с изменяемой интенсивностью таким образом, чтобы в различные моменты времени одновременно на сервере выполнялось различное число запросов к одному и другому сетевым сервисам.

Хотя в процессе тестирования были собраны сведения о запросах к обоим сетевым сервисам, при анализе данных и применении методики использовались данные о поступлении запросов к сетевому сервису № 2.

Для проверки предлагаемой методики идентификации собранные данные были использованы в качестве обучающих примеров нейронной сети. В качестве входных данных использовались показатели счетчиков производительности и количество запросов в обработке на сервере, в качестве выходных – фактическое время обработки запроса на сервере. Моделирование нейронной сети (схема сети 15–12–1) производилось для одного из двух сетевых сервисов с использованием ПО Statistica.

В качестве индикатора перегрузки принималось время обработки запроса, превышающее 40 секунд. В результате были получены сведения о выполнении 1783 запросов, из которых 769 были обработаны в режиме перегрузки. В результате нейронная сеть определила отсутствие перегрузки в 805 случаях, из них 45 ошибочно (5,59%), наличие перегрузки – в 978 случаях, из них 254 ошибочно (25,97%). В целом доля ошибок составила 16,77%.

Для сравнения был построен прогноз возникновения перегрузки традиционным методом, идентифицирующим ее по факту возникновения. Суть метода заключается в том, что при поступлении очередного запроса прогноз относительно возникновения состояния перегрузки строится по результатам последнего обработанного запроса: если последний обрабо-

танный запрос не вызвал перегрузку, то и вновь поступивший также ее не вызовет, и наоборот. В результате отсутствие перегрузки было определено в 1066 случаях, из них 254 ошибочно (23,83%), наличие перегрузки в 717 случаях, из них 202 ошибочно (28,17%). В целом доля ошибок составила 25,57%.

Полученные результаты показывают, что предложенный подход позволяет более точно предсказать состояние перегрузки, что дает возможность принимать обоснованное решение об обслуживании или отказе запросов и тем самым организовывать качественное управление запросами с учетом состояния сервера и текущей загруженности, учитывая индивидуальные особенности аппаратно-программной платформы web-сервера с целью предотвращения его перегрузки и обеспечения стабильности работы.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головки В. А., Безобразов С. В. Проектирование интеллектуальных систем обнаружения аномалий // Материалы международной научно-технической конференции OSTIS-2011. Минск: БГУИР, 2011.
2. Жуков А. В. Некоторые модели оптимального управления потоком входных заявок в интранет-системах // Новые информационные технологии в ЦБП и энергетике: Материалы 6-й научно-технической конференции. Петрозаводск, 2004. С. 87–90.
3. Кучерявый Е. А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет. М.: Наука и техника, 2004.
4. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. 290 с.
5. Менаске Д. А., Алмейда В. А. Ф. Производительность Web-служб. Анализ, оценка и планирование: Пер. с англ. СПб.: ООО «ДиаСофтЮП», 2003. 480 с.

Gusev O. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
 Zhukov A. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
 Peshkova I. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

WEB SERVER OVERLOAD IDENTIFICATION BY USE OF NEURAL NETWORK

Problems of diagnosing web servers' overloading are considered. It was found out that the use of simple models doesn't allow achievement of exact overload identification, but the use of complex models helps to assess the acceptable performance level of identification algorithm. When using a real Web server a set of features inherent to specific hardware-software platform can have a direct impact on its ability to resist overloads. The approach based on the server overload identification with the use of a neural network with the architecture of the three-layer direct distribution preceptor is offered. The range of the data source, necessary for construction of the set of input data of a neural network, is designated. The algorithm of actions for preparation of basic data, their analysis, and application of the received results for prediction of the origin of overloads on a Web server is offered. The offered approach is tested by data received during load testing of the Web server. The obtained results demonstrated that the offered approach is facilitative in a more precise overload assessment, which helps to organize effective requests' management with the purpose of congestion avoidance.

Key words: overload, neural networks, requests' managing, Web server, load testing, request

REFERENCES

1. Golovko V. A., Bezobrazov S. V. Design of intellectual systems of detection of anomalies [Proektirovanie intellektual'nykh sistem obnaruzheniya anomalii]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii OSTIS-2011* [Materials of the international scientific and technical OSTIS-2011 conference]. Minsk, BGUIR Publ., 2011.
2. Zhukov A. V. Some models of optimum control of a flow of input requests in the intranet systems [Nekotorye modeli optimal'nogo upravleniya potokom vkhodnykh zayavok v intranet-sistemakh]. *Novye informatsionnye tekhnologii v TsBP i energetike: Materialy 6-y nauchno-tekhicheskoy konferentsii* [New Information Technologies in TsBP and Power Engineering: Materials of the 6th scientific and technical conference]. Petrozavodsk, 2004. P. 87–90.
3. Kucheryavy E. A. *Upravlenie trafikom i kachestvo obsluzhivaniya v seti Internet* [Traffic management and quality of service on the Internet]. Moscow, Nauka i tekhnika Publ., 2004.
4. Kallan K. R. *Osnovnye kontseptsii neyronnykh setey* [The Essence of Neural Networks]. Moscow, Wil'yams Publ., 2001. 290 p.
5. Menasce D. A., Almeida V. A. F. *Proizvoditel'nost' Web-služhb. Analiz, otsenka i planirovanie* [Capacity planning for web-services: metrics, models and methods]. St. Petersburg, ООО "DiaSoftYuP" Publ., 2003. 480 p.

Поступила в редакцию 06.11.2013

АЛЕКСАНДР АНДРЕЕВИЧ ЛОМОВ

аспирант кафедры информатики и математического обеспечения математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
lomov@cs.karelia.ru

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРОГРАММНОГО АГЕНТА НА УРОВНЕ СЕССИИ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМИ ПРОСТРАНСТВАМИ*

Рассматривается задача доступа программных агентов к интеллектуальным пространствам на платформе Smart-M3. Предлагается модель параллельных сеансов для работы с несколькими ИП. Модель определяет сессию, объединяющую несколько сеансов, операции управления и хранилище данных, оперирующее онтологическими сущностями (класс, свойство, индивид). Предлагаемая модель реализована в инструментарии SmartSlog и позволяет упростить разработку агентов при взаимодействии с несколькими ИП.

Ключевые слова: интеллектуальные пространства, Smart-M3, сессия, SmartSlog, многоагентные системы

ВВЕДЕНИЕ

На программной платформе Smart-M3 реализуются многоагентные распределенные системы, в которых агенты взаимодействуют в общем интеллектуальном пространстве (ИП, от англ. smart space) [7], [9]. Агент – программа, работающая на вычислительном устройстве. Семантический информационный брокер (SIB, от англ. semantic information broker) реализует интерфейс доступа агентов к ИП.

Информация в ИП представлена моделью RDF (от англ. resource description framework) в виде троек: субъект, предикат, объект. Это позволяет проводить машинную обработку и вывод новых понятий [5]. Таким образом, ИП рассматривается как база знаний [4], формируемая агентами и управляемая брокерами. Агент взаимодействует с брокером по протоколу SSAP (от англ. smart space access protocol) на основе сеансов клиент-сервер [8]. Для отслеживания изменений на стороне ИП в рамках сеанса организуются подписки [2].

В статье предлагается частный случай модели взаимодействия в распределенной системе [3] для поддержки параллельных сеансов агента с ИП. Модель определяет сессию, операции управления и хранилище данных. Используется онтолого-ориентированный подход к разработке агента [11] на основе языка веб-онтологий OWL. Подробнее о разработке агентов в [12], об использовании онтологий для разработки программного обеспечения и агентов в [10], [11].

Модель используется в авторском инструментарии для разработки Smart-M3 агентов SmartSlog [1] и позволяет уменьшить объем программного кода агента, использующего параллельные сеансы, и способствует разработке агента с более высоким уровнем переносимости.

УРОВЕНЬ СЕАНСОВ

Для выполнения операций агент устанавливает сеанс с брокером. Сеанс обеспечивает взаимодействие, управляет обменом данных, синхронизацией задач. Операции протокола SSAP манипулируют с данными, представленными тройками. Операция подписки реализует постоянный запрос, аналогичный запросу на выборку данных, но хранимый на стороне брокера. Брокер будет уведомлять агента при изменении данных, подходящих под запрос.

Будем представлять сеанс p как (Q_p, T_p) , где Q_p – это множество подписок агента в сеансе, T_p – набор всех троек, используемых (отправляемых и получаемых) в операциях сеанса. Множество всех сеансов и подписок заданного агента обозначим как P и Q .

Агент работает с локальными копиями данных, поэтому при использовании параллельных сеансов необходимо объединять данные, так как в распределенных системах связанные между собой данные могут получаться из различных источников. Пусть $D = \bigcup_{p \in P} T_p$ – локальное хранилище на стороне агента.

Рассмотрим пример использования параллельных сеансов на основе «умного дома», где ИП₁ работает внутри дома, а ИП₂ работает в доме и снаружи (рис. 1). В ИП₁ есть информация о звонках и электронных письмах, в ИП₂ – о звонках. В доме агент использует два параллельных сеанса, снаружи – один. При выходе из дома сеанс p_1 с подписками завершается. При возвращении в дом сеанс p_1 и подписки должны быть восстановлены. Нужно провести синхронизацию локального хранилища D с данными сеанса T_{p_1} , например, добавить данные о письмах и звонках в хранилище D , учитывая дублирование.

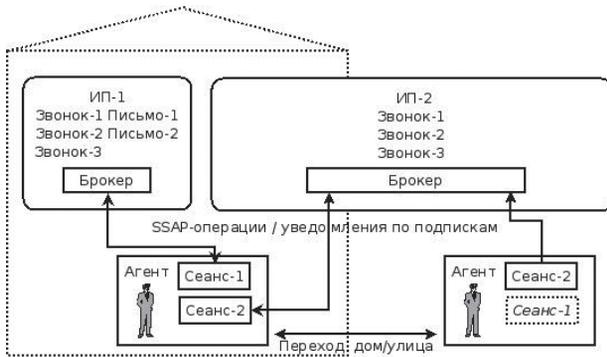


Рис. 1. Работа параллельных сеансов

Таким образом, для поддержки параллельных сеансов нужно: 1) реализовать работу сеансов и подписок, 2) организовать хранение данных с возможностью объединения и синхронизации. Для решения этих задач предлагается объединить сеансы в сессии и реализовать хранилище данных, разделенное между сеансами сессии, с возможностью синхронизации на основе подписок.

УРОВЕНЬ СЕССИЙ

Предлагаемой моделью параллельных сеансов описываются сессия, основанная на модели многоэлементной сессии [6], операции управления и хранилище данных. Данные представлены сущностями языка онтологий OWL: классами, свойствами и индивидами (экземплярами классов). Это позволяет работать с объектами (например, человек, машина) и скрыть низкоуровневые детали, упрощая разработку агента [11]. Данный подход позволяет использовать модель в инструментарии SmartSlog.

Сеансы объединяются в сессии s , реализуемой на прикладном уровне сетевой модели OSI [3] и определяемой как (P_s, Q_s, D_s) , где P_s – сеансы, Q_s – подписки, D_s – хранилище данных. С точки зрения онтологического представления хранилище D_s определим как $O_c \cup O_v \cup O_i$, где O_c, O_v, O_i – множества классов, свойств и индивидов. Все объекты онтологии O представим как $O_c \cup O_v \cup O_i$.

Если сеанс $p \in P_s$, то в контексте сессии представим его как $p = (Q_p, O_p)$, где $Q_p \in Q_s, O_p \in D_s$. Сеанс или подписка могут находиться в активном состоянии или в состоянии ожидания. Пусть множество сеансов P и подписок Q – это дизъюнкция $P_a \cup P_w$ и $Q_a \cup Q_w$, где P_a, Q_a и P_w, Q_w – множества сеансов и подписок в активном состоянии и в состоянии ожидания. Для сеанса $p \in P_a$ установлено сетевое соединение с брокером для операций по протоколу SSAP. Для подписки $q \in Q_a$ ожидаются уведомления от брокера. Для сеанса $p \in P_w$ и подписки $q \in Q_w$ сетевое взаимодействие отсутствует.

В модели управление объектами выполняется на основе операций, каждое имеет вид (табл. 1):

$$U = \{REG, DEL, ACTIVE, WAIT\},$$

где REG – регистрация, DEL – удаление, $ACTIVE$ – активация, $WAIT$ – ожидание. Регистрация – это локальная операция, устанавливающая связь между объектами (сеансами, подписками, сущностями онтологий) и сессией. Операция DEL удаляет связь объекта с сессией. Операции $ACTIVE$ и $WAIT$ используются для управления состоянием всей сессии, отдельных сеансов и подписок.

УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТАМИ ДАННЫХ В РАМКАХ СЕССИИ

Все объекты сессии имеют уникальные идентификаторы, при помощи которых осуществляется регистрация. Для сессии и подписок идентификаторы генерируются при создании. Идентификаторы сеансов задаются разработчиком. Для классов и свойств используются URI (от англ. Uniform Resource Identifier, унифицированный идентификатор ресурса) [5] из онтологии. Для индивидов URI задается разработчиком либо создается на основе URI родительского класса.

На рис. 2 представлена диаграмма состояния объектов в сессии. Жизненный цикл объекта начинается при регистрации его в сессии и заканчивается при удалении. Объекты онтологий после регистрации помещаются в хранилище. Для управления состоянием сеансов и подписок применимы операции $ACTIVE$ и $WAIT$. Использование нескольких сеансов с различными наборами подписок позволяет организовать группы подписок и активировать часть подписок при определенных условиях, останавливая другие, и наоборот.

Состояние сессии определяет состояние всех сеансов и подписок (см. таблицу). Выделим три способа использования нескольких сессий: 1) активация-ожидание, 2) активация-завершение, 3) смешанный. При способе 1 неиспользуемые сессии переводятся в состояние ожидания. При способе 2 сессия завершается после работы с ней. Способ 3 комбинирует два предыдущих. Например, агент использует часть сессий с постоянным набором сеансов и часть создает для разовых взаимодействий с ИП.

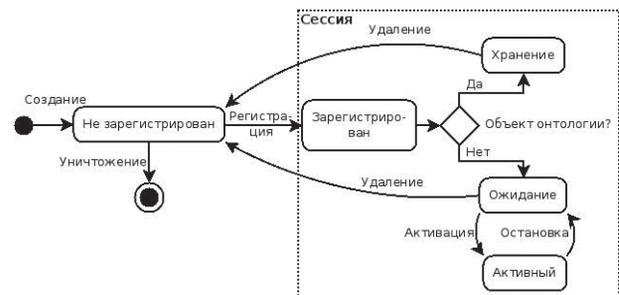


Рис. 2. Состояние объектов сессии

Операции управления объектами

Регистрация и удаление объекта из сессии; объекты онтологии помещаются или удаляются из хранилища	
$REG(s, x) = \begin{cases} (P_s \cup \{x\}, Q_s, D_s), & \text{если } x \in P \text{ и } x \notin P_s \\ (P_s, Q_s \cup \{x\}, D_s), & \text{если } x \in Q \text{ и } x \notin Q_s \\ (P_s, Q_s, D_s \cup \{x\}), & \text{если } x \in O \text{ и } x \notin D_s \end{cases}$	$DEL(s, x) = \begin{cases} (P_s \setminus \{x\}, Q_s, D_s), & \text{если } x \in P_s \\ (P_s, Q_s \setminus \{x\}, D_s), & \text{если } x \in Q_s \\ (P_s, Q_s, D_s \setminus \{x\}), & \text{если } x \in D_s \end{cases}$
Активация сессии, сеанса или подписки. Активация сессии приводит к активации всех сеансов в сессии. Активация сеанса приводит к активации подписок связанных с сеансом	
$ACTIVE(s) \rightarrow ACTIVE(s, p),$ <p style="text-align: center;">для $\forall p \in P_s$</p>	$ACTIVE(s, x) = \begin{cases} (P_s = \{P_w \setminus \{x\} \cup \{P_a \cup \{x\}\}, Q_s, D_s) \rightarrow \\ ACTIVE(s, q) \text{ для } \forall q \in Q_s, & \text{если } x \in P_s \\ (P_s, Q_s = \{Q_w \setminus \{x\} \cup \{Q_a \cup \{x\}\}, D_s), & \\ \text{если } x \in Q_s \end{cases}$
Перевод в состояние ожидания сессии, сеанса или подписки. Переход сессии переводит в состояние ожидания все сеансы и подписки. Переход сеанса переводит все подписки в состояние ожидания	
$WAIT(s) \rightarrow WAIT(s, p),$ <p style="text-align: center;">для $\forall p \in P_a$</p>	$WAIT(s, x) = \begin{cases} (P_s = \{P_a \setminus \{x\} \cup \{P_w \cup \{x\}\}, Q_s, D_s) \rightarrow \\ WAIT(s, q) \text{ для } \forall q \in Q_s, & \text{если } x \in P_s \\ (P_s, Q_s = \{Q_a \setminus \{x\} \cup \{Q_w \cup \{x\}\}, & \text{если } x \in Q_s \end{cases}$

РАЗРАБОТКА АГЕНТА НА УРОВНЕ СЕССИИ

На основе модели параллельных сеансов предложена следующая схема разработки агента (рис. 3).



Рис. 3. Схема разработки агента

Шаг 1. Создание сессии s , сеансов, классов и подготовка сессии к работе операцией $REG(s, x)$. Если в сессии нет сеансов, то невозможно взаимодействовать с ИП. При отсутствии классов и свойств нельзя создавать индивидов и устанавливать связи.

Шаг 2. Использование а) операций для управления состоянием ($ACTIVE(s, x)$, $WAIT(s, x)$), работы с локальными данными, б) операций для взаимодействия с ИП. Операции для работы с локальными данными и взаимодействия зависят от реализации в инструментарии.

Шаг 3. Завершение сессии: перевод сессии в состояние ожидания и удаление всех зарегистрированных объектов и сущностей онтологии (операции $WAIT(s)$ и $DEL(s, x)$).

На примере «умного дома» (см. рис. 1) рассмотрим использования сессии (см. пример ниже). В строках 1 и 2 создаются сессия, сеансы и классы. В строке 3 объекты регистрируются в сессии. В строках 4–6 создаются и регистриру-

ются подписки. Строки 7–11 описывают логику управления состоянием сеансов в зависимости от местонахождения. Если территория «умного дома» покинута, то сессия останавливается, и из нее удаляются все объекты (строки 12–13).

Пример построения агента

1. Создать сессию, сеансы: s, p_1, p_2
2. Создать класс телефона и электронного письма: t, e
3. Зарегистрировать объекты: $REG(s, p_1), REG(s, p_2), REG(s, t), REG(s, e)$
4. Создать подписки для звонков и писем сеанса p_1 : a_1, a_2
5. Создать подписку для звонков сеанса p_2 : b_1
6. Зарегистрировать подписки: $REG(s, a_1), REG(s, a_2), REG(s, b_1)$
7. Пока В_Умном_Доме () = «Да»
8. Если (В_Доме () = «Да» И $p_1 \in P_s$) { $ACTIVE(s, p_1)$ };
9. Если (В_Доме () = «Да» И $p_2 \in P_s$) { $ACTIVE(s, p_2)$ };
10. Если (Снаружи () = «Да» И $p_1 \in P_s$) { $WAIT(s, p_1)$ };
11. Конец
12. Остановить сессию $WAIT(s)$
13. Завершить $s // DEL(s, x)$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная модель позволяет агенту использовать несколько сеансов в одной сессии, управлять объектами в сессии и предоставляет локальное хранилище, разделенное между сеансами сессии. Хранилище синхронизируется при помощи подписок. Подписки можно разбивать на группы и управлять их состоянием. В результате агент имеет возможность: а) работать с параллельными сеансами, б) управлять состоянием сеансов и подписок, в) объединять данные различных ИП, г) синхронизировать локальное хранилище. Модель используется в инструментарии SmartSlog, что позволяет работать с объединенной и поддерживаемой в актуальном состоянии информацией об объектах предметной области разных ИП.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корзун Д. Ж., Ломов А. А., Ваняг П. И. Автоматизированная модельно-ориентированная разработка программных агентов для интеллектуальных пространств на платформе Smart-M3 // Теоретический и прикладной научно-технический журнал «Программная инженерия». 2012. № 5. С. 6–14.
2. Ломов А. А., Корзун Д. Ж. Операция подписки для приложений в интеллектуальных пространствах платформы Smart-M3 // Труды СПИИРАН. 2012. № 4. С. 439–458.
3. Таненбаум Э., Стеен ван М. Распределенные системы. Принципы и парадигмы. М.; СПб.: Питер, 2003.
4. Akerkar R., Sajja P. Knowledge-Based Systems // Jones & Bartlett Publishers. 2010. P. 354.
5. Allemang D., Hendler J. Semantic Web for the Working Ontologist: Effective Modeling in RDFS and OWL // Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA. 2008.
6. Deni'elou P.-M., Yoshida N. Multiparty Session Types Meet Communicating Automata // Proceedings of the 21st European conference on Programming Languages and Systems. 2012. P. 194–213.
7. Honkola J., Laine H., Brown R., Tyrkkö O. Smart-M3 Information Sharing Platform // Proc. IEEE Symp. Computers and Communications (ISCC'10). 2010. P. 1041–1046.
8. Kiljander J., Morandi F., Soinenen J.-P. Knowledge Sharing Protocol for Smart Spaces // International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA). 2012. Vol. 3. № 9.
9. Korzun D. G., Balandin S. I., Luukkala V., Liuha P., Gurtov A. V. Overview of Smart-M3 Principles for Application Development // Proc. Congress on Information Systems and Technologies (IS&IT'11), Conf. Artificial Intelligence and Systems (AIS'11). 2011. P. 64–71.
10. Obitko M., Marik V. Adding OWL Semantics to Ontologies Used in Multi-agent Systems for Manufacturing // Lecture Notes in Computer Science. 2003. Vol. 2744. P. 189–200.
11. Pan J. Z., Staab S., Aßmann U., Ebert J., Zhao Y. Ontology-Driven Software Development // Berlin: Springer, 2013.
12. Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems // Wiley. 2009. P. 484.

Lomov A. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

AGENT' S SESSION BASED INTERACTION WITH SMART SPACE

A problem of the agents' access to smart spaces (SS) on Smart-M3 platform is considered. A model of parallel sessions' support for simultaneous interaction with several SS is offered. The model includes: a session, management operations, and data storage. The session component is based on the multiparty session model uniting a number of sessions. It allows the agent to work with several SS. The suggested storage gives the opportunity to the agent to operate with ontological elements (class, property, individual). The offered model is realized in the SmartSlog tools and allows simplifying agents' development for interactions with several SS.

Key words: smart spaces, smart-M3, session, smartSlog, multi-agent systems

REFERENCES

1. Korzun D. Zh., Lomov A. A., Vanag P. I. Automated model-based development of smart space agents for Smart-M3 platform [Automatizirovannaya model'no-orientirovannaya razrabotka programmnykh agentov dlya intellektual'nykh prostranstv na platforme Smart-M3]. *Teoreticheskiy i prikladnoy nauchno-tekhnicheskyy zhurnal "Programmnaya inzheneriya"*. 2012. № 5. P. 6–14.
2. Lomov A. A., Korzun D. Zh. Subscription operation for applications in smart spaces of Smart-M3 platform [Operatsiya podpiski dlya prilozheniy v intellektual'nykh prostranstvakh platformy Smart-M3]. *SPIIRAS Proc.* 2012. № 4. P. 439–458.
3. Tanenbaum E., Steen van M. *Raspredelelynye sistemy: Printsipy i paradigmy* [Distributed Systems: Principles and Paradigms]. Moscow; SPb., Piter Publ., 2003.
4. Akerkar R., Sajja P. Knowledge-Based Systems. Jones & Bartlett Publishers. 2010. P. 354.
5. Allemang D., Hendler J. Semantic Web for the Working Ontologist: Effective Modeling in RDFS and OWL. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA. 2008.
6. Deni'elou P.-M., Yoshida N. Multiparty Session Types Meet Communicating Automata. Proceedings of the 21st European conference on Programming Languages and Systems. 2012. P. 194–213.
7. Honkola J., Laine H., Brown R., Tyrkkö O. Smart-M3 Information Sharing Platform. Proc. IEEE Symp. Computers and Communications (ISCC'10). 2010. P. 1041–1046.
8. Kiljander J., Morandi F., Soinenen J.-P. Knowledge Sharing Protocol for Smart Spaces. International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA). 2012. Vol. 3, № 9.
9. Korzun D. G., Balandin S. I., Luukkala V., Liuha P., Gurtov A. V. Overview of Smart-M3 Principles for Application Development Proc. Congress on Information Systems and Technologies (IS&IT'11), Conf. Artificial Intelligence and Systems (AIS'11). 2011. P. 64–71.
10. Obitko M., Marik V. Adding OWL Semantics to Ontologies Used in Multi-agent Systems for Manufacturing. Lecture Notes in Computer Science. 2003. Vol. 2744. P. 189–200.
11. Pan J. Z., Staab S., Aßmann U., Ebert J., Zhao Y. Ontology-Driven Software Development. Berlin: Springer. 2013.
12. Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems. Wiley. 2009. P. 484.

Поступила в редакцию 07.03.2013

**ЮРИЙ ЮРЬЕВИЧ ГЕРАСИМОВ**
(08.08.1964–30.09.2013)

доктор технических наук, профессор кафедры тяговых машин лесоинженерного факультета Петрозаводского государственного университета, член-корреспондент РАЕН, ведущий научный сотрудник НИИ леса Финляндии

Ю. Ю. Герасимов родился в с. Покровка Приморского края. В 1986 году с отличием окончил лесоинженерный факультет Петрозаводского государственного университета, а затем аспирантуру при лесомеханическом факультете Ленинградской лесотехнической академии. В 1990 году защитил кандидатскую диссертацию. Докторская диссертация на тему «Повышение качества и надежности гидроманипуляторного технологического оборудования лесных машин» защищена в 1994 году в Воронежской государственной лесотехнической академии (он становится самым молодым доктором технических наук в России и возвращается в ПетрГУ). Работая на кафедре тяговых машин лесоинженерного факультета, Юрий Юрьевич активно включается в научную деятельность и становится поистине научным лидером факультета. Он первым внедряет в учебный процесс ГИС-технологии, теорию принятия решений, активно занимается моделированием производственных процессов, оптимизацией конструкций технологического оборудования лесных машин. При его непосредственном участии в ПетрГУ открывается первая очная докторантура, растет публикационная активность, развиваются международные связи. Активная деятельность молодого ученого была высоко отмечена нашими и зарубежными коллегами. Вскоре крупнейший финский лесной концерн Stora Enso приглашает его на работу. Он открывает первое представительство концерна в Республике Карелия, выстраивает сеть терминалов. Руководство концерна, высоко оценивая результаты работы молодого специалиста, переводит его в головной офис в Санкт-Петербург. Все это время Юрий Юрьевич не теряет связей с факультетом, ведет научную работу. Вскоре его приглашают на работу

в один из ведущих научных центров Европы – НИИ леса Финляндии. Здесь он активно включается в выполнение новых сложных научных проектов. Сотни его публикаций посвящены вопросам исследования лесного сектора Северо-Запада России, развитию биоэнергетики, совершенствованию конструкций лесных машин и оборудования, повышению эффективности технологических процессов, вопросам экологии лесозаготовок, эргономики лесных машин, оптимизации и развитию дорожной сети. Он инициирует ряд крупных научных исследовательских проектов, позволяющих объединить усилия российских и зарубежных ученых для решения важнейших вопросов, стоящих перед нашей лесной отраслью и биоэнергетикой.

Еще в 1996 году по инициативе Юрия Юрьевича на лесоинженерном факультете университета начался выпуск научного журнала «Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ», который с 2012 года трансформировался в международный электронный научный журнал «Resources and Technology». Благодаря усилиям Юрия Юрьевича сегодня это издание включено в ведущие наукометрические базы данных. По его инициативе начато создание уникальной платформы для функционирования электронного научного журнала.

Юрий Юрьевич – один из самых ярких людей, которых мы знали. Он был отличным отцом, мужем, преданным другом, глубоко порядочным человеком, нашим учеником и УЧИТЕЛЕМ.

Светлая память о Юрии Юрьевиче Герасимове навсегда сохранится в наших сердцах.

*В. С. СЮНЁВ,
доктор технических наук,
профессор, проректор по НИР,
Петрозаводский государственный университет*



13 октября 2013 года исполнилось 75 лет доктору медицинских наук, профессору, заведующему кафедрой физиологии человека и животных, патофизиологии медицинского факультета Петрозаводского государственного университета *Юрию Васильевичу Лупандину*.

ЮРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ ЛУПАНДИН

К 75-летию со дня рождения

Ю. В. Лупандин родился в Новокузнецке, учился в Комсомольске-на-Амуре. После окончания Хабаровского медицинского института работал врачом на Дальнем Востоке. В 1964 году переехал в Петрозаводск. С 1966 года работает в ПетрГУ, где прошел путь от ассистента до доктора медицинских наук (1983), профессора (1984), заведующего кафедрой физиологии человека и животных. Научные интересы Ю. В. Лупандина связаны с нейрофизиологией и терморегуляцией. Он создал оригинальную концепцию о единстве терморегуляционного и позного тонуса мышц. На основе этой теории под его руководством защищены 14 кандидатских и 2 докторские диссертации, еще 8 диссертаций защищены под руководством учеников Юрия Васильевича. Результаты его научной деятельности отражены более чем в 200 работах, в их числе 55 статей в базе данных Scopus. Ю. В. Лупандин – соавтор нескольких российских учебников по физиологии и научных монографий, в том числе такого популярного учебника, как «Начала физиологии», и «Энциклопедического биологического словаря». Его организаторские способности особенно проявились во время руководства медицинским факультетом, который он возглавлял в течение 20 лет.

НАТАЛЬЯ НИКОЛАЕВНА ВЕЗИКОВА

К 50-летию со дня рождения



5 декабря 2013 года исполнилось 50 лет доктору медицинских наук, профессору, заведующему кафедрой госпитальной терапии медицинского факультета Петрозаводского государственного университета *Наталье Николаевне Везиковой*.

Н. Н. Везикова родилась в Петрозаводске. В 1987 году закончила медицинский факультет Петрозаводского университета. С 1993 года работает на кафедре госпитальной терапии ПетрГУ, с 2006 года – заведующий кафедрой. В 1995 году защитила кандидатскую диссертацию, в 2005 году – докторскую. Является членом ученого совета медицинского факультета и диссертационного совета при ПетрГУ, членом Российской ассоциации ревматологов, Республиканского общества терапевтов, Межрегиональной общественной организации «Общество фармакоэкономических исследований», председателем общества клинических фармакологов РК, главным внештатным терапевтом Министерства здравоохранения и социального развития РК, членом аттестационной комиссии Министерства здравоохранения и социального развития РК. Входит в редакционную коллегию научно-практического рецензируемого журнала «Клиническая фармакология и фармакоэкономика». Имеет высшую квалификационную категорию по терапии и ревматологии.

Поздравляем юбиляров и от всей души желаем здоровья, успехов в научной и педагогической деятельности!

CONTENTS

BIOLOGY

- Markovskaya E. F., Elkina N. A., Sonina A. V.*
Assessment of pollen grains state in tidal zone plants of White sea coast 7
- Terebova E. N., Markovskaya E. F., Shmakova N. Yu.*
Some features of cell wall transport function in Arctic plants 11
- Bakhmet I. N.*
Characteristic property of blue *Mussel mytilus edulis* L. adaptation to pollutants 17
- Pilipko E. N.*
Effect of life sustaining activity of european beavers (*Castor fiber* L.) on some environmental parameters 20

MEDICAL SCIENCE

- Dudanov I. P., Akhmetov V. V.*
Ooptimal surgical technique for carotid endarterectomy after desobliteration 25
- Antonen E. G., Burkin M. M., Hyanikyaynen I. V., Korobkov M. N.*
Psychopathology of vascular brain diseases (review) 30
- Mel'tzer R. I., Ivanov D. V., Lozovik I. P., Verkhovod A. Yu., Pochenty D. O.*
Postoperative management of patients with non-reference tibial fractures under controlled axial load 37
- Stafeeva I. V., Subbotina N. S.*
Characteristic features of hemispheric coherence in EEG patients diagnosed with ischemic stroke 40

EARTH SCIENCE

- Potashева I. M., Chazhengina S. Yu., Svetov S. A.*
Possibilities of using electronic microscopy (sem) analysis of wheel-thrown pottery samples in study of ancient karelian pottery production technology used in middle ages 44

AGRICULTURAL SCIENCE

- Fedorets N. G., Solodovnikov A. N.*
Effect of Kostomuksha mining and ore dressing complex on soils in adjacent areas 51
- Lopatin Ev. V.*
Method for forest growth dynamics' assessment using time series of remote sensing data 58
- Sungurova N. R., Sungurov R. V.*
Duration of influence of planting materials' parameters on growth of forest cultures 64

ENGINEERING SCIENCE

- Gerasimov Yu. Yu., Katarov V. K., Kovaleva N. V., Rozhin D. V., Sokolov A. P., Syuney V. S.*
Improvement of logistic system for optimal roads' construction and forest roads' network planning 70
- Grigor'ev I. V., Nikiforova A. I., Pelymskiy A. A., Khitrov E. G., Khakhina A. M.*
Experimental assessment of stress relaxation time for forest soils 77
- Pitukhin A. V., Petrov A. N., Stepanov A. V.*
Estimation of road coating reliability under limited loads calculated by means of fracture mechanics method 81
- Selyutina L. F.*
Computer simulation of multistory buildings with allowance for wind impact 84
- Markov B. G., Markov O. B., Borisov A. Yu.*
Characteristic features of geometric modeling of lost architectural monuments 88
- Arkhipov I. V.*
Mathematical models and geometrical features of wood sawing in planning and management of sawmill industry 93
- Gavrilov T. A.*
Experimental study of raw meat grinding process at different cutting speed 98
- Zabrovskiy A. L., Petrov E. A.*
Web service for testing remote users' ability to receive multimedia stream with certain bit rate 102

PHYSICS AND MATHEMATICS

- Pikalev A. A., Luizova L. A.*
Study of dusty structures influence on spectral line profile of neon 106
- Pikulev V. B., Loginova S. V., Loginov D. V.*
Model interpretation of properties of material composed by nanocrystalline cellulose and silicon nanoparticles 110
- Gusev O. V., Zhukov A. V., Peshkova I. V.*
Web server overload identification by use of neural network 114
- Lomov A. A.*
Agent' s session based interaction with smart space 118

Память

- Yu. Yu. Gerasimov 122

Jubilation

- To the 75th birthday anniversary of Yu. V. Lupandin 123
- To the 50th birthday anniversary of N. N. Vezikova 123