
Министерство образования и науки
Российской Федерации

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

№ 8 (129). Т. 1. Декабрь, 2012

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. К. Зильбер, доктор медицинских наук, профессор

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

И. Р. Шегельман, 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.petrSU.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»

- А. Е. БОЛГОВ**
доктор сельскохозяйственных наук,
профессор (Петрозаводск)
- В. В. ВАПИРОВ**
доктор химических наук, профессор (Петрозаводск)
- Е. Ф. МАРКОВСКАЯ**
доктор биологических 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)
- В. И. СЫСУН**
доктор физико-математических наук,
профессор (Петрозаводск)
- В. С. СЮНЁВ**
доктор технических 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 (129). Vol. 1. December, 2012

Natural & Engineering Sciences

Chief Editor

Anatoly V. Voronin, Doctor of Technical Sciences, Professor

Chief Deputy Editor

Vladimir B. Akulov, Doctor of Economic Sciences, Professor

Elmira K. Zilber, Doctor of Medical Sciences, Professor

Ernest V. Ivanter, Doctor of Biological Sciences, Professor,

The RAS Corresponding Member

Il'ya R. Shegelman, 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

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

Editorial Board of the Series "Natural & Engineering Sciences"

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

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЯ

- Ивантер Э. В., Курхинен Ю. П., Соколов А. В.
Темная полевка (*Microtus agrestis* L.) в коренных и антропогенных ландшафтах Восточной Фенноскандии. 7
- Новичонок А. О., Евдокимова Е. В., Марковская Е. Ф., Курбатова Ю. А.
Preliminary forest plant biomass inventory in monsoon tropical forest in Cat Tien National Park (South Vietnam) 13
- Пяртман А. К., Андреев В. П., Ремизова Л. А., Соболев П. С.
Экстракция нитратов лантаноидов (III) нитратом триоктилпроп-2-инил аммония 17
- Рыжков Л. П., Горохов А. В., Марченко Л. П.
Трансформация химического состава вод реки Лососинки под воздействием природных и антропогенных факторов. 20
- Болотникова О. И., Михайлова Н. П., Гинак А. И.
Образование ксилита и этанола штаммами ксилозоассимилирующих дрожжей *Pachysolen tannophilus* различной плоидности. 25
- Холопцева Е. С., Дроздов С. Н., Сазонова Т. А., Хилков Н. И.
Влияние температуры почвы и других факторов среды на фотосинтез семян березы повислой. 28
- Якимова А. Е.
Мелкие млекопитающие в питании хищников Европейской тайги 32

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

- Введенский В. П., Ключевский В. В.
К вопросу об эффективности эндобронхиальной терапии вентилятор-ассоциированных пневмоний при сочетанной травме 37
- Никитина К. А., Карапетян Т. А., Доршакова Н. В.
Особенности микроэлементного состава крови при возникновении и разрешении внебольничной пневмонии у пациентов пожилого и преклонного возраста. 41

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Белашев Б. З., Горьковец В. Я., Раевская М. Б.
Опыт изучения структурных и магнитных свойств железистых кварцитов Южно-Корпанского участка Костомукшского рудного поля 46

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

- Тимейко Л. В., Корнеев Ю. С., Евстратова Л. П.
Пути повышения урожайности картофеля на Северо-Западе России 52
- Мишенева Е. Ю., Морозова Ю. В.
Характеристика молодняка русской верховой породы лошадей по экстерьерным и двигательным качествам 57
- Раевский Б. В., Щурова М. Л.
Сохранение и использование лесных генетических ресурсов хвойных лесообразующих видов в Карелии 61

- Царёв В. А.
Современные проблемы лесопользования в Российской Федерации 65

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Борисов А. Ю.
Архитектурно-ландшафтная организация традиционных поселений Карелии (по картам Генерального межевания XVIII века). 68
- Григорьев И. В., Былев А. Б., Хахина А. М., Никифорова А. И.
Математическая модель уплотняющего воздействия динамики поворота лесозаготовительной машины на боковые полосы трелевочного волокна 72
- Аюкаев Р. И., Графова Е. О., Веницианов Е. В.
Математическое моделирование и расчет многослойных фильтров малой толщины для сорбционной очистки поверхностного стока с загородных участков автомагистралей. . 78
- Борисов Г. А., Тихомирова Т. П.
Увеличение ресурсов изоляции и подшипников электрических двигателей путем наивыгоднейшего распределения нагрузок 83
- Levin V. M., Kanaun S. K.
Application of Maxwell method in solution of homogenization problem for anisotropic elastic media with ellipsoidal inclusions 86
- Герасимов Ю. Ю., Соколов А. П., Сюньев В. С., Суханов Ю. В.
Апробация системы поддержки принятия решений по использованию древесины в биоэнергетике: технико-экономическое обоснование 90

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Куроптев В. А., Путролайнен В. В., Стефанович Г. Б.
Исследование прототипа элемента ReRAM на основе нестехиометрических анодных оксидных пленок ниобия 95
- Семенов А. В., Пергамент А. Л., Пустыльник М. Ю.
Масс-спектрометрические исследования состава газовой среды комплексной плазмы с частицами меламинформальдегида 99
- Grishin A. M.
Toward magneto-optical lasing media 103
- Котов А. А., Некрасов М. Ю., Седов А. В., Рогов А. А.
Информационная система для создания размеченных корпусов малой размерности 108
- Семенов И. О., Сиговцев Г. С.
Математическое моделирование в планировании содержания электронного учебного курса 113
- Бычков Е. В.
Численное моделирование продольных колебаний в диспергирующих средах 116
- Научная информация 119
- Информация для авторов 120
- Contents 121

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.petrso.ru/files/reg.pdf>**

Учредитель: ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет»

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

Подписано в печать 18.12.2012. Формат 60х90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
10 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. (1-й завод – 170 экз.) Изд. № 371.

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

ЭРНЕСТ ВИКТОРОВИЧ ИВАНТЕР

доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой зоологии и экологии, декан эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

ivanter@petrsu.ru

ЮРИЙ ПАВЛОВИЧ КУРХИНЕН

доктор биологических наук, профессор кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

kurhinen@petrsu.ru

АРТЕМ ВЛАДИМИРОВИЧ СОКОЛОВ

аспирант кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

falco_87@mail.ru

ТЕМНАЯ ПОЛЕВКА (*MICROTUS AGRESTIS* L.) В КОРЕННЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ЛАНДШАФТАХ ВОСТОЧНОЙ ФЕННОСКАНДИИ*

Рассматриваются популяционно-экологические особенности темной полевки в условиях антропогенной трансформации таежных экосистем Восточной Фенноскандии, закономерности пространственной структуры популяции, изменений численности, взаимоотношения с видами-конкурентами.

Ключевые слова: популяция, экосистема, динамика численности, биотопическое размещение

В Восточной Фенноскандии (к которой относятся Финляндию, Кольский полуостров, Карелию и Карельский перешеек Ленинградской области) темная полевка распространена повсеместно и по численности и доминированию в населении мелких млекопитающих занимает твердое третье место (после обыкновенной бурозубки и рыжей полевки). Вместе с тем этот вид заселяет рассматриваемую территории неравномерно. Наибольшая его численность отмечена в южных районах, особенно в местах, сильно затронутых хозяйственной деятельностью человека, а на севере и востоке ареала он встречается спорадически и обычно в небольшом количестве (табл. 1 и 2).

В целом по региону численность темной полевки колебалась по годам в пределах 0,01–2,0 (см. рисунок) и составила в среднем за все годы учетов (1958–2012) 0,3 экз. на 100 ловушко-суток (7,6 % в уловах ловушками). Канавочные учеты за этот же период дали средний показатель 0,38 экз. на 10 канавко-суток (индекс доминирования – 3,2 %) с колебаниями от 0 до 1,6 (0–12,7 %). Сопоставление этих данных с соответствующими показателями учетов численности вида в других частях ареала [1], [3], [6], [7], [9], [14] позволяет говорить о сравнительно невысокой плотности его населения в Восточной Фенноскандии, особенно в северной ее половине. Общая невысокая численность темной полевки на этой территории объясняется сужением экологического ареала вида вблизи северной границы распространения и, в частности, более тесной его связью с антропо-

генным ландшафтом, который занимает здесь весьма ограниченные площади.

Таблица 1

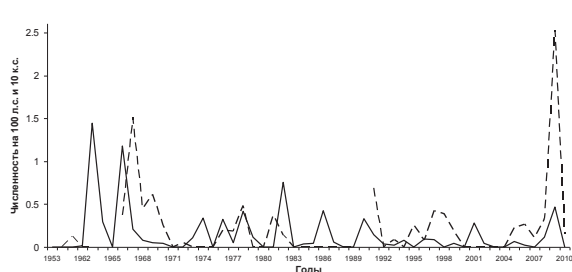
Среднегодовые показатели численности темной полевки в Карелии по данным учетов ловушками (июль–октябрь, 1958–2011 годы)

Районы и годы учетов	Число добытых зверьков		
	Абс.	На 100 ловушко-суток	% от улова мелких млекопитающих
Лоухский, Калевальский, Кемский (1959, 1961–1962, 1973, 1994–1997)	66	0,21	10,1
Сегежский, Суоярвский (1958, 1960)	29	0,50	8,8
Медвежьегорский (1958, 1962, 1964–1965)	45	0,08	6,0
Кондопожский (1959, 1966–1972)	107	0,24	7,4
Пудожский (1961–1963, 1966)	9	0,03	1,3
Питкярантский, Сортавальский (1966–1967, 1969–2011)	288	0,13	3,2
Лахденпохский (1958–1959, 1966)	28	0,10	5,6
Прионежский (1963, 1966, 1970–1973, 1977–1979)	215	0,36	6,4
Пряжинский (культурный ландшафт, 1966)	56	1,80	25,9
Пряжинский (лесные биотопы, 2002–2011)	8	0,03	0,7

Таблица 2

Результаты учета темной полевки
в Карелии ловчими канавками
(июль – октябрь, 1959–2011 годы)

Районы и годы учета	Число добытых зверьков		
	Абс.	На 10 канавко-суток	% от улова мелких млекопитающих
Кондопожский (1959–1960)	112	0,89	6,1
Медвежьегорский (1962–1964, 1966–1968)	16	1,27	17,2
Питкярантский (1966–1967, 1969–2011)	75	0,12	1,08
Пудожский (1961–1963)	4	0,06	0,9



— 1
----- 2

Динамика численности темной полевки в Карелии по данным учетов ловушко-линиями (1) и канавками (2)

Особенности биотопической приуроченности темной полевки в условиях Восточной Фенноскандии отражают данные табл. 3. В исследованном регионе она наиболее многочисленна в сельскохозяйственных угодьях и по окраинам населенных пунктов, а также на зарастающих лесосеках с разбросанными порубочными остатками, неубранными бревнами и гнилыми пнями. Довольно часто темная полевка встречается на

сырых лугах, по опушкам травяных хвойных и лиственных лесов, по краям болот, в лиственном мелколесье и т. п. В пределах этих местообитаний она выбирает влажные захламленные участки с зарослями высоких травянистых растений и кустарников. В южных частях региона темная полевка распространена более равномерно и населяет многие лесные станции, хотя и с меньшей плотностью, чем луговые и полевые угодья. На севере же она более стеноотопна и встречается главным образом на лугах, лесных полянах, вырубках, по опушкам лиственных лесов, обочинам дорог и на полях, избегая закрытых станций, и особенно монотонных хвойных насаждений. Характер стациального размещения зависит также от сезона и численности зверьков. В годы наиболее высоких пиков (1951, 1957, 1963, 1966, 1967, 1982, 1990, 2010) население полевки широко растекается и они встречаются почти во всех биотопах. В большей степени это характерно для молодых расселяющихся зверьков, тогда как зимовавшие более консервативны и придерживаются лишь наиболее благоприятных мест обитания. Совершенно иная картина наблюдается при стойких депрессиях численности (1953–1960, 1970–1972, 1979–1981, 1991–1996, 2000–2008). В этих случаях популяция состоит из отдельных разрозненных поселений, приуроченных к «станциям переживания», которыми в наших условиях служат поросшие кустарником и высоким разнотравьем и сильно захламленные каменные гряды, межи и прочие «неудобные земли» на полях и сенокосах. В небольшом количестве они также сохраняются на посевах трав, опушках, лесных полянах, молодых вырубках и в понижениях, где есть заросли кустарников, высокий травостой и ягодники.

Таблица 3

Биотопическое распределение темной полевки

Биотоп	Весна	Лето	Осень	По всем сезонам	
				Показатель численности	Индекс верности биотопу
Учеты ловушко-линиями (экз. на 100 ловушко-суток)					
Сосняки лишайниковые	—	—	—	—	—
Сосняки-зеленомошники	—	0,08 (3,3)	0,08 (1,4)	0,07 (2,7)	-0,64
Ельники-зеленомошники	0,02 (1,9)	0,03 (1,1)	0,05 (0,7)	0,03 (1,0)	-1,10
Смешанные хвойно-лиственные леса	—	0,04 (1,1)	0,61 (6,7)	0,09 (2,4)	-0,45
Спелые лиственные леса	0,01 (2,0)	0,22 (5,8)	0,09 (1,6)	0,18 (5,1)	+0,36
Лиственное мелколесье	—	0,21 (4,9)	0,22 (3,5)	0,20 (4,8)	+0,55
Вырубки	—	0,24 (4,4)	0,02 (0,3)	0,20 (3,8)	+0,55
Окультуренный ландшафт	0,07 (5,6)	0,59 (12,0)	1,03 (13,3)	0,52 (14,1)	+3,45
Окраины болот	—	0,13 (10,0)	—	0,12 (11,0)	-0,18
Опушки леса	—	0,20 (5,6)	1,06 (9,6)	0,66 (8,8)	+4,72
Учеты канавками (экз. на 10 канавко-суток)					
Сосняки-зеленомошники	—	0,10 (0,9)	0,06 (0,5)	0,09 (0,8)	-0,59
Ельники-зеленомошники	—	0,29 (2,1)	—	0,27 (2,0)	+0,22
Смешанные хвойно-лиственные леса	—	0,26 (2,6)	—	0,24 (2,5)	0
Спелые лиственные леса	0,16 (2,0)	0,18 (1,0)	0,46 (3,7)	0,20 (1,4)	0
Лиственное мелколесье	—	0,25 (1,8)	—	0,24 (1,8)	0
Вырубки	—	0,46 (3,7)	5,7 (44,4)	0,64 (5,4)	+1,9
Окультуренный ландшафт	1,25 (100,0)	1,00 (7,3)	3,17 (26,0)	1,37 (11,4)	+5,2

Сезонные изменения биотопического размещения темной полевки сводятся в основном к перераспределению численности. Весной и в начале лета плотность населения полевок минимальная и зверьки концентрируются в немногих лучших местообитаниях, чаще всего в пределах антропогенного ландшафта, по травяным опушкам и лесным пожням. Летом отдельные поселения постепенно сливаются и зверьки более или менее равномерно заселяют все подходящие биотопы. Осенью эта дисперсия особенно хорошо выражена, но к зиме полевки вновь концентрируются в немногочисленных поселениях и их распространение приобретает очаговый характер. В это время они часто отлавливаются в стогах, на усадьбах и в хозяйственных постройках, безраздельно господствуя в населении мелких млекопитающих антропогенного ландшафта. Таким образом, зимой, весной и в начале лета, а также во все сезоны в годы стойких депрессий численности для темных полевок Восточной Фенноскандии характерен мозаичный тип поселений, а в июле – октябре – диффузный, равномерный. И поскольку перестройка типа поселения носит здесь как сезонный, так и годовой циклический характер при сохранении сети постоянных элементарных поселений, свойственный данной популяции тип пространственной структуры можно по классификации В. Е. Флинта [16], [17] отнести к пульсирующему.

Особого внимания заслуживает вопрос о территориальных отношениях темной полевки с полевкой-экономкой. На сырых лугах, в мелколесье по берегам водоемов, на болотах и сырых участках антропогенного ландшафта их экологические ниши наиболее полно совпадают, что ведет к конкуренции. В наиболее яркой форме территориальный антагонизм, приводящий к четкой пространственной разобщенности этих двух видов, мы наблюдали в 1960–90-х годах в окрестностях полевых стационаров в Прионежском (агробаза Института биологии КарНЦ РАН) и Питкярантском (дер. Карку) районах Карелии. В более благоприятных, влажных, с густым и сочным травостоем местах здесь всегда количественно преобладала более крупная и сильная полевка-экономка, а в более сухих и менее кормных – темная полевка. Вместе с тем отчетливая территориальная конкуренция и вызванное ею количественное доминирование экономки были заметны в основном лишь в годы ее высокой численности, а в остальное время зверьки обоих видов вполне мирно уживались и одинаково часто отлавливались в одних и тех же местах. К аналогичному выводу о зависимости биотопического распределения темной полевки от численности экономки как более сильного конкурента приходит по наблюдениям в Северной Финляндии и Дж. Таст [21]. Так, по его данным, в годы высокой численности экономки темная полевка исчезает почти из всех антропогенных местообитаний и большинства торфяников, а во

время очень высоких пиков – даже из светлых травянистых лесов. Между тем в годы низкой численности экономки темная полевка снова занимает эти места обитания и живет бок о бок с немногочисленными особями вида-конкурента. Подробное описание этих явлений, наблюдавшихся в других частях ареала данных видов, можно найти и в трудах известных классиков отечественной териологии [2], [5], [13], [18].

Согласно специальным исследованиям [10], [11], [12], отношение темной полевки к сплошным концентрированным рубкам леса в целом гораздо терпимее, чем других обитателей таежных экосистем. В отдельных биотопах сукцессионного ряда (вырубки, особенно злаковых типов) она составляет до 45 % (учеты давилками) – 76 % (учеты канавками, табл. 4). Анализ данных многолетних учетов показывает, что на рубках происходит заметное увеличение численности темной полевки, создающей здесь в течение нескольких лет основной фон населения мышевидных грызунов. В последующие годы по мере восстановления древесного полога и угнетения нижних ярусов растительности обилие и индекс доминирования темной полевки постепенно сокращаются. Коэффициент корреляции между давностью рубки (от 1–2 до 25 лет) и индексом доминирования вида составил $-0,95$ ($p < 0,05$), то есть изменения идут в противоположном, по сравнению с рыжей полевкой, направлении. Характер взаимоотношений темной и рыжей полевок, демонстрирующих совершенно разную реакцию на рубку леса, неоднократно обсуждался в литературе. При этом предполагалась возможность конкуренции между этими видами на ранних стадиях вторичной сукцессии лесных экосистем [19]. По материалам исследований в Финляндии [20], рыжая полевка может испытывать конкурентное давление со стороны темной полевки, особенно в годы высокой численности последней. Не исключая конкуренцию, определяющим фактором мы все же считаем резкое изменение экологических условий на рубках, дающее временное преимущество темной полевке. В Карелии летом это типично зеленоядный вид, зимой в его рационе значительное место занимают кора и побеги древесных пород [7]. Увеличение фитомассы травянистых кормов и количества подраста на рубках благоприятно сказывается на кормовой базе и, соответственно, на обилии темной полевки. Нами установлена достоверная корреляционная связь между фитомассой травяно-кустарничкового яруса растительности и численностью темной полевки ($+0,89$, $p < 0,01$). В дальнейшем восстановление лесной среды в процессе вторичной сукцессии растительности ведет к ухудшению экологических условий для темной полевки. В результате преимущество получает рыжая полевка, которая вновь занимает лидирующее положение среди населения лесных грызунов.

Таблица 4

Изменение численности и соотношения фоновых видов мышевидных грызунов в коренных и трансформированных рубках леса биотопах

Биотоп	Рыжая полевка			Темная полевка			Полевка-экономка		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
А. Учеты на ловушко-линиях:									
Сосняки зеленомошные, спелые	2,8	60	94	0,14	2,5	5	0	0	0
Ельники зеленомошные, спелые	2,8	62	98	0,02	0,4	0,7	0	0	0
Открытые вырубки	1,9	22	37	2,3	26	45	0,8	8	16
Молодняки 6–20 лет	2,9	39	66	10	14	23	0,4	5	9,1
21–40 лет	2,0	72	100	0	0	0	0	0	0
Вторичные древостои 50–70 лет	2,1	43	92	0,06	1	2,6	0,1	3	4,4
Семенные куртины	2,3	58	96	0,1	2	4,2	0	0	0
Недорубы	3,8	55	89	0,4	5	9,4	0	0	0
Экотоны (лес-вырубка)	4,7	39	55	2,9	25	34	0,9	8	10,6
В. Учеты ловчими конусами									
Сосняки зеленомошные, спелые	2,2	40	95	0,6	10	26	0	0	0
Ельники зеленомошные, спелые	1,0	27	100	0	0	0	0	0	0
Открытые вырубки	0,1	2	5	1,4	32	76	0,1	3	5,4
Молодняки 6–20 лет	0,5	9	40,6	0,6	14	49	0	0	0
20–30 лет (смешанные)	2,0	45	77	0,6	10	23	0	0	0
30–40 лет (хвойные)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Вторичные древостои 50–70 лет	1,1	24	50	0	0	0	0,2	4	9,1
Семенные куртины	1,6	23	59	0,8	14	29,6	0	0	0
Недорубы	0,7	12	70	0,2	3	20	0	0	0

Примечание. I – численность (экз. на 100 ловушко-суток – А, на 10 конусо-суток – В); II – % от улова мелких млекопитающих; III – % от улова мышевидных грызунов.

Подснежные учеты зверьков в феврале на открытой злаковой вырубке и в сосняке-зеленомошнике показали, что темная полевка в период высокой численности предпочитает селиться на открытых вырубках не только летом, но и зимой (1,3 экз. на 100 ловушко-суток, 21 % в уловах мелких млекопитающих). Однако доминирование темной полевки в отловах грызунов характерно только для территории злаковых (луговиковых, вейниково-луговиковых) вырубков. Правда, они составляют значительную часть всех вырубков региона [4], [8], [15].

На вырубках иных типов темная полевка может не преобладать в уловах, хотя ее обилие и индекс доминирования здесь повышаются. Очевидно, только типом растительности на вырубках и можно объяснить некоторые закономерные географические различия численности и доминирования определенных видов мелких млекопитающих в разных регионах таежной зоны России. В одних регионах доминирует темная полевка (или другие представители рода *Microtus*), в других наблюдается только рост ее численности при сохранении доминирования за лесными (рыжими) полевками. Вполне естественно, что разные исследователи выбирали

в качестве «контроля» различные типы леса, а в качестве «опыта» – разные типы вырубков. Не исключено, что в пределах разных регионов может наблюдаться широкий спектр различных реакций одного и того же вида животного на рубку леса, в зависимости от характера лесного биоценоза, типа вырубки, почв, рельефа и др., как это и установлено нами в Восточной Финляндии.

Темная полевка хорошо приспособлена к жизни на вырубках. В годы пиков численности она активно осваивает не только оптимальные для нее злаковые (вейниково-луговиковые) вырубки, но и заболоченные, осоково-сфагновые (в том числе зимой). По нашим наблюдениям, на злаковых вырубках зимой полевки устраивают подснежные гнезда в центральной части дернины злаков, постепенно выедают живые части растений, а отмершие стебли и листья используют как теплоизолятор. Летом зверьки устраивают норы в заросших травянистой растительностью отвалах почвы из-под гусениц трелевочных тракторов. Почва здесь рыхлая, она как бы приподнята над остальной поверхностью. В условиях повышенного поверхностного стока на открытых лесосеках такие норы практически не затопляются.

Численность темной полевки на вырубках испытывает не столь сильные колебания по годам, как в спелых сосняках (коэффициент вариации CV соответственно 107 и 188 %). Летне-осенняя численность этого вида на вырубках обычно в 5–10 раз превышает весеннюю, при этом особенно быстрый рост происходит в первой половине лета (в среднем за 11 лет наблюдений – девятикратное). Впрочем, бывают и исключения из этого правила. На одном из экспериментальных участков вырубки (злаковый тип, очистка – сбор порубочных остатков в валы и кучи, есть лесные культуры ели) было зафиксировано значительное, в 4 раза, сокращение численности темной полевки от весны к осени. Однако это скорее всего было связано с отмеченной здесь достаточно высокой численностью других видов полевок – экономки и рыжей. При этом последняя, в отличие от темной, не только не сократила численность к концу бесснежного сезона, а напротив, увеличила ее в 8 раз. В этих условиях темная полевка смогла достичь достаточно высокой численности только на краю вырубки – на границе с лесом, что для данного вида в целом нехарактерно. Это нельзя объяснить ничем иным, как вытеснением темной полевки с территории вырубки другими видами полевок – эконожкой и рыжей, что косвенно подтверждает вероятность обострения их конкурентных отношений при высокой численности последних.

В сомкнутых древостоях по краю рубок (хвойные недорубы, участки частоствольных молодняков) темная полевка встречается не постоянно и в небольшом количестве, в основном лишь в годы пиков численности и ближе к осени, в периоды массового расселения молодых. Антропогенная трансформация ландшафта в целом позитивно сказывается на состоянии ее популяций, ее численность здесь значительно выше, чем в крупных массивах незатронутых рубками хвойных лесов. В среднем за 11 лет исследования превышение достигло семикратной величины, а в слабо фрагментированных сосняках – даже десятикратной. Помимо прочего, это связано и с более благоприятной для успешного воспроизводства возрастной структурой обитающего на вырубках поголовья: в

период массового размножения зимовавшие и половозрелые прибылые зверьки составляли здесь до половины всего населения, тогда как в сомкнутых хвойных насаждениях их либо не было вовсе, либо их количество не превышало 10 %, остальных представляли лишь молодые расселяющиеся животные. Таким образом, в условиях периферии ареала вырубки служат для популяции темных полевок важнейшей стацией размножения. Недаром именно здесь, на рубках, было отловлено подавляющее большинство (84 %) беременных самок этого вида.

Итак, вызванная массовыми рубками фрагментация хвойных лесов и формирование мозаичного антропогенного ландшафта – в целом позитивный для темной полевки процесс. Особенно благоприятно сказываются на существовании этого вида формирующиеся на хорошо очищенных лесосеках злаковые вырубки, составляющие наряду с селхозугодьями основные места его обитания в Восточной Фенноскандии. В этих условиях темная полевка проявляет себя как типичный обитатель открытых пространств, хорошо приспособленный к освоению и заселению злаковых рубок. Выполняя важнейшую функцию первопоселенца, необходимого первичного звена в осуществлении процесса лесовосстановления, этот вид при благоприятных условиях (очистка лесосек, отсутствие конкурентов, мощный травяно-кустарничковый ярус) может достигать очень высокой численности (в отдельные годы – до 18–20 экз. на 100 ловушко-суток) и тем самым подготавливает условия для дальнейшего заселения рубок другими видами животных, и прежде всего хищниками-млекопитающими – лесной куницей, горностаем, лисицей, лесным хорьком и др. В дальнейшем, по мере восстановления лесной растительности и формирования исконной таежной фауны, происходит снижение как численности, так и индекса доминирования темной полевки и на смену ей приходят новые, более характерные обитатели спелого леса: рыжие полевки, землеройки-бурозубки, а также целый ряд более крупных охотничьих видов, таких как летяга, белка, лесная куница, заяц-беляк, рысь, барсук, медведь, лось и т. д.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А н у ф р и е в В. М. Темная (пашенная) полевка // Фауна европейского Северо-Востока России. Млекопитающие. Т. II, Ч. 1. СПб.: Наука, 1994. С. 254–263.
2. Б а ш е н и н А. В. Материалы к экологии мелких млекопитающих зоны европейской тайги // Ученые записки Пермского педагогического института. 1968. Т. 52. С. 3–44.
3. В о р о н о в Г. А. География мелких млекопитающих южной тайги Приуралья, Средней Сибири и Дальнего Востока. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1993. 223 с.
4. В о р о н о в В. С. К вопросу о классификации растительности рубок Карелии // Возобновление леса на вырубках и выращивание сеянцев в питомниках. Петрозаводск, 1964. С. 23–32.
5. Г р и б о в а З. А. К экологии пашенной полевки (*Microtus agrestis* L.) // Труды ВНИИОЗ. Вып. 18. М., 1959.
6. Ж и г а р е в И. А. Мелкие млекопитающие рекреационных лесов Подмосковья. М.: Прометей, 2004. 232 с.

7. Ивантер Э. В. Популяционная экология мелких млекопитающих таежного Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1975. 244 с.
8. Крышень А. М., Гнатюк Е. П. Разнообразие растительных сообществ вырубок Карелии // Антропогенная трансформация таежных экосистем Европы. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2004. С. 178–172.
9. Куприянова И. Ф. Биотопические группировки мелких млекопитающих и динамика их численных взаимоотношений на юге Архангельской области // Фауна и экология позвоночных животных. М., 1978. С. 114–130.
10. Курхинен Ю. П. Воздействие сплошных концентрированных рубок на кормовые ресурсы и численность растительоядных млекопитающих Карелии // Влияние хозяйственного освоения лесных территорий Европейского Севера на население животных. М., 1987. С. 18–31.
11. Курхинен Ю. П. Млекопитающие и тетеревиные птицы Восточной Финляндии в условиях антропогенной трансформации таежных экосистем: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Петрозаводск, 2001. 38 с.
12. Курхинен Ю. П., Данилов П. И., Ивантер Э. В. Млекопитающие Восточной Финляндии в условиях антропогенной трансформации таежных экосистем. М.: Наука, 2006. 206 с.
13. Наумов Н. П. Очерки сравнительной экологии мышевидных грызунов. М.; Л., 1948. 204 с.
14. Попов И. Ю. Структура и динамика населения мелких млекопитающих в связи с сукцессиями растительности в Европейской южной тайге: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1998.
15. Ронконен Н. И. Вырубки и естественное возобновление на них // Лесовосстановление в Карельской АССР и Мурманской области. Петрозаводск, 1975. С. 36–65.
16. Флинт В. Е. Типы пространственной структуры популяций у мелких млекопитающих // Популяционная структура вида у млекопитающих. М.: Изд-во МГУ, 1970. С. 161–163.
17. Флинт В. Е. Пространственная структура популяций мелких млекопитающих. М.: Наука, 1977. 182 с.
18. Формозов А. Н. Мелкие грызуны и насекомоядные Шарьинского района Костромской области в период 1930–1940 гг. // Материалы по грызунам. М.: Изд-во МОИП, 1948. Вып. 3. С. 3–110.
19. Henttonen H., Kaikusalo A., Tast J., Viitala J. Interspecific competition between small rodents in Subarctic and boreal ecosystems // *Oikos*. 1977. Vol. 29. P. 581–590.
20. Larsson T. Small rodent abundance in relation to reforestation measures and natural habitat variables in Northern Sweden // *Bull. OEPP*. 1977. Vol. 7. № 2. P. 397–409.
21. Tast J. Influence of the root vole, *Microtus oeconomus* (Pallas) in man-made habitats in Finland // *Ann. Zool. Fenn.* Vol. 5. P. 62–72.

АРТЕМ ОЛЕГОВИЧ НОВИЧОНОК

аспирант кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

artnovich@inbox.ru

ЕЛЕНА ВАЛЕНТИНОВНА ЕВДОКИМОВА

соискатель кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

evdokimova1@inbox.ru

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

ЮЛИЯ АЛЕКСАНДРОВНА КУРБАТОВА

кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН (Москва, Российская Федерация)

kurbatova.j@gmail.com

PRELIMINARY FOREST PLANT BIOMASS INVENTORY IN MONSOON TROPICAL FOREST IN CAT TIEN NATIONAL PARK (SOUTH VIETNAM)*

The results of forest plant biomass inventory in monsoon tropical forest in Cat Tien National Park are presented. The study demonstrates the differences in plant biomass production between forest areas with different levels of anthropogenic disturbance.

Key words: Cat Tien National Park, forest inventory, *Lagerstroemia calyculata*, tropical forest biomass

INTRODUCTION

Forest plantations in Vietnam, especially lowland forests in the southern part of the country, suffered severe damage during the 20th century [8]. The main causes were land clearing for farming, collection of forest products by the local population, excessive timber cutting, and the use of herbicides during the Vietnam War [4], [11], [12], [20]. At present, only 17 % (5,5 million hectares) of the total area of Vietnam is forested [7], whereas about 44 % of the area was covered with forests in 1944. The forest area reduction is considered to be one of the most important environmental threats in Vietnam. It is estimated that more than 6 million hectares have to be reforested in Vietnam [8]. The problem is aggravated by heavy overpopulation of the country that limits forest restoration and causes a conflict between man and nature. This situation is common in many tropical developing countries [18].

Lowland forests in southern Vietnam have been poorly studied. Only little data is available on structural and floristic parameters and successional trends of these forests, and questions regarding forest recovery are under discussion [6], [10], [17], [19]. The origin of these forests remains controversial. According to Trung [19] and Schmid [17], closed deciduous tropical forests dominated by *Lagerstroemia calyculata* Kurz belong to 'climax forests' whereas Rollet [15], [16] regarded them as secondary forests.

In this study we consider, like Brown and Lugo [6], primary (climax) forests as those which structural and floristic parameters do not reflect past degradation and secondary forests as those formed as a consequence of human impact.

In the southern part of Cat Tien National Park the tower for continuous eddy covariance and microclimate measurements has been set up. In view of this the question arises whether forest communities around the tower are representative, as carbon dioxide balance measured in these communities will serve for the estimation of the potential for carbon sequestration in tropical moist forests in South Vietnam.

The satellite data have shown that the forests of Cat Tien National Park appear like a mosaic of forest formations more or less dominated by *Lagerstroemia* species [2], which is confirmed by the field observations of Vandekerckhove et al. [21]. The degree of representativeness of the forests around the tower can be estimated on the basis of the taxonomic composition of communities and comparison with literature data.

The aim of this work is preliminary inventory of forests on the typical territory around the eddy covariance tower. The objectives of this study are to define the main types of plant communities in the study area, and estimate the productivity and representativeness of these communities for the national park.

MATERIALS AND METHODS

Study area. The study was carried out in the southern part of Cat Tien National Park, one of the largest national parks in Vietnam that covers an area of 720 km². The study area was located within a 2-km radius of the eddy covariance tower (coordinates: 11°26'30"N, 107°24'04"E). The total study area was approximately 12 km². The area is subject to a tropical monsoon climate with two distinct seasons: a rainy season from April to November and a dry season from December to March. The mean annual rainfall is 2450 mm [3]. August and September are the most rainy months of the year. The temperature amplitude (month average) is very low, varying from 24 to 29 °C, and the mean annual temperature is 25,4 °C.

The park is divided into two clearly defined topographic areas: the eastern flat part (the study area) and the western hilly part with altitudes up to 375 m. There are many streams and rivers in the park (especially in the low eastern part), most of which dry up during the dry season. Soils of the greater part of the park are loamy, developed on basalt, volcanic tufas, tuff breccias and shales. In flood plains there are areas with sandy alluvial soils [1].

Methods. The field reconnaissance study was conducted in July–September 2011. Based on the Forest Inventory Map of Cat Tien National Park (1999) (Fig. 1) three dominant types of forest communities typical of the study area were identified: (1) primary forest dominated by *Lagerstroemia* species, (2) secondary, naturally recovering forest and (3) secondary, the most disturbed sparse forest. In these communities 3, 5 and 2 field plots were established, correspondingly.



Fig. 1. Segment of forest inventory map of Cat Tien National Park (1999). The map shows the area within two km radius around the eddy covariance tower. 1 – naturally regenerating mixed forests; 2 – mature forests, including *Lagerstroemia* forests; 3 – sparse forest; 4 – disturbed forest areas

Biomass studies were conducted using a technique based on allometric equations that allows above-ground tree biomass and carbon stock to be estimated on the basis of tree diameter at breast height (DBH) [13]. Test plot locations were selected randomly within the study area. In the study, the

nested plot technique was used. Quadrates (size 35 x 35 m for trees greater than 20 cm DBH, 10 x 10 m for trees with a diameter of 5–20 cm DBH and 1,5 x 1,5 m for trees and herbs smaller than 5 cm DBH) were laid at each plot in forests of all types. The biomass of each sample tree was calculated using allometric equation for estimating the above-ground biomass in tropical forests [13]. Litter biomass was measured on five litter plots (size 0,3 x 0,3 m) randomly placed in each plot. The calculation of liana biomass was based on the assumption that the average total above-ground dry weight of lianas is 4,5 % of the estimated above-ground forest according to the method developed for the equatorial forest of Venezuela [14]. Root biomass was determined indirectly by using allometric equations for tropical forests [13].

RESULTS AND DISCUSSION

Forest communities with the upper canopy layer dominated by *Lagerstroemia calyculata* are rather widespread in the study area. The other species (e. g. *Azelia xylocarpa*, *Tetrameles nudiflora*) rarely occur in the upper canopy layer of such a forest. The upper open canopy is formed by *Lagerstroemia* trees that reach a height of 30–40 m with no crown below 15 m. The second canopy layer in this community is closed and consists of such dominant species as *Acronychia laurifolia*, *Dalbergia cf. mammosa*, *Peltophorum dasyrrachis*, *Markhamia stipulata*, *Pterocymbium tinctorium*, *Pterospermum sp.*, *Rothmannia eucodon*, *Xylopia cf. vielana*, *Polyalthia sp.*, *Cinnamomum sp.*, *Phoebe sp.*, *Diospyros spp.*, *Kneima sp.* [2] with a height of about 20 m or a bit higher. The undergrowth of the dominant species, *Lagerstroemia calyculata*, does not occur under the canopy of this forest type, but it occupies forest openings, roadsides, clearings and glades. The primary *Lagerstroemia* forest is characterized by the presence of numerous large trees of *Lagerstroemia calyculata*. Dominant trees are usually old with DBH greater than 70 cm (the largest measured tree had DBH of about 3 m) (Fig. 2, 3). These trees form a considerable part of the biomass in the forest of this type (Apparently, the biomass of *Lagerstroemia calyculata* is overestimated as a common allometric equation for tropical forests was used in calculations, which does not take into account that old *Lagerstroemia* trees have large (more than 10 m) hollows). The number of large trees is 55–65 trunks per hectare. The dead and fallen dominant trees result in the appearance of forest openings, where low vegetation develops, in particular, rattan palm (*Calamus spp.*) and numerous liana species. Young trees of *Lagerstroemia calyculata* may also occur there.

Lagerstroemia forest is regarded as a community with relatively stable temporal dynamics of biomass. The biomass of trees greater than 20 cm DBH (mainly dominant species) is 530,6 t ha⁻¹ (74,6 % of the total community biomass); the biomass of trees with a diameter of 5–20 cm DBH is 39,2 t ha⁻¹ (5,5 % of the total community biomass); the biomass of

trees smaller than 5 cm DBH is 6,0 t ha⁻¹ (0,8 % of the total community biomass), see table 1.

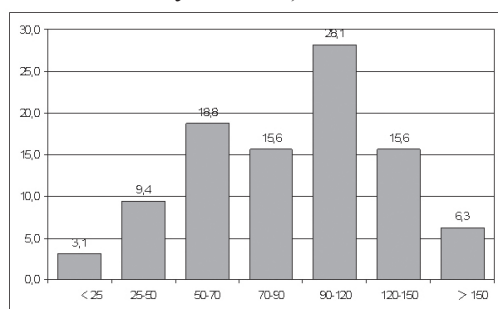


Fig. 2. DBH-class distribution of *Lagerstroemia calyculata* trees in mature *Lagerstroemia* forest. On the x-axis – tree diameter (cm), y-axis – number of trees (%). Only trees greater than 5 cm DBH were considered

Some problems related to biomass estimation have arisen during the study of this community. Large *Lagerstroemia* trees develop constantly increasing hollows that must be taken into account in the biomass studies. Measurements have shown that hollows may account for more than 40–50 % of the tree volume.

Table 1

Distribution of biomass (t ha⁻¹) in *Lagerstroemia* forest

Fraction of biomass	Plot 1	Plot 2	Plot 3	Average
Trees greater than 20 cm DBH	631,3	510	450,6	530,6
Trees with a diameter of 5–20 cm DBH	53,1	21,5	42,9	39,2
Litter	19,1	3,1	5,2	4,2
Undergrowth	7,0	6,1	4,0	6,0
Lianas	32,0	24,3	22,7	26,3
Dead wood	4,5	3,3	5,1	4,3
Underground biomass	112,1	89,7	83,9	95,2
Total	859,0	658,0	615,3	710,8

In the naturally regenerating forest, just like in *Lagerstroemia* forest, 4–5 tree layers can be distinguished. The upper layer consists of flag trees of numerous species: *Lagerstroemia calyculata*, *Azela xylocarpa*, *Tetrameles nudiflora*, *Haldina* (syn. *Adina*) *cordifolia*, *Hopea odorata* and others. These trees are generally quite thin, with the average diameter of large trees (greater than 20cm DBH) about 30 cm, unlike in *Lagerstroemia* forest where this index is greater than 100.

This type of forest is characterized by numerous glades and openings where rapid development of a dense vegetation cover dominated by rattan palm takes place. The glades often appear on the place of large old fallen trees. Newly formed forest openings overgrow with fast-growing, light-loving trees that for some time impede the growth of native species. Larger clearings are probably attributed to soil properties and to timber cutting that took place in the second half of the 20th century.

Naturally regenerating forest community produces considerably less total biomass. However, the share of large trees (with a diameter of more than

20 cm DBH) is also high amounting to 69 % of the total biomass. The share of medium-sized trees (with a diameter of 5–20 cm DBH) is greater than in *Lagerstroemia* forest, 14,8 % of the total biomass (56,1 t ha⁻¹), see Table 2. The average canopy height there is nearly the same as in the mature forest (~ 30 m), but the average DBH is significantly smaller. Nevertheless, the canopy there is quite close and the incoming solar radiation under the canopy is similar to that in the mature forest. Figure 3 shows the DBH-class distribution of trees in naturally regenerating forest.

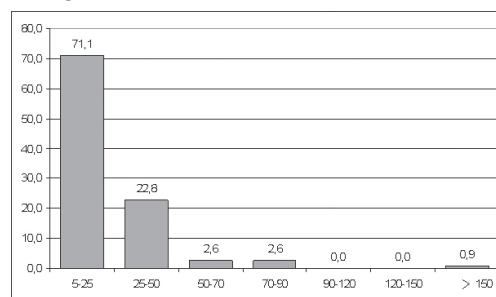


Fig. 3. DBH-class distribution of trees in naturally regenerating forest. On the x-axis – tree diameter (cm), y-axis – number of trees (%). Only trees greater than 5 cm DBH were considered

Table 2

Distribution of biomass (t ha⁻¹) in naturally regenerating forest community

Fraction of biomass	Plot 1	Plot 2	Plot 3	Plot 4	Plot 5	Average
Trees greater than 20 cm DBH	143,0	304,4	198	239,3	231,2	223,2
Trees with a diameter of 5–20 cm DBH	135,2	74,7	106,2	101,1	56,1	94,7
Litter	7,8	7,4	2,0	6,1	5,2	5,6
Undergrowth	5,3	4,3	4,3	6,2	7,0	5,7
Lianas	13,1	17,6	14,1	15,5	15,7	15,1
Dead wood	2,5	4,3	3,5	3,2	2,9	3,3
Underground biomass	51,0	66,5	55,2	59,6	54,0	57,3
Total	357,9	479,2	385,2	422,7	380,2	405,0

Sparse forest is the most suppressed community, largely represented by the vegetation typical for exposed sites described above, and underdeveloped forest sites. Large solitary trees are represented by the species mentioned earlier in descriptions of other forest types. They make up only 27 % (47,7 t ha⁻¹) of the total community biomass. Trees with a diameter of 5–20 cm DBH make up 35,1 % (62,0 t ha⁻¹) of the total community biomass. However, the most developed in this community is undergrowth. Its contribution to the total biomass is 6,1 %, while in *Lagerstroemia* and naturally recovering forests it makes up 0,8 and 1,8 %, respectively (Table 3).

It is quite possible that considerable parts of this forest community were formed as a result of strong degradation in the past, but one of the important reasons refers to the properties of soil structure (confining to wet, boggy areas). Thus, the development potential of sparse forest cannot be high and is unlikely to contribute significantly to carbon sequestration in the park forests.

Table 3
Distribution of biomass ($t\ ha^{-1}$) in sparse forest community

Fraction of biomass	Plot 1	Plot 2	Plot 3
Trees greater than 20 cm DBH	54,9	46,3	47,7
Trees with a diameter of 5–20 cm DBH	93,4	59,7	62
Litter	2,9	3,2	3,1
Undergrowth	9,5	12	10,8
Lianas	7,2	5,5	6,3
Dead wood	2,2	2,6	2,4
Underground biomass	30,4	24,5	26,9
Total	200,5	152,8	176,6

The contribution of litter to the total biomass was $4,2\ t\ ha^{-1}$ (0,6 %), $5,6\ t\ ha^{-1}$ (1,4 %) and $3,1\ t\ ha^{-1}$ (1,8 %) in *Lagerstroemia* forest, naturally recovering forest community and sparse forest, respectively. It should be taken into account that litter biomass is minimal during the wet season and attains the peak values in the dry season. No significant differences were found in dead wood biomass on different sites as well. It was $4,3\ t\ ha^{-1}$ (0,6 % of the total biomass), $3,3\ t\ ha^{-1}$ (1 %) and $2,4\ t\ ha^{-1}$ (1,4 %) in *Lagerstroemia* forest community, naturally regenerating forest and sparse forest, respectively. The average total biomass of naturally regenerating forest has not reached its potential maximum yet, and the increase of biomass will be accompanied by the increase in carbon sequestration.

CONCLUSION

The study demonstrates the differences in plant biomass production between the forest areas in Cat Tien National Park with different levels of anthropogenic disturbances. The inventory data obtained are important for the forthcoming large-scale eddy covariance flux research for quantifying CO_2 exchange. The data on biomass production by different types of forest communities are in general agreement with literature data on similar communities in other tropical countries [14].

The analysis of cartographic material (Fig. 1) showed that the naturally recovering forest is the predominant forest type in the study area, but the other two studied communities also occupy large areas. Such distribution can be considered as typical for the north-eastern flat part of the park only, but not for the whole Cat Tien National Park, where bamboo and other community types largely dominate.

Based on forest inventory data, it was concluded that as the park forests biomass potential is not being realized today, these forests must be depositing carbon on a global scale. The greatest contribution to the sequestration of atmospheric carbon will be made by naturally regenerating forests, as forests of this type occupy the largest area in the park and are supposed to have the greatest potential to sequester carbon.

* Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта РФФИ 12-04-31234 мол_а «Эколого-физиологические адаптации растений на нарушенных территориях» и при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

REFERENCES

1. Аничкин А. Е. Структура и функциональная роль животного населения почв муссонного тропического леса Вьетнама: Дис. ... канд. биол. наук. М., 2008. 199 с.
2. Структура и функции почвенного населения тропического муссонного леса (национальный парк Кат Тьен, Южный Вьетнам) / Под общ. ред. А. В. Тиунова. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2011. 280 с.
3. Blanc L., Maury-Lechon G., Pascal J.-P. Structure, floristic composition and natural regeneration in the forests of Cat Tien National Park, Vietnam: an analysis of the successional trends // Journal of Biogeography. 2000. Vol. 27. P. 141–157.
4. Boffey P. M. Herbicides in Vietnam // AAAS study finds widespread devastation. 1971. Science. Vol. 171. P. 43–47.
5. Brown S. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer // FAO Forestry Papers 134, 134, 55 pp. Rome, Italy. FAO [Electronic resource]. Access mode: http://www.fao.org/icatalog/search/dett.asp?aries_id=7736
6. Brown S., Lugo A. E. Tropical secondary forests // Journal of Tropical Ecology. 1990. Vol. 6. P. 1–32.
7. Collins N. M., Sayer J. A., Whitmore T. C. Conservation atlas of tropical forests. Asia and the Pacific. London, 1991.
8. Durand F. Les forêts en Asie du Sud-Est: recul et exploitation: le cas de l'Indonésie. Paris: L'Harmattan, 1994. 411 p.
9. Mai To Dinh. Le Viêt-Nam forestier // Revue Forestière Française. 1983. Vol. 25. P. 227–243.
10. Maurand P. L'Indochine forestière // Institut des recherches agronomiques et forestières de l'Indochine. Hanoi: Newbery, M. D., Campbell, E. J. F., Lee, Y. F., Ridsdale. 1943.
11. Norman C. Academy reports on Vietnam herbicides damage // Nature. 1974. Vol. 248. P. 186–188.
12. Orians G. H., Pfeiffer E. W. Ecological effects of the war in Vietnam // Science. 1970. Vol. 168. P. 544–554.
13. Pearson T., Brown S., Walker S. Sourcebook for land use, land-use change and forestry projects [Electronic resource]. Access mode: http://www.winrock.org/ecosystems/files/winrock-biocarbon_fund_sourcebook-compressed.pdf
14. Putz F. E. Liana biomass and leaf area of a 'Tierra Firme' forest in the Rio Negro Basin, Venezuela // Biotropica. 1983. Vol. 15. P. 185–189.
15. Rollet B. Note sur la végétation du Vietnam au sud du 17^{ème} parallèle Nord. Commentaire de la carte au 1/1,000,000. Saigon: Institut de Recherche Agronomique, 1960.
16. Rollet B. La végétation du Cambodge (article in three parts) // Bois et Forêts des Tropiques. 1972. 144, 3–15, 145, 23–38, 146, 3–20.
17. Schmid M. Végétation du Viet-Nam. Paris: ORSTOM, 1974.
18. SRV State Committee for Sciences, U.N.D.P., SIDA, UNEP & IUCN (1991) Vietnam, national plan for environment and sustainable development. 1991–2000. Project VIE/89/021.
19. Trung Thai Van Phytogénèse et classification de la végétation forestière au Vietnam // Acta scientiarum Vietnamicarum Section Biology Geography and Geology. 1966. Vol. 1. P. 88–100.
20. Tschirley F. H. Defoliation in Vietnam // Science. 1969. Vol. 163. P. 779–786.
21. Vandeckerkhove K., De Wulf R., Chin N. N. Dendrological composition and forest structure in Nam Bai Cat Tien National Park, Vietnam. Silva Gandavensis. 1993. Vol. 58. P. 41–83.

АНДРЕЙ КОНСТАНТИНОВИЧ ПЯРТМАН

доктор химических наук, профессор кафедры технологии редких и рассеянных элементов факультета наукоемких технологий, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет) (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
piartman@tu.spb.ru

ВЛАДИМИР ПЕТРОВИЧ АНДРЕЕВ

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

ЛЮДМИЛА АЛЕКСАНДРОВНА РЕМИЗОВА

кандидат химических наук, старший научный сотрудник кафедры органической химии химического факультета, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
rv57@mail.ru

ПАВЕЛ СЕРГЕЕВИЧ СОБОЛЕВ

аспирант кафедры молекулярной биологии, биологической и органической химии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
andreev@psu.karelia.ru

ЭКСТРАКЦИЯ НИТРАТОВ ЛАНТАНОИДОВ (III) НИТРАТОМ ТРИОКТИЛПРОП-2-ИНИЛ АММОНИЯ*

Ацетиленовые четвертичные аммониевые соли обладают лучшей селективностью при экстракционном разделении лантаноидов (III), чем их аналоги, не содержащие двойных и тройных связей.

Ключевые слова: экстракция, координация, лантаноиды, ацетиленовые четвертичные аммониевые соединения

Редкоземельные металлы (РЗМ) с каждым годом все в больших количествах применяются в различных областях науки и техники. Столь быстрый рост потребления обусловлен многими уникальными физическими и химическими свойствами этих металлов и их соединений – оптическими, магнитными, электрическими и др. [5].

Общее содержание РЗМ в земной коре относительно велико (суммарный кларк РЗМ равен 0,015 %) и выше, чем В, Cu, Co, Zn и Ni. Однако из-за того что свойства этих элементов близки друг другу, выделение индивидуальных соединений редкоземельных элементов (РЗЭ) – одна из самых сложных задач химической технологии.

Неутешительным является и тот факт, что в РФ получение лантаноидов и других редкоземельных металлов слабо развито [10]. Поэтому мы вынуждены закупать данные металлы в Китае. Однако недавно Китай, считая себе монополистом в области продаж ценных металлов, ввел квоты на экспорт лантаноидов и других металлов и одновременно повысил цены на данный вид продукции. Из таблицы виден рост цен на представленные металлы и их соединения.

Мировые цены на редкоземельные металлы за первые шесть месяцев 2011 года выросли в пять раз: килограмм оксида европия, который

используется в производстве плазменных телевизоров и ламп дневного света, 20 июня стоил 26–28 тысяч юаней (4015–4324 доллара), в то время как в мае его стоимость составляла 7,7–8,2 тысячи юаней за килограмм; оксид диспрозия, используемый в производстве накопителей на жестких дисках и ветряных турбин, примерно за тот же период подорожал в два раза – с 720 до 1470 долларов за килограмм. За год (с июня 2010 года по июнь 2011-го) цены на этот металл выросли в десять раз.

Поэтому поиск новых типов экстрагентов (жидкостная экстракция – главный промышленный метод разделения РЗМ), обладающих высокой селективностью по отношению к РЗМ, является чрезвычайно актуальной задачей.

Полученные нами ранее экспериментальные данные по экстракции Zn (II) и Cu (II) ацетиленовыми ЧАС [1], [3], [4] давали основание предполагать, что эти соли могут быть перспективными для выделения и значительно более мягких с точки зрения теории ЖМКО ионов металлов, таких, например, как РЗМ и трансурановых элементов.

Предварительные исследования в ПетрГУ показали, что при использовании в качестве экстрагентов РЗМ ацетиленовых ЧАС очень быстро устанавливается равновесие между водной

и органической фазы, происходит быстрое расслоение жидкостей, и для процесса экстракции из растворов HNO_3 требуется вдвое меньшее количество молей нитрата триоктилпроп-2-иниламмония (ТОПАН), чем обычно используемого для этих целей нитрата триалкилбензиламмония. Крайне важно и то, что экстрагент может быть использован многократно, так как регенерируется чрезвычайно легко и практически без потерь.

Среднегодовые китайские цены (\$/кг) на РЗМ в 2008–2010 годах [10]

Металлы и их оксиды	Год			Увеличение цены по сравнению с 2009 годом, %
	2008	2009	2010	
Оксид диспрозия	87,9	82,7	180,6	118
Диспрозий	120,0	112,2	200,5	79
Иттрий	34,9	36,6	43,5	19
Оксид лантана	4,5	3,6	4,5	26
Лантан	8,3	6,5	8,0	23
Оксид неодима	22,3	11,9	29,6	148
Неодим	30,1	16,3	36,8	126
Оксид празеодима	21,2	11,4	27,7	142
Празеодим	29,2	15,7	34,6	120
Оксид самария	2,4	2,5	2,7	10
Оксид тербия	519,0	269,8	402,8	49
Тербий	681,7	354,2	498,0	41
Оксид церия	1,7	2,2	3,5	57
Церий	7,0	6,1	7,1	16
Оксид эрбия	368,5	360,6	409,2	13
Европий	667,0	690,0	701,4	2
Оксид европия	472,5	475,0	550,5	16

Детальные исследования экстракции лантаноидов (III) посредством ТОПАН были проведены совместно с сотрудниками Санкт-Петербургского государственного технологического института.

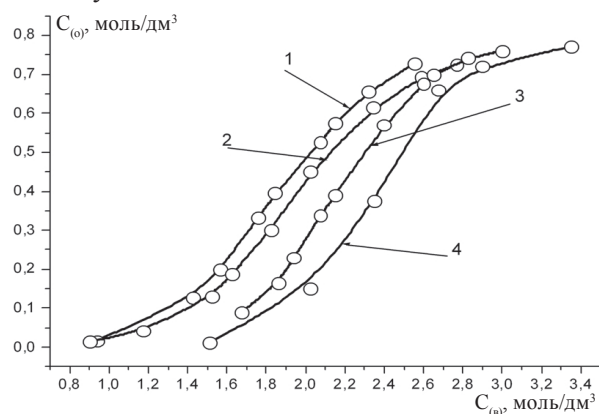


Рис. 1. Изотермы экстракции нитратов РЗМ (III) 0,78 М раствором нитрата триоктилпроп-2-иниламмония в толуоле при $T = 298,15 \text{ К}$; «о» – органическая, «в» – водная фазы; 1 – Gd(III), 2 – Pr(III), 3 – Er(III), 4 – Lu(III)

Полученные изотермы экстракции нитратов РЗМ (III) 0,78 М раствором нитрата триоктилпроп-2-иниламмония в толуоле при $T = 298,15 \pm 0,2 \text{ К}$ (например, для Gd(III), Pr(III),

Er(III) и Lu(III)) они представлены на рис. 1) во всех случаях характеризуются пределом насыщения органической фазы, стремящегося к соотношению $C_s : C_0 \rightarrow 1 : 1$, где C_s – общая (аналитическая) концентрация экстрагента, а C_0 – равновесная концентрация лантаноида (III) в органической фазе. Это позволяет предполагать, что для РЗМ (III) при насыщении органической фазы образуются соединения состава $(R_4N)[Ln(NO_3)_4]$, где Ln – лантаноид.

Следует отметить, что такое поведение ацетиленового ТОПАН весьма необычно, так как в работах [6], [7] показано, что при экстракции лантаноидов (III) нитратами насыщенного триалкилметиламмония и жирноароматического триалкилбензиламмония в толуоле образуются молекулярные ассоциаты $[(R_4N)_4Ln(NO_3)_5] \cdot R_4NNO_3$ или соединения состава $[(R_4N)_2Ln(NO_3)_5]$ соответственно. При этом, согласно рис. 2, максимальное значение K_{ex} наблюдается для Nd, но селективность разделения значительно лучше в ряду Gd – Lu.

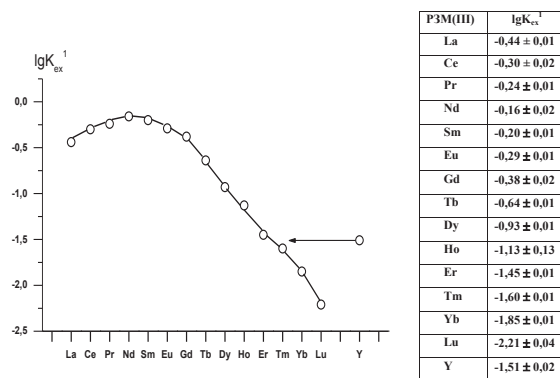


Рис. 2. Зависимости логарифмов констант экстракции от порядкового номера лантаноида (III). Справа – значения логарифмов констант фазовых равновесий при экстракции нитратов РЗМ (III) 0,78 М раствором ТОПАН в толуоле

На основании данных, полученных нами на примере экстракции Zn(II), Cu(II) и РЗМ (III), а также принимая во внимание тот факт, что мягкие кислоты Льюиса (например, катионы серебра, РЗМ, семейства платины) легко образуют комплексы π, ν -типа, можно предположить, что и экстрагируемые ТОПАН соединения, содержащие РЗМ, имеют (подобно аддуктам ацетиленовых ЧАС с Zn(II) и Cu(II) [1], [3], [4]) хелатное строение, где катион РЗМ одновременно связан с тройной связью и (через нитрат-анион) с атомом азота ЧАС.

Представленные нами в данной статье и описанные ранее [1], [3], [4], [8] результаты свидетельствуют о перспективности ацетиленовых ЧАС для экстракционного разделения и концентрирования не только Zn(II), Cu(II) и РЗМ (особенно в ряду Gd – Lu), но и других d- и f-элементов периодической таблицы Д. И. Менделеева, а также о необходимости дальнейших

исследований природы образующихся молекулярных комплексов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Бромид проп-2-инилтриоктиламмония получали, как описано в работах [1], [2].

Раствор нитрата проп-2-инилтриоктиламмония готовили перемешиванием раствора бромид

да в толуоле с насыщенным водным раствором нитрата аммония (2–3-кратная смена раствора, соотношение 1 : 1 по объему). Проверку отсутствия галогенида в органической фазе осуществляли с помощью пробы Бельштейна [9].

Условия проведения экспериментов по экстракции аналогичны описанным в работах [6], [7], [8].

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В. П. Молекулярные комплексы гетероароматических N-оксидов и ацетиленовых аминов с π -акцепторами как модель исследования нуклеофильности и основности соединений с пространственно доступными реакционными центрами: Дис. ... д-ра хим. наук. Петрозаводск, 2007. 427 с.
2. Андреев В. П., Кочеткова Е. В., Ремизова Л. А., Фаворская И. А. Кватернизация ацетиленовых аминов 2-пропинил- и алкилгалогенидами // ЖОрХ. 1979. Т. 15. Вып. 3. С. 464–467.
3. Андреев В. П., Тунина С. Г., Ремизова Л. А. Экстракция цинка и меди ацетиленовыми четвертичными аммониевыми основаниями // ЖОХ. 2005. Т. 75. Вып. 5. С. 712–718.
4. Андреев В. П., Тунина С. Г., Усов В. В., Ремизова Л. А. Экстракция цинка бромидом гепт-2-инилтриоктиламмония // ЖОХ. 2003. Т. 73. Вып. 7. С. 1094–1098.
5. Михайличенко А. И., Михлин Е. Б., Патрикевич Ю. Б. Редкоземельные металлы. М.: Металлургия, 1987. 232 с.
6. Пяртман А. К., Андреев В. П., Кескинов В. А., Лищук В. В. Экстракция нитратов лантаноидов (III) и иттрия нитратом триоктил-2-гептиниламмония: Тез. докл. XIII Российской конференции по экстракции «Экстракция в гидрометаллургии, радиохимии, технологии неорганических веществ». 19–24 сентября 2004 г. М., 2004. Ч. 1. С. 167.
7. Пяртман А. К., Ковалев С. В., Кескинов В. А., Копырин А. А. Экстракция нитратов лантанидов (III) иттриевой группы и иттрия нитратом триалкилбензиламмония в толуоле // Радиохимия. 1997. Т. 39. Вып. 2. С. 141–144.
8. Пяртман А. К., Ковалев С. В., Кескинов В. А., Хохлова Н. В. Экстракция нитратов лантанидов (III) нитратом триалкилметиламмония в толуоле // Радиохимия. 1997. Т. 39. № 6. С. 534–536.
9. Рево А. Я. Практикум по органической химии (Качественные микрохимические реакции): Учеб. пособие для медицинских вузов. 3-е изд. М.: Высш. шк., 1971. 208 с.
10. Среднегодовые китайские цены на редкоземельные металлы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.metalresearch.ru/page163.html>

ЛЕОНИД ПАВЛОВИЧ РЫЖКОВ

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

АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ ГОРОХОВ

научный сотрудник-гидрохимик Лаборатории экологических проблем Севера, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
margo@research.ru

ЛЮДМИЛА ПАВЛОВНА МАРЧЕНКО

младший научный сотрудник-гидрохимик Лаборатории экологических проблем Севера, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
margo@research.ru

**ТРАНСФОРМАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД РЕКИ ЛОСОСИНКИ
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ***

Приведены материалы многолетних исследований химического состава вод городской реки Лососинки. Исследованы пути их формирования под воздействием природных и антропогенных факторов.

Ключевые слова: водоток, ливневый сток, химический состав, тяжелые металлы, водосбор, лососевый водоем, атмосферные осадки

Условия формирования и изменения качества природных вод малых рек, находящихся под постоянной антропогенной нагрузкой, привлекают все более пристальное внимание исследователей. В большинстве случаев по многим причинам бывает очень затруднительно выявить исходные (фоновые) составляющие концентрации загрязняющих веществ, главная из которых заключается в том, что водоемы этой категории достаточно длительное время (часто задолго до начала постоянных наблюдений) находились под мощным антропогенным воздействием агропромышленных зон. В то же время изучение антропогенного влияния на экосистемы малых рек имеет важное практическое значение, в том числе для прогнозирования последствий использования биоресурсов и определения мер по защите водотоков от загрязнения.

Географическое расположение реки Лососинки, протекающей через крупный техногенный узел Северо-Западного региона – город Петрозаводск, позволяет оценить воздействие антропогенной нагрузки на качество ее вод. Роза ветров в регионе расположена таким образом, что верхнее течение реки находится вне сферы локального переноса загрязняющих веществ, оставляя большую часть территории водосбора за чертой техногенного купола. Площадь водосбора за городской чертой полностью расположена в природоохранной зоне, что достаточно надежно гарантирует отсутствие серьезных негативных воздействий на нее в течение длительного времени. Эти условия позволяют определить фо-

новое состояние качества речных вод и степень антропогенной нагрузки.

ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДОТОКА РЕКИ

Река Лососинка является уникальным водоемом. В прошлом лососевая река, она вытекает из озера Лососинное и впадает в Петрозаводскую губу Онежского озера. Протяженность реки 23,3 км. Падение составляет 123 м. Водосбор сравнительно небольшой, заболоченный, площадью 322,5 км². Средний расход воды оценивается в 3,6 м³/сек. Питание реки Лососинки осуществляется в основном за счет озерных вод Лососинного. Выше города, на протяжении 16,5 км от истока, река пребывает в естественном состоянии, а затем приблизительно на протяжении 7 км протекает по пригородной зоне и центральной части города Петрозаводска. Поступление воды в водоток не регулируется искусственно. Полностью сохраняется природный паводковый режим. Русло реки и рельеф пороговых участков также не подвергаются изменению. Фракционный состав грунта естественен, как и его распределение по пороговым участкам. До впадения в город река протекает по природоохранной территории, занятой лесом и болотами [4]. Таким образом, в основном процесс загрязнения речных вод происходит на небольшом участке реки, расположенном в черте города. При изучении реки нельзя не учитывать сезонные изменения состояния качества ее вод. В результате длительного использования реки в хозяйственных целях и сооружения плотин она

потеряла свое значение как лососевый водоем. В настоящее время в ней обитают плотва, окунь, щука, налим, хариус, форель. При проведении соответствующих рыбоводно-мелиоративных работ (разборке плотин, расчистке русла и строительстве рыбоходов) река сможет восстановить свой прежний рыбохозяйственный статус. Для этого необходимо достаточно четко представлять современное состояние качества вод реки. С этой целью на протяжении длительного времени Лабораторией экологических проблем Севера ПетрГУ осуществлялся мониторинг вод реки.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Природные воды реки Лососинки при транзите их через городскую территорию подвергаются влиянию антропогенных факторов, важнейшими из которых являются ливневый сток и атмосферные осадки, выпадающие на водосборной площади.

Наблюдения за изменением химических показателей речных вод проводились на двух постоянных станциях:

- станция 1 – в верхнем течении реки за пределами города,
- станция 2 – в устьевом участке реки при впадении ее в Петрозаводскую губу Онежского озера.

Для изучения химического состава ливневых стоков, поступающих в реку, пробы отбирались на 3 станциях:

- сток 1 – в районе автодороги м/р Древянка – м/р Кукковка,
- сток 2 – в районе улицы Лесной,
- сток 3 – в районе туркомплекса «Карелия».

Пробы атмосферных осадков (снежный покров) отбирались на территории водосбора реки в черте города в период максимального накопления влаги [3]. Район в зеленой зоне, расположенный на достаточном удалении от городской черты (15 км) в местечке Лососинное, с подветренной стороны по основной составляющей розы ветров был принят за фон (контрольная зона). Атмосферные осадки в этой зоне по результатам многолетних исследований характеризуются низким содержанием химических компонентов [1], [8].

Анализы проводились по общепринятым в гидрохимической практике методикам [2], [7]. Содержание тяжелых металлов определялось методом ААС на приборе АА-6800.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ливневой сток

Химический состав ливневых стоков, поступающих в реку, формируется под влиянием как природных (сезон года, погодные условия), так и антропогенных условий (состояние водосборных площадей). Результаты многолетних исследований, проведенных в 1999–2001 годах, показали, что ливневые воды в большом количестве

насыщены загрязняющими компонентами. Так, содержание органических веществ, в том числе биохимически лабильных, в ливневых стоках было высоким. Наибольшие значения перманганатной и бихроматной окисляемости, а также БПК₅ отмечены в стоке 2 (ПО – 11,9 мгО₂/л, БО – 35,1 мгО₂/л и БПК₅ – 5,68 мгО₂/л), а наименьшие в стоке 3 (8,7 мгО₂/л, 22,0 мгО₂/л, 2,38 мгО₂/л соответственно). Ливневые воды содержали в себе также большое количество биогенных элементов. Концентрации аммонийного азота варьировали от 2,09 мгN/л (сток 1) до 0,61 мгN/л (сток 3). Количество нитритного азота изменялось в пределах от 0,098 мгN/л (сток 2) до 0,017 мгN/л (сток 3) и нитратного от 1,55 мгN/л (сток 2) до 0,78 мгN/л (сток 3). Соединения фосфора в основном представлены минеральными формами и в ливневых стоках содержатся в очень больших количествах. Наибольшие концентрации фосфора отмечены в водах стока 2 (Робщ. 0,101 мгP/л, Рмин. 0,086 мг P/л), а наименьшие – в стоках 3 (0,079 мгP/л и 0,068 мгP/л соответственно). Очень большое количество органических соединений различного качественного состава и биогенных элементов в стоках 2, возможно, обусловлено попаданием в них вод бытового происхождения. В районе этого участка реки в ее русло стекаются в основном ливневые воды с жилых районов города: Древянка, Кукковка и Голиковка. Затем воды Лососинки проходят через два водохранилища и несколько расширений, в которых частично освобождаются от органических соединений, и в устье реки их содержание существенно сокращается. В стоке 3 содержание органических веществ и биогенных элементов по сравнению со стоком 2 почти в 2 раза меньше. Пойма реки в этом районе сужается, и количество бытовых стоков сокращается. Следует учитывать, что в этом участке реки расположены парковые зоны, а не жилые районы.

О других антропогенных воздействиях через ливневый сток можно судить по содержанию тяжелых металлов, которыми в той или иной мере насыщены воды станций. Средние многолетние величины содержания железа в стоках на всех станциях были выше 100 мкг/л. Его максимальная величина отмечена на станции 4 (473,8 мкг/л). Марганец в наиболее высоких концентрациях поступал в реку с водами на станции 4 (10,7 мкг/л). На станции 3 его содержание равнялось 1,7 мкг/л, на станции 5 – 7,2 мкг/л. По динамике содержания свинца и меди в ливневых стоках можно судить о влиянии городского транспорта на водную систему реки. Свинец и медь в наибольшем количестве содержались в водах ливневого стока станции 5 (1,2 и 5,6 мкг/л соответственно).

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ НА ВОДОСБОРНОЙ ПЛОЩАДИ РЕКИ

Снежный покров, по данным исследований последних лет, является наиболее эффективным

индикатором оценки загрязнения атмосферы и других природных сред. Он как естественный планшет-накопитель дает действительную величину сухих и влажных выпадений. Локальное поступление загрязняющих веществ во многом обусловлено и выпадением так называемых сухих осадков, то есть гравитационным осаждением атмосферных аэрозолей, которые суммируются с «нормальными» осадками в виде дождя и снега [5], [6].

Интегральные пробы снега на водосборной площади реки отбирались с 1994 по 2000 год в период его интенсивного таяния. Анализ полученных результатов показал, что практически все параметры химического состава атмосферных осадков на водосборной площади реки, расположенной в черте города, были выше соответствующих значений фона (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав снежного покрова
(многолетние средние значения)

Показатель	Контрольная зона (фон)	Водосборная площадь реки в черте города	Индексы загрязнения
pH	5,46	6,79	1,24
ПО, мгО/л	2,6	8,6	3,31
БПК ₅ , мгО ₂ /л	1,49	3,35	2,25
БПК ₂₀ , мгО ₂ /л	2,14	5,75	2,69
NH ₄ ⁺ , мгN/л	0,22	0,47	2,14
NO ₂ ⁻ , мгN/л	0,006	0,037	6,17
NO ₃ ⁻ , мгN/л	0,16	0,2	1,25
Рмин., мгР/л	0,005	0,029	1,60
Робщ., мгР/л	0,012	0,039	3,25
Fe, мкг/л	27,7	26,7	0,96
Cu, мкг/л	2,0	2,6	1,30
Mn, мкг/л	6,0	17,2	2,87
Pb, мкг/л	1,0	1,8	1,80

Для объективной характеристики загрязнения снежного покрова применяют индексы загрязнения (отношение показателей химического состава на исследуемых станциях к соответствующим значениям на условно чистой станции). Значения индексов, превышающие 1, указывают на наличие загрязнения, а их величина – на степень загрязнения.

Активная реакция снеговых вод на водосборной площади реки была сдвинута в щелочную сторону. Показатели содержания органических веществ (по тесту ПО и БПК), минерального азота (NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻) и соединений фосфора заметно превышали соответствующие фоновые значения. Концентрации марганца, свинца, меди были выше фонового уровня (в 3, 1,8 и 1,3 раза соответственно).

Химический состав речных вод

Активная реакция естественных вод в верхнем течении реки (станция 1) во время весеннего паводка в период наблюдения с 1993 по 2003 год была близка к нейтральной, величина pH изменялась от 6,80 до 7,30, среднее значение 7,14. В период летней межени разброс показателей pH на этом участке реки был больше (6,90–7,95), среднее многолетнее – 7,34. Осенью в отдельные годы значения величины pH несколько сдвигались в кислую сторону (до 6,50–6,85), однако средняя величина pH была соизмерима с весенними значениями (7,14). В нижнем течении реки (станция 2) показатели pH были, как правило, выше 7,00, за исключением осени 2003 года (pH 6,50). Средние значения этого показателя варьировали в пределах от 7,26 осенью до 7,49 летом. Отношение величины pH в водах устьевого участка реки к соответствующим показателям в ее верхнем течении на протяжении всего периода исследования независимо от сезона изменялось в очень узких пределах (0,95–1,05).

Величина цветности вод на верхнем участке реки в разные годы колебалась в довольно широких пределах – от 88 до 249 град., наиболее цветные воды поступали с водосбора осенью. Многолетние средние значения цветности на верхнем участке реки весной 137 град., летом – 153 град., осенью – 165 град. Величина цветности вод устьевого участка реки колебалась также в очень широких пределах – от 89 до 259 град., средние многолетние значения этого показателя по сезонам изменялись от 148 до 173 град. (табл. 2).

Таблица 2

Показатели содержания органического вещества в водах реки Лососинки

Показатель	Место отбора	Весна	Лето	Осень
Цветность, град.	верх	<u>90–204</u> 137	<u>88–249</u> 153	<u>92–208</u> 165
	устье	<u>122–208</u> 148	<u>94–259</u> 159	<u>108–236</u> 173
Перманганатная окисляемость, мгО/л	верх	<u>11,6–27,6</u> 17,0	<u>13,8–32,0</u> 18,9	<u>12,6–25,1</u> 18,3
	устье	<u>15,4–31,6</u> 19,2	<u>13,0–34,6</u> 20,1	<u>17,7–26,9</u> 21,3
БПК ₅ , мгО ₂ /л	верх	<u>1,46–2,96</u> 1,99	<u>1,19–1,82</u> 1,62	<u>1,29–2,17</u> 1,65
	устье	<u>1,46–2,96</u> 1,99	<u>1,31–3,86</u> 2,17	<u>1,55–2,24</u> 1,94
БПК ₂₀ , мгО ₂ /л	верх	<u>1,69–3,61</u> 3,20	<u>2,48–4,60</u> 3,30	<u>1,90–3,30</u> 2,71
	устье	<u>3,94–6,22</u> 5,36	<u>3,39–4,81</u> 4,03	<u>2,61–3,86</u> 3,23

Примечание. Числитель – амплитуда изменений значений элементов, знаменатель – средние значения.

Значения перманганатной окисляемости вод реки за пределами города варьировали в соответствии с величиной цветности также в достаточно широких пределах (11,6–32,0 мгО/л), при многолетних средних значениях 17,0–18,9 мгО/л. Величины перманганатной окисляемости на

устьевом участке реки весной изменялись в узких пределах: от 15,4 до 18,2 мгО/л, за исключением весны 2003 года, когда значение окисляемости достигало величины 31,6 мгО/л. Летом значения ПО варьировали наиболее заметно: от 13,0 до 34,6 мгО/л. Осенью этот показатель колебался в пределах от 17,7 до 26,9 мгО/л. Многолетние средние значения величины перманганатной окисляемости (21,3 мгО/л) осенью превышали как летние (20,1 мгО/л), так и весенние (19,2 мгО/л) показатели. Содержание легко окисляемой органики в нижнем течении реки по сравнению с ее верхним участком за редким исключением увеличивалось, индексы этого показателя в течение всего периода наблюдения были выше 1.

Количество биохимически лабильной органики в водах верхнего участка реки мало менялось по сезонам, многолетние средние значения БПК₅ 1,62–1,99 мгО₂/л и БПК₂₀ 2,71–3,30 мгО₂/л. Наибольшее содержание биохимически лабильной органики на устьевом участке реки наблюдалось во время весеннего паводка (БПК₅ 1,73–4,06 мгО₂/л, БПК₂₀ 4,13–7,20 мгО₂/л), а наименьшее осенью (БПК₅ 1,55–2,24 мгО₂/л, БПК₂₀ 2,24–3,86 мгО₂/л). За все время наблюдения многолетние средние показатели БПК₅ и БПК₂₀ на этом участке реки находились в пределах 1,94–2,17 и 3,23–5,36 мгО₂/л соответственно. Количество биохимически лабильной органики в нижнем течении реки по сравнению с верхним ее участком существенно возрастало, особенно весной, в этот период индекс показателя в отдельные годы приближался к 3, его многолетние средние значения во все сезоны достаточно высоки (1,3–2,0).

Содержание аммонийного азота в верхнем течении реки весной изменялось в пределах от 0,12 до 0,38 мгN/л, при многолетних средних значениях 0,31 мгN/л. В период летней межени разброс значений увеличивался (0,12–0,66 мгN/л, среднее 0,34 мгN/л). Осенью количество аммонийного азота возрастало до 0,18–0,80 мгN/л, многолетний средний показатель 0,42 мгN/л (табл. 3). В водах нижнего течения реки аммонийный азот распределялся следующим образом: весной его было 0,13–0,70 мгN/л, летом 0,27–1,03 мгN/л и осенью 0,24–1,05 мгN/л, при средних многолетних значениях 0,49–0,53 мгN/л. За все время наблюдения индексы показателя аммонийного азота за редким исключением были выше 1, наибольшие его значения (до 2,5) были отмечены весной 1999 и летом 1993 и 2000 годов.

Нитритный азот в водах верхнего течения реки присутствовал в незначительных количествах: 0,001–0,005 мгN/л, в нижнем течении реки содержание нитритов варьировало в более широких пределах: от 0,001 до 0,020 мгN/л. Индексы показателя варьировали в очень широких пределах, как правило, были значительно выше 1, а наибольшие значения (больше 7) отмечены во время весеннего паводка.

Таблица 3

Содержание биогенных элементов в водах реки Лососинки

Показатель	Место отбора	Весна	Лето	Осень
NH ₄ ⁺ , мгN/л	верх	0,12–0,38 0,31	0,12–0,66 0,34	0,18–0,50 0,42
	устье	0,13–0,76 0,49	0,26–1,03 0,52	0,24–1,05 0,53
NO ₂ ⁻ , мгN/л	верх	0,001–0,004 0,002	0,001–0,005 0,002	0,002–0,004 0,003
	устье	0,001–0,015 0,009	0,003–0,016 0,009	0,002–0,015 0,006
NO ₃ ⁻ , мгN/л	верх	0,08–0,36 0,21	0,01–0,20 0,09	0,07–0,24 0,13
	устье	0,06–0,72 0,41	0,02–0,25 0,20	0,12–0,33 0,21
Р _{мин.} , мгP/л	верх	0,001–0,033 0,011	0,002–0,025 0,094	0,006–0,016 0,011
	устье	0,005–0,038 0,023	0,007–0,025 0,015	0,012–0,036 0,020
Р _{общ.} , мгP/л	верх	0,014–0,062 0,031	0,021–0,036 0,029	0,018–0,036 0,026
	устье	0,032–0,064 0,43	0,030–0,042 0,036	0,030–0,054 0,039

Примечание. Числитель – амплитуда изменений значений элементов, знаменатель – средние значения.

Наименьшие концентрации нитратных ионов в верхнем течении реки обнаруживались летом (0,01–0,20 мгN/л), а наибольшие весной (0,08–0,36 мгN/л). Осенью нитраты на этом участке реки присутствовали в количестве от 0,06 до 0,24 мгN/л. В нижнем течении реки содержание нитратов распределялось следующим образом: весной 0,06–0,72 мгN/л, летом 0,09–0,40 мгN/л и осенью 0,12–0,33 мгN/л. Отношение количества нитратов в водах устьевом участка реки к соответствующим показателям в ее верхнем течении на протяжении всего периода исследования независимо от сезона было всегда выше 1. Наиболее высокие показатели индекса (до 20) наблюдались в летний период.

Количество минерального фосфора в верхнем течении реки во все сезоны года находилось практически на одном уровне. Весной содержание фосфатов составляло 0,001–0,017 мгP/л, летом 0,009–0,021 мгP/л и осенью 0,006–0,016 мгP/л. На нижнем участке реки концентрации минерального фосфора были выше и варьировали в пределах от 0,005 до 0,038 мгP/л. Общее содержание фосфора в водах верхнего участка реки находилось в пределах от 0,014 до 0,062 мгP/л, а в устье от 0,030 до 0,064 мгP/л. Индексы показателей минерального фосфора практически во всех случаях превышали 1, наиболее заметно изменялись весной (от 1 до 9), а меньше всего осенью (от 1 до 2,5). Отношение содержания общего фосфора в водах устьевом участка реки к его количеству в верхнем течении за все время наблюдения изменялось в пределах от 1,3 до 3, наиболее высокие индексы показателя отмечены осенью 1997 и 2000 годов.

Воды верхнего участка реки Лососинки характеризуются стабильно высоким содержанием железа, что обусловлено высокой гумификацией природных вод (табл. 4). Весной в период интенсивного таяния снега на водосборной площади концентрации его были наименьшими и изменялись от 0,18 до 0,31 мг/л, в период летней межени и особенно осенью количество железа в водах реки увеличивалось и варьировало в пределах 0,17–0,35 мг/л и 0,22–0,40 мг/л соответственно. Генезис речных вод определял и индексы содержания железа, весной и летом они не превышали 1,5, а осенью количество железа в верхнем течении реки было выше, чем в нижнем.

Таблица 4

Содержание тяжелых металлов в водах реки Лососинки

Показатель	Место отбора	Весна	Лето	Осень
Fe, мкг/л	верх	<u>176,3–312,1</u> 218,6	<u>166,7–350,0</u> 243,7	<u>216,7–550,0</u> 345,2
	устье	<u>166,7–255,3</u> 242,3	<u>150,0–394,6</u> 263,7	<u>190,0–550,0</u> 335,8
Cu, мкг/л	верх	<u>2,6–5,0</u> 3,7	<u>0,9–3,5</u> 1,9	<u>1,4–6,0</u> 2,7
	устье	<u>3,7–4,8</u> 4,3	<u>1,4–6,5</u> 3,4	<u>1,5–6,1</u> 3,1
Pb, мкг/л	верх	<u>0,6–2,5</u> 1,6	<u>0,2–2,5</u> 1,4	<u>0,5–7,5</u> 2,5
	устье	<u>1,0–2,5</u> 1,9	<u>0,7–2,5</u> 1,7	<u>0,6–5,0</u> 2,9
Mn, мкг/л	верх	<u>1,4–197,9</u> 35,5	<u>1,8–23,2</u> 6,4	<u>5,2–34,3</u> 14,9
	устье	<u>0,7–17,5</u> 6,0	<u>1,2–12,6</u> 7,4	<u>4,8–150,0</u> 45,8

Примечание. Числитель – амплитуда изменений значений элементов, знаменатель – средние значения.

Свинец и медь в водах реки присутствовали в незначительных количествах (0,2–7,5 и 0,9–6,0 мкг/л соответственно). Соединения этих металлов, как правило, поступали в воды реки в основном с городского водосбора. Индексы

содержания меди в подавляющем большинстве случаев были больше 1, а летом и осенью часто выше 2, концентрации свинца в водах устьевой зоны также были в 2–6 раз выше, чем за городской чертой.

Содержание марганца в верхнем течении реки распределялось следующим образом: весной его было от 1,4 до 6,7 мкг/л (среднее 1,7 мкг/л), летом от 1,8 до 23,2 мкг/л (среднее 6,4 мкг/л), осенью от 5,2 до 34,3 мкг/л (среднее 14,9 мкг/л). Концентрации марганца в устье весной варьировали в пределах от 0,7 до 17,5 мкг/л (среднее 6,0 мкг/л), летом от 1,2 до 12,6 мкг/л (среднее 7,4 мкг/л), осенью количество марганца в водах нижнего течения было наибольшим (4,8–150,0 мкг/л при среднем 45,8 мкг/л). Индексы этого показателя в большинстве случаев варьировали в пределах от 0,2 до 1,5, за исключением значений, полученных осенью 1997 (28,9) и 2000 (4,5) годов, а также летом 1999 года (4,5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов объективно показывает, что параметры химического состава вод реки при их транзите через техногенные зоны городской территории претерпевают существенные изменения, как правило, ухудшающие качество воды. Существенная роль в этом принадлежит поступающим в водоем ливневым стокам. Наиболее загрязненными являются стоки, поступающие из оголовков централизованной ливневой системы города, и в несколько меньшей степени стоки атмосферных осадков, выпадающих на водосборной площади. Для улучшения экологической ситуации необходимо установить жесткий контроль за сбросом ливневых вод и благоустройством водосборных площадей. При должном понимании проблемы вполне возможно успешное ее разрешение и в конечном итоге – восстановление статуса Лососинки как лососевой реки.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартынова И. Л. Химический состав атмосферных осадков на территории Сямозерского бассейна Карелии // Комплексное изучение водных ресурсов. Петрозаводск, 1982. С. 33–35.
2. Новиков Ю. В. и др. Методы исследования качества воды водоемов. М.: Медицина, 1990. 400 с.
3. Прокачева В. Г., Усачев В. Д. Снежный покров в сфере влияния города. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 176 с.
4. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики. Т. 2. Карелия и Северо-Запад. Л., 1966. 702 с.; 1978. 670 с.
5. Савенко В. С. Атмосферные аэрозоли как источник фосфора в водных экосистемах // Водные ресурсы. 1995. Т. 22. № 2. С. 187–197.
6. Савенко В. С. Природные и антропогенные источники загрязнения атмосферы // Итоги науки и техники. Охрана природы и воспроизводство природных ресурсов. М.: ВИНТИ, 1991. Т. 31. 210 с.
7. Семенов А. Д. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 541 с.
8. Харкевич И. С. О роли атмосферных осадков в формировании химического состава вод малых озер Карелии // Гидрохимические материалы. 1986. Т. 96. С. 3–22.

ОЛЬГА ИВАНОВНА БОЛОТНИКОВА

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

bolot@onego.ru

НАТАЛЬЯ ПАВЛОВНА МИХАЙЛОВА

доктор биологических наук, старший научный сотрудник кафедры молекулярной биотехнологии факультета химической и биотехнологии, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет) (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

m_natalia2@rambler.ru

АНАТОЛИЙ ИОСИФОВИЧ ГИНАК

доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой молекулярной биотехнологии факультета химической и биотехнологии, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет) (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

wb@ctinet.ru

ОБРАЗОВАНИЕ КСИЛИТА И ЭТАНОЛА ШТАММАМИ КСИЛОЗОАССИМИЛИРУЮЩИХ ДРОЖЖЕЙ *PACHYSOLEN TANNOPHILUS* РАЗЛИЧНОЙ ПЛОИДНОСТИ*

Изучена микроаэробная ферментация D-ксилозы изогенными штаммами ксилозоассимилирующих дрожжей *P. tannophilus* различной ploидности. Несмотря на склонность к диссоциации, в ходе периодического культивирования диплоид накапливал ксилит (2,75 г/л, 0,04 г/г) и этиловый спирт (0,64 г/л, 0,17 г/г) лучше гаплоида. Обсуждается возможность конструирования продуцентов на основе коллекционных штаммов *P. tannophilus*.

Ключевые слова: D-ксилоза, дрожжи *P. tannophilus*, ксилит, этиловый спирт

ВВЕДЕНИЕ

Обогащенные D-ксилозой растворы – продукты гидролиза растительной биомассы (подсолнечная лузга, кукурузная кочерыжка, сульфитный щелок и т. д.) являются субстратами для образования ксилита и этанола [10], [12], [14]. Уникальная способность накапливать их сопоставимые количества делает вид *Pachysolen tannophilus* удобной экспериментальной моделью для изучения фундаментальных и прикладных аспектов катаболизма D-ксилозы [8]. Однако внутрипопуляционная гетерогенность этих ксилозоассимилирующих дрожжей существенно затрудняла выделение и анализ штаммов различной ploидности [9]. В ходе предварительных экспериментов нам удалось определить факторы, регулирующие жизненный цикл *P. tannophilus*, а также подобрать условия для инкубирования вегетативной гаплоидной и диплоидной культуры [4].

Ранее было показано, что образование ксилита и этанола из D-ксилозы у дрожжей тесно ассоциировано с ростом [3]. Известно, что синтез так называемых первичных метаболитов часто коррелирует с ploидностью дрожжевой клетки [1], [2]. Поэтому цель настоящей работы заключалась в сравнительном анализе эффективности накопления ксилита и этанола изогенными (гаплоидным и диплоидным) штаммами *P. tannophilus*.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовали гаплоидный штамм 22-Y-1532, полученный из хорошо спорулирующей культуры Y-1532 *P. tannophilus* (ВКПМ ВНИИ Генетика, Москва) стандартной методикой [7], а также изогенный диплоид 1Д-22-Y-1532, выделенный согласно [4]. Микроаэробную ферментацию проводили в 250 мл колбах Эрленмейера со 100 мл жидкой среды с 2 % D-ксилозой [8] на термостатированной круговой качалке УВНТ-12-250 при 100 об./мин и 30 ± 2 °C в течение 24 часов. Посевной материал выращивали аналогично [9]. Внутрипопуляционную устойчивость штаммов *P. tannophilus* изучали с помощью микроскопа Jenamed variant (Германия) при увеличении окуляра и объектива соответственно в 18 и 40 раз. Пробы для анализа отбирали в среднем через каждые 2 часа, устанавливая размер и форму клеток, характер почкования, а также споруляции [4], [9].

После окончания ферментации биомассу дрожжей отделяли на центрифуге ПК-6 в течение 5–10 минут при 5000 об./мин. Ее концентрацию рассчитывали по методу Лоури [13] спектрофотометрически на приборе СФ-46 (СССР) при длине волны 620 нм. Содержание D-ксилозы определяли по Феллингу. Этиловый спирт и ксилит анализировали методами газовой хро-

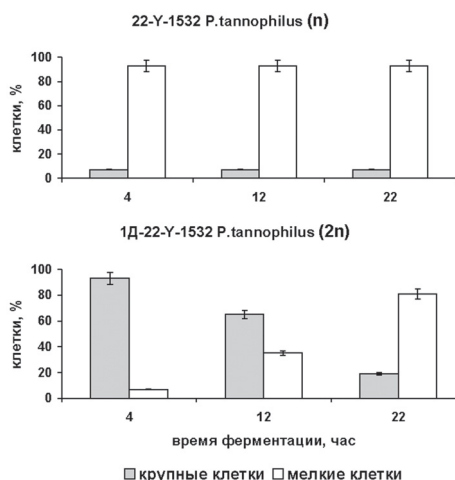
матогрaфии на приборе Vista 600 (Varian, США) согласно условиям, отраженным в [8]. Статистическую обработку экспериментальных данных проводили стандартными методами [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Установлено, что ксилит в дрожжевой клетке образуется из D-ксилозы под действием ферментов НАД(Ф)Н-зависимой D-ксилозоредуктазы (ЕС 1.1.1.21) и ДНФ-ксилитол (D-ксилозу)-дегидрогеназы (ЕС 1.1.1.9). Его использование в гликолитическом пути Эмбдена – Мейергофа – Парнаса опосредовано реакциями неокислительной стадии пентозофосфатного цикла [8], [15]. Очевидно, что ксилит и этанол могут накапливаться лишь при жестком ограничении роста и размножения дрожжей. Чаще всего таким ограничивающим (лимитирующим) фактором является недостаточное снабжение питательной среды кислородом. Поэтому ферментацию D-ксилозы изогенными штаммами *P. tannophilus* осуществляли в так называемом микроаэробном режиме [3].

Популяционная устойчивость оказывает непосредственное влияние на скорость роста продуцента, его жизнеспособность в присутствии микроорганизмов – контаминантов, а также эффективность конверсии субстрата в целевой продукт [1], [5]. Коллекционные варианты *P. tannophilus* – гетерогенные популяции клеток различной пloidности, не имеющие биотехнологической значимости [9]. Идентификация факторов, регулирующих динамику жизненного цикла этого вида, позволила нам стабилизировать изогенные диплоид и гаплоид на плотной питательной среде с D-ксилозой [4]. Их поведение в аналогичной по составу источников углерода жидкой ферментационной среде оставалось неизученным. Поэтому размер, форму клеток гаплоидного (22-Y-1532) и диплоидного (1Д-22-Y-1532) штаммов *P. tannophilus*, характер почкования, а также индукцию споруляции (показатель возникающей гетерогенности культуры) анализировали, учитывая критерии [4], [9] в ходе микроаэробной биоконверсии D-ксилозы (см. рисунок).

Микроаэробная ферментация D-ксилозы штаммами *P. tannophilus* различной пloidности



Популяционная устойчивость изогенных штаммов ксилитоассимилирующих дрожжей *P. tannophilus*: размер крупных клеток – (6,3–8,4) × (4,2–6,3) мкм; мелких клеток – (1,3–6,3) × (2,1–4,2) мкм

Оба штамма имели близкую динамику роста. Тем не менее гаплоид *P. tannophilus* отличала устойчивость на протяжении всего периода ферментации. Вероятно, именно она способствовала лучшему приросту биомассы этого штамма (Δ, см. таблицу). Напротив, уже к 12-му часу эксперимента 40 % популяции диплоида составляли мелкие гаплоидные клетки, появившиеся в результате диссоциации. Однако степень потребления D-ксилозы, концентрация, а также экономический коэффициент образования ксилита у диплоидного штамма оказались выше. Аналогичная тенденция была зафиксирована для этанола. Незначительное увеличение продукции спирта, который, в отличие от ксилита, появляется лишь на заключительных этапах гликолиза, хорошо объясняется активной диссоциацией культуры 1Д-22-Y-1532 *P. tannophilus* (см. рисунок и таблицу). Таким образом, результаты указывают на существование взаимосвязи между пloidностью клеток *P. tannophilus* и эффективностью накопления ксилита и этилового спирта из D-ксилозы. В то же время ее характер нельзя определить без дополнительных исследований.

Штамм	D-ксилоза			Ксилит		Этанол		Биомасса	
	Концентрация, г/л		Степень потребления, %	Концентрация, г/л	Выход*, г/г	Концентрация, г/л	Выход*, г/г	Прирост, Δ, г	Выход*, г/г
	нач.	конеч.							
22-Y-1532 (гаплоид)	21,0	5,5	73,8	2,1	0,14	0,49	0,03	5	0,32
1Д-22-Y-1532 (диплоид)		4,5	78,6	2,75	0,17	0,64	0,04	3,6	0,22

Примечание. * – экономический коэффициент образования ксилита (этанола или биомассы) в расчете на грамм потребленной D-ксилозы. Относительная ошибка в каждой экспериментальной точке не превышает 5 %.

ОБСУЖДЕНИЕ

Возможность рационального осуществления того или иного метаболического процесса в промышленных условиях зависит от целого комплекса факторов. Наиболее важными из них являются технологические особенности продуцента: скорость роста, метаболическая активность, интенсивность потребления субстрата, устойчивость культуры в ходе ферментации и т. п. [5]. Именно они стали причиной широкого использования полиплоидов *Saccharomyces cerevisiae* в различных отраслях народного хозяйства. Тесная взаимосвязь между плоидностью генома данного вида, продуктивностью и скоростью образования этанола уже не вызывает сомнения [1].

Попытки создать аналогичные линии дрожжей *P. tannophilus*, находящихся большей частью в гаплофазе жизненного цикла, уже предпринимались за рубежом. Некоторые линии дрожжей отличала улучшенная способность продуцировать ксилит и этиловый спирт в ходе микроаэробной ферментации D-ксилозы [11], [12]. Тем не менее они, как и диплоид 1Д-22-У-1532 *P. tannophilus*, активно диссоциировали. Это указывает на необходимость дополнительной идентификации факторов, стабилизирующих такие штаммы в жидких ферментационных средах. Их анализ может стать важной предпосылкой для успешного конструирования продуцентов этанола и ксилита на основе коллекционных вариантов ксилозоассимилирующих дрожжей.

* Работа выполнена при поддержке грантов Программы Президента РФ «Ведущие научные школы» (НШ-3731.2010.4 и НШ-1642.2012.4) и Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиханян С. И. Генетические основы селекции микроорганизмов. М.: Наука, 1969. 299 с.
2. Берри Д. Биология дрожжей: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 96 с.
3. Болотникова О. И., Михайлова Н. П., Шабалина М. В., Бодунова Е. Н., Гинак А. И. Условия дифференциации и стабилизации фаз жизненного цикла дрожжей *Pachysolen tannophilus* // Микробиология. 2005. Т. 74. № 4. С. 483–488.
4. Болотникова О. И., Михайлова Н. П., Гинак А. И., Немова Н. Н. Влияние аэрации на образование продуктов биотрансформации D-ксилозы дрожжами *Pachysolen tannophilus* // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. № 6(111). С. 14–18.
5. Воробьева Л. И. Промышленная микробиология. М.: Изд-во МГУ, 1989. 135 с.
6. Глотов Н. В., Животовский Н. В., Хованов В. Г., Хромов-Борисов Н. Н. Биометрия. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 244 с.
7. Захаров И. А., Кожин С. А., Кожина Е. И., Федорова И. В. Сборник методик по генетике дрожжей-сахаромицетов. Л.: Наука, 1984. 144 с.
8. Яблочкова Е. Н., Шабалина М. В., Огородникова Т. Е., Михайлова Н. П., Шаповалов О. И. Морфологическая гетерогенность и особенности жизненного цикла дрожжей *Pachysolen tannophilus* // Микробиология. 1994. Т. 63. Вып. 6. С. 1058–1063.
9. Яблочкова Е. Н., Болотникова О. И., Михайлова Н. П., Немова Н. Н., Гинак А. И. Особенности ферментации D-ксилозы и D-глюкозы ксилозоассимилирующими дрожжами // Прикладная биохимия и микробиология. 2003. Т. 39. № 3. С. 303–306.
10. Dart R. K., Bets W. F. Uses and potential of lignocellulose. London: London Limited, 1991. 201 p.
11. James A. P., Zahab D. M. The construction and genetic analysis of polyploids and aneuploids of the pentose-fermenting yeast *Pachysolen tannophilus* // J. Gen. Microb. 1983. Vol. 129. P. 2489–2494.
12. Maleszka A. P., Schneider J. H. Ethanol production from various sugars by strains of *Pachysolen tannophilus* bearing different numbers of chromosomes // J. Gen. Microbiol. 1983. Vol. 129. P. 2495–2499.
13. Lowry O. H., Rosebrough N. J., Fatt A. L., Randall R. G. Protein measurement with the Folin phenol reagent // J. Biol. Chem. 1951. Vol. 193. № 1. P. 265–275.
14. Pepper T., Olingers P. M. Xylitol applications // Food technol. 1988. № 10. P. 98.
15. Verho R., Londesborough J., Penttila M., Richard P. Engineering redox cofactor regeneration for improved pentose fermentation in *Saccharomyces cerevisiae* // Appl. Environ. Microb. 2003. Vol. 69. № 10. P. 5892.

ЕКАТЕРИНА СТАНИСЛАВОВНА ХОЛОПЦЕВА

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт биологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)

holoptseva@krc.karelia.ru

СТАНИСЛАВ НИКОЛАЕВИЧ ДРОЗДОВ

доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт биологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)

drozdov@krc.karelia.ru

ТАТЬЯНА АРКАДЬЕВНА САЗОНОВА

доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт леса Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)

alt86@rambler.ru

НИКОЛАЙ ИВАНОВИЧ ХИЛКОВ

инженер, Институт биологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)

holoptseva@krc.karelia.ru

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВЫ И ДРУГИХ ФАКТОРОВ СРЕДЫ НА ФОТОСИНТЕЗ СЕЯНЦЕВ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ

В регулируемых условиях среды в планируемом многофакторном эксперименте изучено влияние температуры почвы (15, 20 и 25 °C) на свето-температурную характеристику двухлетних интактных сеянцев березы повислой. Наибольший потенциальный максимум нетто-фотосинтеза у сеянцев березы повислой получен при температуре почвы 15,0 °C, воздуха 20,6 °C и освещенности 34,6 клк. При двух других температурах почвы потенциальный максимум нетто-фотосинтеза был ниже, в среднем на 10 %, и достигался при более высокой освещенности и низкой температуре воздуха.

Ключевые слова: *Betula pendula* Roth., многофакторный планируемый эксперимент, CO₂-обмен, нетто-фотосинтез, температура почвы, свето-температурная характеристика

ВВЕДЕНИЕ

По мере освоения северных территорий шло изучение их биологических ресурсов и развитие сельскохозяйственного производства. В конце XIX и начале XX столетия значительный материал об особенностях жизни растений в северных условиях, в том числе вечной мерзлоты, получили экспедиции переселенческого управления Министерства земледелия. Результаты их работы привлекли вначале ботаников, а в дальнейшем физиологов растений к выяснению влияния на растения экологических особенностей Севера, в частности низких температур почвы [6; 18–40]. В России первые опыты по изучению влияния пониженных температур почвы на растения проведены в 1900 году в Санкт-Петербурге в Лесном институте. В дальнейшем исследования влияния температуры почвы на жизнедеятельность растений нашли отражение во многих трудах [6], [7], [18], в которых основное внимание уделено сельскохозяйственным растениям. Сведения о реакции древесных пород малочисленны и носят в основном описательный характер [6; 79–136], [9; 48], в то время как возрастание роли искусственного лесовосновления диктует необходимость всестороннего изучения экофизиологической характеристики сеянцев перспективных лесных культур.

В послеледниковый период в процессе исторического развития растительного покрова широкое распространение получили березовые формации. К настоящему времени представители рода Березы (*Betula* L.) занимают обширный ареал в умеренных и арктических зонах Европы и Северной Америки [3]. В Российской Федерации ими занято более половины всей площади, находящейся под листовенными древесными породами. В европейской части России наиболее часто встречается береза повислая (*Betula pendula* Roth.) и береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.).

По занимаемой площади береза стоит на третьем месте после лиственницы и сосны, являясь одной из основных лесообразующих пород. Ценность березы определяется ее пластичностью, неприхотливостью, способностью расти и возобновляться в различных лесорастительных условиях. Она дает высококачественное сырье для различных отраслей промышленности, причем все ее части – почки, ветки, листья, береста, сок, и особенно древесина, с давних пор широко используются человеком. Помимо этого она имеет огромное санитарно-гигиеническое значение. Береза привлекает все большее внимание лесоводов. Среди видов берез имеется много форм, выделенных преимущественно по габитусу ствола, цвету и строению коры, рисунку древесины [13;

46]. Очень ценной является форма березы повислой с узорчатой древесиной. Целенаправленное изучение биологии берез началось в первой половине XX столетия. Но, несмотря на значительное внимание к ней как в России, так и за рубежом [3], [11], многие вопросы остались недостаточно изучены, особенно касающиеся ее экологии на ранних этапах развития, что имеет большое значение при выращивании посадочного материала. Практически не исследовано влияние температуры почвы на семена березы [15]. В то же время возрастание роли экологических показателей в решении конкретных практических вопросов требует их перевода из качественного описания в количественное. Последнее стало возможно в результате развития фитотроники и вычислительной техники, разработки методики проведения многофакторных планируемых экспериментов на базе системной идеологии и моделирования [8]. При этом, учитывая большое влияние фактора времени, в связи с ростом и развитием растений для оценки их реакции на действие внешней среды в активном эксперименте наиболее удобным интегральным показателем является первичный процесс продуктивности – CO_2 -обмен, быстро реагирующий на изменения условий среды и доступный для регистрации без контакта с растением, дистанционно и непрерывно [12].

Целью данного исследования было изучение влияния температуры почвы на экофизиологическую характеристику семян березы повислой. В задачи работы входило проведение планируемого многофакторного эксперимента и определение уровня свето-температурных условий внешней среды, которые обеспечивают достижение потенциального максимума и зоны оптимума нетто-фотосинтеза интактных растений при естественном содержании в воздухе CO_2 .

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на территории Агроботанической станции Института биологии КарНЦ РАН. Объектами изучения являлись 2-летние семена березы повислой. В качестве посевного материала использовали сертифицированные семена березы повислой от контролируемого опыления фирмы Forelia OY (Finland). В первый год исследования семена проращивали на фильтровальной бумаге в чашках Петри, пикировали в стаканчики с песком, затем подросшие растения пересаживали в грунт в условия теплицы. На второй год растения переносили на грядки. По завершении второго года развития растения выкапывали из грунта и помещали в пластиковые сосуды, по одной штуке в каждый, сохраняя в целостности корневую систему, и переносили под светоустановку с люминесцентными лампами, где выдерживали в течение недели для адаптации растений к факторостатным условиям выращивания (температура воздуха – 18–

20 °C ночь/день, освещенность – 10–12 клк, длина светового периода – 16 часов).

Далее по 3 сосуда с растениями помещали в установку с регулируемыми условиями среды, позволяющую обеспечивать пределы освещенности 0–40 клк, температуру воздуха от 5 до 40 °C и почвы от 15 до 30 °C [8], где в течение 3 дней (ежедневно изменяя температуру почвы – 15, 20 и 25 °C) исследовали их CO_2 -обмен в условиях двухфакторного эксперимента [4] (табл. 1) в двукратной повторности.

Таблица 1

План постановки эксперимента по изучению зависимости нетто-фотосинтеза растений березы повислой от переменных факторов среды

№	1-й день	2-й день	3-й день	Тв, °C	Е, клк
	Тп ₁	Тп ₂	Тп ₃		
1	15	20	25	12	15
2	15	20	25	12	25
3	15	20	25	20	15
4	15	20	25	20	25
5	15	20	25	20	40
6	15	20	25	28	25
7	15	20	25	28	40

Примечание. Тп₁, Тп₂, Тп₃ – температура почвы в опытах (°C), Тв – температура воздуха, Е – интенсивность освещенности по плану эксперимента.

При определении концентрации CO_2 использовали оптико-акустический инфракрасный газоанализатор Infracal IV (Германия, фирма Junkalor), включенный по дифференциальной схеме. Интенсивность газообмена определяли при концентрации CO_2 в воздухе, близкой к естественной. После 40-минутной экспозиции на каждой ступени плана интенсивность нетто-фотосинтеза семян рассчитывали по разности концентраций CO_2 на входе и выходе из ассимиляционной камеры установки и скорости поступления наружного воздуха и пересчитывали на единицу сухой массы целых (интактных) растений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обработка полученных данных методом множественного регрессионного анализа позволила получить ряд уравнений, отражающих зависимость интенсивности нетто-фотосинтеза растений березы от факторов среды – света и температуры воздуха при трех уровнях температуры почвы.

$$NP = b_0 + b_1E + b_2T + b_3ET + b_4E^2 + b_5T^2,$$

где NP – интенсивность видимого фотосинтеза, мг CO_2 /г ч; Е – освещенность, клк; Т – температура воздуха, °C; b_0 – b_5 – коэффициенты, определенные при математической обработке экспериментальных данных. Статистическая оценка уравнений показала высокую степень их достоверности: коэффициенты множественной детерминации $R^2 > 0,80$, критерии Фишера

$F = 3,15-5,04$, что во всех вариантах опыта больше F табличного при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

В естественных условиях сочетание факторов внешней среды, поддерживающее максимальные значения фотосинтеза, бывает очень неустойчиво. Поэтому наилучшими условиями произрастания любого вида являются те, которые обеспечивают достижение достаточно высоких значений оптимума, – температура и освещенность, позволяющие получить более 90 % от потенциального максимума интенсивности нетто-фотосинтеза. Конкретные границы оптимума зависят от вида и фазы развития растений и сопутствующих условий внешней среды.

Поэтому при анализе уравнений связи мы определяли не только максимальные значения интенсивности видимого фотосинтеза растений, но и области его оптимума (90 % от максимума) и интенсивность света и температуры, обеспечивающие их достижение.

Как показывает анализ полученных уравнений (табл. 2), судя по относительно небольшой разнице потенциального максимума нетто-фотосинтеза (в пределах 10 %) при естественном содержании в воздухе CO_2 исследуемые температуры почвы практически входят в зону оптимальных температур почвы для данного экотипа березы. Наибольшего максимума нетто-фотосинтеза интактные растения двухлетних сеянцев березы повислой достигают при температуре почвы 15°C и определенных температуре воздуха и освещенности – $20,6^\circ\text{C}$ и 34,6 клк. При более высокой температуре почвы ($20-25^\circ\text{C}$) максимум нетто-фотосинтеза тех же сеянцев березы ниже, чем при температуре почвы 15°C и достигается при более низкой температуре воздуха и более высокой освещенности. Снижение видимого фотосинтеза при повышении температуры почвы, возможно, происходит в результате возрастания дыхания корневой системы [14], но при этом оптимум нетто-фотосинтеза достигается в более широком световом и температурном диапазоне. Ранее в работе финских исследователей [15] было показано, что низкие температуры почвы ($5-10^\circ\text{C}$) отрицательно сказываются на росте трехлетних сеянцев березы повислой, снижая ее фотосинтез, сухой вес листьев и изменяя ряд физиологических показателей. Такие явления, вероятно, связаны с тем, что локальное охлаждение корневой системы вызывает закалывающий эффект во всем растении, как это было показано на примере пшеницы [2].

Изучение влияния температуры воздуха на видимый фотосинтез сеянцев березы при двух уровнях температуры почвы и разной освещенности – из района потенциального максимума и областей предполагаемого оптимума – свидетельствует о значительном воздействии всех исследуемых факторов среды на видимый фотосинтез растений березы. При температуре по-

чвы 15°C наиболее сильное влияние на нетто-фотосинтез сеянцев оказывает температура воздуха, о чем можно судить по углу наклона кривых и их сближенности при всех рассматриваемых уровнях освещенности. При этом, во всем диапазоне исследованных температур воздуха повышенная освещенность – 45 клк – при температуре почвы 15°C снижает эффективность фотосинтеза, что свидетельствует об изменении характера влияния этой интенсивности света на фотосинтетический аппарат. Скорее всего, происходит ее выход за пределы зоны светового оптимума в данном сочетании с уровнями напряженности сопутствующих факторов внешней среды, как и в случае интенсивности света 40 клк при повышенной температуре воздуха. В литературе имеются данные, что при увеличении освещенности вначале происходит перестроение хлоропластов с изменением их угла направленности к световому потоку [19]. При дальнейшем усилении интенсивности света возможно образование синглетного кислорода, что ведет к саморазрушению клетки [5], [16], [17].

При температуре почвы 25°C сила влияния температуры воздуха на видимый фотосинтез значительно снижается и возрастает необходимость в усилении освещенности до 45–50 клк. При более высоком или пониженном уровне освещенности нетто-фотосинтез сеянцев снижается.

Таблица 2

Потенциальный максимум и оптимум нетто-фотосинтеза сеянцев березы повислой и свето-температурные условия среды, обеспечивающие их достижение при трех уровнях температуры почвы

Тп	Интенсивность нетто-фотосинтеза (NP)		Условия максимума		Условия оптимума	
	max	opt	E	T	E	T
$^\circ\text{C}$	мг $\text{CO}_2/\text{г ч}$	мг $\text{CO}_2/\text{г ч}$	клк	$^\circ\text{C}$	клк	$^\circ\text{C}$
15	4,3	3,9	34,6	20,6	26,7–42,5	16,3–25,0
20	3,8	3,4	63,8	18,7	44,6–83,0	11,2–24,3
25	3,9	3,5	81,5	13,0	>39	5,6–29,6

Примечание. Тп – температура почвы, E – интенсивность освещенности, T – температура воздуха.

Графики по влиянию освещенности на нетто-фотосинтез сеянцев березы, построенные по экспериментальной модели (рис. 2А, Б), имеют в основном куполообразную форму, что не соответствует данным, приведенным в литературе [1; 128–132], полученным при изучении растений в природных условиях или в однофакторных экспериментах. По мнению авторов, при определенной интенсивности света кривые видимого фотосинтеза выходят на плато в результате достижения уровня светового насыщения. Этому утверждению противоречат данные о влиянии избыточной освещенности на появление синглетного кислорода и его разрушительного действия на фотосинтетический аппарат в результате развития окислительного стресса [10]. По нашему мнению, выход световой кривой нетто-фотосинтеза

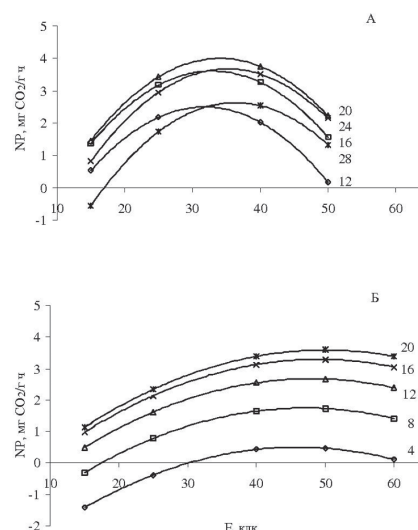
на плато является результатом не светового насыщения, а действия какого-либо лимитирующего фактора: в природе это, вероятнее всего, недостаток влаги, а в эксперименте – температуры.

Анализ световых кривых подтверждает взаимовлияние на нетто-фотосинтез исследуемых факторов внешней среды, в том числе температуры почвы. При этом у световых кривых более рельефно выделяется зона оптимума температуры воздуха в зависимости от температуры почвы. При температуре почвы 15 °С, воздуха – 12 и 28 °С из зоны оптимума переходят в соседние зоны холодного и теплового закаливания (см. рисунок). При 25 °С в зону холодного закаливания попадают температуры ниже 12 °С. Но если при температуре почвы 15 °С экспериментальные точки попадают в центр зоны светового оптимума, то при температуре почвы 25 °С необходим более высокий уровень света, и поэтому экспериментальные точки не покрывают всей зоны, что частично компенсируется возможностями модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные исследования показывают значительное влияние температуры почвы на сеянцы березы повислой и ее взаимосвязь с ведущими факторами внешней среды. Потенциального максимума нетто-фотосинтеза растения достигают при температуре почвы 15,0 °С, воздуха – 20,6 °С, освещенности 34,6 клк и естественном содержании в воздухе CO₂. При этом сеянцы березы имеют широкий диапазон оптимума по всем рассмотренным факторам внешней среды, обеспечивающий 90 % уровень видимого фотосинтеза при температуре воздуха 16,7–25,0 °С, освещенности 26,7–42,5 клк, кото-

рый значительно расширяется в зоне оптимальных значений фотосинтеза (табл. 2).



Влияние интенсивности света на видимый фотосинтез двухлетних сеянцев березы повислой в зависимости от температуры почвы и воздуха: А – при температуре почвы 15 °С и воздуха: 12 °С, 16 °С, 20 °С, 24 °С, 28 °С; Б – при температуре почвы 25 °С и воздуха: 4 °С, 8 °С, 12 °С, 16 °С, 20 °С

Для ускоренного получения сеянцев березы целесообразно, особенно в северных условиях ее выращивания, оборудовать рассадные теплицы возможным подогревом почвы в холодный период вегетации. Этого можно достигнуть закладкой по всей площади теплицы на глубине 30 см параллельно через 25–30 см оцинкованной стальной проволоки диаметром 3–4 мм. Ее концы присоединяют к клеммам трансформатора с регулируемым напряжением порядка 10–15 вольт при контроле уровня температуры почвенными термометрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Березина Н. А., Афанасьева Н. Б. Экология растений. М.: Академия, 2009. 400 с.
- Венжик Ю. В., Титов А. Ф., Таланова В. В., Назаркина Е. А. Влияние охлаждения корней на устойчивость клеток листьев и активность фотосинтетического аппарата пшеницы // Доклады РАН. 2009. Т. 27. № 3. С. 314–316.
- Ветчинникова Л. В. Береза. Вопросы изменчивости. М.: Наука, 2004. 199 с.
- Голикова Г. И., Панченко Л. А., Фридман М. З. Каталог планов второго порядка. Вып. 47. Ч. 1. М.: МГУ, 1974. 387 с.
- Головки Т. К., Дымова О. В., Яцко Я. Н., Захожий И. Г., Далькэ И. В., Табаленкова Г. И. Механизмы адаптации фотосинтетического аппарата к стрессовым воздействиям // Материалы Всеросс. науч. конф. «Устойчивость организмов к неблагоприятным факторам внешней среды». Иркутск, 2009. С. 89–92.
- Дадькин В. П. Особенности поведения растений на холодных почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 276 с.
- Коровин А. И. Роль температуры в минеральном питании растений. Л.: Гидрометиздат, 1972. 282 с.
- Курец В. К., Попов Э. Г. Статистическое моделирование системы растение – среда. Л.: Наука, 1991. 152 с.
- Куусела К. Динамика бореальных хвойных лесов. Хельсинки: Repola, 1991. 210 с.
- Мокроносов А. Т., Гавриленко В. Ф. Фотосинтез. Физиолого-экологические и биохимические аспекты. М.: МГУ, 1992. 240 с.
- Новицкая Л. Л. Карельская береза: механизмы роста и развития структурных аномалий. Петрозаводск, 2008. 143 с.
- Суворова Г. Г. Фотосинтез хвойных деревьев в условиях Сибири. Новосибирск: Гео, 2009. 195 с.
- Тренин В. В. Ценные формы деревьев. Петрозаводск: Карелия, 1999. 88 с.
- Цельникер Ю. Л. Дыхание корней и их роль в углеродном балансе древесных // Лесоведение. 2005. № 6. С. 11–18.
- Aphalo P. J., Lahti M., Lehto T., Repo T., Rummukainen A., Mannerkoski H., Finer L. Responses of silver saplings to low soil temperature // University of Joensuu. Faculty of Forestry. 2006. Vol. 40. № 3. P. 429–442.
- Bennett J. Protein phosphorylation in green plant chloroplasts // Ann. Rev. Plant Physiol. 1991. Vol. 42. P. 281–311.
- Powles S. B. Photoinhibition of photosynthesis induced divisible // Ann. Rev. Plant Physiology. 1984. Vol. 35. P. 15–44.
- Went D. J. Plant growth under controlled conditions. Thermoperiodicity in growth and a fruiting of the tomato // Am. J. Bot. 1944. Vol. 31. P. 135–150.
- Witak S. M., Williams W. E., Sarton H. B. Chloroplast pigments in the field // Plant, Cell and Environ. 2003. 26. № 12. P. 2005–2014.

АЛИНА ЕВГЕНЬЕВНА ЯКИМОВА

кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории зоологии, Институт биологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
angelina73@mail.ru

МЕЛКИЕ МЛЕКОПИТАЮЩИЕ В ПИТАНИИ ХИЩНИКОВ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТАЙГИ*

В статье приводится характеристика питания различных мелких и средних хищников и доля в нем мелких млекопитающих. Рассматривается взаимосвязь численности хищников и их основных жертв.

Ключевые слова: хищники, жертвы, мелкие млекопитающие, доля в питании

Мелкие млекопитающие (грызуны и насекомоядные) составляют основу питания многих хищных зверей. Так, горноста́й, лисица, лесной хорек, енотовидная собака, лесная куница, барсук, американская и европейская норки, даже волк и рысь используют их в пищу. Чаше хищники поедают полевок, в частности рыжую и серую, реже – землероек, крота.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НАСЕЛЕНИЯ МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ

На территории Карелии отмечены 16 видов мелких млекопитающих, принадлежащих к двум отрядам. Постепенно доминирования в суммарных отловах виды распределяются следующим образом: обыкновенная бурозубка (*Sorex araneus* L.), рыжая полевка (*Clethrionomys glareolus* Shreb.), малая бурозубка (*Sorex minutus* L.), средняя бурозубка (*Sorex caecutiens* Laxm.), темная полевка (*Microtus agrestis* L.), лесная мышовка (*Sicista betulina* Pall.), равнозубая бурозубка (*Sorex isodon* Turov.), водяная кутора (*Neomus fodiens* Penn.), красная полевка (*Clethrionomys rutilus* Pall.), полевая мышь (*Apodemus agrarius* Pall.), лесной лемминг (*Myopus schisticolor* Lill.), мышь-малютка (*Micromys minutus* Pall.), крошечная бурозубка (*Sorex minutissimus* Zimm.), обыкновенная полевка (*Microtus arvalis* Pall.), полевка-экономка (*Microtus oeconomus* L.), водяная полевка (*Arvicola terrestris* L.). Два вида составляют абсолютное большинство населения мелких млекопитающих: обыкновенная бурозубка (49,3 %) и рыжая полевка (44,6 %) [11]. Содоминантами являются малая бурозубка, темная полевка и средняя бурозубка. Часть видов встречаются ежегодно, но имеют низкую численность. Лесной лемминг, обыкновенная полевка, полевка-экономка, мышь-малютка в Карелии редки и встречаются не ежегодно. Крошечная бурозубка (статус 3), равнозубая бурозубка (статус 4), полевая мышь (статус 3), лесной лемминг (статус 4) занесены в Красную книгу Карелии. Также в этой книге находятся лесная мышь и черная крыса – виды со статусом 0, то есть не встречавшиеся последние 20–30 лет. Показатель численности мелких млекопитающих в Карелии при учетах давилками

колеблется по годам от 0,34 до 18,5 экз. на 100 ловушко-суток и составляет в среднем 5,85, канавками – от 2,7 до 25,4, в среднем 12,6 экз. на 10 канавко-суток [12]. Сравнение этих данных с таковыми в других районах Европейского Северо-Запада [11] позволяет оценить численность мелких млекопитающих в Карелии как среднюю.

Динамика численности мелких млекопитающих в Карелии имеет ряд особенностей (рис. 1). Здесь нет четкой цикличности в смене подъемов и спадов численности как отдельных видов, так и всех мелких млекопитающих. При этом подъемы численности обычно редки и кратковременны, а периоды депрессии растянуты и имеют значительную глубину. Для многих видов мелких млекопитающих Карелия является северным пределом ареала, а значит, они находятся в более стрессовых условиях по сравнению с центром ареала. Этим обусловлены и низкая плотность популяции, и больший диапазон колебаний численности данных видов, так как в условиях пессимума популяция разрежена, ее численность лимитируется в основном внешними факторами и, следовательно, менее стабильна.

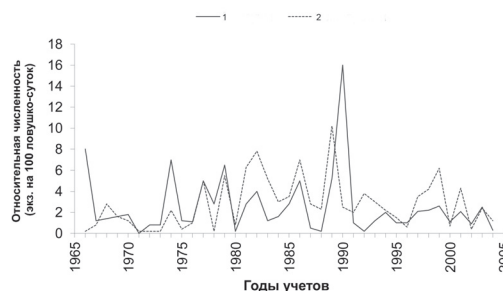


Рис. 1. Динамика численности грызунов (1) и землероек (2) в Карелии (по [11] с дополнениями): ось абсцисс – годы исследований, ось ординат – численность мелких млекопитающих (экз. на 100 ловушко-суток)

СОСТАВ ПИТАНИЯ ХИЩНИКОВ И ДОЛЯ В НЕМ МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ

Данные о составе пищи некоторых мелких и средних хищников таежного Северо-Запада представлены в табл. 1. Ниже приводится более подробная характеристика рационов некоторых из них.

Таблица 1

Питание некоторых мелких и средних хищников Европейской тайги в среднем по Северо-Западу России (встречаемость, % от числа исследованных проб)

Пищевые объекты	Ласка*	Горностай*	Куница*	Хорек*	Европейская норка*	Американская норка*	Енотовидная собака**	Лисица**	Барсук**
Мышевидные грызуны	87,1	77,9	37,4	62,1	27	33,9	14,3	96,9	53,4
Землеройки	3,2	7,3	13,5	4,5	2,5	0,3	2,6	0,3	6,9
Ондатра		1,8		4,6	0,8	3,7	1,3		
Заяц-беляк			5,5	1,1			1,9		1,4
Птицы	8,7	18,5	36	9,1	12,4	12,9	12,3	2,8	25,3
Амфибии	13,4		6,6	40,2	46,3	26,7	13,5		23,9
Рептилии	4,4			1,1			1,9		4,1
Рыбы				3,4	29,2	26,7	5,2		
Насекомые	13,4			1,1	34,2	14,9	6,5	18,2	100
Растительные корма	8,7		10,3	1,1	4,7	3,7	9,5	8,6	26,5

Примечание. * – по [8], ** – по [6].

Ласка. Это наиболее специализированный «мышеед» семейства куньих. В Древнем Риме и раннесредневековой Европе ласка была домашним животным, поскольку охотилась на мышей. Основу питания зверька составляют мышевидные грызуны (до 52 %), доля других кормов незначительна. Специализация питания этого хищника наиболее выражена на севере ареала [8]. Так, на Кольском полуострове кроме мышевидных грызунов она поедает только незначительное количество рыбы. В Карелии рацион расширяется за счет землероек, птиц, лягушек, насекомых и растительных кормов, однако мышевидные грызуны остаются основным видом корма. Сезонная смена кормов у ласки не выражена.

В поисках пищи ласка тщательно обследует все укрытия мышевидных грызунов, встречающиеся ей на пути. Были также отмечены случаи попадания и гибели ласок в ловчих канавках, предназначенных для отлова мелких млекопитающих.

Горностай. Основу питания горностая на Северо-Западе России в течение круглого года составляют мышевидные грызуны. Из них доля полевых на Кольском полуострове достигает 93 % [16], в Карелии она, включая ондатру, зимой составляет 66,6–71,4 % [3]. Сезонные различия в питании невелики. Летом набор кормов несколько разнообразнее за счет включения в рацион ящериц, лягушек, ягод.

Сравнительный анализ географических особенностей питания горностая показал, что при высокой и средней численности мелких млекопитающих различия в составе пищи хищника обнаружены только в видовом составе жертв, что определялось их доминированием среди населения мелких млекопитающих в разных зонах [3]. И только в годы низкой численности грызунов важное значение в питании горностая приобретают другие, в том числе растительные корма [16]. В южных областях заметное место в рационе зверька занимают птицы.

Лесная куница. По характеру питания куница является эврифагом, объектами ее питания служат более 40 видов корма [3], [8]. Тем не менее основное место в питании куницы во все сезоны принадлежит млекопитающим, из них наиболее часто поедаются мышевидные грызуны и белка (в среднем 54 и 17 % встреч). Насекомоядных, зайца-беляка и ондатру куница ест значительно реже. Несмотря на то что видовой состав жертв куницы разнообразнее на юге, основу питания хищника везде составляют фоновые виды мышевидных грызунов – рыжие и серые полевки, из насекомоядных – обыкновенная бурозубка и крот, в Ленинградской области она иногда успешно охотится на ежей. На Кольском полуострове и в Карелии в рационе куницы преобладают рыжие полевки, в то время как в Ленинградской области – серые [8], при этом встречаемость определенного вида корма в желудках и экскрементах хищника напрямую зависит от его обилия.

В отдельные годы наблюдается увеличение частоты встреч следов куницы в местах с повышенной численностью полевых – зарастающие вырубки, окраины полей, пограничные линии смешанных лесов с открытыми и полукрытыми стациями и др. [3].

Лесной хорек. Основу рациона хищника составляют три компонента – мышевидные грызуны, лягушки и птицы. Наибольшее значение в питании имеют мышевидные грызуны, доля которых зимой в Карелии достигает 89 % [3]. Подобное предпочтение отмечено и в ряде других частей ареала хищника: в Московской области – 95,8 % [13], в Татарии – 74,8 % [2], в Литве – 74,8 % [14]. Однако на Северо-Западе России зверек также достаточно часто питается земноводными. Из мышевидных грызунов жертвами хорька становятся преимущественно серые полевки, поскольку именно эти виды преобладают в сравнительно открытых и прибрежных биотопах, которые предпочитает и хорек.

Американская норка. Состав пищи европейской и американской норки имеет много общего и характеризует их как довольно широких эврифагов. Далее речь идет об американской норке, поскольку уже в конце 1970-х – начале 1980-х годов европейская норка в Карелии была замещена норкой американской [3]. В питании хищников в течение года довольно равномерно представлены мелкие млекопитающие, земноводные, рыбы, ракообразные, меньшее значение имеют птицы. Растительные корма встречаются редко и в небольшом количестве [3].

Основу питания норки на Кольском полуострове составляет рыба, а также лемминги и другие мышевидные грызуны. В Карелии и в Ленинградской области довольно большое значение, помимо названных групп, имеют также земноводные и птицы [8].

Енотовидная собака. Является одним из самых широких эврифагов семейства собачьих. Основу питания енотовидной собаки во все сезоны года составляют млекопитающие и главным образом мышевидные грызуны. Осенью их доля, по разным данным, составляет от 30,4 [14] до 48,3 % [1] в северо-западных областях России и 43 % в Южной Финляндии [19]. Во второй половине весны и летом несколько сокращается потребление хищником мышевидных грызунов (до 21,8 %), зато возрастает роль в его питании насекомых (29,5), ягод (27,3), амфибий (10,3) и птиц (6,1 % от общего числа встреч) [4].

Аналогичные изменения состава пищи енотовидной собаки наблюдаются и в Финляндии, где летом вдвое сокращается потребление полевых – до 20 %, но в несколько раз возрастает поедание амфибий и рептилий – до 30 % против 6 % весной и 12 % осенью, почти втрое увеличивается и доля насекомых – до 80 % [19].

Лисица. На севере региона основу питания лисицы составляют мышевидные грызуны (до 93 % встреч). При недостатке этой добычи резко возрастает потребление лисицей тетеревиных птиц (до 40 %) и зайца-беляка [17]. В Карелии в питании лисицы также велико значение мышевидных грызунов (60–80 % встреч), но значительную долю составляют заяц-беляк (12–24 %), тетеревиные птицы (8–30 %), падаль (6–30 %); встречаемость насекомых доходит до 17 %, ягод – до 9–33 % [9]. Южнее, в Ленинградской и Псковской областях, встречаемость мышевидных грызунов в рационе лисицы достигает 98,8 %, птиц – 2,8 %, насекомых – 18,2 %, растительных кормов – 8,6 % [4].

Рысь. Основу питания рыси в Карелии составляют: заяц-беляк – 49,2 %, тетеревиные птицы – 19 % и мелкие млекопитающие – 6,3 % [4]. Более крупные животные, такие как копытные, становятся добычей рыси довольно редко. Имеются некоторые географические различия в питании хищника на Северо-Западе России. Так, на се-

вере региона (Карелия) рысь иногда нападает на северных оленей, а в южных областях (Новгородская, Псковская) успешно охотится на косуль и молодых кабанов. В Ленинградской области известны случаи нападения хищника на акклиматизированных пятнистых оленей [7].

Географические различия в составе пищи рыси на территории Северо-Запада России проявляются не только в большем разнообразии крупных и мелких животных в рационе хищника на юге, но и в довольно значительном участии в ее питании здесь тетеревиных птиц. В итоге в южных областях региона рысь – большой эврифаг, чем, например, в Карелии, где она кормится в основном зайцами.

Барсук. Мелкие млекопитающие и земноводные имеют в жизни барсука весьма существенное значение. В поисках пищи звери часто раскапывают кротовые ходы, очевидно, это делается и для сбора беспозвоночных, попавших в ходы, и с целью поимки самого крота [8]. Такого мнения придерживается и О. С. Русаков [18], который сообщает, что из 284 ходов крота, учтенных им на барсучьих тропах в Ленинградской области, 209 были разрыты барсуками. Из мелких млекопитающих наибольшее значение в питании барсука имеют рыжие и серые полевки, реже насекомоядные.

Волк. Основные жертвы волка – копытные звери и заяц-беляк. Однако волчата уже с 2–3-месячного возраста пытаются добывать себе дополнительный корм (мелких грызунов, птиц) в окрестностях логова [3].

Таким образом, мелкие млекопитающие являются объектами питания для большого числа хищников.

СВЯЗЬ ЧИСЛЕННОСТИ ЖЕРТВ И ХИЩНИКОВ

Существует большая или меньшая связь численности хищника с таковой его основных жертв. Для оценки этих связей были сопоставлены многолетние данные лаборатории зоологии Института биологии КарНЦ РАН по численности мелких млекопитающих (получены согласно стандартным методикам) и некоторых хищников (по данным зимнего маршрутного учета). Учитывая то, что землеройки поедаются хищниками весьма неохотно, к рассмотрению принималась исключительно численность мышевидных грызунов. Анализ изменений численности «жертв» и «хищников» показал слабую положительную корреляцию хода численности мышевидных грызунов с таковой горностая (достоверную), лисицы, лесного хорька (табл. 2).

Лисица. Периодичность колебаний численности лисицы наиболее выражена на северной периферии ее ареала [3]. Это можно объяснить тем, что здесь численность мышевидных грызунов имеет более определенную цикличность. Так, А. А. Насимович [17] отмечает, что на Кольском полуострове подъемы и спады численности

рыжей полевки (доминирующей среди мелких млекопитающих) следуют друг за другом через 4 года, и такая же периодичность прослеживается в изменениях численности лисицы. В Ка-

релии также в ряде случаев можно увидеть согласованные изменения численности лисицы и мелких млекопитающих с тайм лагом в один год (рис. 2, табл. 2).

Таблица 2

Связь между обилием мышевидных грызунов и обилием хищных млекопитающих в Питкярантском районе Карелии (1969–2005 годы)

	Коэффициент Спирмена	p-level	Коэффициент Пирсона	p-level
Мышевидные грызуны (отлов канавками) – горностай	-0,441971	0,008870	-0,3045	0,115
Мышевидные грызуны (отлов канавками) – куница	0,109403	0,537952	-0,805	0,684
Мышевидные грызуны (отлов канавками) – лисица	-0,131340	0,278358	0,0899	0,649
Мышевидные грызуны (отлов канавками) – хорь	-0,195503	0,267835	0,0225	0,910
Мышевидные грызуны (отлов ловушками) – горностай	-0,043714	0,806086	-0,0605	0,760
Мышевидные грызуны (отлов ловушками) – куница	-0,012686	0,943231	-0,1044	0,597
Мышевидные грызуны (отлов ловушками) – лисица	-0,62591	0,725095	-0,1072	0,587
Мышевидные грызуны (отлов ловушками) – хорь	0,29813	0,867077	-0,1102	0,577

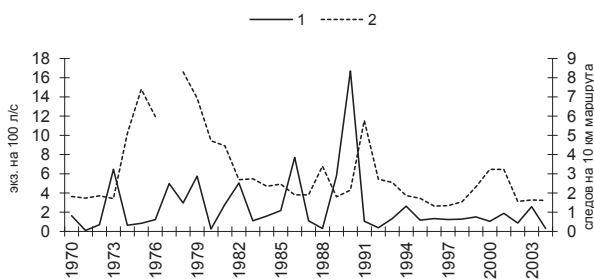


Рис. 2. Динамика численности мышевидных грызунов и лисицы в Южной Карелии: 1 – мышевидные грызуны; 2 – лисица

Горностай. На юге Карелии существует связь между ходом численности горностая и мышевидных грызунов (рис. 3, табл. 2). П. И. Данилов [3] показывает, что стациональное распределение горностая изменяется по годам в соответствии с изменением численности мелких млекопитающих. Так, в годы «неурожая» основных жертв горностая и при низкой численности последнего его распределение носит выраженный очаговый характер, когда хищники встречаются преимущественно в стациях «переживания полевков» – по окраинам сельскохозяйственных угодий, на опушках леса, по берегам водоемов, окраинам населенных пунктов. В годы обилия полевков следы хищника встречаются во всех типах угодий.

Протяженность охотничьего хода самцов горностая в Карелии в среднем равняется 2,6 ($n = 20$) км, самок – 2,0 ($n = 9$) км [7], [8]. При высокой численности мышевидных грызунов средняя длина охотничьего хода была почти вдвое меньше и составила у самцов 1,5 ($n = 8$) км, у самок 1,0 ($n = 4$) км. В годы со сравнительно низкой численностью основных жертв протяженность охотничьих перемещений хищников возросла: самцов – до 4 ($n = 9$) км, самок – до 3 ($n = 3$) км.

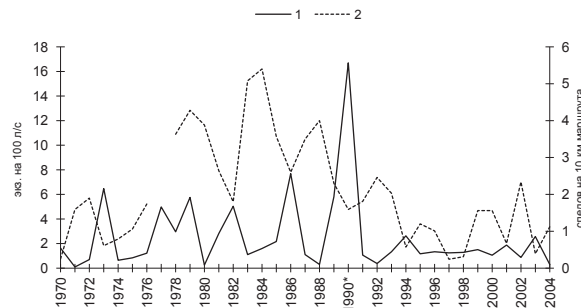


Рис. 3. Динамика численности мышевидных грызунов и горностая в Южной Карелии: 1 – мышевидные грызуны; 2 – горностай

В Карелии площадь участка обитания зверьков в годы обилия корма составляет: у самцов – 10–15 га, у самок – 7–10 га. В годы же с низкой численностью жертв она возрастала до 25–30 га у самцов и 20 га у самок [7]. Сходные данные получены в Финляндии [19]. Там район охоты самца составляет в среднем 20 га ($n = 11$), самки – 7 га ($n = 29$).

На севере – в Лапландском заповеднике, где численность мелких млекопитающих существенно ниже, чем на юге Карелии, участки обитания в кормные зимы не превышают 100 га, тогда как в голодные годы их площадь достигает нескольких квадратных километров [16].

Хорек. П. И. Данилов [3] отмечает отсутствие сколько-нибудь выраженной периодичности колебаний численности лесного хорька в Карелии и объясняет это особенностями динамических процессов в популяции вида на пределе ареала. Однако при этом на юге республики прослеживается некоторая связь динамики численности хищника и мышевидных грызунов – его основных жертв (рис. 4, табл. 2). Значительно южнее – в Псковской области – четкой зависимости

между численностью хищника и обилием грызунов не прослеживается [3], что объясняется большим разнообразием жертв и их обилием в данном регионе.

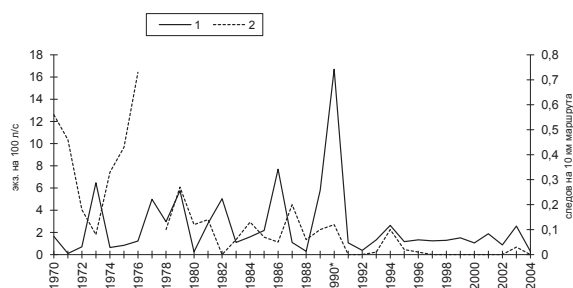


Рис. 4. Динамика численности мышевидных грызунов и лесного хорька в Южной Карелии: 1 — мышевидные грызуны; 2 — лесной хорек

Куница. Движение численности куницы в первую очередь зависит от пресса охоты. Обеспеченность кормами играет меньшую роль, обуславливая только малые циклы изменения численности [8]. Это объясняет отсутствие четкой зависимости между численностью куницы и обилием мышевидных грызунов (рис. 5, табл. 2).

Подводя итог вышесказанному, можно отметить, что в Карелии существует слабая зависимость численности мелких и средних хищников от обилия мышевидных грызунов; эта связь не

носит четко выраженного характера. Это объясняется особенностями динамики численности мелких млекопитающих в Карелии, а также тем, что мышевидные грызуны не являются единственным пищевым объектом для названных хищников.

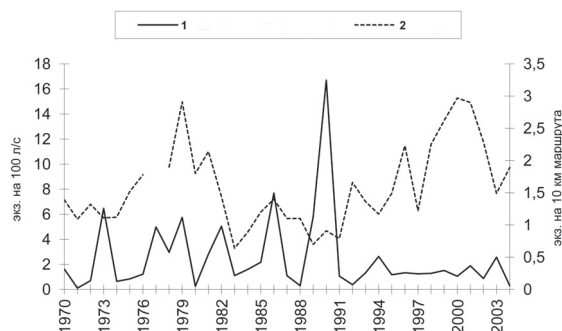


Рис. 5. Динамика численности мышевидных грызунов и куницы в Южной Карелии: 1 — мышевидные грызуны; 2 — куница

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность Э. В. Ивантеру, П. И. Данилову за предоставленные материалы, а также сотрудникам лаборатории зоологии ИБ КарНЦ РАН, студентам и аспирантам ПетрГУ, в разные годы принимавшим участие в сборе материала.

* Работа поддержана грантами ОБН РАН «Биологические ресурсы России», Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Биологическое разнообразие», грантом РФФИ № 10-04-00913.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Геллер М. Х. Биология уссурийского енота, акклиматизированного на Северо-западе европейской части СССР // Труды НИИ сельского хозяйства Крайнего Севера. Норильск, 1959. № 9. С. 115–124.
- Григорьев Н. Д., Теплов В. П. Результаты исследования питания пушных зверей в Волжско-Камском крае // Труды Общества естествоиспытателей при Казанском университете. 1939. Т. 56. Вып. 1/2. С. 101–195.
- Данилов П. И. Охотничьи звери Карелии: Экология, ресурсы, управление, охрана. М.: Наука, 2005. 340 с.
- Данилов П. И., Ивантер Э. В., Зимин В. Б. Изменения зоогеографической структуры и пути формирования современной фауны наземных позвоночных Карелии // VIII Зоогеографическая конференция. М., 1979. С. 20–23.
- Данилов П. И., Русаков О. С. Значение оценки кормности угодий при относительных учетах охотничье-промысловых животных // Вопросы экологии животных. Петрозаводск, 1974. С. 174–179.
- Данилов П. И., Русаков О. С., Туманов И. Л. Хищные звери Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1979. 256 с.
- Данилов П. И., Русаков О. С., Туманов И. Л. и др. Рысь Евразии: эколого-географическая характеристика по регионам: Северо-запад России // Рысь: Региональные особенности экологии, использования и охраны. М.: Наука, 2003. С. 31–52.
- Данилов П. И., Туманов И. Л. Куны Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1976. 256 с.
- Ивантер Э. В. Материалы по биологии и численности лисицы в Карельской АССР // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 1969. Т. 14. Вып. 4. С. 196–211.
- Ивантер Э. В. К изучению барсука на северном пределе ареала // Тр. Гос. заповедника Кивач. 1973. Вып. 2. С. 164–173.
- Ивантер Э. В. Популяционная экология мелких млекопитающих таежного Северо-запада СССР. Л.: Наука, 1975. 318 с.
- Ивантер Э. В., Макаров А. М. Территориальная экология землероек-бурозубок. Петрозаводск, 2001. 272 с.
- Лавров Н. П. К биологии обычного хорька (*Putorius putorius* L.) // Бюллетень МОИП. Отд. биол. 1935. Т. 44. Вып. 7/8. С. 362–372.
- Мельджюнайте С. А. Куницеобразные хищники Литовской ССР, их биология, численность и хозяйственное значение: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Вильнюс, 1963. 22 с.
- Морозов В. Ф. Акклиматизация уссурийского енота (*Nyctereutes procyonoides*) как пример успешного преобразования фауны пушных зверей Европейской территории СССР // Зоологический журнал. 1953. Т. 32. № 3. С. 524–533.
- Насимович А. А. Очерк экологии горностая в Лапландском заповеднике // Тр. Лапландского государственного заповедника. 1948а. Вып. 3. С. 3–37.
- Насимович А. А. Экология лисицы в Лапландском заповеднике // Тр. Лапландского гос. заповедника. 1948. Вып. 3. С. 37–79.
- Русаков О. С. Горностай. Ласка. Черный хорь. Барсук // Охотничьи звери и их промысел. М., 1970. С. 41–53, 61–65.
- Kauhala K., Helle E. Supikoirakannan runsauteen vaikuttavista tekijöistä Suomessa // Suomen Riista. Helsinki. 1992. № 39. S. 102–110.
- Siivonen L. Suuri nisäkäskirja. Helsinki, 1956. 800 s.

ВАСИЛИЙ ПЕТРОВИЧ ВВЕДЕНСКИЙ

кандидат медицинских наук, заведующий эндоскопическим отделением, ГБКУЗ ЯО поликлиника № 2 (Ярославль, Российская Федерация)
vvasp@mail.ru

ВЯЧЕСЛАВ ВАСИЛЬЕВИЧ КЛЮЧЕВСКИЙ

доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой травматологии, ортопедии и военно-полевой хирургии лечебного факультета, Ярославская государственная медицинская академия (Ярославль, Российская Федерация)
vvasp@mail.ru

К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНДОБРОНХИАЛЬНОЙ ТЕРАПИИ ВЕНТИЛЯТОР-АССОЦИИРОВАННЫХ ПНЕВМОНИЙ ПРИ СОЧЕТАННОЙ ТРАВМЕ

При лечении вентилятор-ассоциированных пневмоний у пострадавших с сочетанной травмой эффективность применения визуально контролируемых эндобронхиальных инстилляций перфторана в комплексе с фиброоптической высокочастотной вентиляцией легких была выше по сравнению с неинвазивной тактикой ведения больных.

Ключевые слова: вентилятор-ассоциированная пневмония, эндобронхиальные инстилляциии перфторана, высокочастотная вентиляция легких

Вентилятор-ассоциированная пневмония (ВАП) признана наиболее тяжелой формой внутрибольничной инфекции, свойственной пациентам в критическом состоянии [11]. Возникновение ВАП не может не оказывать негативного воздействия на течение ведущей патологии и является неблагоприятным фоном для лечения основного заболевания, особенно у лиц с тяжелыми механическими повреждениями. При этом риск летального исхода увеличивается на 30 % [4], [5], [6], [9], [10]. Это диктует необходимость разработки новых методов интенсивной терапии пневмоний, связанных с искусственной вентиляцией легких, у травматологических больных.

Цель исследования – определение эффективности методов эндобронхиальной терапии перфтораном при лечении вентилятор-ассоциированных пневмоний при тяжелой сочетанной травме.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для решения поставленной задачи послужили результаты обследования и лечения 77 пострадавших с тяжелой сочетанной травмой, осложненной бронхо-легочной аспирацией. Мужчин было 56, женщин – 21, возраст пациентов от 17 до 71 года. При поступлении тяжесть состояния пациентов по APACHE II составила $17,42 \pm 0,16$ балла, общая тяжесть травмы по ISS – $23,89 \pm 0,27$ балла. С момента госпитализации всем больным проводилась инвазивная искусственная вентиляция легких как в силу выраженной респираторной дисфункции, так и с учетом степени угнетения сознания (9–7 баллов по GCS). Эндоскопически в трахеобронхиальном дереве констатировано жидкое желудочное содержимое с $pH < 3,0$ ($n = 77$).

В зависимости от особенностей лечения пострадавшие были разделены на три группы. В первой ($n = 27$) проводили базовую интенсивную терапию (ИТ), складывавшуюся из антибактериальных средств (ревизию которых осуществляли по результатам бактериологического мониторинга) и иммунокорректоров, мероприятий, направленных на улучшение микроциркуляции, уменьшение интоксикации, оптимизацию бронхиального дренажа с использованием фиброэндоскопов. У 10 пациентов второй группы ИТ была дополнена ультразвуковыми ежедневными 2–3-кратными ингаляциями перфторана (ПР) – газотранспортного перфторуглеродного кровезаменителя, улучшающего доставку и передачу кислорода тканям. В третьей группе ($n = 40$) базовую терапию сочетали с эндобронхиальными инстилляциями ПР на фоне визуально контролируемой высокочастотной вентиляции легких в перемежающихся режимах. Режим экспульсии: $f = 300$ циклов/мин, $I:E = 3:1$, $P_{\text{раб}} = 0,5$ атм. Режим импульсии, которому предшествовала визуально контролируемая инстиляция перфторана в бронхи пораженной доли легкого: $f = 300$ циклов/мин, $I:E = 1:3$, $P_{\text{раб}} = 1,5$ атм. Однократное время воздействия на каждый бронх – до 1 мин. Начало терапии ПР – с первых часов манифестации пневмонии в суточной дозе 0,25 мл/кг как при ингаляционном, так и при инстилляционном методах введения.

Лечебно-диагностические бронхоскопии проводили с использованием фиброэндоскопов BF-40 и BF-PE2 фирмы «Olympus» с пре- и постоксигенацией на фоне респираторной поддержки при постоянном мониторинге AD, PS, SpO_2 . Эндоскопически верифицировали изменения слизистой бронхов, характер и количество па-

тологического экспектората, выраженность и динамизм нарушений бронхиальной проходимости. Для определения агрессивности аспирата исследовали его водородный показатель. Бронхоальвеолярный лаваж выполняли с целью определения клеточного состава эндопульмональной цитограммы (ЭПЦ) и проведения бактериологического мониторинга.

Рентгенологическое обследование проводили на аппаратах «Hof-man Metroskop 50 S» и «Sytec Sri» фирмы «GE». Показатели кислородного статуса и кислотно-основного состояния исследовали на анализаторе газов крови «288 Blood-Gas System» фирмы «Ciba-Corning».

Расчет клеточного состава ЭПЦ выполняли при исследовании нативного бронхоальвеолярного смыва после окраски его 0,1 % раствором трипанового синего в камере Н. К. Горяева. При составлении эндопульмональной цитограммы учитывали клетки моноцитарно-макрофагального ряда, лимфоциты, нейтрофильные и эозинофильные лейкоциты [1].

Бактериологическое исследование экспектората заключалось в выделении чистых культур микроорганизмов и их идентификации в соответствии с Приказом МЗ СССР № 535 от 22.4.1995. Чувствительность возбудителя к антибиотикам оценивали согласно МУК 4.2.1890-04 «Методические указания по определению чувствительности микроорганизмов к антибактериальным препаратам».

Для оценки вероятности возникновения пневмонии и для контроля динамики состояния пациента в процессе лечения использовали Clinical Pulmonary Infection Score (CPIS) [7]. Динамику исследуемых параметров отслеживали в дебюте заболевания и на 7-е сутки от начала лечения (после нормализации температурной реакции и лейкоцитоза). Раннюю и позднюю ВАП определяли по классификации J. Rello (2001) [8] и С. Bornstain et al. (2004) [3]. Тяжесть течения пневмонии обозначали с учетом критериев А. Г. Чучалина (2003) [2].

Статистическая обработка результатов исследований выполнена на персональном компьютере с использованием пакета статистических прикладных программ «Microsoft Statistica 6.0». Описательная статистика представлена в виде средних величин и их ошибки ($M \pm m$), сравнение которых проводили с расчетом *t*-критерия Стьюдента. Учитывая небольшое число наблюдений, проверка статистических гипотез осуществлялась на основе непараметрического теста Колмогорова – Смирнова.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведение инвазивной искусственной вентилиции легких у пострадавших с тяжелыми сочетанными травмами, осложненными бронхолегочной аспирацией с рН аспирата меньше

3,0, сопровождалось развитием ранней ($n = 44$, 57,14 %) и поздней ($n = 33$, 42,86 %) тяжелой ВАП. Поражение правого легкого имело место у 43 (55,84 %) больных, левого – у 25 (32,47 %), обоих – у 9 (11,69 %).

При рентгенологическом мониторинге выявлены инфильтративные изменения, имевшие очаговый полисегментарный характер и локализовавшиеся во втором, шестом, восьмом, девятом и десятом сегментах одного или обоих легких. На 7-е сутки от начала лечения положительная динамика рентгенологических симптомов поражения легочной ткани отмечена у 7 (25,93 %) больных в первой группе, у 5 (50 %) – во второй и у 30 (75 %) – в третьей. Это свидетельствовало о преимуществе использования эндобронхиальной терапии ПР. Однако достоверность изменений ($p < 0,001$) выявлена только при выполнении инстилляций перфторана по сравнению с базовой ИТ. Наибольшим упорством в отношении проводимого лечения отличались инфильтративные изменения, локализовавшиеся в сегментах Фовлера.

По результатам исследования динамики клеточного состава эндопульмональной цитограммы (табл. 1) установлено, что в дебюте ВАП выявлены низкие показатели содержания клеток макрофагально-моноцитарного ряда на фоне выраженного местного нейтрофильного лейкоцитоза. Вне зависимости от особенностей лечения отмечена достоверно значимая положительная динамика исследуемых показателей ЭПЦ, что свидетельствовало об эффективности проводимой терапии. Вместе с тем констатированы достоверные изменения количества альвеолярных макрофагов и моноцитов, нейтрофильных лейкоцитов, лимфоцитов и эозинофилов, свидетельствующие о нивелировании альвеолярно-макрофагального иммунодефицита и нейтрофильного альвеолита. Это определяло приоритет использования эндобронхиальных инстилляций перфторана. На фоне положительной динамики клинических, рентгенологических, эндоскопических и микробиологических симптомов поражения легких и при оценке состояния больного менее 6 баллов по шкале CPIS (7-е сутки от начала лечения) не отмечено восстановления нормальной картины клеточного состава ЭПЦ. Это свидетельствовало о высоком риске рецидива пневмонии и необходимости пролонгирования проводимой терапии.

Этиологический агент ВАП идентифицирован в 27 наблюдениях и был представлен монокультурами грамположительных (*Staphylococcus aureus* – $n = 14$, 51,85 %) и грамотрицательных (*Pseudomonas aeruginosa* – $n = 13$, 48,15 %) аэробов. После достижения больными статуса менее 6 баллов по шкале CPIS элиминация возбудителя констатирована у 16 (59,26 %) больных. Вне зависимости от особенностей проводимой тера-

пии достоверных различий в частоте эрадикации возбудителя не выявлено.

Согласно критериям Clinical Pulmonary Infection Score констатированы результаты, свидетельствующие об эффективности каждого из используемых методов терапии тяжелой ВАП аспирационного генеза у пострадавших с сочетанной травмой. Эффект применения эндобронхиальных инстилляций перфторана в комплексе с фиброоптической высокочастотной вентиля-

цией легких составил 62,5 % и был выше, чем при проведении базовой ИТ – 14,81 % ($p < 0,001$) или ее сочетания с ингаляционным введением ПР – 40 % ($p > 0,05$). При использовании перфторана рентгенологических признаков ателектазирования легочной ткани не выявлено.

Определены характер и частота встречаемости легочных осложнений и показатели атрибутивной летальности при лечении ВАП в зависимости от метода проводимой терапии (табл. 2).

Таблица 1

Динамика клеточного состава эндопульмональной цитограммы при лечении вентилятор-ассоциированной пневмонии

Клеточный состав ЭПЦ, %	Группы больных в зависимости от метода проводимой терапии					
	1-я группа (n = 19)		2-я группа (n = 10)		3-я группа (n = 19)	
	До лечения	На 7-е сутки лечения	До лечения	На 7-е сутки лечения	До лечения	На 7-е сутки лечения
АМ + Мон	38,7 ± 1,1	44,9 ± 0,9 ¹	41,7 ± 1,7	50,9 ± 1,4 ^{1,2}	38,7 ± 1,2	57,7 ± 1,6 ^{1,3,4}
Н	52,9 ± 1,1	46,0 ± 1,0 ¹	48,0 ± 1,4	39,3 ± 1,4 ^{1,2}	55,5 ± 1,1	32,1 ± 1,5 ^{1,3,4}
Л	6,8 ± 0,2	8,0 ± 0,2 ¹	7,2 ± 0,3	9,2 ± 0,6 ^{1,2}	8,0 ± 0,3	9,5 ± 0,3 ^{1,3}
Э	1,5 ± 0,2	1,1 ± 0,1 ¹	1,9 ± 0,3	0,6 ± 0,2 ^{1,2}	0,9 ± 0,1	0,7 ± 0,1 ³

Примечание. АМ + Мон – альвеолярные макрофаги плюс моноциты; Н – нейтрофильные лейкоциты; Л – лимфоциты; Э – эозинофилы; ¹ – достоверность изменений показателей в каждой группе ($p < 0,05$); ² – достоверность изменений аналогичных показателей в 1-й и 2-й группах ($p < 0,05$); ³ – достоверность изменений аналогичных показателей в 1-й и 3-й группах ($p < 0,05$); ⁴ – достоверность изменений аналогичных показателей во 2-й и 3-й группах ($p < 0,05$).

Таблица 2

Характер и частота встречаемости легочных осложнений, показатели атрибутивной летальности при лечении ВАП в зависимости от метода проводимой терапии

Характер осложнений и атрибутивная летальность	Группы больных в зависимости от метода проводимой терапии		
	1-я группа (n = 27)	2-я группа (n = 10)	3-я группа (n = 40)
Дыхательная недостаточность	27 (100 %)	10 (100 %)	40 (100 %)
Экссудативный плеврит	10 (37,04 %)	2 (20 %)	7 (17,5 %)
Бронхообструкция	13 (48,15 %)	10 (100 %) ¹	18 (45 %) ²
Абсцедирование	8 (29,63 %)	1 (10 %)	2 (5 %) ²
Эмпиема плевры	6 (22,22 %)	1 (10 %)	0 ²
Атрибутивная летальность	19 (70,37 %)	3 (30 %) ¹	9 (22,5 %) ²

Примечание. ¹ – достоверность изменений между аналогичными показателями в 1-й и 2-й группах ($p < 0,05$); ² – достоверность изменений между аналогичными показателями в 1-й и 3-й группах ($p < 0,05$).

Манифестация пневмонии сопровождалась прогрессированием дыхательной недостаточности, коррекция которой требовала интенсификации респираторной поддержки. Экссудативные плевриты расценивали как осложнение ВАП только в случае большого скопления жидкости в плевральной полости, требующей ее эвакуации для устранения рестриктивной составляющей нарушенной механики дыхания. Выраженность и динамизм бронхообструкции определялись гиперпродукцией патологического экспектората, особенно в дебюте заболевания.

Деструкция легких с абсцедированием в виде формирующихся единичных периферических абсцессов выявлена у 11 пациентов: в первой группе – у 8 (72,73 %), во второй – у 1 (9,09 %), в третьей – у 2 (18,18 %). Левосторонняя локализация процесса констатирована в 6 (54,55 %)

наблюдениях (в S_6 – у 4, в S_{10} – у 2), правосторонняя – в 5 (45,45 %) (в S_6 – у 3, в S_{10} – у 2).

У 7 (63,64 %) больных абсцессы нижней доли левого (n = 5) и правого легкого (n = 2) осложнились развитием ограниченной эмпиемы плевры. При активном дренировании плевральной полости выявлена негерметичность легочной ткани. В силу этого выполнена временная эндоскопическая окклюзия «причинного» долевого бронха поролоновым obturatorом на срок от 12 до 16 дней с положительным результатом во всех наблюдениях.

ВЫВОДЫ

У пострадавших с сочетанной травмой, осложненной бронхолегочной аспирацией с агрессивностью аспирата меньше 3,0, тяжелая вентилятор-ассоциированная пневмония была

представлена пневмоническим процессом, локализовавшимся в задних сегментах верхних и задне-нижних участках нижних долей, этиологически обусловленным монокультурами грамотрицательных и грамположительных аэробов, манифестировавшим и протекавшим на фоне иммунологической недостаточности смешанно-

го типа с нарушениями иммунорезистентности. При лечении этой патологии эффективность применения визуально контролируемых эндобронхиальных инстилляций перфторана в комплексе с фиброоптической высокочастотной вентиляцией легких была выше по сравнению с неинвазивной тактикой ведения больных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Картавенко В. И., Романова Л. К., Креймер В. Д. и др. Эндопульмональная цитограмма в прогнозе инфекционных легочных осложнений при сочетанной травме // *Общая реаниматология*. 2005. № 6. С. 9–15.
2. Чучалин А. Г. Респираторная медицина. Руководство. М.: Гэотар-Медиа, 2007. Т. 1. 800 с.
3. Bornstain C., Azoulay E., De Lassence A. et al. Sedation, sucralfate and antibiotic use are potential means for protection against early-onset ventilator-associated pneumonia // *Clin. Infect. Dis.* 2004. Vol. 38(10). P. 1401–1408.
4. Craven D. E. Epidemiology of ventilator-associated pneumonia // *Chest*. 2000. Vol. 117, № 4 (Suppl. 2). P. 186S–187S.
5. Hunter J., Annadurai S., Rothwell M. Diagnosis, management and prevention of ventilator-associated pneumonia in the UK // *Eur. J. Anesthesiol.* 2007. Vol. 24 (11). P. 971–977.
6. Niederman M. S. Therapy of ventilator-associated pneumonia: What more can we do to use less antibiotics? // *Crit. Care. Med.* 2004. Vol. 32. P. 44–54.
7. Pugin J. Clinical signs and scores for the diagnosis of ventilator-associated pneumonia // *Minerva Anesthesiol.* 2002. Vol. 68(4). P. 261–265.
8. Rello J. International Conference for the Development of Consensus on the Diagnosis and Treatment of Ventilator-associated Pneumonia // *Chest*. 2001. Vol. 120 (3). P. 955–970.
9. Shorr A. F., Kollef M. H. Ventilator-associated pneumonia: insights from recent clinical trials // *Chest*. 2005. Vol. 127 (Suppl. 2). P. 583–591.
10. Shorr A. F., Sherner J. H., Jackson W. L., Kollef M. H. Invasive approaches to diagnosis of ventilator-associated pneumonia // *Crit. Care. Med.* 2005. Vol. 33. P. 46–53.
11. Vincent J. L. Ventilator-associated pneumonia // *J. Hosp. Infect.* 2004. Vol. 57, № 4. P. 272–280.

КСЕНИЯ АЛЕКСАНДРОВНА НИКИТИНА

ассистент кафедры семейной медицины (общей врачебной практики) медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

nikxen@yandex.ru

ТАТЬЯНА АЛЕКСЕЕВНА КАРАПЕТЯН

доктор медицинских наук, профессор кафедры семейной медицины (общей врачебной практики) медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

kara@karelia.ru

НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА ДОРШАКОВА

доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой семейной медицины (общей врачебной практики) медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

ndorshakova@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА КРОВИ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ И РАЗРЕШЕНИИ ВНЕБОЛЬНИЧНОЙ ПНЕВМОНИИ У ПАЦИЕНТОВ ПОЖИЛОГО И ПРЕКЛОННОГО ВОЗРАСТА*

Представлены результаты исследования микроэлементного статуса крови у жителей Карелии разного возраста: здоровых доноров и пациентов с внебольничной пневмонией. Показаны различия в содержании массовых концентраций микроэлементов у здоровых и больных лиц, а так же разнонаправленные изменения МК МЭ в крови пациентов разных возрастных групп в процессе выздоровления.

Ключевые слова: микроэлементный статус, внебольничная пневмония, возраст

ВВЕДЕНИЕ

По статистическим данным, заболеваемость внебольничной пневмонией (ВП) у пациентов в старшей возрастной группе (≥ 65 лет) колеблется в пределах 25–44 %, тогда как лица более молодого возраста страдают ВП существенно реже (заболеваемость в пределах от 1 до 11,6 %). Полуморбидность, тяжелое течение заболевания обуславливают высокую смертность у этой категории больных – 15–30 %, что примерно в десять раз выше аналогичного показателя у пациентов более молодого возраста (1–3 %) [2], [17], [19]. Определенные трудности вызывает начальная диагностика ВП у больных старше 60 лет; они связаны с частым отсутствием как выраженных респираторных симптомов, так и достоверных физикальных данных, дебютом заболевания с неспецифических симптомов, свойственных неврологическим нарушениям [8], [9], [10], [15], [26]. Программа лечения ВП у пожилых также имеет некоторые особенности, обусловленные необходимостью учитывать снижение функции почек, уменьшение всасывающей способности желудочно-кишечного тракта, ослабление детоксицирующей функции печени, то есть процессы, связанные с постепенной инволюцией организма. Происходящие изменения могут обуславливать и замедление процессов репарации, а значит, вызывать затяжное течение пневмонии, увеличение сроков приема антибактериальных препаратов [8], [9], [10], [13], [14], [15].

Микроэлементная система относится к базовым системам регуляции всех функций организма, тогда как окислительно-восстановительная, гуморальная, иммунная, нервная – к надстроечным [24]. Исследование микроэлементного состава крови при ВП позволяет более глубоко изучить процессы функционирования организма в условиях возникновения и разрешения воспаления в легочной ткани, обнаружить возможности влияния на течение этого процесса и на этой основе сформулировать основные принципы восстановительных и коррекционных мероприятий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Атомно-эмиссионной спектрометрией исследованы массовые концентрации (МК) 8 микроэлементов (МЭ) (Zn, Fe, Mg, Mn, Cu, Pb, Cd, Li) в цельной венозной крови у постоянно или длительно (более 15 лет) проживающих в Карелии лиц: 68 больных ВП в возрасте от 15 до 80 лет (в дебюте и при разрешении заболевания) и 44 здоровых доноров в возрасте от 15 до 59 лет, анамнез которых был тщательно изучен. Все обследованные не имели хронической патологии желудочно-кишечного тракта и гепатобилиарной системы, не принимали дополнительно лекарственные препараты, а также витаминно-минеральные комплексы или биологически активные добавки, содержащие макро- или микроэлементы. Диагностика ВП проводилась согласно требованиям практических рекомен-

даций по диагностике, лечению и профилактике внебольничной пневмонии у взрослых, подготовленных группой российских экспертов [2]. Среди больных лиц было выделено 3 группы: в возрасте от 15 до 44 лет – 51 человек; от 45 до 59 лет – 11 человек; от 60 до 80 лет – 6 человек. Среди доноров – 2 группы: 15–44 лет – 38 человек; 45–59 лет – 6 человек (доноров более старших возрастных групп по объективным причинам найти не удалось). Статистическая обработка данных проводилась с использованием лицензионной статистической программы Statistica 6.0. Различия между группами оценивались по t-критерию Стьюдента. Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Популяционные исследования микроэлементного состава организма человека позволили определить диапазон нормального содержания МЭ в тканях, в том числе и в цельной крови [21], [24], [27], что позволяет интерпретировать результаты собственных исследований (табл. 1, 2).

Таблица 1

Массовые концентрации микроэлементов в цельной крови у здоровых доноров Карелии в сравнении с нормальными величинами (мг/л)

Элемент	Средние МК в цельной крови у доноров, мг/л (n = 44)	Диапазон нормального содержания МЭ, мг/л [21], [24], [27]
Mg	30,06	35,8–48,5
Pb	0,066	0,008–0,269
Cd	0,00085	0,00003–0,007
Fe	408,09	309–521
Zn	8,996	4,8–12,8
Cu	0,92	0,8–1,3
Li	0,031	0,004–0,019
Mn	0,0536	0,0016–0,075

МК Zn, Fe, Mn, Cu, Pb и Cd у доноров укладывались в диапазон рекомендуемых нормативов их содержания в крови [21], [24], [27], при этом уровень Li у всех респондентов был выше, а Mg – ниже рекомендуемых норм (табл. 1).

Для человека основными источниками поступления лития являются питьевая вода и продукты питания растительного происхождения [16]. В Карелии существуют территории, где имеет место техногенное загрязнение Li: повышенное содержание этого МЭ, превышающее региональные ПДК, неоднократно отмечается в водных объектах района г. Костомукши [5], [6], [7]. Поверхностные воды служат главным источником водоснабжения населения Карелии (53,8 % [6]), хотя в питьевой воде уровень лития систематически не исследуется. Изучение почвенных ресурсов на предмет определения в них уровня Li (для возможной последующей оценки содер-

жания этого МЭ в произрастающих культурных растениях, употребляемых в пищу) в Карелии тоже не проводилось.

МК Mg в крови обследованных доноров были ниже рекомендуемых норм. В организм человека Mg поступает преимущественно с растительной пищей и водой [25]. Поверхностные воды Карелии, за редким исключением, по природному химическому составу и качеству мало минерализованы (менее 100 мг/л) и очень мягкие (менее 4 % жесткости), то есть обеднены ионами Ca и Mg [5], [6], [7], [11]. Это обусловлено тем, что более 70 % территории Карелии занимают материнские минеральные породы, практически не содержащие биогенных МЭ, а процессы почвообразования связаны с разрушением этих пород посредством выветривания и вымывания ионов Mg, K, Ca, Na. В районах с повышенным количеством осадков более активно идут процессы растворения водами и вымывания МЭ уже из почв. Именно поэтому в органоминеральных горизонтах Карелии количество Mg ниже, чем в минеральных [18]. Кроме того, на доступность Mg для усвоения растениями влияет кислотность почв: чем она выше, тем труднее происходит усвоение МЭ [22], при этом для региона характерна высокая кислотность почв. Таким образом, питьевые воды и произрастающие культурные растения, употребляемые в пищу населением, невозможно рассматривать как важный источник поступления Mg. Необходимо учитывать и тот факт, что в организме человека Li проявляет по отношению к Mg антагонистическое действие [24], [25], что, безусловно, сказывается на уровне содержания последнего.

МК Zn, Fe, Mn, Cu, Pb и Cd у пациентов с ВП разных возрастных групп в дебюте и при разрешении заболевания находились в диапазоне рекомендуемых нормативов содержания их в крови [21], [24], [27], при этом у всех обследованных больных сохранялся сниженный по сравнению с нормами уровень Mg и повышенный – Li (табл. 2).

Мы сопоставили МК МЭ больных внебольничной пневмонией до и после лечения и здоровых доноров в возрастных группах 15–44 лет и 45–59 лет (табл. 3) (к сожалению, не удалось подобрать контрольную группу доноров для пациентов возрастного диапазона 60–80 лет в силу объективных обстоятельств).

У пациентов 60–80 лет в дебюте ВП и при выздоровлении уровень Mg является максимальным среди всех обследованных больных (табл. 2), что соответствует данным А. Л. Горбачева и соавторов, обнаруживших повышенное содержание Mg в волосах пожилых жителей г. Магадана по сравнению с более молодыми лицами [4]. У пациентов 15–44 лет уровень МЭ занимает промежуточное значение и у пациентов 45–59 лет является минимальным.

Таблица 2

МК МЭ в крови пациентов разного возраста в дебюте и при разрешении ВП в сравнении с нормальными величинами (мг/л)

Элемент	МК МЭ в цельной крови больных ВП разного возраста						Диапазон нормального содержания МЭ мг/л [21], [24], [27]
	В дебюте заболевания			После разрешения заболевания			
	15–44 лет (n = 51)	45–59 лет (n = 11)	60–80 лет (n = 6)	15–44 лет (n = 51)	45–59 лет (n = 11)	60–80 лет (n = 6)	
Mg	30,03	28,64	31,15	29,82	28,01	30.35	35,8–48,5
Pb	0,070	0,088	0,050	0,047	0,056	0,044	0,008–0,269
Cd	0,00200	0,00083	0,00159	0,00164	0,00058	0,00076	0,00003–0,007
Fe	378,88	351,94	407,85	387,21	365,27	399,53	309–521
Zn	7,33	7,35	8,17	6,76	5,50	8,20	4,8–12,8
Cu	1,07	1,15	0,895	0,96	1,13	1,01	0,8–1,3
Li	0,0540	0,0410	0,0390	0,0510	0,0499	0,0430	0,004–0,019
Mn	0,0425	0,0306	0,0397	0,0440	0,0286	0,0512	0,0016–0,075

Таблица 3

МК МЭ в крови пациентов разного возраста в дебюте и при разрешении ВП и здоровых доноров соответствующих возрастных групп (мг/л)

Элемент	МК в цельной крови обследованных 15–44 лет			МК в цельной крови обследованных 45–59 лет		
	Больные ВП 15–44 лет в дебюте заболевания (n = 51)	Больные ВП 15–44 лет после разрешения заболевания (n = 51)	Доноры крови 15–44 лет (n = 38)	Больные ВП 45–59 лет в дебюте заболевания (n = 11)	Больные ВП 45–59 лет после разрешения заболевания (n = 11)	Доноры крови 45–59 лет (n = 6)
Mg	30,03	29,82	29,85	28,64	28,01**	31,37**
Pb	0,070	0,047**	0,062**	0,088	0,056	0,091
Cd	0,00200*	0,00164**	0,00090*,**	0,00083*	0,00058**	0,00040*,**
Fe	378,88*	387,21**	406,06*,**	351,94*	365,27**	420,93*,**
Zn	7,33	6,76**	8,93**	7,35	5,50**	9,44**
Cu	1,07*	0,96	0,91*	1,15	1,13	1,01
Li	0,0540*	0,0510**	0,0310*,**	0,0410	0,0499	0,0360
Mn	0,0425*	0,0440**	0,0530*,**	0,0306*	0,0286**	0,0600*,**

Примечание. *, ** – различия между подгруппами являются статистически значимыми при $p < 0,05$.

До начала лечения содержание Mg в крови больных 15–44 лет выше, а после окончания лечения – ниже по сравнению с показателями доноров аналогичного возраста. В возрастной группе 45–59 лет исходно низкие по сравнению с донорами МК Mg в крови снижаются (табл. 3), приобретая статистическую значимость после проведенного лечения. Mg принимает участие во внутриклеточных обменных процессах, стимулирует образование белка, регулирует хранение и высвобождение аденозинтрифосфата [1], [20], [22], [23], [25]. Он расходуется при повышенной потребности клетки в энергии, что сопровождается воспалительным процессом при ВП.

Уровень Cd при возникновении и разрешении ВП у больных 60–80 лет имеет промежуточное значение: выше, чем у пациентов 45–59 лет и ниже, чем у пациентов 15–45 лет (табл. 2). Статистически достоверным является более высокое содержание Cd до и после проведенного лечения в группах пациентов 45–59 лет и 15–44 лет по сравнению с донорами соответствующего возраста (табл. 3). У курящих лиц путем преимущественного поступления Cd в организм является ингаляционный, при котором он из табачного дыма (листья табака концентрируют этот МЭ) усваивается на 50 %. Доля усвоения Cd, поступающего с загрязненными пищевыми продук-

тами, составляет лишь 4–6 % от введенного количества. Если вдыхаемый воздух не загрязнен табачным дымом, то количество поступающего с пищей кадмия превышает количество ингалируемого. Так как в нашем исследовании МК Cd у больных лиц достоверно превышают таковые у здоровых доноров соответствующего возраста, это может свидетельствовать о том, что среди пациентов с большей частотой встречались курильщики табака. Влияние Cd на организм связано с уменьшением фагоцитарной способности макрофагов [1], снижением активности естественных клеток-киллеров (ЕКК) [16], что может обусловить уменьшение устойчивости организма курильщика к возникновению ВП. Снижение уровня Cd в крови пациентов в процессе выздоровления может быть связано с прекращением курения или с уменьшением пассивного курения в связи с госпитализацией.

Уровень Pb в дебюте и при разрешении ВП у пациентов 60–80 лет является минимальным; содержание МЭ у пациентов 45–59 лет максимально, а у пациентов 15–44 лет имеет промежуточное значение (табл. 2). После лечения ВП МК Pb в группах 45–59 ниже, а в группе 15–44 лет – уже достоверно ниже аналогичных показателей у доноров соответствующих возрастов (табл. 3). Уровень Pb в крови пациентов 45–59

лет при возникновении заболевания не достигает, а у больных 15–44 лет – превышает таковой у доноров соответствующего возраста. В организм человека Pb попадает с продуктами питания и загрязненным воздухом [1], [16]. Избыток свинца в организме приводит к снижению уровня жизненно важных МЭ – Ca, Fe, Zn, Se. Свинец вызывает подавление антителогенеза (IgM, IgG), снижает антителозависимую и митоген-индуцированную клеточную цитотоксичность и подавляет функции макрофагов [16], [22], [23]. По данным А. В. Скального (2010), свинец может выводиться из организма с потом [24].

МК Fe и Zn в крови пациентов 60–80 лет выше, чем у остальных, как в дебюте ВП, так и после разрешения воспалительного процесса в легочной ткани (табл. 2). Это соответствует данным о более высоком содержании этих МЭ у пожилых по сравнению с молодыми, полученным Э. Я. Журавской и соавторами при исследовании микроэлементного состава крови жителей г. Новосибирска [12], и данным А. Л. Горбачева и соавторов, которые изучали микроэлементный состав волос жителей г. Магадана [4].

МК Fe у пациентов 15–44 лет и 45–60 лет статистически ниже таковых у доноров соответствующего возраста, и хотя они увеличиваются в процессе выздоровления, но по-прежнему остаются достоверно ниже уровня железа у доноров своей возрастной группы (табл. 3). Fe входит в состав лактоферрина – главного белкового компонента специфических гранул полиморфно-ядерных нейтрофилов, содержащегося в различных секретах организма. Низкое содержание Fe в организме ведет к снижению функции иммунной системы: уменьшается количество гранулоцитов и макрофагов, угнетается цитотоксическая функция ЕКК, понижается продукция макрофагами интерферона, угнетается фагоцитоз, образование антител [1], [16], [23], [25].

Сниженные по сравнению с донорами соответствующих групп МК Zn при госпитализации в группах пациентов 15–44 и 45–59 лет в процессе разрешения ВП еще более снижаются, приобретая статистическую значимость при $p < 0,05$ (табл. 3). Zn принимает участие в процессах регенерации тканей, формировании Т- и В-клеточного иммунитета, процессах выработки антител, функциях ЕКК, входит в состав супероксиддисмутазы (СОД) [1], [22], [24]. Дефицит цинка развивается при любых инфекционных заболеваниях, что связано с повышенным его расходом, и ведет к расстройству фагоцитоза [16].

Содержание же Cu у пожилых пациентов в дебюте ВП является минимальным, а при разрешении ВП имеет промежуточное значение, превышая аналогичные показатели в группе 15–44 лет, и являясь более низким по сравнению с группой 45–59 лет (табл. 2). При этом МК Cu при сравнении с донорами в группах пациентов

15–44 лет и 45–59 лет более высокие как в дебюте, так и при разрешении ВП (табл. 3). У пациентов 15–44 лет до госпитализации МК Cu статистически превышают аналогичные значения в группе доноров соответствующего возраста, при окончании лечения теряя достоверную значимость. Cu является компонентом церулоплазмينا, выступающего реактантом острой фазы воспалительного процесса и протектором клеточных мембран от перекисного окисления липидов, тем самым способствуя защите сурфактанта легких. Входя в состав $Cu, Zn-COD$, медь обеспечивает защиту макрофагов и моноцитов от свободных радикалов, вырабатываемых ими в процессе «кислородного взрыва». Дисбаланс Cu может отразиться на функциях Cu-зависимой лизилоксидазы и вызвать снижение репаративных и регенераторных свойств тканей в очаге воспаления, удлиняя тем самым сроки течения пневмонии [1], [16], [23], [25].

МК Mn в дебюте ВП у пожилых пациентов занимают промежуточное значение, уровень МЭ минимален в группе больных 45–59 лет и максимален в группе 15–45 лет; при разрешении заболевания МК Mn становятся максимальными в группе пациентов пожилого возраста (табл. 2). Уровни Mn в крови пациентов 15–44 лет и 45–59 лет достоверно ниже в дебюте и при разрешении ВП по сравнению со здоровыми донорами соответствующих возрастов, что может быть связано с его повышенным расходом в процессе воспаления (табл. 3). Марганец является кофактором Mn-COD – фермента, обеспечивающего инактивацию супероксидного анион-радикала [1], [20], [23], [25]. В эксперименте введение 10–160 мг/г хлорида Mn мышам приводило к 2–4 кратному росту активности ЕКК (ЕК-активность) в отношении любых клеток-мишеней [16]. Вероятно, поступающего с пищей Mn пациентам с ВП недостаточно для поддержания его уровня в крови.

МК Li в обеих пробах крови больных 60–80 лет являются минимальными, у больных 45–59 лет – промежуточными, у больных 15–44 лет – максимальными (табл. 2). МК Li в крови пациентов 15–44 лет и 45–59 лет превышают МК содержания этого элемента в крови здоровых доноров соответствующего возраста, причем у пациентов 15–44 лет эти различия статистически значимы как до, так и после лечения заболевания (табл. 3). Li стимулирует ЕК-активность, дозозависимо стимулирует продукцию интерлейкина-2, интерлейкина -6, гранулоцитарно-макрофагального колониестимулирующего фактора Т-клетками [23]. Соединения Li в культуре полиморфно-ядерных лейкоцитов человека, активированных зимозаном, подавляли хемолюминесценцию, обусловленную «кислородным взрывом» в фагоцитах, обозначая свою протективную роль [16].

Для того чтобы определить возможное участие МЭ в патогенезе пневмонии, мы сравнили их МК

у больных ВП в дебюте заболевания и после его разрешения в разных возрастных группах.

Оказалось, что для всех обследованных в процессе выздоровления наблюдается снижение МК Mg, Cd и Pb. Однако при разрешении ВП в группе пациентов 60–80 лет наблюдаются отличия от больных других возрастных групп: в процессе выздоровления у них происходит повышение МК Zn и Cu и снижение МК Fe, тогда как у более молодых пациентов – в группах 15–44 и 45–59 лет – МК Zn и Cu снижаются, а Fe – повышаются.

ВЫВОДЫ

Сниженные по сравнению с рекомендуемыми нормами МК Mg и повышенные МК Li в крови всех обследованных можно рассматривать в качестве эколого-гигиенических особенностей Карелии [3],[4]. Это требует дальнейшего изучения содержания данных МЭ в природных средах региона.

Разрешение воспалительного процесса в легочной ткани у всех обследованных больных протекает на фоне статистически значимого пониженного содержания Zn, Fe, Mn и повышенного содержания Li и Cd по сравнению со здоровыми донорами крови, при этом выздоровление сопровождается повышением МК Zn, Cu и снижением МК Fe в группе больных 60–80 лет, в отличие от более молодых пациентов, у которых изменения носят противоположно направленный характер. Более высокие МК Mg, Zn и Fe в крови пожилых пациентов по сравнению с более молодыми больными ВП, возможно, являются отражением закономерных возрастных изменений элементного статуса человека.

Выявленные изменения МК МЭ необходимо учитывать при разработке терапевтических подходов к курации пациентов разного возраста, страдающих ВП.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авцын А. П., Жаворонков А. А., Риш М. А., Строчкова Л. С. Микроэлементозы человека: этиология, классификация, органопатология. М.: Медицина, 1991. 496 с.
2. Внебольничная пневмония у взрослых: практические рекомендации по диагностике, лечению и профилактике: Пособие для врачей. Смоленск: МАКМАХ, 2010. 80 с.
3. Горбачев А. Л., Добродеева Л. К., Теддер Ю. Р., Шацова Е. Н. Биогеохимическая характеристика северных регионов. Микроэлементный статус населения Архангельской области и прогноз развития эндемических заболеваний // Экология человека. 2007. № 1. С. 4–11.
4. Горбачев А. Л., Луговая Е. А. Возрастные перестройки микроэлементной системы человека как биохимический механизм старения // Северо-Восточный научный журнал. 2010. № 1. С. 54–62.
5. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2009 году / Мин-во сельского, рыбного хоз-ва и экологии РК. Петрозаводск, 2010. 296 с.
6. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2010 году / Мин-во по природопользованию и экологии РК. Петрозаводск, 2011. 292 с.
7. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2011 году / Мин-во по природопользованию и экологии РК. Петрозаводск, 2012. 294 с.
8. Дворецкий Л. И. Пневмонии, диагностика, лечение, геронтологические аспекты. М.: НЬЮДИАМЕД – АО, 1995. 44 с.
9. Дворецкий Л. И. Внебольничные пневмонии у пожилых. Стратегия и тактика антибактериальной терапии // Пульмонология. 2001. № 4. С. 91–97.
10. Дворецкий Л. И., Яковлев С. В. Пожилой больной и инфекция: руководство для врачей. М., 2008. 368 с.
11. Доршак Н. В. Качество окружающей среды и здоровье человека в условиях Карелии. Петрозаводск, 1997. 204 с.
12. Журавская Э. Я., Латынцева Л. Д., Никитин Ю. П., Куценогий К. П., Гырголька Л. А., Чанкина О. В., Савченко Т. И. Особенности микроэлементного статуса у лиц старческого возраста // Бюллетень СО РАМН. 2011. Т. 31. № 5. С. 64–67.
13. Карапетян Т. А. Внебольничная пневмония сегодня // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. Сер. «Медицина». 2008. № 1. С. 3–13.
14. Карапетян Т. А., Доршак Н. В. Внебольничная пневмония в Карелии. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. 196 с.
15. Кокосов А. Н. Пневмология в пожилом и старческом возрасте. СПб.: МЕД МАСС МЕДИА, 2005. 712 с.
16. Кудрин А. В., Громова О. А. Микроэлементы в иммунологии и онкологии. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2007. 544 с.
17. Пожилой больной. М.: Издательский дом «Русский врач», 2001. 144 с. Приложение к журналу «Врач».
18. Почвы Карелии: геохимический атлас / Н. Г. Федорев [и др.; отв. ред. В. И. Крутов]; Рос. акад. наук, Карел. науч. центр, Ин-т леса. М.: Наука, 2008. 44 с.
19. Пульмонология / Под ред. А. Г. Чучалина. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2011. 336 с.
20. Ребров В. Г., Громова О. А. Витамины, макро- и микроэлементы. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008. 960 с.
21. Семенов Н. В. Биохимические компоненты и константы жидких сред и тканей человека. М.: Медицина, 1971. 152 с.
22. Скальный А. В. Магний: энергия жизни, уверенность, сила. М.: МедЭкспресс, 2004. 104 с.
23. Скальный А. В. Химические элементы в физиологии и экологии человека: Учеб. пособие для студентов мед. и фармацевтических вузов. М.: ОНИКС 21 век: Мир, 2004. 215 с.
24. Скальный А. В. Микроэлементы: бодрость, здоровье, долголетие. М.: Эксмо, 2010. 288 с.
25. Скальный А. В., Рудаков И. А. Биоэлементы в медицине. М.: ОНИКС 21 век: Мир, 2004. 272 с.
26. Шепеленко А. Ф., Дмитриев Ю. К., Долмашкина М. А., Иващенко В. А., Дуганов В. К. Особенности синдрома воспалительной интоксикации у больных внебольничной пневмонией пожилого возраста // Клиническая медицина. 2006. № 10. С. 40–44.
27. Эмсли Дж. Элементы / Пер. с англ. Е. А. Краснушкиной. М.: Мир, 1993. 256 с.

БОРИС ЗАЛМАНОВИЧ БЕЛАШЕВ

доктор технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геофизики, Институт геологии Карельского научного центра РАН, профессор кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
belashev@krc.karelia.ru

ВАЛЕНТИН ЯКОВЛЕВИЧ ГОРЬКОВЕЦ

доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геофизики, Институт геологии Карельского научного центра РАН, профессор кафедры геологии и геофизики горно-геологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
gorkovets@krc.karelia.ru

МАРИАННА БОРИСОВНА РАЕВСКАЯ

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геофизики, Институт геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
raevskaya@krc.karelia.ru

ОПЫТ ИЗУЧЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ ЮЖНО-КОРПАНГСКОГО УЧАСТКА КОСТОМУКШСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ*

Свойства железистых кварцитов Южно-Корпангского участка Костомукшского рудного поля изучены с применением современных физических методов минералогического анализа. В магнетите железистых кварцитов выявлены трещины, вызывающие его переизмельчение при дроблении. Установлен состав примесей магнетита. Показано, что наиболее чистыми являются руды заключительных стадий прогрессивного метаморфизма.

Ключевые слова: железистые кварциты, магнетит, рентгенофазовый анализ, температура Кюри, ЯГР-спектроскопия

ВВЕДЕНИЕ

Изучение структурных и магнитных свойств железистых кварцитов Южно-Корпангского участка Костомукшского рудного поля предпринято в связи с его разработкой и использованием руды в качестве сырья Костомукшского обогатительного комбината. Качество сырья определяет режимы обогащения руд и производства окатышей. Для оптимизации режимов необходима предварительная характеристика руд.

Реконструировать процесс рудообразования и оценить качество сырья оказалось возможным благодаря свойствам магнетита – минерала с высокой изоморфной емкостью, чувствительного к условиям минералообразования.

Железистые кварциты изучали с применением современных физических методов анализа вещества. По результатам изучения свойств железистых кварцитов выделены зоны с повышенным содержанием магнетита.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА

Железорудные месторождения Костомукшского рудного района сложены метаморфизованными осадочными комплексами позднего архея гимальской серии возрастом 2,85–2,75 млрд лет. Рудные зоны месторождений представлены те-

лами магнетитовых кварцитов в ассоциации со слюдистыми и углеродсодержащими сланцами [4]. Железные руды являются химически чистыми метаморфизованными осадками, на 95 % состоящими из кварца и магнетита (SiO_2 – 40–50 %, Fe_2O_3 – 30–45 %) с содержанием оксидов Al_2O_3 – 1 %, MgO – 1,5 %, CaO – 1,5 %, Na_2O – 0,4 %, K_2O – 0,1 %, сульфидной серы – менее 1 %, фосфора – 0,07 % и крайне незначительными концентрациями рассеянных элементов. В состав магнетитовых кварцитов входят магнетит, менее 1 % гематита и силикатные минералы: биотит, амфиболы, пироксен, гранат. Вмещающими магнетитовые кварциты породами являются слюдистые сланцы – метаморфизованные песчаники и глинистые осадки флишевого типа, чередующиеся с железистыми кварцитами, содержащие до 63 % кремнезема (SiO_2), до 15 % глинозема (Al_2O_3), до 2,5 % CaO и MgO ; содержание серы (S) – 0,02 %, фосфора (P) – 0,03 %, рассеянных элементов (Cu, Co, N, Cr, Sr, Ba и т. д.) – менее 10^{-2} – 10^{-4} %. Секущепластовый силл представлен риодацитовый породой – геллефлинтой с содержанием кремнезема (SiO_2 – 70 %), глинозема (Al_2O_3 – 20 %), окиси железа (Fe_2O_3 + FeO – 1–3 %), MgO и CaO 2,5–3,0 %; Na_2O до 5 %, K_2O до 1,5 %, с незначительными содержаниями серы и фосфора.

Формула стехиометрического магнетита – $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$. Магнетит представлен кристаллами плотностью 4,8–5,3 г/см³, твердостью 5,5–6,0 по шкале Мооса, микротвердостью 535–695 кг/мм². Интервал температур плавления магнетита составляет 1591–1597 °С.

Метаморфизму железистых кварцитов отвечает эпидот-амфиболитовая фация (нагрев до 550 °С) и амфиболитовая фация (нагрев 650–700 °С). Оказывая влияние на химизм магнетита, метаморфизм меняет в нем содержание примесей. В условиях высокой амфиболитовой фации метаморфизма повышается содержание титана, ванадия, магния и уменьшается содержание германия. Метасоматические процессы формируют богатые руды [3].

Эволюцию железистых кварцитов прослеживают по составу и текстуре руд, содержанию, размерам, форме и состоянию кристаллов магнетита. Исходный тонкополосчатый мелкозернистый кварцит содержит мелкие кристаллы низкотемпературного магнетита, кристаллы грюнерита, биотита и кварца. В тонкокристаллическом сегрегационном кварците с повышением температуры и давления полосчатость исчезает, магнетит перекристаллизуется в мелкие, до 0,5 мм, кристаллы. На заключительной стадии образуется раскристаллизованный железистый кварцит с крупными (1–2 см) кристаллами магнетита. Метасоматические пятнистые кварциты содержат большое количество мелких кристаллов магнетита [5]. В табл. 1 дана характеристика отобранных проб.

Таблица 1

Описание проб		
№	Проба	Качественная характеристика руд
1	577-3	Средние руды. Слоистый грюнерит-магнетитовый кварцит с биотитом. Мелкие зерна магнетита
2	577-6	
3	585-2	Средние руды. Биотит-магнетитовый кварцит с амфиболом. Магнетит перекристаллизован. Размер зерен до 0,5 мм
4	685-3	
5	605-31	Биотит-грюнерит-магнетитовый кварцит
6	605-33	
7	605-33a	Богатая руда. Магнетитовый кварцит. Магнетит перекристаллизован
8	605-35	Пятнистый мелкозернистый магнетитовый кварцит
9	683-4	Бедная руда. Грюнерит-магнетитовые кварциты. Мелкие зерна
10	689-4	Богатая руда. Метасоматический магнетитовый кварцит с жилками микроклинового гранита. Мелкие зерна магнетита
11	689-5	
12	699-5	Бедная руда. Тонкослоистый магнетитовый кварцит
13	12	Богатая руда. Амфибол-магнетитовый кварцит
14	12-1	
15	12-1г	

Из морфоструктурных разновидностей магнетита выделяют гомогенный магнетит, форми-

рующий субидиоморфные зерна без включений, и пойкилитовый магнетит с ксеноморфными зернами включений преимущественно кварца, биотита, амфибола, реже пирротина. Помимо минеральных примесей магнетит содержит изоморфные примеси – катионы магния, кальция, алюминия, других элементов, частично замещающие железо в кристаллической решетке. Изоморфные примеси отражают геохимические условия образования и преобразования магнетита [7].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пробы железистых кварцитов отбирали на выбранных по геологическим признакам площадках Южно-Корпангского участка и из керна скважин. Пробы с № 12, 12-1, 12-1г были отобраны на Корпангском месторождении.

Из отобранных образцов изготавливали шлифы. Образцы дробили и из порошков мокрой магнитной сепарацией выделяли фракции магнетита. У полученных фракций магнетита измеряли магнитную восприимчивость капнометром «КТ-5».

При изучении свойств железистых кварцитов и входящего в них магнетита применяли электронно-зондовую микроскопию, рентгенографический фазовый анализ, ЯГР-спектроскопию, термический анализ.

Вещественный состав шлифов проб анализировали с помощью микроскопа «Vega LSH» и анализатора «Inca Energy 350». Данные о примесях и параметрах элементарной ячейки магнетита получали обработкой рентгенограмм, зарегистрированных на рентгеновском дифрактометре «ARLXTRA» с использованием $\text{Cu K}\alpha$ излучения. Дифрактограммы проб порошков (0,05–0,07 мм) магнетитов получали в диапазоне углов $2\theta = 0\text{--}90^\circ$ и обрабатывали программой «Siroquant». Мессбауэровскую (ЯГР) спектроскопию применяли для получения оценки соотношения катионов двух- и трехвалентного железа в магнетите и сведений об их распределении по структурным позициям. Спектры порошков магнетитов (0,05–0,07 мм) регистрировали в 512 каналах спектрометра «Ms-1104 Em» с источником ^{57}Co в матрице родия при комнатной температуре. Их обработку вели по программе «Univem Ms», используя в качестве критерия разложения спектра на компоненты параметр ($\min \chi^2$), оценивающий приближение экспериментального и модельного спектров. Изомерный химический сдвиг рассчитывали относительно $\alpha\text{-Fe}$ [6].

Термический анализ порошковых образцов навеской 50–70 мг проводили в атмосфере аргона в диапазоне 20–700 °С на установке STA 449 C с ячейкой, находящейся в магнитном поле. Температуру Кюри определяли по эндотермическому эффекту на кривой дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и скачку потерь массы на термогравиметрической (ТГ) кривой.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Примеры микроизображений железистых кварцитов приведены на рис. 1. Изображения строки отвечают выбранной пробе железистых кварцитов. Столбцы дают изображения железистых кварцитов при разных увеличениях. Первый столбец отражает изменение текстуры железистых кварцитов. Второй столбец дает сведения о содержании, форме и размерах кристаллов магнетита. Третий столбец показывает расположение магнетитовых и силикатных компонентов

руды. Четвертый столбец представляет полученные с высоким увеличением изображения акцессорных образований монацита, паризита, оксида вольфрама, халькопирита. В шлифах также обнаружены циркон, галенит, торид, пирротин, сфалерит, сплав никеля и железа. На рис. 1к, о видна сеть трещин в кристаллах магнетита.

Рентгенограммы образцов проб 12-1г и 689-5 даны на рис. 2, а результаты фазового анализа и определения параметров элементарной ячейки – в табл. 2.

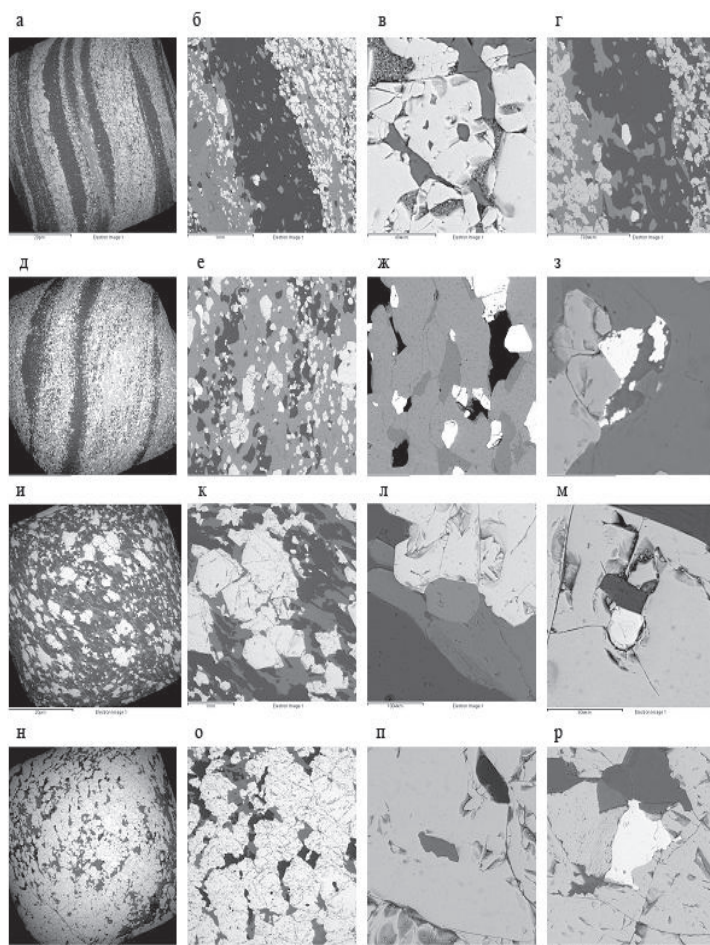


Рис. 1. Микронзондовые изображения шлифов железистых кварцитов проб 577-6 (а-г), 683-4 (д-з), 685-2 (и-м), 689-4 (н-р)

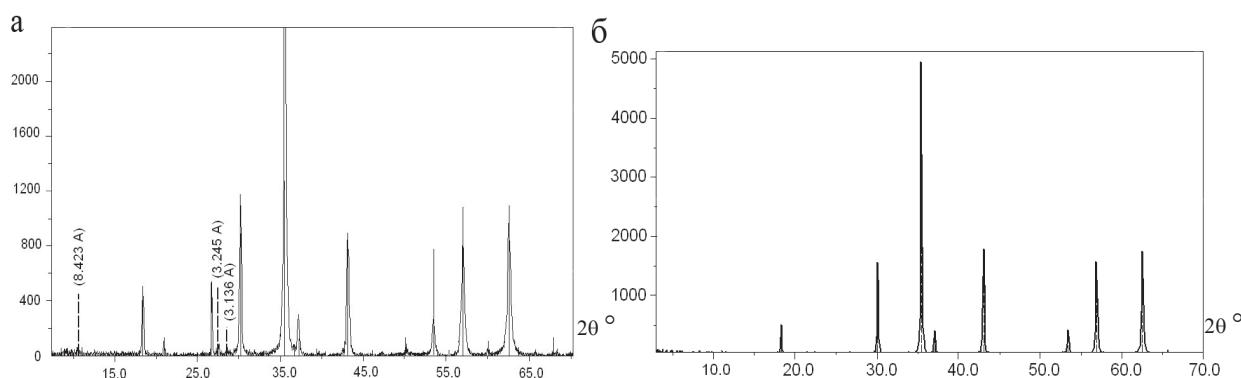


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы проб 12-1г (а) и 689-5 (б)

Таблица 2
 Параметры элементарной ячейки и состав примесей магнетита

№	Проба	$a \pm \Delta a$, нм	V , нм ³	Минеральные примеси
1	12	$0,83962 \pm 0,00002$	0,59190	Кварц
2	12-1	$0,83958 \pm 0,00003$	0,59181	Кварц, амфибол
3	12-1г	$0,83958 \pm 0,00004$	0,59182	Кварц, амфибол
4	605-31	$0,83962 \pm 0,00002$	0,59191	Кварц
5	605-35	$0,83970 \pm 0,00001$	0,59206	Кварц
6	683-4	$0,83963 \pm 0,00001$	0,59192	Кварц
7	605-33	$0,83982 \pm 0,00002$	0,59231	—
8	605-33а	$0,83962 \pm 0,00002$	0,59191	—
9	585-2	$0,83976 \pm 0,00002$	0,59219	Кварц
10	685-3	$0,83977 \pm 0,00002$	0,59221	Кварц
11	689-4	$0,83973 \pm 0,00001$	0,59214	Кварц
12	689-5	$0,83963 \pm 0,00002$	0,59192	—
13	577-3	$0,83973 \pm 0,00001$	0,59212	Кварц
14	577-6	$0,83997 \pm 0,00002$	0,59236	Кварц
15	699-5	$0,83976 \pm 0,00002$	0,59221	Кварц

Пример мессбауэровских спектров магнетита дает рис. 3, на котором приведены ЯГР-спектры образцов проб 577-6 и 689-4 и результаты их разложения на компоненты.

Результаты ЯГР-спектроскопии и термического анализа сведены в табл. 3. На рис. 4 даны кривые ДСК и ТГ образцов магнетита проб 683-4 (а) и 577-3 (б) с крайними значениями температуры Кюри.

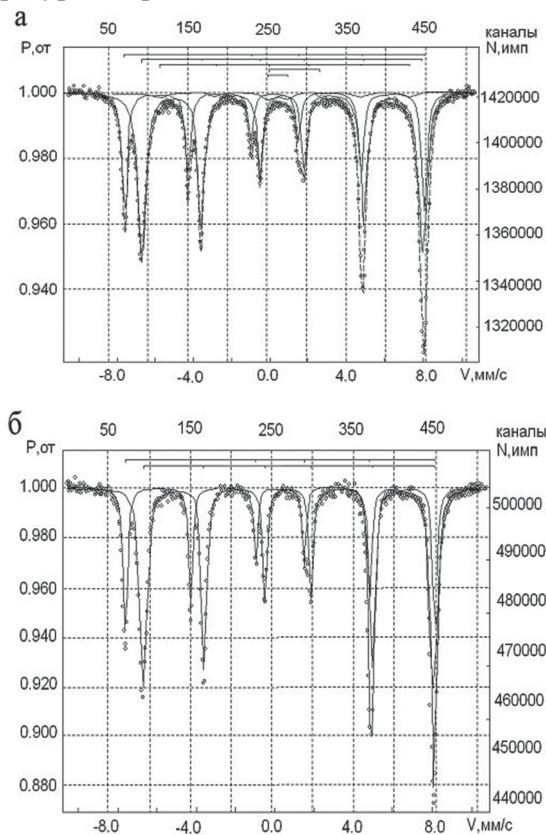


Рис. 3. ЯГР-спектры образцов проб 577-6 (а) и 689-4 (б), их разложение на компоненты

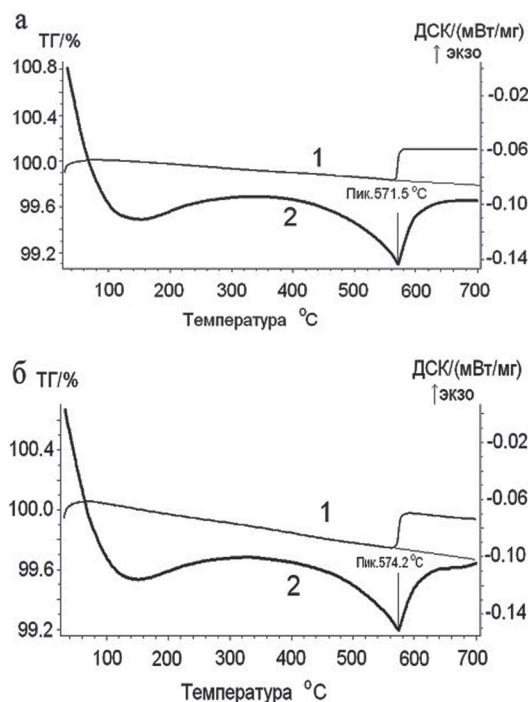


Рис. 4. Кривые термического анализа ТГ (1) и ДСК (2) для оценки температуры Кюри образцов магнетита проб 683-4 (а) и 577-3 (б)

ОБСУЖДЕНИЕ

Микроизображения на рис. 1 наглядно отражают эволюционные преобразования железистых кварцитов при метаморфизме. Процесс эволюции железистых кварцитов связан с перекристаллизацией, в ходе которой железосодержащий силикатный минерал грюнерит заменяется роговой обманкой. При перекристаллизации исчезает характерная для исходных железистых кварцитов полосчатость, магнетит очищается от примесей. При быстрой закалке образуются мелкие кристаллы магнетита. Кристаллы магнетита заключительных этапов прогрессивного метаморфизма становятся более однородными (рис. 1п).

Характерным элементом части крупных кристаллов магнетита являются секущие их трещины (рис. 1к, о). Трещины могут приводить к переизмельчению кристаллов и потерям магнетита в процессе дробления.

По структурным свойствам рудообразующий минерал железистых кварцитов магнетит принадлежит к группе сложных окислов $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$ со структурной обращенной шпинели пространственной группы $\text{Fd}3m$, на одну элементарную ячейку которой приходится 8 формульных единиц. Находящиеся в узлах ГЦК решетки анионы кислорода образуют плотную кубическую трехслойную упаковку. Катионы железа частично заполняют междоузлия. В реальных кристаллах магнетита анионы кислорода смещены из идеальных позиций в направлении $[111]$ [7]. При этом по сравнению с идеальной решеткой тетраэдрические пустоты увеличены, а октаэдрические — уменьшены.

Таблица 3

ЯГР-характеристики и температура Кюри образцов магнетита

№	Проба	Температура Кюри, °С	Отношение S ₁ /S ₂	Эффект, %	$\chi \cdot 10^{-5}$, м ³ /кг	Железосодержащие фазы и распределение железа по фазам, %
1	577-3	574,2	0,506	12,348	236 ± 19	Mgt 99,2 %; Fe ²⁺ силиката 0,8 %
2	577-6	573,9	0,507	7,975	120 ± 19	Mgt 97,8 %; Fe ²⁺ силиката 0,8 % Fe ³⁺ парамагнитной фазы 1,8 %
3	585-2	573,7	0,514	10,373	214 ± 27	Mgt 100 %
4	685-3	573,9	0,503	8,706	149 ± 14	Mgt 98,3%; Гетит? – 1,7%
5	605-31	572,1	0,516	11,102	270 ± 18	Mgt 100 %
6	605-33	573,4	0,519	13,033	360 ± 26	Mgt 99,8 %; Fe ²⁺ силиката 0,2 %
7	605-33a	573,4	0,513	12,351	321 ± 17	Mgt 100 %
8	605-35	572,4	0,523	13,329	373 ± 13	Mgt 100 %
9	683-4	571,5	0,528	13,338	258 ± 8	Mgt 100 %
10	689-4	574,0	0,511	12,710	458 ± 33	Mgt 100 %
11	689-5	574,1	0,519	12,978	419 ± 20	Mgt 100 %
12	699-5	573,5	0,524	12,450	235 ± 10	Mgt 100 %
13	12	574,0	0,500	11,302	256 ± 17	Mgt 100 %
14	12-1	573,9	0,504	10,081	142 ± 28	Mgt 100 %
15	12-1r	571,8	0,542	12,337	170 ± 10	Mgt 99,0 %; Fe ²⁺ силиката 0,3 % Fe ³⁺ не идентифицировано 0,7 %

Наличие минеральных силикатных примесей магнетита определяют по появлению в ЯГР-спектрах отдельных дублетов. Примеси с магнитным порядком дают характерные сексты. В рентгенограммах магнетита минеральные примеси идентифицируют по дополнительным рефлексам.

В спектрах проб 577-3 и 605-33 (табл. 3) помимо секстеров C₁ и C₂ обнаружены дублеты Fe²⁺, принадлежащие силикатным минералам с содержанием 0,8 и 0,2 % [6]. В пробах 577-6, 12-1r вместе с Fe²⁺ силикатной фазой (0,4 и 0,3 %) присутствует Fe³⁺ фаза, отнесенная к тонкодисперсному суперпарамагнитному оксиду железа, с содержанием соответственно 1,8 и 0,7 %. В пробе 685-3 возможна примесь гетита на уровне ошибки определения. Остальные образцы представлены магнетитом с содержанием железа 100 %.

Сравнение этих данных с данными рентгенофазового анализа (табл. 2) показывает различия в составе определяемых механических примесей магнетита. Тот факт, что ЯГР-анализ дает малое количество примесей, связан с информативностью метода лишь для железосодержащих минералов. ЯГР-спектроскопия чувствует амфибол, но не кварц. В этом отношении рентгенофазовый анализ универсален. Согласно его результатам, лишь немногие пробы магнетита являются чистыми, не содержащими минеральных примесей. Метод ЯГР-спектроскопии дает количественную оценку содержания примеси по площади под графиком соответствующей компоненты модельного спектра. По его оценке (табл. 3), содержание магнетита в исследуемых образцах составляет 98–100 %.

Что касается непосредственно магнетита, его структурные характеристики, полученные в результате применения этих методов, являются в основном стандартными. На рентгенограммах

магнетита все основные рефлекссы отвечают магнетиту. Из результатов ЯГР-спектроскопии следует, что по изомерному химическому сдвигу Is, квадратурному расщеплению Qs и магнитному полю H на ядрах Fe⁵⁷ компоненты спектра также соответствуют магнетиту. Секстет C₁ с Is = 0,26 мм/с, Qs = 0,00 мм/с и H = 488 кЭ дают ионы Fe³⁺ в тетраэдрической координации (тетраэдрической позиции А). Секстет C₂ (Is = 0,67 мм/с, Qs = 0,00 мм/с и H = 457 кЭ) обусловлен связанными электронным обменом ионами Fe²⁺ и Fe³⁺ в октаэдрической позиции (В). Нулевое квадратурное расщепление секстеров характерно для минералов с кубической структурой. Наличие электронного обмена подтверждает среднее значение изомерного сдвига между ионами Fe²⁺ и Fe³⁺ [2].

Причиной отклонения параметров кристаллической ячейки магнетита от нормы 8,396А [7] (табл. 2) считают изоморфные катионы, отличающиеся по радиусам от катионов железа. Распространенными изоморфными ионами являются Mg, Al, Ca. Замещение иона железа катионом с меньшим радиусом ведет к уменьшению объема элементарной ячейки, а замещение ионом большего радиуса – к увеличению этого объема.

По отношению площадей секстеров S₁/S₂ судят о соотношении заселенностей позиций А и В. Для кубической структуры магнетита расчетное соотношение равно 0,5. У стехиометрического магнетита реальное отношение лежит в диапазоне 0,49–0,52, что обусловлено чуть большей величиной резонансного эффекта для тетраэдрических ионов железа [8]. Для пробы 689-4 отношение площадей секстеров составляет 0,511. Исследуемый магнетит можно считать чистым, не содержащим заметного количества изоморфных примесей.

Отклонение параметра S₁/S₂ от приведенных значений дает основание говорить о наличии изоморфных примесей и определять валентность

замещающего элемента. Замещение ионов Fe^{3+} в октаэдрической позиции ионами Me^{3+} приводит к выводу из электронного обмена части ионов Fe^{2+} (В), дающих самостоятельный секстет с меньшим полем на ядрах Fe^{57} , чем поле от ионов железа октаэдрической позиции. Замещение ионов Fe^{2+} ионами Me^{2+} приводит к выводу из обмена ионов Fe^{3+} , которые дают свой секстет, накладывающийся на секстет тетраэдрических ионов Fe^{2+} . Оценки значений температуры Кюри (T_c), как и отношения S_1/S_2 , свидетельствуют об отсутствии в образцах магнетита изоморфных примесей. При ошибке определения T_c 1° отклонения от нормы 575° имеют лишь пробы 683-4, 12-1г, 605-31 и 605-35.

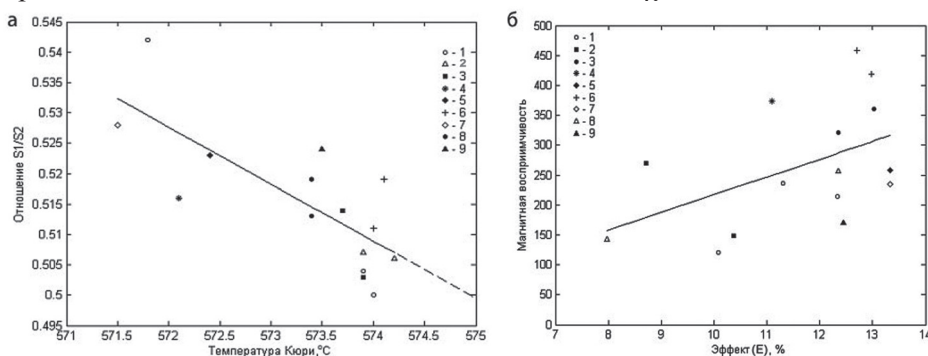


Рис. 5. Графики регрессии $S_1/S_2 = -0,0094 T_c + 5,8954$ (а) и $\chi = 29,6653E - 79,5346$ (б): 1 – пробы 12,12-1,12-1г; 2 – 577-3,577-6; 3 – 585-2, 685-3; 4 – 605-31, 5 – 605-35; 6 – 689-4; 689-5; 7 – 683-4; 8 – 605-33, 605-33а; 9 – 699-5

ВЫВОДЫ

1. Образцы железистых кварцитов отбирали в соответствии с реконструкцией рудообразующих процессов на исследуемом участке Костомукшского рудного поля.

2. Выявлены тектурные особенности и акцессорные соединения железистых кварцитов. В магнетите обнаружены трещины, вызывающие его переизмельчение и потери в процессе дробления.

Рис. 5 построен по данным табл. 3 и результатам расчета линейных регрессионных зависимостей температуры Кюри и отношения S_1/S_2 , эффекта (Е) и магнитной восприимчивости χ .

Экстраполяция зависимости $S_1/S_2 = -0,0094T_c + 5,8954$ (рис. 5а) к известному для стехиометрического магнетита и его чистых природных разновидностей значению температуры Кюри $T_c = 575^\circ\text{C}$ дает значение $S_1/S_2 = 0,4995$, близкое к теоретическому 0,5.

Зависимость на рис. 5б указывает на связь случайных величин эффекта – площади под ЯГР-спектром и магнитной восприимчивости магнетитов χ .

3. Установлен состав минеральных примесей в магнетитах. Продemonстрировано влияние изоморфных примесей на объем элементарной ячейки и значение температуры Кюри.

4. Наиболее чистыми оказались руды пятнистой текстуры с крупными кристаллами магнетита. Пробы магнетитов этих руд имеют высокие значения магнитной восприимчивости, близкое к 0,5 отношение S_1/S_2 и температуру Кюри, приближающуюся к 575°C .

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бенкрофт Г., Меддок Р., Барнс Р. Применение эффекта Мессбауэра к минералогии силикатов. 1. Силикаты железа с известной структурой // Физика минералов. М.: Мир, 1971. С. 179–204.
- Гапеев А. К., Гендлер Т. С., Кузьмин Р. Н. и др. Исследование мессбауэровских спектров ферритов-шпинелей системы $\text{Fe}^{3+}\text{-xMg}^{2+}\text{O}_4$ // Кристаллография. 1972. Т. 17. Вып. 1. С. 141–145.
- Горьковец В. Я., Раевская М. Б. Геология и рудоносность геологических формаций Костомукшского рудного района // Крупные и суперкрупные месторождения: закономерности размещения и условия образования / Под ред. Д. В. Рундквиста. М.: ИГЕМ РАН, 2004. С. 95–109.
- Горьковец В. Я., Раевская М. Б., Белоусов Е. Ф., Инина К. А. Геология и металлогения района Костомукшского железорудного месторождения. Петрозаводск: Карелия, 1981. 143 с.
- Железисто-кремниевые формации докембрия европейской части СССР // Минералогия / Отв. ред. Б. И. Пирогов. Киев: Наукова думка, 1989. 168 с.
- Коровушкин В. В. ЯГР-спектроскопия в практике геолого-минералогических работ (Лабораторные и технологические исследования минерального сырья: Обзор). М.: АО «Геоинформмарк», 1993. 39 с.
- Мошкина Е. В., Раевская М. Б., Репникова Е. Ф., Фофанов А. Д. Уточнение структуры магнетитов Костомукшского железорудного месторождения методом полнопрофильного анализа // Материалы IX молодежной конференции, посвященной памяти К. О. Кратца «Геология и экология Фенноскандии, северо-запада и центра России». Петрозаводск, 2002. С. 130–133.
- Me n i l F. Systematic trends of ^{57}Fe Mossbauer isomer shifts in (FeOn) and (FeFn) polyhedra. Evidence of new correlation between the isomer shifts and the inductive effect of the competing bond $T\text{-X}$ (-Fe) (where X is O or F and T element with positive charge) // J. Phys. and Chem. Solids. 1985. Vol. 46. № 7. P. 763–789.

ЛИДИЯ ВЛАДИМИРОВНА ТИМЕЙКО

кандидат биологических наук, доцент кафедры агрономии, землеустройства и кадастров агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

tim@psu.karelia.ru

ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ КОРНЕЕВ

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры агрономии, землеустройства и кадастров агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

tim@psu.karelia.ru

ЛЮБОВЬ ПАВЛОВНА ЕВСТРАТОВА

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой агрономии, землеустройства и кадастров агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

levstratova@yandex.ru

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ УРОЖАЙНОСТИ КАРТОФЕЛЯ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ РОССИИ*

Обсуждаются результаты многолетних полевых производственных, полупроизводственных и мелкоделяночных опытов по использованию органических и минеральных удобрений, их видов, доз, способов внесения, совершенствования приемов агротехники при возделывании картофеля в Карелии на почвах, различных по гранулометрическому составу и плодородию.

Ключевые слова: картофель, минеральные и органические удобрения, ширина междурядий, урожай

ВВЕДЕНИЕ

Повышение рентабельности картофелеводства по-прежнему остается важнейшей задачей растениеводства России [15]. В последние годы в силу различных причин произошло удорожание производства картофеля в несколько раз, что отразилось на конкурентоспособности отечественного продукта на продовольственном рынке по сравнению с аналогичным, поступающим из-за рубежа. Известно, что выращивание картофеля связано со значительным отчуждением органических и минеральных веществ из почвы, которое возрастает с повышением урожайности [2]. В первую очередь это обусловлено биологическими особенностями растений, связанными с накоплением большого количества сухого вещества при относительно слабо развитой корневой системе. Поэтому при составлении системы удобрения картофеля следует учитывать характеристики участка, химический состав вносимых солей, их доступность растениям, потенциальные потребности сорта. В этой связи важнейшим фактором роста эффективности растениеводства является повышение плодородия почв на основе научно обоснованного, экологически безопасного, ресурсосберегающего применения органических, макро- и микроминеральных и известковых удобрений, а также оптимизация всех элементов технологии возделывания сельскохозяйственных культур [1], [5], [12]. Правильно сбалансированная система удобрений больше, чем многие другие факторы, обуславливает

технологические, продовольственные и семенные качества клубней картофеля [14], [15].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В течение последних 30 лет сотрудниками кафедры агрономии, землеустройства и кадастров агротехнического факультета Петрозаводского государственного университета проведены многочисленные полевые производственные, полупроизводственные и мелкоделяночные опыты, целью которых являлись поиск путей рационализации использования вносимых удобрений, совершенствование элементов технологии для повышения урожайности и качества клубней картофеля – основной продовольственной культуры на Северо-Западе России.

В период исследования изучено влияние ряда важнейших абиотических и антропогенных факторов на рост, развитие и формирование клубней растениями картофеля, в частности: дозы, способы, сроки и сочетания внесения различных видов органических и минеральных удобрений для повышения эффективности их использования в зависимости от типа почвы, ее гранулометрического состава, предшественников, агрохимических характеристик участка. Большое внимание уделено новым формам минеральных и органо-минеральных удобрений; проведена сравнительная оценка традиционных и вновь разрабатываемых схем и способов посадки картофеля, размещения растений на площади с учетом ландшафта поверхности почвы.

Исследования выполнены на коллекционном участке кафедры агрономии, землеустройства и кадастров, а также в производственных посадках на базе сельхозпредприятий республики. На протяжении периода наблюдений использованы элитные семена картофеля среднераннего сорта Невский, который является районированным для Карелии и показывает высокие результаты по урожайности в производственных условиях. Полевые опыты и лабораторные анализы проведены в соответствии с общепринятыми методиками таких исследований, результаты фенологических наблюдений и биометрических измерений статистически и математически обработаны [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Увеличение урожайности картофеля, улучшение вкусовых показателей клубней и повышение почвенного плодородия во многом связаны с применением органических удобрений [2], [3]. Они содержат практически все питательные вещества, улучшают структуру почвы, ее водный, воздушный и тепловой режимы и другие физические свойства, поддерживают плодородие почвы на высоком уровне, содействуя накоплению гумуса.

В настоящее время для увеличения объемов органических удобрений перспективной является утилизация древесной коры (отходов лесоперерабатывающей промышленности) через компостирование. Использование такого компоста обеспечивает возврат минеральных соединений в кругооборот веществ в земледелии, повышает плодородие почвы, снижает негативное влияние отходов лесного комплекса на окружающую среду [9].

В работе изучены приемы компостирования измельченной древесной коры в чистом виде и с добавлением 0,5 и 1 % полного минерального удобрения по действующему веществу NPK к абсолютно сухой массе отходов. Влияние полученных компостов оценивали в сравнении с действием навоза, минеральных удобрений, внесенных под картофель в эквивалентных количествах по содержанию азота (N), фосфора (P), калия (K).

Установлено, что в Карелии действие компоста из коры на урожайность картофеля в первую очередь зависит от исходных показателей плодородия и гранулометрического состава почвы (табл. 1). Максимальное положительное действие компостированной коры выявлено на слабоокультуренной почве. Так, рост урожайности по сравнению с контрольным вариантом (без удобрений) составляет 11,4 %, в то время как на хорошо окультуренной почве – 7,2 %. Реакция растений на внесение навоза также более выражена на низкоплодородных почвах и составляет 11,1 %, что на 7,4 % больше контроля на хорошо окультуренном участке.

Таблица 1

Сравнительная оценка действия видов органических удобрений на урожай картофеля сорта Невский

Вариант опыта	Суглинистая слабо окультуренная почва		Супесчаная хорошо окультуренная почва	
	Средний урожай за 4 года, т/га	Прибавка к контролю, %	Средний урожай за 4 года, т/га	Прибавка к контролю, %
Контроль (без NPK)	17,2	–	27,6	–
Навоз	19,1	+ 11,1	29,8	+7,4
Кора свежая	15,7	- 9,1	25,8	-6,5
Компост (чистая кора)	16,2	-9,5	26,6	-3,6
Компост (кора + NPK)	19,6	+11,4	29,6	+7,2
N ₆₀ P ₆₀ K ₉₀	18,9	+10,0	33,4	+21,0
Точность опыта, %	2,6		3,3	

Внесение некомпостированной древесной коры и компостированной без минеральных удобрений на суглинистой слабоокультуренной почве привело к снижению урожая клубней на 9,1 и 9,5 % относительно контрольного варианта, а на супесчаной хорошо окультуренной – на 6,5 и 3,6 % соответственно. Следовательно, без добавления минеральных удобрений компостированная и некомпостированная кора являются только оструктурирующими компонентами и 1–2 года после внесения сами поглощают значительное количество питательных элементов из почвы для создания оптимальной среды обитания бактериям, минерализующим органическую массу. Полученные данные показывают, что органические удобрения более действенны на слабо плодородных участках и в зависимости от состава степени разложения оказывают двоякое действие: окультурирование почв и обеспечение элементного питания растений.

Минеральные удобрения в эквивалентных количествах по NPK на хорошо окультуренных почвах вызывают прирост урожая на 21 %, в то время как на слабоокультуренных их действие менее выражено (прибавка урожая – 10 %). Эти данные противоречат литературным, но, возможно, могут быть связаны с недостаточным количественным внесением элементов питания относительно потребности в них растений для формирования урожая [2].

Таким образом, в условиях Северо-Запада утилизация древесной коры через компостирование является перспективной как для улучшения экологической обстановки в сельских поселениях, так и для увеличения количества органических удобрений, внесение высоких доз которых непременно приводит к улучшению состояния почв и, соответственно, росту количества и качества производимой продукции.

В растения картофеля азот поступает в течение всей вегетации, однако больше всего его потребляется в период бутонизации – цветения. Однако хорошая обеспеченность азотом на ранних этапах роста способствует более быстрому и мощному формированию вегетативной массы, благодаря чему растения продуктивнее используют весенние запасы влаги в почве и лучше формируют урожай клубней [10], [13]. На подзолистых почвах Северо-Западного региона азоту принадлежит особая роль в формировании урожая. Этот важнейший элемент питания оказывает влияние на величину урожая, сроки созревания, качество клубней, их лежкость. Именно поэтому проведено изучение влияния возрастающих доз азотных удобрений при локальном внесении на рост, развитие картофеля, качество продукции и урожайность.

На среднекультуренных дерново-подзолистых супесчаных почвах к фоновым дозам $P_{60}K_{60}$ добавляли азотные удобрения (аммонийная селитра) в дозах N_{30} , N_{60} , N_{90} , N_{120} (табл. 2).

Таблица 2

Влияние доз азотных удобрений при локальном внесении на урожай клубней картофеля сорта Невский

Вариант опыта, кг д. в./га	Средний урожай за 5 лет, т/га	Прибавка к контролю, %
$P_{60}K_{60}$ (контроль)	35,0	—
$N_{30}P_{60}K_{60}$	41,2	17,7
$N_{60}P_{60}K_{60}$	44,2	26,3
$N_{90}P_{60}K_{60}$	48,7	39,1
$N_{120}P_{60}K_{60}$	48,7	39,1

Примечание: д. в. – действующее вещество удобрения.

Показательно, что рост дозы вносимых азотных удобрений не приводит к линейному увеличению урожая клубней. Так, при удвоении дозы азота (с 30 до 60 кг/га) урожай клубней возрос на 8,6 %, увеличение вносимого элемента в 3 раза привело к приросту продуктивности на 11,4 %. Прибавка урожая клубней относительно контроля составила от 17,7 до 39,1 %. Дальнейшее увеличение вносимой дозы азота положительной реакции не вызывает. Азотные удобрения усиливают рост листьев и стеблей, что удлиняет вегетационный период, задерживает созревание клубней [10]. Наступление фенофаз у опытных растений по мере увеличения внесенных доз азотных удобрений происходит с отставанием от контроля ($P_{60}K_{60}$) по вариантам на 1, 2, 3 дня соответственно. Применение повышенных доз азотных удобрений приводит к мощному развитию надземной массы, ассимиляционного аппарата растений. В связи с этим отток пластических веществ из листьев в аккумулирующие органы ослабевает, интенсивность накопления крахмала снижается, что также подтверждается литературными сведениями [4]. Повышение нормы азота на дерново-подзолистых почвах отри-

цательно влияет на состояние клубней, вызывая потемнение. Оценка пищевых качеств показала линейное снижение показателей содержания крахмала с 13,6 до 12,4 % по мере увеличения дозы азотных удобрений (табл. 3).

Таблица 3

Влияние дозы азотных удобрений на качественные показатели клубней картофеля сорта Невский (в среднем за 5 лет)

Вариант опыта, кг д. в./га	Содержание, %		Вкусовые достоинства, балл	Потери урожая при длительном хранении, %
	Крахмал	Сухое вещество		
$P_{60}K_{60}$	13,6	20,1	5	1,4
$N_{30}P_{60}K_{60}$	13,6	20,1	5	2,0
$N_{60}P_{60}K_{60}$	13,5	20,0	5	4,0
$N_{90}P_{60}K_{60}$	12,8	19,3	4	8,5
$N_{120}P_{60}K_{60}$	12,4	18,9	3	10,6

Отмечается ухудшение вкусовых качеств производимой продукции. Во время дегустации самый низкий балл получили клубни в варианте $N_{120}P_{60}K_{60}$. Сходная тенденция влияния дозы удобрения получена и по показателю накопления сухого вещества к периоду общей уборки урожая. Кроме того, выявлено повышенное содержание влаги, незрелость эпидермиса и запасующих тканей клубней, что способствует значительным потерям при хранении. По данным Ю. С. Корнеева (1996), они могут достигать до 10,6 % [10]. Таким образом, внесение азотных удобрений выше 90 кг д. в./га экономически и экологически не оправдано, а также нерационально в отношении общехозяйственного окультуривания почв.

Эффективность вносимых минеральных удобрений в значительной степени определяется способом внесения. В сельскохозяйственных предприятиях Республики Карелия основной способ внесения удобрений – разбросной. Однако в нашей стране и за рубежом опыты с локальным внесением показали более высокую эффективность удобрений по сравнению с разбросным способом [8], [11]. Совершенствование технологии внесения минеральных удобрений, правильный выбор способа внесения – важное условие для повышения их эффективности.

В связи с вышеизложенным значительный интерес вызывает изучение влияния отдельных элементов питания и их взаимодействия при разных способах внесения на урожай картофеля [6], [8]. Схема опыта включала варианты, позволяющие выявить эффективность каждого питательного элемента при различных способах внесения и глубине заделки в почву. Удобрения при локальном способе вносили лентой в борозду, на 5 см ниже посадочных клубней, а разброс – под культивацию (табл. 4).

Результаты исследований показали, что разбросное внесение хлорсодержащих калийных удобрений (хлористый калий) не приводит к сни-

жению урожайности хлорофобного картофеля, в то же время замена локального внесения фосфорных (двойной суперфосфат) и азотных (аммонийная селитра) удобрений разбросным способом снижает ее на 9–10 %. Возможно, внесение близко к поверхности почвы привело к быстрым потерям азота в виде аммиака, а пересыхание верхней части пахотного слоя снизило эффективность фосфорных удобрений, требующих в силу слабой подвижности достаточного количества влаги для растворения, и они остались неиспользованными растениями.

Таблица 4

Влияние способов внесения различных видов удобрений на урожай картофеля сорта Невский

Вариант опыта (дозы удобрений, кг д. в./га)	Средний урожай за 5 лет, т/га	Прибавка к контролю, %
$N_{60}P_{60}K_{60}$ локально, контроль	27,9	–
$N_{60}P_{60}$ локально, K_{60} вразброс	28,1	+7,2
$N_{60}K_{60}$ локально, P_{60} вразброс	26,0	-19
$P_{60}K_{60}$ локально, N_{60} вразброс	26,1	-18
P_{60} локально, $N_{60}K_{60}$ вразброс	27,5	-4

Выявленные закономерности влияния видов удобрений при сочетании различных способов их внесения показывают, что наиболее целесообразно внесение $N_{60}P_{60}K_{60}$ – локально, в рядок и $N_{60}P_{60}$ – локально + K_{60} – вразброс. Такое распределение внесения элементов питания при использовании хлористого калия и калийной соли позволит снизить негативное влияние хлора на растения картофеля.

Вопросы зависимости урожая от густоты посадки картофеля и ширины междурядий являются дискуссионными. В настоящее время в Карелии картофель в основном высаживают с шириной междурядий 70 см. Однако с переходом на энергонасыщенные тракторы наблюдается несоответствие ширины междурядий и ширины колес. Это приводит к уплотнению почвы, уменьшению площади питания растений, увеличению числа и размеров комьев, повреждению корневой системы при междурядной обработке. В результате получаем недобор урожая, уменьшение фракции крупных клубней и ухудшение их качества [6], [11].

Полевые опыты показали, что при одинаковом числе растений на площади увеличение ширины междурядий с 70 см (традиционная ширина междурядий, схема посадки 70*30) до 90 см (схема посадки 90*25) не приводит к снижению урожайности (табл. 5).

Наоборот, во влажные годы увеличение междурядий способствовало росту урожая почти на

10 %, так как при окучивании высоту гребней можно увеличить. Уменьшение расстояния между рядами до 60 см (схема посадки 60*35) приводит к снижению урожайности на 4,1 % относительно контрольного варианта (70*30).

Таблица 5

Урожайность картофеля сорта Невский при различных схемах посадки

Вариант опыта (схема посадки, см)	Средний урожай клубней за 5 лет, т/га	Прибавка к контролю, %
70*30	22,3	–
90*25	24,5	+9,9
60*35	21,4	-4,1

В посадках с широкими междурядьями создаются лучшие условия для реализации потенциальной продуктивности картофеля интенсивных сортов, уменьшается плотность почвы в зоне клубнеобразования, повышается товарность клубней, создаются оптимальные условия влажности воздуха, что снижает поражение фитофторозом.

Вызывает интерес положение о влиянии формы поверхности почвы при посадке картофеля на формирование клубней. Изучены такие варианты: 70*30 (посадка на ровной поверхности, контроль); 70*30 (посадка на гребнистой поверхности); 110*30–30 (посадка грядково-ленточным способом). Число растений по вариантам на площади одинаковое (из расчета 50 тыс. шт./га). Выявлено, что посадка клубней на гребнях способствовала росту урожайности картофеля в среднем на 13,8 % за все годы исследований по сравнению с посадкой на ровной поверхности. Посадка картофеля грядково-ленточным способом приводила к снижению урожайности независимо от погодных условий в среднем на 15,5 % по сравнению с контрольным вариантом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетние полевые исследования свидетельствуют о том, что на дерново-подзолистых почвах обязательным является использование органических удобрений в виде компостов различного состава для оструктурирования почвы и повышения плодородия. Благоприятным по действию на урожай и его сохранность является сочетание органических компонентов с минеральными удобрениями, особенно при низких агрохимических показателях. Однако на почвах Карелии не может быть универсальной технологии возделывания картофеля, идеально подходящей для всех ландшафтных и погодных условий. Приемы посадки, внесения удобрений, выбор их вида, формы и количества должны дифференцироваться с учетом агрохимических, гранулометрических показателей, метеословий, плодородия почвы, качества семян, назначения выращиваемой продукции.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В. А. Способ обработки почвы, удобрения и урожай // Картофель и овощи. 2003. № 2. С. 10.
2. Артюшин А. М., Дерюгин И. П., Кумокин А. Н., Ягодин Б. А. Удобрения в интенсивных технологиях возделывания сельскохозяйственных культур. М.: ВО «Агропромиздат», 1991. 174 с.
3. Бутов А. В. Влияние возрастающих норм минеральных удобрений в сочетании с беспостилочным навозом на крахмалонакопление клубней картофеля // Труды НИИКХ. М., 1980. Вып. 37. С. 42–48.
4. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 359 с.
5. Исаев М. Д., Салихов И. Х., Цветкова С. М., Назарова В. М., Назаров А. В. Соблюдение технологии гарантирует получение высоких урожаев // Картофель и овощи. 2006. № 8. С. 11–12.
6. Кабаков Н. С., Пономарев А. Г. Широкоягодная технология возделывания картофеля // Земледелие. 2001. № 4. С. 11.
7. Корнеев Ю. С. Как повысить эффективность органических удобрений в совхозах Карелии // Пути повышения урожайности с/х культур в условиях Северо-Запада РСФСР: Межвуз. сб. Петрозаводск, 1983. С. 20–24.
8. Корнеев Ю. С. Локальные способы внесения комплексных минеральных удобрений под пропашные культуры // Пути повышения урожайности с/х культур в условиях Северо-Запада РСФСР: Межвуз. сб. Петрозаводск, 1985. С. 12–21.
9. Корнеев Ю. С., Мельникова С. В. Использование органических удобрений из древесной коры // Повышение плодородия почв и урожайности с/х культур Северо-Запада РСФСР: Межвуз. сб. Петрозаводск, 1979. С. 85–90.
10. Корнеев Ю. С., Семенова О. Е. Влияние возрастающих уровней азотного питания на фенологию и урожай корнеклубнеплодов // Адаптация растений при интродукции на Севере: Межвуз. сб. Петрозаводск, 1996. С. 41–43.
11. Корнеев Ю. С. Эффективность различных видов и сочетаний минеральных удобрений при локальном и разбросном внесении под картофель // Пути интенсификации земледелия на Северо-Западе России: Межвуз. сб. Петрозаводск, 1992. С. 26–31.
12. Коршунов А. В., Семенов А. В. Приемы агротехники влияют на урожай и его качество // Картофель и овощи. 2003. № 3. С. 8–9.
13. Назарюк В. М., Прозоров А. Р. Азотные удобрения под картофель // Химизация сельского хозяйства. 1989. № 9. С. 45–46.
14. Плотникова Г. А., Налиухин А. Н. Выращивание столового картофеля с использованием новых видов удобрений // Земледелие. 2007. № 6. С. 33–34.
15. Симakov Е. А., Анисимов Б. В. Картофелеводство в условиях меняющейся экономики России // Картофель и овощи. 2007. № 8. С. 2–3.

ЕЛЕНА ЮРЬЕВНА МИШЕНЕВА

кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры зоотехнии, товароведения и экспертизы продовольственных товаров агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
euptz@mail.ru

ЮЛИЯ ВАЛЕРЬЕВНА МОРОЗОВА

студентка 5-го курса агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
ushasa@yandex.ru

ХАРАКТЕРИСТИКА МОЛОДНЯКА РУССКОЙ ВЕРХОВОЙ ПОРОДЫ ЛОШАДЕЙ ПО ЭКСТЕРЬЕРНЫМ И ДВИГАТЕЛЬНЫМ КАЧЕСТВАМ*

Изучены промеры, двигательные и прыжковые качества жеребят русской верховой породы 2004–2005 годов рождения (Старожиловский конезавод, Рязанская область). Учтено происхождение по отцам. В потомстве отдельных жеребцов обнаружены как дочери, так и сыновья, отвечающие экстерьерным требованиям воссоздаваемой породы. Половой диморфизм по промерам не выявлен. Молодняк разного происхождения достоверно различается по своим двигательным и прыжковым качествам. Изменчивость всех признаков невелика.

Ключевые слова: русская верховая порода лошадей, Старожиловский конезавод, воссоздание породы, соответствие требованиям породы, экстерьер, двигательные качества, прыжковые качества, половой диморфизм

Начало созданию русской верховой лошади было положено в XVIII веке графом А. Г. Орловым-Чесменским и графом В. Ф. Ростопчиным. Использовали метод сложного воспроизводительного скрещивания лошадей арабской и чистокровной верховой пород, азиатских и европейских полукровных пород. Целью было создание нарядной манежной, парадной и одновременно строевой кавалерийской лошади, способной работать под тяжелым всадником. По воспоминаниям современников, сам Алексей Орлов был крупным мужчиной, есть свидетельства, что граф весил 9 пудов (около 145 кг). Но и под таким всадником, как видно на портрете кисти крепостного художника Д. Невзорова (рис. 1), русский верховой жеребец Свирепый демонстрирует импульс, в движениях лошади легко узнаваем эффектный пассаж.



Рис. 1. Граф Орлов-Чесменский на жеребце русской верховой породы Свирепом (художник Д. Невзоров)

Условной датой рождения русской верховой (орлово-ростопчинской) породы можно считать 1860 год, когда поголовье орловских и ростопчинских лошадей было собрано в Хреновском конном заводе. С тех пор представители породы не раз завоевывали первые места и золотые медали на всероссийских и всемирных выставках Москвы, Петербурга, Лондона, Чикаго, Полтавы, Киева, Парижа, вызывая восхищение публики [4].

В XX веке большая часть поголовья породы была утрачена. Ее разведением занимались лишь коневоды-энтузиасты. Планомерная работа по воссозданию русской верховой лошади началась в 1978 году по инициативе кафедры коневодства Московской сельскохозяйственной академии им. К. А. Тимирязева на базе Старожиловского конного завода (Рязанская область).

Базой для воссоздания породы послужили не только лошади, несущие в себе кровь русской верховой (с кровностью от 1/8 до 3/8), но также достаточно близкие по типу к требуемой модели траккененские, англо-траккененские, арабо-траккененские, чистокровные верховые, арабские, ахалтекинские, орловские рысистые и терские лошади. Были разработаны и применены на практике схемы скрещиваний, направленные на консолидацию поголовья с учетом сочетаемости [4].

В настоящее время сотрудники кафедры коневодства во главе с заведующим В. А. Парфеновым курируют племенную работу с породой. В 1999 году восстановленная порода была официально зарегистрирована в Государственном реестре селекционных достижений, допущенных к использованию, под номером 9 353 144.

Сегодня лошади русской верховой породы используются преимущественно для выездки (рис. 2). Это один из видов классического конного спорта, целью которого является обучение лошади двигаться под всадником как можно изящнее, совершенствуя ее естественные движения. Идеальная выездковая лошадь должна иметь следующие качества: ростость, боковую гибкость, лентовидную шею, темные масти (вороная, караковая), мягкую бабку, длинный затылок, крепкую нервную систему, чуткость к управлению. Всем этим требованиям отвечала порода, выведенная еще Орловым и Ростопчинным. Современных русских верховых лошадей отличает стабильность и отдаленность в работе, врожденные правильные движения [2].



Рис. 2. Амаретто, жеребец русской верховой породы под седлом И. Потураевой. Победитель и призер национальных и международных турниров по выездке

Целью нашей работы была оценка молодняка русской верховой породы, выращенного на Старожиловском конном заводе, по экстерьерным и двигательным качествам.

МЕТОДИКА

Материалом для работы послужили результаты оценки молодняка в возрасте двух лет согласно Инструкции по бонитировке лошадей русской верховой породы [1]. Учтены четыре экстерьерных промера и результаты испытаний по двигательным и прыжковым качествам. Обработаны данные по 119 жеребят 2004–2005 годов рождения, происходящих от 14 жеребцов. Учтен половой диморфизм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Средние промеры кобылок – дочерей разных жеребцов показаны в табл. 1. Самых высоких дочерей давали Заальцкенинг и Гепард (выше 160 см в холке), самых низкорослых – Пирх (менее 155 см). Если судить по обхвату пясти, то наиболее костистыми были дочери Вольфа (20,5 см), а тонконогими – дочери Ашфора (всего 19 см). Эти различия достоверны ($P \leq 0,05$).

Таблица 1

Промеры кобылок русской верховой породы – дочерей разных жеребцов ($\bar{X} \pm m$, см)

Кличка отца	n	Высота в холке	Косая длина туловища	Обхват груди	Обхват пясти
Заальцкенинг	5	160,6 ± 2,0	155,8 ± 2,3	177,6 ± 3,0	20,1 ± 0,2
Гепард	4	160,3 ± 2,6	153,3 ± 3,0	178,3 ± 3,2	19,6 ± 0,4
Вольф	6	159,7 ± 1,9	157,5 ± 2,4	180,3 ± 2,3	20,5 ± 0,4
Интриган	5	159,6 ± 0,8	154,0 ± 1,5	175,0 ± 1,4	19,6 ± 0,2
Гоготун	9	158,2 ± 1,2	155,6 ± 1,5	176,9 ± 1,4	19,7 ± 0,3
Кисет	6	158,2 ± 1,3	155,5 ± 1,6	173,8 ± 1,4	19,1 ± 0,4
Элькуш	10	157,8 ± 1,3	155,8 ± 2,1	174,8 ± 1,7	19,5 ± 0,2
Атом	5	157,6 ± 1,8	154,6 ± 2,1	175,6 ± 2,9	19,5 ± 0,3
Романтикёр	4	157,3 ± 2,5	151,0 ± 4,0	173,3 ± 6,2	19,1 ± 0,5
Ашфор	6	157,0 ± 5,1	149,0 ± 7,1	176,0 ± 5,1	19,0 ± 1,0
Коринф	4	156,8 ± 1,5	154,0 ± 3,2	176,3 ± 1,8	19,5 ± 0,2
Вельдфред	7	156,4 ± 0,4	154,4 ± 1,3	174,6 ± 1,2	19,6 ± 0,1
Кнехт	12	155,0 ± 1,0	153,2 ± 1,1	174,5 ± 1,0	19,2 ± 0,1
Пирх	5	154,6 ± 1,2	153,2 ± 3,0	172,2 ± 2,7	19,6 ± 0,2

У дочерей разных жеребцов не обнаружено достоверных различий по обхвату груди и по косой длине туловища ($P \geq 0,05$). Можно только отметить, что Вольф давал кобылок с большим обхватом груди (более 180 см) и более растянутым корпусом (косая длина – почти 158 см).

По промерам сыновей достоверно отличается Романтикёр (табл. 2). Его сыновья были самыми высокорослыми (почти 165 см в холке), с растянутым корпусом (косая длина туловища – 159 см), костистыми (пясть – почти 21 см), с наибольшим обхватом груди (более 181 см).

Таблица 2

Промеры жеребчиков русской верховой породы – сыновей разных жеребцов ($\bar{X} \pm m$, см)

Кличка отца	n	Высота в холке	Косая длина туловища	Обхват груди	Обхват пясти
Романтикёр	9	164,6 ± 1,2	159,1 ± 1,7	181,1 ± 2,1	20,9 ± 0,3
Атом	4	159,3 ± 1,3	157,0 ± 2,9	175,0 ± 2,9	20,0 ± 0,4
Омуртаг	3	161,3 ± 3,9	155,7 ± 3,2	180,3 ± 2,6	20,2 ± 0,8
Пирх	3	159,0 ± 1,0	155,3 ± 2,1	176,7 ± 2,2	19,8 ± 0,2
Гоготун	3	159,0 ± 4,8	158,7 ± 1,8	178,0 ± 2,1	20,3 ± 0,5
Элькуш	5	158,6 ± 1,4	152,4 ± 3,1	172,6 ± 2,5	19,5 ± 0,3
Вельдфред	4	158,5 ± 1,6	153,8 ± 1,5	176,3 ± 2,6	20,3 ± 0,2
Кнехт	3	157,3 ± 1,4	149,0 ± 2,1	172,7 ± 1,4	19,7 ± 0,4
Коринф	3	157,3 ± 3,4	151,7 ± 4,0	174,7 ± 2,5	19,3 ± 0,4
Ашфор	4	157,3 ± 3,1	153,5 ± 3,7	180,8 ± 3,1	20,1 ± 0,3

В то же время были получены низкорослые жеребчики от Кнехта, Коринфа и Ашфора (всего 157 см в холке). Сыновья Коринфа были достаточно тонконогими (пясть – 19,3 см), потомки Кнехта отличались коротким форматом (КДТ на 10 см достоверно меньше потомков Романтикёра).

Изменчивость изучаемых промеров в группах как дочерей, так и сыновей была небольшой. Коэф-

фициент вариации в группах отцовских полусибсов не превышал 7,16 %, так как потомство всех жеребцов достаточно выровнено по экстерьеру.

Современный стандарт русской верховой породы лошадей предусматривает следующие промеры двухлеток [3]. Контрольная шкала роста для кобылок: 157 см высота в холке, 155 см длина туловища, 177 см обхват груди и 19,5 см обхват пясти, для жеребчиков 159, 157, 178 и 20 см соответственно.

Используя промеры жеребят, мы сравнили экстерьер потомков каждого производителя с требованиями стандарта породы для двухлеток (они приняты за 100 %). Наиболее соответствуют стандартной модели русской верховой породы дочери жеребцов Коринфа, Атома, Гоготуна, Кнехта, Интригана. Отклонения от модели по ним не превышают 2 % (в ту и другую сторону) по всем учтенным промерам. Более чем на 2,5 % по некоторым промерам отклоняются от стандарта дочери Романтикёра, Пирха и Вельдфреда.

Что касается потомства мужского пола, наиболее близки к желательной модели породы сыновья Атома и Вельдфреда. Таким образом, только от Атома происходят и сыновья, и дочери, близкие к стандарту по породе.

В задачу исследования входило также изучение полового диморфизма в экстерьере потомства разных жеребцов. В 10 изученных группах полусибсов в двухлетнем возрасте кобылки и жеребчики по промерам достоверно не различаются ($P \geq 0,05$). Следовательно, оправданно выступление в конном спорте кобыл и жеребцов русской верховой породы на равных. Исключением было потомство Романтикёра, Пирха и

Вельдфреда. По отдельным промерам их сыновья были немного крупнее сверстниц ($P \leq 0,05$).

При работе над русской верховой породой лошадей одной из целей селекционеров является типизация имеющегося поголовья. Кафедрой коневодства Московской сельскохозяйственной академии разработана шкала оценки лошадей-двухлеток по индексам телосложения [1]. Согласно данной шкале, у жеребцов в двухлетнем возрасте желательны следующие соотношения промеров. Индекс формата – 96–101 %, массивности – 111–115 %, костистости – 12,3–12,6 %. Для кобыл – 98–102, 112–116 и 12,3–12,5 % соответственно.

С учетом этих требований оптимальное для русской верховой породы соотношение промеров имели двухлетки обоего пола только от одного жеребца – Коринфа (табл. 3). Средние значения всех трех индексов его потомков были в рекомендуемых пределах. Полностью соответствовали желаемой модели дочери Кнехта, а также сыновья Пирха и Омуртага.

Если судить по индексу формата, то наиболее соответствующее русской верховой породе телосложение имеют сыновья почти всех изучаемых жеребцов и дочери большинства отцов. В то же время по индексам массивности и костистости соответствий было обнаружено меньше.

О спортивном потенциале лошади судят по результатам испытаний. Проведен анализ результатов испытаний двигательных и прыжковых качеств молодняка (табл. 4). По этим показателям обнаружены высокостойкие различия между группами отцовских полусибсов ($P \leq 0,001$).

Таблица 3

Индексы телосложения кобылок и жеребчиков от разных производителей

Кличка отца	Индекс кобылок, %				Индекс жеребчиков, %			
	n	формата	массивности	костистости	n	формата	массивности	костистости
Атом	5	98,1*	111,4	12,4*	4	98,6*	109,9	12,6*
Вельдфред	7	98,7*	111,6	12,5*	4	97,0*	111,2*	12,8
Вольф	6	98,6*	112,9*	12,8				
Гоготун	9	98,4*	111,8	12,5*	3	99,8*	111,9*	12,8
Кисет	6	98,3*	109,9	12,1				
Кнехт	12	98,8*	112,6*	12,4*	3	94,7	109,8	12,5*
Коринф	4	98,2*	112,4*	12,4*	3	96,4*	111,1*	12,3*
Омуртаг					3	96,5*	111,8*	12,5*
Пирх	5	99,1*	111,4	12,7	3	97,7*	111,1*	12,5*
Элькуш	10	98,7*	110,8	12,4*	5	96,1*	108,8	12,3*
Ашфор	6	94,9	112,1*	12,1	4	97,6*	114,9*	12,8
Гепард	4	95,6	111,2	12,2				
Романтикёр	4	96,0	110,2	12,1	9	96,7*	110,0	12,7
Интриган	5	96,5	109,6	12,3*				
Заальцкенинг	5	97,0	110,6	12,5*				

Примечание. * – соответствуют оптимальным значениям индексов.

Таблица 4

Оценка двигательных и прыжковых качеств потомков разных жеребцов-производителей ($\bar{X} \pm m$, балл)

Кличка отца	n	Двигательные качества	Прыжковые качества
Заальцкенинг	8	9,63 \pm 0,28	8,65 \pm 0,18
Элькуш	4	9,09 \pm 0,38	8,83 \pm 0,29
Коринф	5	9,07 \pm 0,48	8,27 \pm 0,19
Вольф	3	9,06 \pm 0,36	9,56 \pm 0,06
Романтикёр	11	8,80 \pm 0,26	9,08 \pm 0,23
Гоготун	15	8,67 \pm 0,29	8,87 \pm 0,18
Ашфор	3	8,55 \pm 0,40	9,00 \pm 0,35
Гепард	9	8,45 \pm 0,49	9,17 \pm 0,14
Интриган	13	8,20 \pm 0,33	9,05 \pm 0,17
Кисет	5	8,07 \pm 0,34	9,13 \pm 0,20
Омуртаг	4	8,04 \pm 0,36	9,17 \pm 0,07
Дурман	8	8,00 \pm 0,26	8,90 \pm 0,35
Обряд	3	7,95 \pm 0,05	8,61 \pm 0,20
Атом	12	7,82 \pm 0,37	9,42 \pm 0,08
Глобин	5	7,80 \pm 0,51	9,20 \pm 0,12
Гамбит	3	7,61 \pm 0,20	9,00 \pm 0,29
Кнехт	14	7,30 \pm 0,34	8,82 \pm 0,16

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по бонитировке лошадей русской верховой породы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rw-base.ru/aboutbreed.php?art=17>
2. Козлов С. А., Зиновьева С. А., Козлова Н. Ю. Коневодство. СПб.: Лань, 2005. 198 с.
3. Козлов С. А., Парфенов В. А. Практикум по коневодству. СПб.: Лань, 2007. 320 с.
4. Парфенов В. А. Исторический очерк формирования и преобразований русской верховой породы лошадей [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rw-base.ru/aboutbreed.php?art=8>

Самую высокую оценку за двигательные качества получили потомки Заальцкенинга (9,63 балла из 10 возможных), минимальную – Кнехта (7,30 балла). Лучшие прыжковые качества показали жеребята от Вольфа (9,56 балла), худшие – от Коринфа (8,27 балла).

Изменчивость этих признаков также невелика. Коэффициент вариации оценок за прыжковые и двигательные качества не превышал в группах отцовских полусибсов 17,5 %. Таким образом, в фенотипе потомства практически каждого жеребца наблюдается примерно равный спортивный потенциал.

Таким образом, благодаря 30-летнему труду специалистов Московской сельскохозяйственной академии им. К. А. Тимирязева и Старожиловского конезавода удалось собрать массив лошадей, отвечающих требованиям к русской верховой породе лошадей, выдвинутым еще в XVII веке. Бесспорно, кавалерия как род войск морально устарела. Но и сегодня самым аристократичным, утонченным и элитарным видом конного спорта по праву считается выездка. Как показывает успешная работа по воссозданию отечественной верховой лошади, у российского конного спорта появилась перспектива получить свою специализированную конкурентоспособную спортивную породу.

БОРИС ВЛАДИМИРОВИЧ РАЕВСКИЙ

кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории лесовосстановления, Институт леса Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
raevski@drevlanka.ru

МАРИНА ЛЬВОВНА ЩУРОВА

инженер отдела «Карельская лесосеменная станция», Филиал ФГУ «Рослесозащита» – «ЦЗЛ Ленинградской области» (Петрозаводск, Российская Федерация)
czlsph.rk@rambler.ru

СОХРАНЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛЕСНЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ХВОЙНЫХ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ВИДОВ В КАРЕЛИИ

Рассматривается современное состояние всего комплекса объектов, связанных с сохранением и использованием лесных генетических ресурсов в Карелии. Сделан вывод, что система плюсовой селекции в Карелии находится в критическом состоянии и требуются безотлагательные действия для исправления ситуации к лучшему.

Ключевые слова: лесные генетические ресурсы, плюсовые насаждения, плюсовые деревья, лесосеменные плантации

ВВЕДЕНИЕ

Поскольку в сфере интересов интенсивного лесного хозяйства находятся прежде всего хозяйственно ценные древесные виды, то и под лесными генетическими ресурсами обычно понимается «совокупность генофондов природных и культивируемых популяций лесных древесных растений, имеющих реальную или потенциальную ценность для определенной территории» [13]. Методы и способы сохранения лесных генетических ресурсов группируются в две главные категории: выполняющие задачу сохранения в естественной природной среде (*in situ*) и вне ее (*ex situ*). В первом случае мы имеем дело с так называемыми лесными генетическими резерватами (ЛГР), где древостой сохраняемого вида являются компонентами естественных природных экосистем различного ранга. Сами резерваты могут существовать отдельно либо входят в состав более крупных особо охраняемых территорий. К этой же категории следует отнести плюсовые насаждения (ПН). Вторую категорию образуют различного рода искусственные посадки (плантации, архивы клонов и т. п.), где концентрируются ценные генотипы, ведется селекционная работа, а также такие высокотехнологичные объекты, как генетические банки лесных семян. В отечественной практике лесного хозяйства и специальной литературе термин «лесные генетические ресурсы» стал сравнительно широко употребляться в последние несколько лет. До этого в лесной селекции и семеноводстве в равной степени использовались два базовых понятия – постоянная лесосеменная база (ПЛСБ) и единый генетико-селекционный комплекс (ЕГСК).

Термин «постоянная лесосеменная база» входит в употребление примерно с 1971 года [9] и

развернуто трактуется в Наставлении по лесосеменному делу 1980 года [4]. Однако, в процессе организации ПЛСБ и реализации системы плюсовой селекции создается еще ряд категорий селекционных объектов, а именно: архивы клонов плюсовых деревьев, маточные плантации, испытательные, географические, популяционно-экологические культуры, которые непосредственно для заготовки семян не используются. Кроме этого, с целью сохранения всего объема внутривидового разнообразия того или иного вида выделяются уже упомянутые выше лесные генетические резерваты. Поэтому в Указаниях по лесному семеноводству в РФ 2000 года [10] для смыслового объединения всех объектов, направленных на сохранение и использование лесных генетических ресурсов (внутривидового разнообразия), появляется термин «единый генетико-селекционный комплекс».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вообще начало разработки научных основ создания в республике постоянной лесосеменной базы хвойных пород на генетико-селекционной основе относится к 60-м годам XX века [8]. Затем в середине 1970-х был дан старт формированию ПЛСБ в производственных масштабах [1]. Таким образом, вот уже почти 50 лет на территории Карелии осуществляется комплекс мероприятий по сохранению и использованию генетических ресурсов основных лесобразующих пород, главным образом хвойных видов.

В настоящей статье обсуждается современная структура ЕГСК Карелии по состоянию на 01.01.2012, динамика его основных компонентов, а также перспективы, намеченные в этой области Лесным планом по Республике Карелия [3] до 2018 года.

Анализ структуры ЕГСК в разрезе площадных объектов (рис. 1) показывает, что основную ее долю (86,1 %) составляют лесные генетические резерваты. Их общая площадь сегодня равна 6092 га. Еще 6127 га так и не прошли процедуру утверждения полностью. В настоящее время это одна из самых проблемных категорий объектов ЕГСК. В Карелии работа по выделению ЛГР активно велась в конце 80-х – начале 90-х годов прошлого столетия на базе «Положения о выделении и сохранении генетического фонда древесных пород в лесах СССР» [6]. Особенностью ЛГР являлось то, что они могли занимать довольно существенную площадь (до 700 га), их количество заранее не ограничивалось, при этом всякая хозяйственная деятельность там запрещалась. Резерваты выделялись как в лесах I и II групп, так и в эксплуатационных лесах (III группа). Таким образом, посредством организации ЛГР в том или ином районе Карелии можно было создать сеть, особо охраняемых территорий (ООПТ) с очень строгим режимом охраны. Такой подход очень выгодно отличал ЛГР от других некрупных ООПТ типа заказников.



Рис. 1. Структура площадных объектов ЕГСК Карелии

После вступления в силу нового лесного законодательства [2] ранее действовавшие нормативно-правовые акты, определявшие порядок действий по сохранению лесных генетических ресурсов в Российской Федерации, утратили свою силу, а новые не были приняты. Получается, что в настоящее время статус ЛГР совершенно не определен. Прямо они не упомянуты ни в категориях ООПТ, ни в категориях защитных лесов и особо защитных участков. В списке объектов лесного семеноводства их тоже нет. На сегодняшний день единственным вариантом их сохранения является оформление ЛГР как особо защитного участка, что далеко не всегда бывает сделано. В свете сказанного целесообразно было бы дополнить ст. 102 Лесного кодекса РФ еще одной категорией защитных лесов – леса высокой генетической ценности, к данной категории отнести уже выделенные и планируемые к выделению ЛГР, плюсовые на-

саждения и другие участки, предназначенные для сохранения в полном объеме существующего внутривидового разнообразия основных лесообразующих пород. Кроме этого, в ст. 2, п. 2 Федерального закона (№ 33-ФЗ) «Об особо охраняемых территориях» в редакции от 04.12.2006 (№ 201-ФЗ) указано, что «соответствующие органы исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органы местного самоуправления могут устанавливать и иные категории особо охраняемых природных территорий», кроме перечисленных в п. 1 данной статьи. Таким образом, в настоящее время существует еще одна возможность присвоить всем выделенным генетическим резерватам охранный статус на уровне ООПТ регионального значения. Если не принять срочных мер в этом направлении, то в ближайшие годы ЛГР, расположенные в эксплуатационных арендованных лесах, будут вырублены, и этот процесс, собственно, уже идет.

Доли ПН и лесосеменных плантаций (ЛСП) в общем близки – 6,7 и 6,4 % соответственно. И в том, и в другом случае преобладают объекты по сосне обыкновенной (рис. 2). Доминирование сосны в структуре ПН и ЛСП в общем оправдано, однако число плюсовых деревьев ели выглядит явно недостаточным, учитывая высокое хозяйственное значение данной породы и известное богатство ее внутривидового разнообразия как по габитуальным признакам, так и по физико-механическим свойствам древесины.

Остальные компоненты непропорционально исчезающе малы по своей площади (рис. 1). Географические культуры (26,3 га) все относятся к так называемой Всесоюзной серии 1973–1977 годов. Площадь испытательных культур всего 24,4 га. При этом 13,3 га – это смешанные экспериментальные культуры сосны обыкновенной и сосны скрученной. Площадь культур собственно сосны обыкновенной – 11,1 га, где испытывается потомство 157 плюсовых деревьев (ПД). Анализ общей структуры ЕГСК Карелии показывает, что с момента своего возникновения он получил явно неравномерное и непропорциональное развитие. Ряд очень важных компонентов, таких как испытательные культуры, архивы клонов, развиты явно недостаточно.

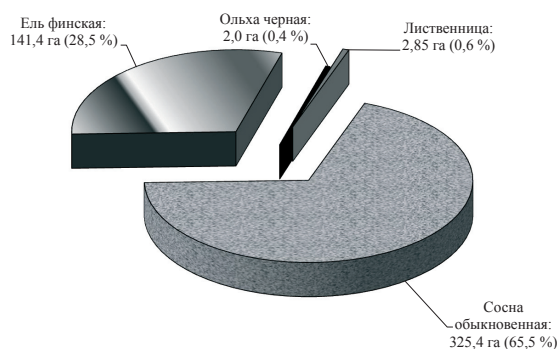


Рис. 2. Породная структура плюсовых насаждений Карелии

На рис. 3 представлена динамика основных составляющих постоянной лесосеменной базы в Карелии. Постоянные лесосеменные участки (ПЛСУ) к настоящему моменту исчезли как категория из состава ПЛСБ. По остальным составляющим рассматриваемая динамика в целом носит явно депрессивный характер. Площади плюсовых насаждений и плантаций, а также численность плюсовых деревьев имеют явную тенденцию к уменьшению.

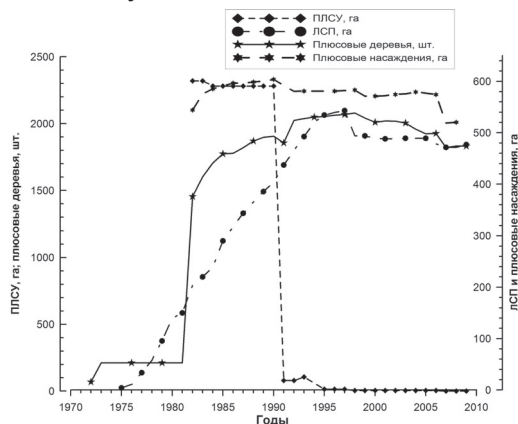


Рис. 3. Динамика основных компонентов ПЛСБ Карелии

Что касается перспектив, намечаемых Лесным планом по республике Карелия [3], то до 2018 года выделение новых лесных генетических резерватов не планируется. По завершении планового периода площадь плюсовых насаждений должна быть равна 620 га. К этому же сроку плюсовых деревьев основных лесообразующих пород следует иметь 2300 экземпляров. Согласно современным представлениям, для каждой зоны селекции (лесосеменного района или зоны) формируется исходная селекционная популяция в количестве 375–750 плюсовых деревьев. Количество 600 деревьев считается вполне достаточным [12]. Следовательно, для трех лесосеменных зон Карелии [7] надо иметь не менее 1800 ПД только сосны. Их сейчас в наличии 1249 шт. Таким образом, в оставшийся период необходимо отобрать примерно 551 ПД сосны обыкновенной и все севернее 63-й параллели. Имея в виду сложившееся соотношение между сосной и елью, приблизительно равное 3:1, разумно предположить, что численность ПД ели должна составлять не менее 600 шт. То есть намеченный рубеж по отбору ПД явно недостаточен. В процессе селекции генетическая база неизбежно сужается и, соответственно, требуется периодическое пополнение элитных селекционных популяций. Поэтому вопрос отбора новых ПД и их оценки будет актуальным всегда. Несмотря на значительную антропогенную нарушенность большей части покрытых лесом земель, в Карелии есть резервы для поиска и выделения новых ПД. Весь парадокс ситуации заключается в том, что, хотя в республике зарезервировано свыше миллиона гектаров земель во

всех категориях ООПТ (5,5 % от площади Карелии), плюсовые деревья и насаждения на покрытых лесом землях в их составе не отбираются [5].

Планируется также создание 55 га новых архивов клонов. Учитывая, что их всего в настоящее время имеется 8 га (0,1 %), динамику по данному показателю можно считать удовлетворительной. В предстоящее десятилетие предполагается закладка всего лишь 35 га новых испытательных культур. Указанной площади теоретически хватит на проверку семенного потомства не более чем 500 клонов. По данным многочисленных исследований, в испытательных культурах не более 20–30 % от исходного числа испытываемых семенных потомств демонстрируют статистически достоверное преимущество перед контролем. Таким образом, при реализации данного сценария можно будет отобрать не более 150 клонов для дальнейшего их разведения на лесосеменных плантациях (ЛСП) 2-го порядка, тогда как в течение всего оставшегося периода необходимо иметь ежегодно не менее 50 клонов, прошедших генетико-селекционную оценку и отобранных для создания ЛСП 2-го порядка. Всего на 7-летний период необходимо иметь в резерве 350 таких клоновых потомств. Иными словами, в ближайшие годы в Карелии следовало бы посадить примерно 50 га испытательных культур только сосны.

Все ЛСП в Карелии – это плантации первого порядка, заложенные генетически непроверенным материалом (рис. 4). В породной структуре плантаций абсолютно преобладает сосна обыкновенная. Возрастная структура ЛСП сосны представлена на рис. 5. Справа от вертикальной пунктирной линии показано распределение площади ЛСП по принципу «указанный возраст и старше», а слева – наоборот, «указанный возраст и младше». Таким образом, очевидно, что в настоящее время 54 % ЛСП сосны имеют возраст свыше 25 лет. Вступив в период интенсивного цветения в 10-летнем возрасте, ЛСП сосны активно плодоносит еще в течение примерно 20 лет. Затем деревья становятся довольно высокими, кроны смыкаются, нижние ветви усыхают, генеративный ярус смещается вверх и урожайность падает.

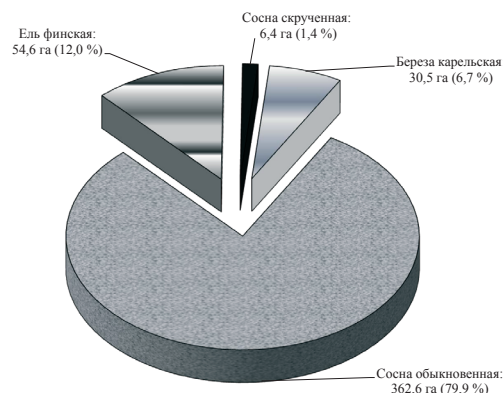


Рис. 4. Породная структура ЛСП Карелии

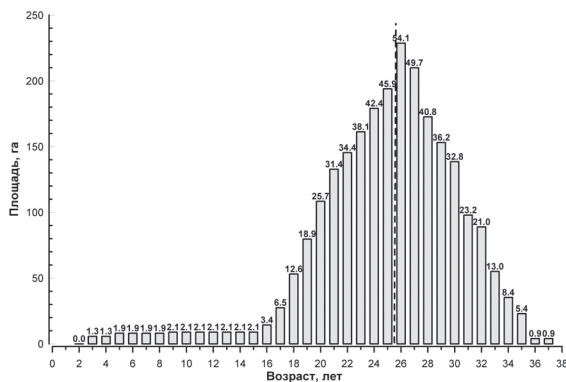


Рис. 5. Возрастная структура ЛСП сосны обыкновенной

Таким образом, современная возрастная структура ЛСП сосны не дает повода для оптимизма. Плантации быстро стареют и уже через 5 лет более половины их площади будут за пределами 30-летнего возраста. Кроме этого, состояние примерно 18 % площади ЛСП сосны в возрасте 16 лет по причине плохих уходов уже сейчас оценивается как неудовлетворительное и хорошего урожая семян на таких участках уже не будет никогда. Нужно также учесть, что 68,8 % полей сосновых ЛСП сильно заросли сорной древесной и кустарниковой растительностью. Без проведения надлежащих уходов в ближайшие 2–3 года они также могут перейти в категорию неудовлетворительных по состоянию. Лесным планом [3] в период 2012–2018 годов предусматривается посадка 20 га ЛСП с темпом 2–4 га ежегодно. Однако эти показатели невыполнимы, так как, чтобы заложить ЛСП, надо вырастить привитой посадочный материал. На это требуется не менее 5 лет (3 года выращивания подвоя + 2 года роста прививки в теплице). Производить же данные работы в настоящее время некому.

Из всего вышесказанного следует неутешительный вывод о том, что примерно через 10 лет заготавливать улучшенные семена сосны будет практически негде. Таким образом, перспектив-

ные показатели, определяемые Лесным планом по Республике Карелия в отношении селекционного семеноводства, следует охарактеризовать либо как совершенно недостаточные, либо как не отражающие реального положения дел.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время вопрос сохранения и использования лесных генетических ресурсов в Карелии решается неудовлетворительно. Сегодня, по сути, в республике не существует хозяйствующих субъектов, организаций и ведомств, напрямую заинтересованных в развитии системы единого генетико-селекционного комплекса. Результатом такого развития событий становится острый дефицит не только улучшенных, но и нормальных местных семян. Сложившаяся ситуация влечет за собой использование в питомниках инорайонного посевного материала, причем зачастую с нарушением существующего лесосеменного районирования. Общим же итогом реализации данного неблагоприятного сценария является снижение качества вновь создаваемых лесных культур.

Очевидно, что требуется безотлагательная разработка и реализация пакета мер организационно-правового характера, в том числе создание в республике селекционно-семеноводческого центра, обладающего современной производственной базой. В качестве первоочередной должна быть поставлена задача разработки и строгого соблюдения обновленного лесосеменного районирования. Новое районирование должно, во-первых, определить порядок использования семян хвойных видов, получаемых на лесосеменных плантациях, а во-вторых, почти полностью исключить использование в лесовосстановлении семян сосны обыкновенной из-за пределов Карелии. Такое ограничение послужило бы мощным стимулом к использованию местных генетических ресурсов и позволило бы переломить ситуацию к лучшему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лаур Н. В. Единый генетико-селекционный комплекс. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2011. 129 с.
2. Лесной кодекс Российской Федерации. № 200-ФЗ, 2006.
3. Лесной план по Республике Карелия. М., 2008. 161 с.
4. Наставление по лесосеменному делу. М., 1980. 108 с.
5. Научное обоснование развития сети особо охраняемых природных территорий в Республике Карелия. Петрозаводск, 2009. 111 с.
6. Положение о выделении и сохранении генетического фонда древесных пород в лесах СССР. М., 1982. 18 с.
7. Раевский Б. В. Ход роста географических культур сосны обыкновенной в Карелии // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2011. № 6 (119). С. 65–69.
8. Раевский Б. В., Мордась А. А. Селекционно-генетическая оценка клонов сосны обыкновенной на лесосеменных плантациях первого порядка. Петрозаводск, 2006. 90 с.
9. Указания о порядке отбора и учета плюсовых деревьев и инсаждений, постоянных лесосеменных участков и плантаций в лесном хозяйстве. М., 1971. 75 с.
10. Указания по лесному семеноводству в Российской Федерации. М., 2000. 197 с.
11. Федеральный закон об особо охраняемых территориях № 33-ФЗ, 1995.
12. Daneil O. Possible Gains in Initial Stages of a National Tree Improvement Programme Using different Techniques // Proceedings from the Nordic tree breeders meeting. Denmark, 1990. P. 11–30.
13. Geburek Th., Turok J. Conservation and Management of Forest Genetic Resources in Europe. Zvolen: Arbora Publishers, 2005. 693 p.

ВАДИМ АНАТОЛЬЕВИЧ ЦАРЁВ

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры управления производством экономического факультета, Воронежская государственная лесотехническая академия (Воронеж, Российская Федерация)
vadbat@comch.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЛЕСОУПРАВЛЕНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

На примере роста площадей пожаров и объемов нелегальных рубок показан ущерб, наносимый экономике страны, который во многом обусловлен принятой системой управления лесами и недостаточной охраной лесного фонда.

Ключевые слова: управление лесами, лесная политика, пожары, нелегальные рубки, Лесной кодекс

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия наметились явные тенденции к сокращению площади лесов из-за просчетов в лесной политике и несовершенства системы лесоуправления. Особенно это проявилось во вспышке лесных пожаров в 2010–2011 годах. Анализ показывает, что виновато не только засушливое лето. Кроме пожаров в стране наблюдается разгул нелегальных рубок и браконьерства. Проблема оказывается гораздо глубже, и на это неоднократно указывали многие отечественные ученые [2], [5], [9] и др.

Цель настоящей работы – привлечь внимание специалистов к проблемам лесной политики.

УПРАВЛЕНИЕ ЛЕСНЫМ ХОЗЯЙСТВОМ СТРАНЫ

Управление лесами России до принятия в 2006 году нового Лесного кодекса двести лет опиралось на следующие принципиально важные системы действий:

1. Лесоустройство, разрабатывавшее проекты организации и ведения лесного хозяйства, а также лесопользования в объектах лесоустройства – лесхозах (субъекты управления);
2. Ведение лесного хозяйства и лесопользования на территории субъектов управления в соответствии с материалами лесоустройства;
3. Организация и осуществление лесопользования и лесовосстановления в субъектах управления согласно расчетным размерам пользования лесом и правилам рубок, а также предписаниям лесоустройства [9].

Это в том или ином виде предусматривалось и Уставом о лесах 1786 и 1832 годов, и Уставом Лесным 1905 и 1913 годов, и Декретом о лесе 1918 года, и Лесным кодексом РСФСР 1923 года, и другими нормативными актами как царской России, так и Советского Союза. В период с 1998 по 2008 год были предприняты серьезные усилия по модернизации современного лесного хозяйства. Однако можно отметить ряд законодательных актов и событий, приведших к неблагоприятным результатам. В мае 2000 года была ликвидирована Федеральная служба лесного

хозяйства России, а лесное хозяйство страны как самостоятельная отрасль было передано в ведение Министерства природных ресурсов РФ, где оно растворилось среди водного хозяйства, охраны природы и всех невозобновляемых природных ресурсов (газ, нефть, уголь и др.). В 2006 году был принят новый Лесной кодекс, направленный в основном на расточительство национальных лесных ресурсов страны и представляющий узкокорпоративные интересы владельцев лесопромышленного комплекса при полном игнорировании позиций государственного лесного хозяйства. Некоторые статьи Кодекса фактически разрешают вырубку леса в зеленых лесопарковых зонах, вывод этих земель из Гослесфонда и легализуют незаконное строительство частного жилья и других объектов [3].

До 2007 года за сохранность лесов в России отвечала единая структура Гослесохрана, в штате которой насчитывалось около 70 тыс. лесников-обходчиков. Они регулярно патрулировали лесные территории, оперативно ликвидировали очаги возгорания и запрещали самовольные порубки леса. В результате последних реорганизаций государственная лесная охрана была сокращена до 12 тыс. человек [10]. Десятки тысяч людей остались без работы. Увеличилось браконьерство.

Пожарная охрана лесов была отдана на откуп арендаторам, цель которых – получение прибыли, решение вопросов неистощительного и восстановительного лесопользования оборачивается для них непосильными издержками. Были ликвидированы единственная специализированная служба «Авиалесохрана» (в 1970–80-х годах противопожарная охрана лесов в России была одной из лучших в Европе) и единственный на всю Россию специализированный институт по охране леса и борьбе с лесными пожарами – ВНИИПОМлесхоз (Красноярский край). Ликвидированы и другие структуры, например отделение по разработке механизмов для борьбы с лесными пожарами при ВНИИЛМе и др. [11].

Ошибочными стали ликвидация лесхозов и передача полномочий по управлению и использова-

нию лесов, их охране, защите и воспроизводству в ведение субъектов РФ. По новому Лесному кодексу правительство передало субъектам РФ федеральные леса в управление и пользование, а по существу – и во владение, хотя это не прописано в полномочиях субъектов РФ. При этом правительство сняло с себя ответственность за определение стратегии развития лесного сектора экономики и за национальную лесную политику в целом.

Согласно статьям нового Лесного кодекса, вступившего в действие с 01.01.2007, были сняты избыточные ограничения лесопользования, стали допускаться несплошные рубки в защитных лесах, аренда без аукциона для инвестиционных проектов, при определении размера арендной платы не учитываются нормативные затраты на ведение лесного хозяйства и развитие инфраструктуры, не внесены в Кодекс понятия нелегальных рубок, отсутствует контроль цепи поставок древесины и т. д. (см. [1], [5], [9].)

Ослабление охраны леса вместо экономии повлекло за собой значительные потери. В особой степени это проявилось в отсутствии государственной противопожарной охраны и ежегодном росте объемов нелегальных рубок древесины.

УЩЕРБ ОТ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Жаркое лето 2010 года и отсутствие лесников способствовали тому, что не были своевременно обнаружены и ликвидированы очаги возгорания. Природными пожарами в июле – августе 2010 года были охвачены 22 субъекта РФ, пострадали от огня 180 поселений, сгорело около 2,5 тыс. домов, погибли десятки людей, тысячи людей остались без крова [12]. Площадь утраченного жилья в результате природных пожаров 2010 года в Центральном федеральном округе составила 47 тыс. м². Полностью уничтожены огнем 127 населенных пунктов. Ущерб составил 85,5 млрд руб. В пострадавших от пожара регионах погибло почти 40 % урожая. Подтвержденные прямые затраты хозяйств составили 41,6 млрд руб. [11]. Затраты только на ликвидацию лесных пожаров в России и помощь погорельцам, по предварительным данным МЧС, составили свыше 12 млрд руб. В европейской части России особенно пострадали от пожаров Нижегородская, Владимирская, Московская, Рязанская, Ивановская, Воронежская и другие области, Республика Марий Эл, Республика Мордовия.

Кроме финансов, направленных на восстановление жилья и документов погорельцам, государство должно еще затратить огромные средства на создание инженерной инфраструктуры в населенных пунктах, строительство социальных объектов и дорог.

Огромный урон пожарами наносится и Гослесфонду. Динамика числа лесных пожаров и объемов поврежденных ими площадей и сгоревшей древесины в России, по данным Росста-

та [13], представлена в таблице. Из этих данных видно, что площадь погибших лесных насаждений за 10 лет составила 4,7 млн га. Из них почти 68 % погибло от пожаров, сгорело на корню более 290 млн м³ древесины. Среднее число пожаров за указанные 10 лет составило почти 28 тыс. возгораний в год, а потери древесины – 29,1 млн м³ в год.

Площадь, затронутая природными пожарами в стране в 2010 году, составила свыше 3 млн га [12]. По официальным данным Рослесхоза, в лесах РФ в 2010 году возникло 34,8 тыс. природных пожаров. При этом более 93 млн м³ древесины сгорело на корню. По оценке Фонда защиты дикой природы (WWF), если исходить из средней стоимости погибшей древесины и необходимых лесовосстановительных работ, общий экономический ущерб от лесных пожаров в 2010 году составил более 10 трлн руб. (375 млрд \$), или 25 тыс. \$ на 1 га [8]. По данным Росстата, лесная площадь, пройденная пожарами в 2010 году, составила 2 млн га. Однако эта цифра сильно занижена. По данным Института леса им. Сукачева СО РАН, Института космических исследований РАН, пожарами было пройдено 5,6–5,9 млн га; по данным Всемирного центра мониторинга пожаров (Global Fire Monitoring Center) – 10–12 млн га [8]. Очевидно, эти данные подлежат корректировке.

Из-за лесных и торфяных пожаров пострадали не только лес и жилье, но и экологическая среда окружающих регионов. В процессе горения с 1 га горящего леса в атмосферу выбрасывается от 30 до 100 млн т различных дымовых частиц и около 10 т смесей различных газов. По экспертным оценкам, общий выброс углекислоты от пожаров в 2010 году мог составлять 400 млн т [8]. От задымления изменился состав атмосферного воздуха. Ухудшение экологической обстановки повлияло на состояние здоровья людей, проживающих в зоне природных пожаров: произошло резкое обострение хронических заболеваний и существенно возросла смертность населения (на 8,6 %).

Общая площадь лесных пожаров в России в 2011 году, по предварительным данным, составила 1,37 млн га, что на 33,4 % меньше, чем в 2010 году. Всего было зарегистрировано 20,3 тыс. природных очагов возгорания [15]. Самыми пожароопасными регионами были Сибирь и Забайкалье. В европейской части России только в Архангельской области, по официальным данным, выгорело 85 тыс. га леса. Данные по природным пожарам в 2011 году также разнятся. Но объемы бедствия, хотя и снизились на треть, остаются достаточно высокими.

В результате появившихся в лесу горельников и невозможности своевременной уборки обгоревших деревьев на них происходят вспышки распространения энтомофитов и фитоболзней, и возникает опасность усыхания близлежащих лесов, что представляет собой самостоятельную чрезвычайную пожароопасность.

Динамика числа лесных пожаров, объемов поврежденных ими площадей и сгоревшей древесины в РФ (по данным Росстата, 2010 год [13])

Показатель	Год											Итого / в среднем за 10 лет
	Ед. изм.	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
Погибло лесных насаждений,	тыс. га	777	186	361	631	437	988	311	319	273	447	4730 / 473
в том числе от лесных пожаров	тыс. га %	710 91,4	141 75,8	304 84,2	540 85,6	150 34,3	465 47,1	175 56,3	200 62,7	171 62,6	346 77,4	3202 / 320 67,7
Число возгораний	тыс. случаев	22,4	33,7	43,4	33,1	27,2	19,2	32,5	17,8	26,3	23,2	278,8 / 27,9
Лесная площадь, пройденная пожарами	млн га	1,3	0,9	1,4	2,4	0,5	0,8	1,5	1,0	2,1	2,1	14,0 / 1,4
Сгорело леса на корню	млн м ³	39,6	16,5	32,4	68,4	15,7	12,3	34,5	16,5	30,1	25,4	291,4 / 29,1

Основной причиной возникновения пожаров, по данным ВНИИЛМ (2003 год), за период с 1985 по 2000 год был человеческий фактор (64–82 % возгораний) [14]. По данным МЧС, в 2010 году доля человеческого фактора уже возросла до 90 %.

Лесные пожары 2010–2011 годов высветили острые проблемы и недоработки нового Лесного кодекса. На это обратило внимание правительство РФ, которое пришло к выводу о необходимости укрепления Федерального органа управления лесами, поднятия статуса Рослесхоза, вывода его из Министерства сельского хозяйства РФ и подчинения его непосредственно правительству.

УЩЕРБ ОТ НЕЛЕГАЛЬНЫХ РУБОК

Другой серьезной проблемой лесного хозяйства в последние годы становится постоянный рост нелегальных рубок. Только за январь – октябрь 2007 года количество выявленных незаконных рубок в России увеличилось по сравнению с предыдущим годом на 38 % (с 6930 до 9592 случаев), а нанесенный ими ущерб вырос с 3,9 до 6,2 млрд руб., то есть на 59 % [6]. В 2009 году ущерб от незаконных рубок составил уже 13,2 млрд руб. [8]. Объем нелегальных рубок в 2007 году составил свыше 30 % от общего объема лесопользования, а в отдельных регионах он

достигал 59–70 %. Основной объем незаконных рубок (41 %) приходился на Сибирь [7]. В 2009 году на территории 24 субъектов РФ с наиболее интенсивным лесопользованием, общая площадь лесов которых составляет 175 млн га, было обнаружено с помощью космической съемки 1,6 тыс. фактов незаконных рубок. В целом за прошедшее десятилетие объемы незаконных рубок в РФ выросли почти вдвое. По оценкам независимых экспертов, объем нелегального лесопользования в России в последние годы составляет 20–25 % от общего объема, а это 40 млн м³ в год. При этом выявляемость совершенных лесонарушений составляет всего 38 % [4], [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, требуется незамедлительное восстановление единого специализированного государственного органа управления лесным хозяйством РФ по отраслевому и территориальному принципам на уровне самостоятельного министерства и возможное реанимирование института лесхозов и службы лесников для охраны российского леса. Одним из источников финансирования долгосрочных программ по выводу лесного хозяйства страны из сложившегося положения может быть повышение лесной ренты до уровня, принятого в большинстве развитых стран.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бригадин И. Ф., Царев В. А. Проблемы совершенствования структуры и процессов управления на предприятиях лесного хозяйства // Инновационная деятельность в сфере управления производством: Материалы региональной науч. конф. ВГЛТА (18–21 марта 2008 г.). Воронеж: ВГЛТА, 2008. С. 108–114.
2. Куликова Е. Новый Лесной кодекс: что ожидали и что получили [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.WWF_forest_lecture.ppt.html
3. Лесной кодекс Российской Федерации: Новая редакция (вступает в силу с 1 января 2007 года) // Кодексы и законы России. Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2007. 79 с.
4. Лесной клуб [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.forestclubexpo.ru.html>
5. Моисеев Н. А. Лесная наука и практика в историческом аспекте: состояние и перспективы на примере России // Леса Евразии – Подмосковные вечера: Материалы X Междунар. конф. молодых ученых. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2010. С. 17–30.
6. Незаконные рубки в России – ситуация на начало 2008 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.woodbusiness.ru/newsdetail.php?aid=1848.html>
7. Нелегальные рубки леса в России [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.yandex.ru/yandexsearch?text.html>
8. Новости пожарной безопасности. 12.10.2010 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.01-news.ru/smi_25.html
9. Писаренко А. И., Страхов В. В. Лесное хозяйство России: национальное и глобальное значение. М., 2011. 600 с.
10. Пожары 2010. 3 сент. 2010 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.greenpeace.org/russia/ru/campaigns/fires/2010/sept/03.html>
11. Последствия засухи // Живой лес: Все о жизни среди деревьев. 2011. Вып. 1. С. 20–24.
12. Риановости. Экология [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.eco.rfa.ru/danger/20101108/293864026.html>
13. Российский статистический ежегодник. 2010 / Статсборник. М.: Росстат, 2010. 813 с.
14. Щетинский Е. А. Лесные пожары и организация борьбы с ними // Лесное хозяйство России: начало третьего тысячелетия. 21–28 сентября 2003 г. М.: ВНИИЛМ, 2003. С. 58–67.
15. Statistica_prirodnich_pozharov [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.versia.ru/articles/2011/oct/17.html>

АЛЕКСЕЙ ЮРЬЕВИЧ БОРИСОВ
научный сотрудник НИИ историко-теоретических проблем народного зодчества, преподаватель кафедры архитектуры строительных конструкций и геотехники строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
borisoff@psu.karelia.ru

АРХИТЕКТУРНО-ЛАНДШАФТНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ТРАДИЦИОННЫХ ПОСЕЛЕНИЙ КАРЕЛИИ (по картам Генерального межевания XVIII века)*

Рассматриваются возможности карт Генерального межевания XVIII века как источников для историко-архитектурного анализа планировочной структуры традиционных поселений. На примере сводных планов Повенецкого, Пудожского уездов проводится анализ заселения исследуемой территории, основных планировочных структур поселений, выявление степени значимости основных природных элементов пространственной ориентации застройки – солнца и водоемов в сопоставлении с искусственными – дорогами.

Ключевые слова: традиционное сельское поселение, историко-архитектурный анализ, карты Генерального межевания, заселение территории, планировочная структура, формы поселений, ориентация застройки, приоритеты ориентации

Традиционное сельское поселение Русского Севера – сложное архитектурно-планировочное образование. Одной из наиболее характерных для него особенностей является вписанность в окружающее природное пространство, обеспечиваемая умелым использованием ландшафтных и климатических особенностей территории при формировании застройки для создания в поселении комфортной среды проживания [7]. Наиболее продуктивными критериями для оценки влияния природных условий на организацию традиционных сельских поселений являются: выбор местоположения поселения в ландшафте (тип заселения); степень подчиненности структуры поселения ландшафтным элементам, главным образом берегам водоемов; степень значимости того или иного природного элемента в качестве объекта для ориентации застройки.

В настоящее время для анализа планировочных структур с этой точки зрения нами используются натурный материал и архивные данные поздних периодов, представляющие собой генеральные планы отдельных поселений, зафиксированные с разной степенью детализации преимущественно в течение XX века. Разновременные и разрозненные материалы не позволяют ни составить общую картину существующих планировочных форм определенного субрегиона по единовременному срезу, ни выявить тенденции развития заселения и форм поселений в исторической ретроспективе. Альтернативой такому подходу могут служить этноархитектурные инвентаризации (единовременные сплошные обследования достаточно больших территорий) и использование архивных материалов, также предоставляющих результаты акций по единовременной фиксации поселений.

В этой связи вызывают интерес карты Генерального межевания, проводившегося в России в конце XVIII века. Это наиболее ранний картографический источник, относительно объективно отражающий расположение поселений в конкретной природно-географической ситуации. Предшествующие Писцовые межевания ограничивались лишь детальным описанием поселений без составления какой-либо дополнительной графической документации [3; 9].

Рассматриваемые картографические материалы составлялись относительно точно, поскольку изображенная на них территория юридически относилась «не к именам владельцев, но к именам сел и деревень», а приводимая на планах графическая информация способствовала разрешению споров о праве собственности [3; 9].

Для нас наибольший интерес представляет графическая трактовка населенных пунктов как основного объекта анализа. При составлении карт межевания вводились условные обозначения, предположительно моделирующие массовую застройку. В использованных обозначениях более толстая линия отражает положение жилой застройки, а более тонкие используются для указания положения хозяйственных наделов, которые традиционно располагались позади домов. Тонкими линиями также обозначены дороги и подъезды к поселениям (рис. 1). Тракты дополнительно выделены цветом [9; 87–88]. Все это с достаточной степенью вероятности позволяет определить тип заселения территории, дорожную сеть, дает возможность судить о положении «лица» застройки, что является достаточным для выявления основных планировочных характеристик – структурообразующих элементов и приоритетов пространственной ориентации жи-

лица. В качестве последних могут выступать как природные элементы – солнце, водоемы, так и искусственные – линии дорог, архитектурные доминанты. На картах Генерального межевания поселения интерпретируются только через линейные структуры, основными из которых являются рядовые и уличные. Поселения, для которых характерны другие планировочные формы – беспорядочные или замкнутые, определяются сочетаниями простых линейных структур.

В целом карты Генерального межевания характеризуются чрезмерными обобщениями и упрощениями природно-географической ситуации, отсутствием ландшафтных подробностей и сведений о взаимном положении построек. Сопоставление графических обозначений населенных пунктов на межевых уездных планах с их картографическими изображениями и генпланами последнего столетия позволяет выделять некоторые несоответствия. Планы на сравниваемых разновременных документах сходны между собой благодаря привязке поселений к крупным географическим объектам, их пространственной ориентации, преемственности планировочной структуры (рис. 2). Нередки случаи частичного нарушения пространственной ориентации поселений, но их изображение – лишь условная обобщенная графическая интерпретация на момент межевания, подвергавшаяся впоследствии корректировкам. В данной связи затрудняется детальная оценка отдельно взятого поселения, но при сплошном общетерриториальном исследовании и статистическом обобщении результатов анализа наличие некоторых условностей представляется допустимым.

На материале генеральных планов Повенецкого и Пудожского уездов Олонецкой губернии нами проведено исследование, направленное на выявление отличий в учете природных факторов при формировании поселений у разноэтничного населения – русских, карел, вепсов. Этническая картина уездов позволяет сделать такие сравнения. Почти весь Повенецкий уезд в XVIII веке был населен карелами, крайний юго-восток – русскими; кроме того, по южной части уезда, по новейшим топонимическим исследованиям, проходила северная граница древневепсского ареала [6; 21]. Пудожский уезд имел русское население, но в языке, топонимии и традиционной культуре этой территории даже в XX веке прослеживался выраженный вепсский субстрат [4; 269–271], [5; 363–364], [6; 21]. Однако этот факт не дает возможности указать на определенную локализацию вепского населения в Пудожье в XVIII веке.

Аналитическую базу составили 274 поселения Повенецкого и 291 поселения Пудожского уездов. Основной доле проанализированных картографически зафиксированных на период XVIII века деревень соответствует приводомный тип заселения территории: в Повенецком уезде – 88,8 %, в Пудожском – 83,2 % (см. таблицу). В связи со спецификой природных ландшафтов наиболее характерными местами расположения поселений в Повенецком уезде являются берега озер, в меньшей степени – рек. В Пудожском уезде наиболее освоенными на период Генерального межевания являются крупные озера ввиду их промыслового значения и долины рек, отличающиеся наиболее плодородными землями и используемые для аграрного освоения.

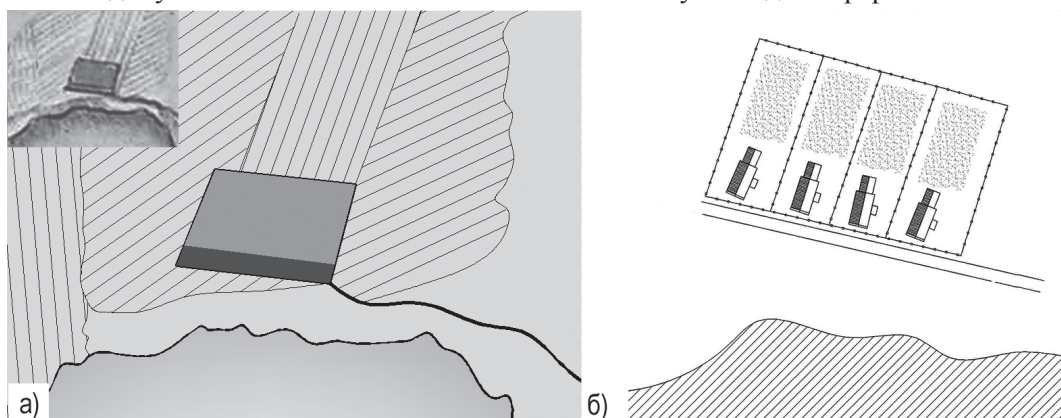


Рис. 1. Интерпретация поселения на карте Генерального межевания: а – изображение поселения на карте Генерального межевания; б – интерпретация планировочной структуры поселения

Анализ характерных приоритетов ориентации застройки по уездам

Уезд	Доля приводомных поселений, %	Доля сельских поселений, %	Доля придорожных поселений, %	Доля застройки с приоритетом ориентации застройки от общего количества поселений уезда, %						
				«На лето»	На водоем	«На лето» и водоем	На дорогу	На культовые сооружения	На внутреннее пространство	Другое
Пудожский	83,2	16,8	94,8	35,7	51,4	25,4	37,2	1,7	31,9	8,3
Повенецкий	88,8	11,2	85,5	57,7	73,7	45,7	14,1	3,0	7,2	6,5

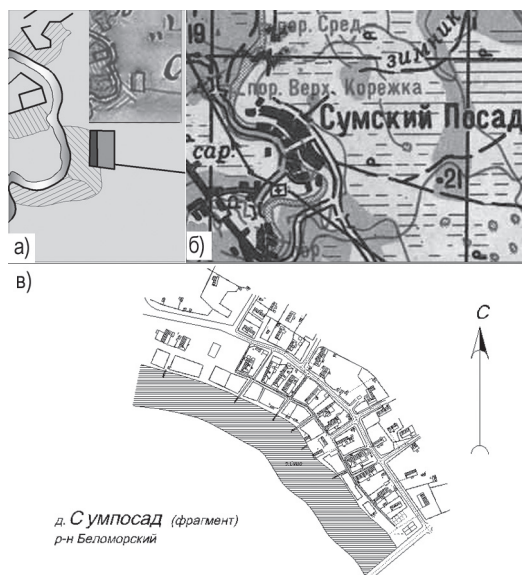


Рис. 2. Сопоставление картографических данных на период конца XVIII–XX веков. Село Сумский Посад (Беломорский район Карелии): а – изображение Сумского Посада на карте Генерального межевания; б – Сумский Посад на карте середины XX века; в – шагомерно-азимутная съемка центральной части Сумского Посада в 2005 году (обмер автора)

Сележные, или водораздельные, поселения возникали при недостатке удобных участков для размещения новых деревень у водоемов. В Повенецком уезде сележных поселений почти в два раза меньше, чем в Пудожском, и располагаются они в южной части уезда, где благоприятные условия для занятий земледелием. К поселениям Пудожского уезда, расположенным по сележным принципам, относятся в основном деревни, тяготеющие к речным долинам, но находящиеся на некотором удалении от рек.

На наш взгляд, различия в заселении и расселении между карельским Повенецким и русским Пудожским уездами являются следствием разных акцентов в хозяйственных занятиях населения – промыслового у карел, земледельческого у русских и обрусевших вепсов в Пудожье. В этом плане примечательны немногие сележные поселения на юге Повенецкого уезда, которые маркируют древневепский, земледельческий по своим основам, ареал [6; 21].

Кроме характеристик заселения планы Генерального межевания дают возможность говорить об особенностях планировочных форм поселений в исследуемых уездах. Форма сельского поселения определяется взаимосвязями составляющих его крестьянских усадеб как между собой, так и с ландшафтной подосновой и характеризуется тремя основными признаками: ориентацией главных фасадов жилых построек, структурой плана и плотностью застройки, а наиболее существенными признаками планировочной формы являются структура плана и пространственная ориентация жилых построек [1; 55]. Все эти признаки находят свое отражение в графической

интерпретации поселений на исследуемых нами планах Генерального межевания. Многообразие выделяемых с их помощью форм поселений можно объединить в группы рядовых и уличных структур, выделив в каждой группе простые формы и их усложненные варианты.

Наиболее характерными структурами для обоих уездов являются рядовые: 82,9 % в Повенецком, 56,7 % в Пудожском. В то же время в Пудожском уезде наблюдается увеличение числа уличных поселений (28,18 %). В Повенецком уезде усложнение структуры прослеживается в появлении многорядности (13,8 %). Такая картина характерна в основном для волостей, граничащих с Пудожским уездом.

Отметим, что с точки зрения ориентации застройки рядовые структуры – однорядные или многорядные – открыты в окружающее пространство. Напротив, уличная структура противопоставлена природному окружению: два ряда застройки при таком плане ориентированы лицевыми фасадами друг на друга. Таким образом, предрасположенность к раскрытию застройки на природное окружение больше выражена у карельского населения, составляющего абсолютное большинство в Повенецком уезде.

Значение того или иного природно-ландшафтного элемента для организации застройки является при оценке ее пространственной ориентации, которая, в свою очередь, определяется направленностью лицевых фасадов жилых домов. В качестве основных ориентационных приоритетов для анализа выбраны: природные – солнце и водоемы, и составляющие им конкуренцию искусственные – дороги и архитектурные доминанты (культовые сооружения). Отдельно учитывались поселения с трудно выявляемой пространственной ориентацией.

Наиболее характерной, общей для поселений обоих уездов является ориентация на воду (Повенецкий уезд – 73,7 %, Пудожский – 51,4 %), что в первую очередь связано с заселением территории, освоением наиболее плодородных земель, использованием водоемов в качестве путей сообщения и промыслового ресурса. В Повенецком уезде велика доля поселений с ориентацией застройки «на лето» (на юг, южную сторону горизонта) – наиболее архаичного пространственного ориентира (Повенецкий уезд – 57,7 %, Пудожский – 35,7 %). Это подтверждает повышенную консервативность архитектурных традиций у карел, известную по исследованиям других областей деревянного зодчества [8]. При этом для 25,4 % деревень Пудожского и 45,7 % деревень Повенецкого уездов наблюдается благоприятное сочетание приоритетов ориентации застройки «на лето» и на водоем, что обусловлено их расположением на северных берегах водоемов.

При сопоставимом количестве придорожного расположения поселений (85,5 % в Повенецком

и 94,6 % в Пудожском уезде) на территории Пудожья более чем в 2 раза больше доля поселений с ориентацией на дорогу, что дополнительно подчеркивает картину различий в отношении к природным и искусственным приоритетам ориентации в сравниваемых разноэтничных уездах.

Особый интерес представляют поселения, по структуре и типу заселения тяготеющие к определенной ориентации, но по каким-либо причинам не характеризующиеся ею. К таким можно отнести рядовые приводомные поселения без ориентации на водоем. Наибольшее распространение такие поселения получили в Пудожском уезде – 31,3 % (в Повенецком уезде – 14,9 %). Застройка в них в большинстве случаев обращена на дорогу, что говорит о большей значимости дороги как приоритета пространственной ориентации. Другой подобный пример относится к западному побережью Повенецкого залива, где наблюдается распространение рядовых поселений, которые при возможности ориентации на водоем предпочитают обращать застройку в сторону от водоема и раскрывать ее «на лето».

Рассмотренные случаи пренебрежения ориентацией на воду в приводомных поселениях напоминают ситуацию в поселениях южных вепсов (Бокситогорский район Ленинградской области), прослеженную нами в экспедиции в 2002 году. Возможно, в Пудожском и на юге Повенецкого уезда, где, как мы отмечали выше, фиксируется вепсский этнический субстрат, проявляется некая древняя вепсская традиция исключения водоема из архитектурно-ландшафтного комплекса поселения [2].

Взаимосвязь поселения с водоемом также может быть рассмотрена на примере поселений с улич-

ной структурой. На межевых планах фиксируются уличные формы, вытянувшиеся вдоль берега, как правило, одновременно и вдоль дороги, параллельной береговой линии. Такие улицы мы называли закрытыми к водоему, ориентированными на внутреннее пространство или дорогу. Открытые к водоему улицы расположены перпендикулярно к водоему. Подобная организация поселения сочетает преимущества расположения у воды, реализацию предпочтения уличной формы и ориентацию на водоем, но в виде раскрытия к воде уличной перспективы. Такие случаи фиксируются в основном на больших водоемах – на Кенозере, и особенно на Водлозере, где примеры таких улиц сохранялись еще в конце XX века. Можно предположить, что формирование открытых к водоему улиц – компромиссное решение, позволяющее подчеркнуть приоритетность водоема при организации поселения и одновременно создавать подобие замкнутых планировочных структур, способствующих укрытию от сильных ветров с озера.

В целом результаты проведенного анализа не противоречат данным, полученным исследователями преимущественно на протяжении последнего столетия. Масштаб и единая организация проведенных в XVIII веке межевых мероприятий открывают возможности для сравнения синхронных данных по разным территориям; при сопоставлении с более поздними материалами позволяют определить направленность и динамику развития планировочных структур, выявить возможную несинхронность их изменений в разных этнических ареалах. Такие исследования будут способствовать уточнению истории формирования традиционных поселений и влиянию этнического фактора на этот процесс.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришина И. Е. Планировочные приоритеты в развитии традиционных сельских поселений Карелии // *Архитектурное наследие*. № 44. М., 2001. С. 55–62.
2. Гришина И. Е., Борисов А. Ю. Некоторые результаты историко-архитектурного исследования поселений южных вепсов // *Современная наука о вепсах: достижения и перспективы* / Отв. ред. И. Ю. Винокурова. Петрозаводск, 2006. С. 276–285.
3. Комов Н. В., Родин А. З., Алакоз В. В. Земельные отношения и землеустройство в России. М., 1995. 512 с.
4. Логинов К. К. Основные компоненты традиционно-бытовой культуры русских Водлозерья // *Национальный парк «Водлозерский»: природное разнообразие и культурное наследие*. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2001. С. 267–271.
5. Логинов К. К. Этническая история Восточного Обонежья // *Очерки исторической географии. Северо-Запад России. Славяне и финны* / А. Алквист, В. А. Булкин, И. Ю. Винокурова и др.; Под общ. ред. А. С. Герда, Г. С. Лебедева. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001. С. 360–369.
6. Муллонен И. И. Исторические топонимы в контексте этнокультурного наследия Карелии // IX Конгресс этнографов и антропологов России: Тез. докл. Петрозаводск, 4–8 июля 2011. Петрозаводск, 2011. С. 19–23.
7. Орфинский В. П. Вековой спор. Типы планировки как этнический признак (на примере поселений Русского Севера) // *Советская этнография*. 1989. № 2. С. 55–62.
8. Орфинский В. П., Гришина И. Е. Традиционный карельский дом. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2010. 480 с.
9. Цицианов Д. П. Краткое математическое изъяснение землемерия межевого. СПб., 1757.

ИГОРЬ ВЛАДИСЛАВОВИЧ ГРИГОРЬЕВ

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

АЛЕКСАНДР БОРИСОВИЧ БЫЛЕВ

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики факультета химической технологии и биотехнологии, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
unpplta@mail.ru

АННА МИХАЙЛОВНА ХАХИНА

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

АНТОНИНА ИВАНОВНА НИКИФОРОВА

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

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПЛОТНЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДИНАМИКИ ПОВОРОТА ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ НА БОКОВЫЕ ПОЛОСЫ ТРЕЛЕВОЧНОГО ВОЛОКА*

Представлено общее теоретическое обсуждение волн в грунтах, а также приведены оценки уплотнения почвы. Показано, что выбором скоростного режима лесных машин можно заметно воздействовать на механизм уплотнения почвы.

Ключевые слова: трелевка, уплотнение почвы, трасса движения, поворот трактора

Лесозаготовительная техника воздействует на все компоненты лесной среды: деревья, остающиеся на доращивание, подрост, и особенно на почвогрунты, вызывая уплотнение почвогрунтов на технологических коридорах и вокруг них, колееобразование и минерализацию верхнего почвенного слоя. В результате уплотнения почвы уменьшается эффективный размер пор, что затрудняет циркуляцию почвенного воздуха, снижая содержание в нем кислорода. Согласно [4] для активного роста кончиков корней концентрация кислорода должна достигать 5–10 %; при концентрации кислорода менее 1 % корни заметно теряют в весе. Независимо от глубины стержневых крупных корней основная масса всасывающих корешков и корневых окончаний расположена в верхнем слое почвы, поскольку он обладает лучшими физико-химическими свойствами, содержит основное питание и обеспечивает достаточный подвод кислорода к корешкам за счет наличия почвенных пор. Если почва не уплотнена, то корневые ходы, трещины и другие внутрипочвенные полостные образования способствуют усиленному развитию корней

и обеспечивают их прирост. В противном случае происходит их угнетение. Уплотнение почвы ведет также к резкому снижению скорости фильтрации воды, затрудняя проникновение влаги в глубинные слои, способствуя застою воды в углублениях, что также отрицательно влияет на жизнь растений. Избыток влаги нарушает деятельность почвенных микроорганизмов, играющих важную роль в обеспечении корней растений доступными элементами питания. Негативно сказываются на лесном массиве и колееобразовательные процессы. Глубокая колея ведет к разрушению большей части корневой системы, попадающей на волок, может служить накопителем излишней влаги, а также способствует водной эрозии.

Вопросы выбора машин и технологий лесозаготовок с целью снижения отрицательного воздействия на почвогрунты рассматривались в работах [5], [6], [7]. В [6] главное внимание было уделено колееобразованию, а в [5], [7] – уплотнению почвогрунтов, причем в [7] исследовалось уплотнение почвогрунтов не только в области волока, но и за его пределами. В [7] рассматри-

вались напряженные состояния среды, вызванные поворотами гусеничных движителей при движении по волоку. В случае колесной техники неизбежно возникающие при движении транспортного средства многочисленные удары колес движителя о дно и боковые стенки колеи вызывают в среде волны деформаций. Это также ведет к уплотнению грунта за пределами волока.

Грунт представляет собой сложную многофазную дисперсную систему, макроскопическое поведение которой под действием нагрузок определяется протеканием многих параллельно идущих процессов различной механической природы. Для феноменологического описания напряженно-деформированного состояния и процессов в грунтах привлекают представления и методы механики сплошных сред, используя различные реологические модели для учета качественных и количественных характеристик деформационных процессов. Многообразие природных разновидностей грунтов и условий воздействия на них ведет к соответствующему многообразию форм макроскопического поведения среды. Для описания грунтов [3] широко применяют модели: Гука, Кельвина – Фойгта, Максвелла, Сен-Венана, Шведова, в которых для описания поведения материала под действием механических нагрузок используются три типа элементов – упругая пружина, вязкий демпфер и пластический шарнир. Все эти модели, однако, обладают симметрией по отношению к растяжению и сжатию, тогда как характерной особенностью грунтов является различное сопротивление растяжению и сжатию с нелинейной зависимостью между деформациями и напряжениями при нагрузках и разгрузках. Как показывают многочисленные эксперименты [9], при любых по интенсивности воздействиях на среду при разгрузке возникают остаточные деформации. Слабые воздействия и малые деформации среды, возникающие в грунте вне трассы при движении лесозаготовительной техники, накапливаясь, могут приводить к заметному уплотнению грунта.

Существуют разные подходы к тому, как учесть различное сопротивление при растяжении и сжатии. Так, в [8], чтобы учесть различное сопротивление материала, реологический метод дополняется новым элементом – жестким контактом, моделирующим идеально сыпучую среду с жесткими частицами. Используя жесткий контакт в сочетании с традиционными элементами, можно строить реологические схемы материалов со сложным комплексом механических свойств. Другой подход предлагается в теории гипопластичности [10], в которой связь напряжение – деформации представляется нелинейным эволюционным уравнением с коэффициентами, в общем случае зависящими от параметров напряженного состояния и пористости среды, а также от констант, характеризующих типы материалов

и определяемых из экспериментов и расчетов. Результаты изучения некоторых закономерностей распространения волн в грунтах на основе гипопластической модели среды представлены в [1]. Наше рассмотрение опирается на это исследование. Представлено общее теоретическое обсуждение волн в грунтах, а также приведены оценки уплотнения почвогрунта. Показано, что выбором скоростного режима лесозаготовительного транспорта можно заметно воздействовать на этот механизм уплотнения почвогрунтов.

В механике сплошных сред изменение импульса среды определяется уравнением

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (1)$$

здесь ρ – плотность среды, v_i – скорость частиц среды, σ_{ij} – тензор напряжений, x_i – декартовы координаты, по повторяющимся индексам проводится суммирование. Чтобы получить замкнутую модель, необходимо ввести зависимость между напряжениями и деформациями. Такая связь называется определяющим уравнением.

Простейшим определяющим уравнением является закон Гука $\sigma = \sigma(\epsilon)$. Согласно этому уравнению напряжение σ зависит только от относительной деформации ϵ и не зависит от пути нагружения и истории деформирования. Материалы и среды, которые могут быть описаны подобными соотношениями, называются упругими. Как указывалось выше, многочисленные наблюдения, проведенные в полевых и лабораторных условиях, показывают, что грунты не являются упругими и определяющие уравнения для них должны быть иными.

Определяющее уравнение для грунтов должно отражать отмеченную выше особенность грунтов – их жесткость при нагружении меньше жесткости при разгрузке. Поясним на простом одномерном примере, как можно решить эту проблему. Рассмотрим одномерную цепочку из грузиков, соединенных между собой пружинками. Возьмем какие-либо два соседних из них и пусть величины u_1 и u_2 задают смещения этих грузиков из положения равновесия (второй грузик для определенности расположен правее первого грузика). Тогда разность $u_2 - u_1$ определит деформацию пружинки, соединяющей эти грузики. По закону Гука сила упругости, действующая на грузики, пропорциональна деформации $\sigma = k(u_2 - u_1)$. Пусть при нагружении пружины ее коэффициент жесткости равен k_1 , а при разгрузке он равен k_2 . При нагружении грузики сближаются и $u_2 - u_1$ уменьшается, то есть производная по времени от $u_2 - u_1$ отрицательна $\frac{\partial(u_2 - u_1)}{\partial t} < 0$. При разгрузке пружины, наоборот, $\frac{\partial(u_2 - u_1)}{\partial t} > 0$. Чтобы учесть различие коэффициентов жесткости при нагру-

жении и разгрузке, вместо закона Гука следовало бы писать соотношения $\frac{\partial \sigma}{\partial t} = k_1 \frac{\partial(u_2 - u_1)}{\partial t}$ при $\frac{\partial(u_2 - u_1)}{\partial t} < 0$ и $\frac{\partial \sigma}{\partial t} = k_2 \frac{\partial(u_2 - u_1)}{\partial t}$ при $\frac{\partial(u_2 - u_1)}{\partial t} > 0$. Переходя к пределу сплошной среды, то есть увеличивая число грузиков и уменьшая расстояние между ними с сохранением плотности, разность $u_2 - u_1$ следует заменить на пространственную производную $\frac{\partial u}{\partial x}$, а $\frac{\partial(u_2 - u_1)}{\partial t}$ заменить на $\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial x}$, где $v = \frac{\partial u}{\partial t}$ – скорость деформации среды. Тогда определяющие уравнения переписываются в виде $\frac{\partial \sigma}{\partial t} = k_1 \frac{\partial v}{\partial x}$ при $\frac{\partial v}{\partial x} < 0$ и $\frac{\partial \sigma}{\partial t} = k_2 \frac{\partial v}{\partial x}$ при $\frac{\partial v}{\partial x} > 0$. Эти два уравнения можно записать в виде одного уравнения, если ввести коэффициенты $\mu_1 = \frac{k_2 + k_1}{2}$ и $\mu_2 = \frac{k_2 - k_1}{2}$. Определяющее соотношение принимает теперь вид

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \mu_1 \frac{\partial v}{\partial x} + \mu_2 \left| \frac{\partial v}{\partial x} \right|. \quad (2)$$

Это уравнение содержит модуль производной скорости среды по координате и поэтому является нелинейным даже в малом, а сама зависимость между напряжением и деформациями представляется в виде уравнения эволюционного типа, связывающего скорость изменения напряжения и скорость деформации среды. Такой подход используется для описания поведения сред в теории гипопластичности [10].

Определяющее уравнение гипопластической среды в общем случае можно записать в виде

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial t} = -(\sigma \omega)_{ij} + (\omega \sigma)_{ij} + L_{ijkl}(\varepsilon, e) \varepsilon_{kl} + N_{ij}(\varepsilon, e) \|\varepsilon\|, \quad (3)$$

где $e = \frac{V - V_s}{V_s}$ – пористость среды, V_s – объем твер-

дой фазы, V – полный объем, $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$ – тензор скоростей деформаций, $\omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$ –

тензор скоростей вращений, $\|\varepsilon\| = \sqrt{\text{tr}(\varepsilon \varepsilon)}$ – норма тензора скоростей деформаций (аналогом $\|\varepsilon\|$ в одномерном случае служит обсуждавшийся выше модуль $\left| \frac{\partial v}{\partial x} \right|$ в уравнении (2)), L и N – некоторые тензорные функции указанных аргументов, имеющие различные представления, в которые входят константы, характеризующие свойства материала.

Не ограничивая по существу общности рассмотрения, обсудим плоскую волну, распространяющуюся в положительном направлении оси x . В этом случае искомые компоненты скоростей и напряжений являются функциями только одной координаты x и времени t . В соответствии с постановкой задачи рассмотрим распространение малых деформаций и, кроме того, будем считать, что начальное состояние среды однородное и $\vec{v}^0 = 0$ (индекс 0 здесь и далее соответствует исходному невозмущенному состоянию среды). При сделанных предположениях система уравнений (1) и (3), описывающая движение гипопластической среды, приводится к системе трех нелинейных уравнений второго порядка для компонент скорости $\vec{v} = (v_1, v_2, v_3)$

$$\frac{\partial^2 v_1}{\partial t^2} - c_p^2 \frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2} = a_1 \frac{\partial^2 v_2}{\partial x^2} + a_2 \frac{\partial^2 v_3}{\partial x^2} + b_1 \frac{\partial}{\partial x} \|\varepsilon\|, \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 v_2}{\partial t^2} - c_{s1}^2 \frac{\partial^2 v_2}{\partial x^2} = a_3 \frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2} + a_4 \frac{\partial^2 v_3}{\partial x^2} + b_2 \frac{\partial}{\partial x} \|\varepsilon\|, \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 v_3}{\partial t^2} - c_{s2}^2 \frac{\partial^2 v_3}{\partial x^2} = a_5 \frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2} + a_6 \frac{\partial^2 v_2}{\partial x^2} + b_3 \frac{\partial}{\partial x} \|\varepsilon\|, \quad (6)$$

где $\|\varepsilon\| = \sqrt{\left(\frac{\partial v_1}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_2}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_3}{\partial x} \right)^2}$, а коэффициенты $c_p, c_{s1}, c_{s2}, a_1, \dots, a_6, b_1, \dots, b_3$ определяются

параметрами исходного состояния среды и принятой модели. Если все коэффициенты a_i, b_j равны нулю, то уравнения (4)–(6) превращаются в независимые друг от друга линейные волновые уравнения, описывающие распространение трех упругих волн (одной продольной и двух поперечных) со скоростями c_p, c_{s1}, c_{s2} . Предполагая, что главные оси невозмущенного тензора напряжений σ_{ij} совпадают с осями x, y, z , так что $\sigma_{xy}^0 = \sigma_{xz}^0 = \sigma_{yz}^0 = 0$, получим вместо (4)–(6) более простую систему уравнений

$$\frac{\partial^2 v_1}{\partial t^2} - c_p^2 \frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2} = b_1 \frac{\partial}{\partial x} \|\varepsilon\|, \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 v_2}{\partial t^2} - c_{s1}^2 \frac{\partial^2 v_2}{\partial x^2} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 v_3}{\partial t^2} - c_{s2}^2 \frac{\partial^2 v_3}{\partial x^2} = 0. \quad (9)$$

Уравнение (7) представляет собой нелинейное неоднородное волновое уравнение, описывающее продольные и поперечные движения среды, а два других уравнения (8) и (9) являются линейными волновыми уравнениями, как и в упругом случае, с постоянными, но, вообще говоря, различными скоростями c_{s1}, c_{s2} . Таким образом, две поперечные (сдвиговые) волны распространяются независимо друг от друга и от продольного движения, в то время как попе-

речные движения воздействуют на продольные волны. Другими словами, в гипопластических средах поперечные волны приводят к возбуждению продольных волн. Применительно к нашей задаче это означает, что удары колеса о дно колеи в вертикальном направлении тем не менее будут вызывать продольные волны, бегущие параллельно поверхности.

Поперечные волны являются упругими и не приводят к появлению остаточных деформаций, поэтому сосредоточим внимание на обсуждении продольной волны и рассмотрим продольную волну в отсутствие поперечных движений ($v_2 = v_3 = 0$). В этом случае продольные возмущения описываются уравнением

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - c_p^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = b \frac{\partial}{\partial x} \left| \frac{\partial v}{\partial x} \right|. \quad (10)$$

Здесь мы перешли к обозначению $v_1 \equiv v$, $b_1 \equiv b$. Решение этого уравнения зависит от знака производной $\frac{\partial v}{\partial x}$. Если $\frac{\partial v}{\partial x} < 0$ всюду и $b < c_p^2$, то уравнение (10) сводится к линейному волновому уравнению

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - (c_p^2 - b) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0, \quad (11)$$

и, как известно, его решения соответствуют переносу начального возмущения без изменения формы с постоянной скоростью $c_1 = \sqrt{c_p^2 - b}$. Если $\frac{\partial v}{\partial x} > 0$, то уравнение принимает вид

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - (c_p^2 + b) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0, \quad (12)$$

и его решения соответствуют переносу начального возмущения без изменения формы с постоянной скоростью $c_2 = \sqrt{c_p^2 + b}$. В нашем случае $b > 0$, поэтому $c_2 > c_1$ и профили, соответствующие положительным значениям градиента скорости $\frac{\partial v}{\partial x}$, распространяются быстрее, чем профили с отрицательным значением этого градиента. С учетом обсуждения, проведенного выше, это означает, что возмущения, соответствующие нагружению грунта, распространяются медленнее возмущений, отвечающих разгрузке грунта.

В предположении малости параметра b уравнение (10) можно упростить, воспользовавшись приближенным методом, изложенным, например, в [11]. Это позволит оценить остаточную деформацию, возникающую в среде после прохождения волны.

Факторизуем волновой оператор

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} - c_p^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} = \left(\frac{\partial}{\partial t} - c_p \frac{\partial}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial}{\partial t} + c_p \frac{\partial}{\partial x} \right)$$

и выделим волну, распространяющуюся в положительном направлении оси x . Для любого волнового профиля, распространяющегося в сто-

рону $x > 0$ со скоростью, приближенно равной c_p , производные по x и t связаны соотношением $\frac{\partial}{\partial t} \approx -c_p \frac{\partial}{\partial x}$, и волновой оператор переписывается в виде

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} - c_p^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \approx -2c_p \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial}{\partial t} + c_p \frac{\partial}{\partial x} \right),$$

что позволяет уравнение (10) записать так:

$$-2c_p \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial}{\partial t} + c_p \frac{\partial}{\partial x} \right) = b \frac{\partial}{\partial x} \left| \frac{\partial v}{\partial x} \right|. \quad (13)$$

Интегрирование этого уравнения по координате x дает уравнение первого порядка

$$\frac{\partial v}{\partial t} + c_p \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{b}{2c_p} \left| \frac{\partial v}{\partial x} \right| = 0. \quad (14)$$

Опишем характер решения этого уравнения. Пусть в начальный момент времени профиль возмущения имеет колоколообразный вид, что типично для возмущений, вызываемых ударами,

$$v(x, 0) = v_0 e^{-\frac{(x-x_0)^2}{l^2}}.$$

В начальный момент времени возмущение локализовано в окрестности точки x_0 . Производная $\frac{\partial v}{\partial x}$ для этого профиля меняет знак, поэтому

с течением времени по мере распространения профиль возмущения будет меняться: участки с отрицательной производной движутся со скоростью $c_1 = c_p - \frac{b}{2c_p}$, а участки с положительной

производной движутся со скоростью $c_2 = c_p + \frac{b}{2c_p}$.

В результате их взаимодействия амплитуда возмущения по мере распространения уменьшается и импульс через некоторое время исчезает. Если считать, что начальное возмущение сосредоточено в области $(x_0 - l, x_0 + l)$, то импульс исчезнет, когда левая граница импульса догонит правую, то есть при выполнении условия

$$x_0 - l + c_2 t = x_0 + l + c_1 t.$$

Отсюда находим время распространения импульса и дальность распространения

$$T = \frac{2l}{c_2 - c_1} = \frac{2lc_p}{b}, \quad (15)$$

$$L = c_p T = \frac{2lc_p^2}{b}. \quad (16)$$

Остаточную относительную деформацию среды δ в точке x после прохождения волны можно найти следующим образом:

$$\delta = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = \int_0^\infty \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) dt = \int_0^\infty \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) dt = \int_0^\infty \frac{\partial v(x, t)}{\partial x} dt. \quad (17)$$

Если до момента времени t через точку x проходят участки с отрицательной производной $\frac{\partial v}{\partial x}$, то согласно (14)

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{c_1} \frac{\partial v}{\partial t}.$$

После момента времени t через точку x проходят участки с положительной производной и

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{c_2} \frac{\partial v}{\partial t}.$$

Подставляя эти выражения в (17), находим

$$\delta = \int_0^t \left(-\frac{1}{c_1} \frac{\partial v}{\partial t} \right) dt + \int_t^\infty \left(\frac{1}{c_2} \frac{\partial v}{\partial t} \right) dt = -\frac{1}{c_1} v(x, t) + \frac{1}{c_2} v(x, t) = \left(\frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_1} \right) v(x, t).$$

Как видим, остаточная относительная деформация отрицательна, что соответствует остаточному сжатию среды.

Таким образом, остаточную относительную деформацию на расстоянии r от точки x_0 по направлению распространения сигнала можно оценить величиной

$$|\delta| = \left(\frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_1} \right) v_0 e^{-\frac{r^2}{L^2}} \approx \frac{b}{c_p^3} v_0 e^{-\frac{r^2}{L^2}}. \quad (18)$$

Оценка (18) получена для случая плоского возмущения. Проведем теперь на ее основе оценку уплотнения почвогрунта в боковых полосах трелевочного волока, возникающего под воздействием динамики движения и поворота лесозаготовительной машины. Удар колес о грунт вызывается неровностью рельефа волока, столкновениями колес с боковыми стенками колеи при движении и поворотах. Удары характеризуются коротким импульсным воздействием и создают как продольные, так и поперечные волны. При этом преобразование энергии воздействия в колебательную энергию распространяющихся волн происходит в некоторой пространственной окрестности вокруг точки воздействия, и эта область также принимает участие в излучении волн. Приблизительно вне этой области источник воздействия можно описывать моделью сферического излучателя, расположенного на поверхности [2]. Эффективный радиус излучателя обозначим R_0 . Энергия возмущения вдоль поверхности переносится главным образом поверхностными волнами, объемные волны во внимание можно не принимать [2]. Скорость распространения поверхностных волн в однородной среде [2] практически не зависит от частоты, но поверхностные волны экспоненциально затухают вглубь на расстояниях порядка длины волны. Поэтому оценкой (18), полученной в предположении отсутствия дисперсии, можно пользоваться непосредственно вблизи поверхности. Толщину этого слоя можно оценить величиной $c\delta t$, где c – скорость распространения волны, а δt – длительность импульса. Для типичных скоростей

поверхностных волн в почвогрунтах ≈ 300 м/с и при длительности импульса 5 мс толщина слоя будет более 1 м, что превосходит представляющий интерес почвенный слой $\approx 0,4$ м.

Отметим еще чисто геометрическое затухание возмущения, вызванное тем, что от места воздействия возмущение распространяется по всем направлениям. Можно принять, что в результате геометрического затухания поверхностной волны амплитуда скоростей точек среды убывает как $\frac{1}{\sqrt{r}}$, где r – расстояние от места удара до точки, в которой определяется остаточное сжатие.

Удары, вызывающие волны деформаций в среде, можно считать происходящими случайно и охарактеризовать их средним числом ударов на единицу пути $n = \frac{1}{a}$, где a – среднее расстояние

между двумя последовательными ударами. Для оценки полного остаточного сжатия среды Δ нужно просуммировать сжатия (18), вызываемые всеми ударами

$$\Delta = \int n |\delta| dx \approx \int_{-\infty}^{\infty} \frac{b v_0 \sqrt{R_0}}{c_p^3 a} \frac{e^{-\frac{R^2+x^2}{L^2}}}{\sqrt{R^2+x^2}} dx.$$

Здесь интегрирование проводится по трассе, R – расстояние до трассы от точки, где определяется остаточное сжатие, L – дальность распространения сигнала (16), v_0 – максимальная скорость точек среды при ударе, определяемая на нормировочном расстоянии R_0 от места удара. Скорость v_0 , определяемая силой удара, зависит от многих факторов: скорости движения лесозаготовительного агрегата, его нагруженности, неровности рельефа волока, характера движения, давления в шинах. Исследуя влияние скоростного режима движения лесозаготовительной машины на уплотнение почвогрунта, можно принять, что в среднем скорость v_0 при прочих равных условиях пропорциональна скорости движения транспорта v , то есть $v_0 = \alpha v$. Значение числового коэффициента α определяется перечисленными выше факторами.

В результате, выполняя интегрирование и подставляя выражение (16) для дальности L , получаем оценку среднего уплотнения почвогрунта на расстоянии $R > R_0$ от трассы волока при движении по нему лесозаготовительной машины со скоростью v

$$\Delta = 4\alpha \frac{v}{c_p} \sqrt{\frac{L^2 R_0}{a^2 L}} f\left(\frac{R}{L}\right). \quad (19)$$

Функция $f(s) = \int_0^\infty \frac{e^{-(s^2+x^2)}}{\sqrt{a^2+x^2}} dx$, входящая в (19),

является монотонно убывающей. Ее значения не превышают 2 и почти равны 0 при $R > 2L$.

В окончательном выражении для остаточного сжатия соотношение (19) нужно еще умножить на число проходов транспорта по трассе I

$$\Delta = 4\alpha I \frac{v}{c_p} \sqrt{\frac{l^2 R_0}{a^2 L}} f\left(\frac{R}{L}\right). \quad (20)$$

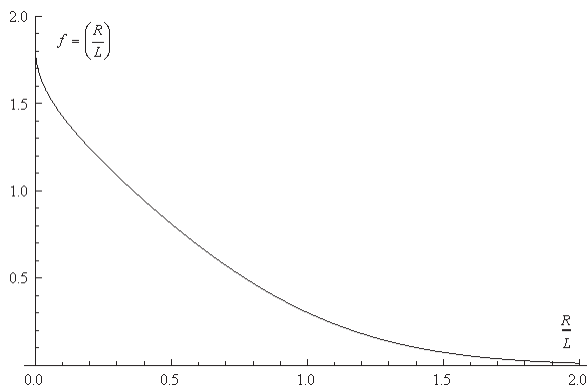


График функции $f(s)$

Отметим, что оценка (20) не учитывает изменения свойств грунта при многократном прохождении по трассе транспорта и потому является завышенной. Отметим также, что оценка уплотнения почвогрунта (20), как это следует из проведенного рассмотрения, применима на расстояниях R больших R_0 . На расстоянии $R = R_0$ уплотнение конечно и быстро убывает с увеличением расстояния R .

Используемый в литературе [5] коэффициент уплотнения почвогрунта ρ_1/ρ связан с Δ очевидным образом

$$\rho_1/\rho = 1 + \Delta.$$

Приведем числовые оценки. Сейсмические волны распространяются в Земле со скоростями 2–8 км/с. В рыхлых породах скорости могут опускаться до значений 1 км/с и меньше. Кроме того, вдоль поверхности волны распространяются с меньшими скоростями, чем в толще Земли [2]. С учетом этого в качестве оценочного значения скорости c_p можно взять 300 м/с. Для параметра b , характеризующего отличие скоростей распространения деформаций нагружения и разгрузки, примем $10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$, тогда относительное отличие указанных скоростей составит 10 %. Характеристику удара l положим равной 20 см, при этом дальность L распространения импульса плоской волны (16) составит 4 м. Среднее расстояние между двумя последовательными ударами оценим в 0,5 м. Для R_0 можно принять 1 м [2]. Подстановка этих значений параметров дает для остаточного сжатия

$$\Delta \approx 2 \cdot 10^{-3} \alpha I v f\left(\frac{R}{4}\right).$$

Для предельных скоростей движения лесозаготовительных машин примем: 4,5 м/с для порожнего прохода и 2,5 м/с в груженном состоянии. В свою очередь, коэффициент α для груженных машин, очевидно, больше, чем для порожних. Как видим, после 50 проходов транспорта уплотнение почвогрунта на расстоянии 2 м от трассы волока составит от 1 до 10 % при $\alpha = 0,1 \div 0,5$. Для расстояния $R = R_0$ результаты получаются в 1,5 раза выше.

* Материалы данной статьи получены при выполнении НИР № 01201255482 «Разработка теоретических основ сквозных технологических процессов и модульных систем машин лесозаготовительного производства».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березин Ю. А., Сподарева Л. А. Распространение акустических сигналов в грунтах // ПМТФ. 2001. Т. 42. № 4. С. 177–183.
2. Боганик Г. Н., Гурвич И. И. Сейсморазведка: Учебник для вузов. Тверь: Изд-во АИС, 2006. 744 с.
3. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высш. шк., 1978. 118 с.
4. Герасимов Ю. Ю., Сюнёв В. С. Экологическая оптимизация технологических машин для лесозаготовок. Йоэнсуу: Изд-во университета Йоэнсуу, 1998. 178 с.
5. Григорьев И. В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: СПбГЛТА, 2006. 236 с.
6. Григорьев И. В., Жукова А. И., Барашков И. А., Свойкин Ф. В. Разработка лесосек на заболоченных участках // Дерево.ру. 2011. № 6. С. 78–84.
7. Лепилин Д. В. Оценка влияния поворотов трелевочного трактора на уплотнение почво-грунтов лесосеки: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Петрозаводск, 2011. 20 с.
8. Садовская О. В., Садовский В. М. Математическое моделирование в задачах механики сыпучих сред. М.: Физматлит, 2008. 368 с.
9. Цытович Н. А. Механика грунтов. М.: Изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963. 636 с.
10. Kolymbas D. Introduction to hypoplasticity. Rotterdam: Balkema, 2000. 94 p.
11. Whitham G. B. Linear and nonlinear waves. N. Y.: Wiley, 1974.

РЕНАТ ИСХАКОВИЧ АЮКАЕВ

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водоснабжения, водоотведения и гидравлики строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
chistayavoda@rambler.ru

ЕЛЕНА ОЛЕГОВНА ГРАФОВА

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры водоснабжения, водоотведения и гидравлики строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
chistayavoda@rambler.ru

ЕВГЕНИЙ ВИКТОРОВИЧ ВЕНИЦИАНОВ

доктор физико-математических наук, профессор, Институт водных проблем РАН (Москва, Российская Федерация)
venits@aqva.laser.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ МНОГОСЛОЙНЫХ ФИЛЬТРОВ МАЛОЙ ТОЛЩИНЫ ДЛЯ СОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА С ЗАГОРОДНЫХ УЧАСТКОВ АВТОМАГИСТРАЛЕЙ*

Для очистки дождевых и талых стоков с поверхности автотрасс в условиях Северо-Запада перспективно применение многослойных фильтров малой толщины. Для обоснования эффективности работы тонкослойного фильтрования используется аппарат теории динамики сорбции. Рассматриваются оптимальные для применения сорбционные материалы. Приводятся результаты инженерных расчетов.

Ключевые слова: очистка поверхностных стоков, тонкое многослойное фильтрование, динамика сорбции, кривые сорбции

В соответствии с действующим законодательством [2] дождевые и талые воды с автодорог и мостовых переходов в водоохранных зонах должны очищаться перед сбросом в водоемы. Автодорога М-18 «Кола» (от Санкт-Петербурга до границы с Норвегией) пересекает множество водоохранных зон. Она имеет следующие особенности: отсутствие электроснабжения; до 40 % территории заболочено или имеются выходы горных пород; чрезвычайно малое (от 0,3 м) превышение полотна дороги над рельефом местности; высокий уровень грунтовых вод. В таких условиях применение локальных очистных сооружений (ЛОС) подземного размещения и с насосной перекачкой стока исключено. Найдено решение [3], которое предусматривает: самотечное движение стока; его сорбционную очистку на многослойном фильтре малой толщины; расположение ЛОС неглубокое или на поверхности земли; «водозаполненное» состояние в рабочем режиме (очистка стоков) и «сухое» в режиме ожидания (включая зимний период).

Вынужденное использование сорбционного фильтра малой толщины (в противоположность нормативно большой) потребовало соответствующего обоснования. Постановочные эксперименты показали: сорбционная очистка на слоях малой толщины имеет право на жизнь; сорбционный фильтр должен быть многослойным, как минимум трехслойным; один из сорбентов должен обладать высокой сорбционной емкостью, но может иметь плохую кинетику; второй сорбент мо-

жет обладать невысокой сорбционной емкостью, но должен иметь хорошую кинетику; требуется также третий слой сорбента – страховочный.

Перспективным для фильтра с такими показателями оказалось использование полимерного (пенополиуретан), органического (модифицированный торф) и минерального («Новосорб») сорбентов. Для качественной и количественной оценки возможностей этих сорбентов мы воспользовались методами и средствами хорошо развитой теории динамики сорбции.

КИНЕТИКА СОРБЦИИ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Кинетику сорбции определяли экспериментально. На рис. 1 представлены данные о содержании нефтепродуктов в пробах раствора объемом 400 мл после контакта с сорбентом «Новосорб», $d \geq 1$ мм, масса 3 г при $t = 20$ °С. Модельный раствор концентрацией 6–133 мг/л готовили из трансформаторного масла.

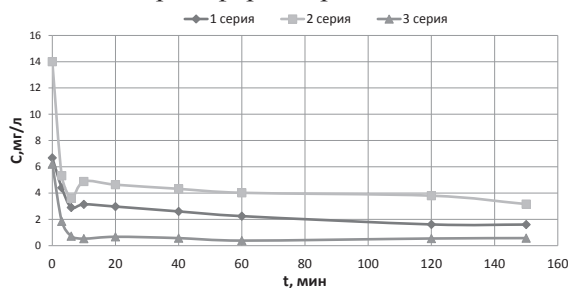


Рис. 1. Кинетические кривые сорбции нефтепродуктов на «Новосорбе»

Примерно 20-минутная продолжительность установления равновесия в системе раствор – сорбент свидетельствует о внутридиффузионной природе сопротивления сорбции нефтепродуктов. В близких условиях проведены эксперименты с пенополиуретаном и торфом. Здесь равновесие в системе раствор – сорбент установилось примерно за 40 и 20 мин. соответственно.

РАВНОВЕСНАЯ СОРБЦИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Изотермы сорбции «Новосорба» ($d \geq 1$ мм, $t = 20^\circ\text{C}$, $T = 20$ мин.), пенополиуретана ($d = 3 \times 2 \times 1$ см, $t = 20^\circ\text{C}$, $T = 40$ мин.) и торфа (волокна, $t = 20^\circ\text{C}$, $T = 20$ мин.) показаны на рис. 2.

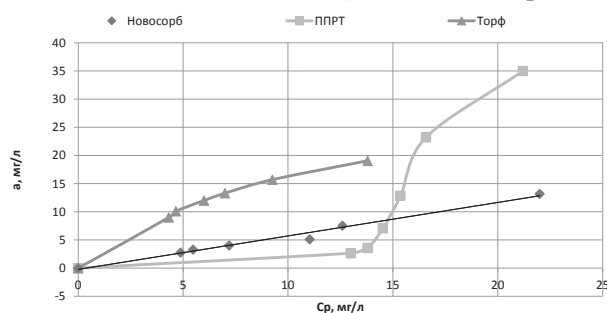


Рис. 2. Изотермы сорбции нефтепродуктов на «Новосорбе», пенополиуретане и торфе: \blacktriangle – торф (волокна, $T = 20$ мин.); \blacksquare – «Новосорб» (фракция 5–6 мм, контакт 20 мин.); \blacklozenge – пенополиуретан (фракция $3 \times 2 \times 1$ см, $t = 20^\circ\text{C}$, $T = 40$ мин.)

Вид изотерм свидетельствует о линейной зависимости равновесной сорбции от концентрации нефтепродуктов в изученном диапазоне концентраций. Изотерма сорбции на пенополиуретане имеет вогнутый характер, максимальный коэффициент распределения достигается при максимальной концентрации $C_p = 21,2$ мг/л. Равновесная величина $a = 70$ мг/г.

ДИНАМИКА СОРБЦИИ

Лабораторный фильтр высотой 13 см и массой 13,9 г включает слой пенополиуретана (3 см, 1,23 г), торфа (6 см / 5,6 г), еще один разделительный слой пенополиуретана (1 см / 0,38 г), «Новосорб» (3 см / 6,7 г).

Со скоростью 1 м/ч фильтровали модельный раствор нефтепродуктов с C_0 20–40 мг/л. Данные о концентрации на выходе приведены на рис. 3. Сорбционная емкость загрузки экспериментального фильтра позволяет задерживать загрязнения

из объема воды, большей объема сорбента примерно в 10 раз при проскоке на уровне 5 мг/л.

ОЧИСТКА РЕАЛЬНОГО СТОКА НА МОДЕЛИ МНОГОСЛОЙНОГО ФИЛЬТРА

Возможность очистки стока (растопленные образцы снега с придорожного полотна) испытывали на модели многослойного фильтра. В пробах исходного и очищенного стока контролировали нефтепродукты, взвешенные, цветность, мутность, pH. Из эксперимента следует, что при скорости фильтрования 4 м/ч и исходной концентрации нефтепродуктов 22,0 мг/л комбинированный слой фильтра обеспечивает очистку до 0,5 мг/л не менее 5 л нефтесодержащего стока. Одновременно удаляются взвешенные (с 1015,0 до 3,0 мг/л), снижается pH (с 7,95 до 7,74), повышается цветность воды (с 67 до 126 градусов).

Из анализа экспериментальных данных можно сделать следующие выводы.

ПЕНОПОЛИУРЕТАН

1. Изотерма сорбции на пенополиуретане имеет вогнутый характер. При вогнутой изотерме имеется стадия «зарядки» – накопления на поверхности сорбента моно слоя нефтепродукта, когда коэффициент распределения Γ мал и отмечаются значительные проскоки загрязнителей. Далее идет аутогезия («самослипание»), то есть способность поглощать загрязняющие вещества (ЗВ) за счет прочной адгезии на поверхности одного и того же вещества. По данным экспериментов на стадии «зарядки», $\Gamma = 260$, при переходе к стадии аутогезии Γ увеличивается до 3300 и выходная концентрация резко снижается.

2. Из кривых кинетики на пенополиуретане следует, что концентрация нефтепродуктов в растворе снижается примерно за 40 мин., тогда как на двух других сорбентах (торф и «Новосорб») – примерно за 20 мин.

Таким образом, пенополиуретан проходит стадию «зарядки», пока концентрация нефтепродукта на поверхности сорбента не достигнет порядка 7 мг/г. При этом возможны значительные проскоки нефтепродукта. На следующей стадии аутогезии коэффициент распределения резко увеличивается, проскоковая концентрация снижается. Кинетика сорбции на пенополиуретане хуже, чем на остальных двух исследованных сорбентах.

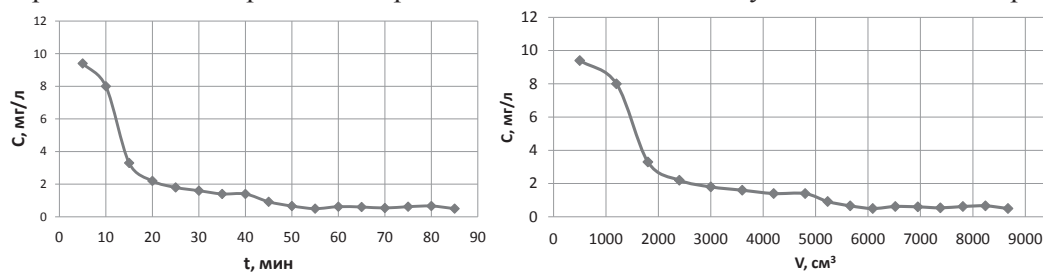


Рис. 3. Выходные кривые поглощения нефтепродуктов сорбционной нагрузкой модельного фильтра: $h = 13$ см, $V = 1$ м/ч, $C_{\text{исх нп}} = 40$ мг/л

ТОРФ

1. Изотерма сорбции на торфе в исследованном диапазоне концентраций имеет слабо выраженный выпуклый характер. Если аппроксимировать ее линейной, то коэффициент распределения Γ равен 1380, что в 2,4 раза меньше, чем для пенополиуретана на стадии аутогезии.

2. Кинетика сорбции для торфа значительно лучше, чем для пенополиуретана.

Сделаем сравнительную оценку величин кинетического коэффициента для этих сорбентов, исходя из внешнелиффузионной модели сорбции. Для объема раствора V и массы сорбента m условие материального баланса сорбируемого вещества имеет вид:

$$VC + ma = VC_0, \quad (1)$$

где C – концентрация в растворе в момент времени t , a – концентрация в фазе сорбента в момент времени t , C_0 – концентрация в растворе в начальный момент времени $t = 0$.

Уравнение кинетики сорбции запишем для случая больших коэффициентов распределения Γ , когда можно пренебречь влиянием сорбционного торможения в сорбенте (это эквивалентно случаю прямоугольной изотермы):

$$\frac{da}{dt} = \beta C, \text{ если } a < a_0, \quad (2)$$

где a_0 – емкость сорбента.

Вместе с уравнением баланса (1) получим систему, исключая из которой a , получим обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$-\frac{V}{m} \frac{dC}{dt} = \beta C, \text{ если } a < a_0, \quad (3)$$

решение которого при условии $C(0) = C_0$ имеет вид:

$$C = C_0 \exp(-\beta mt/V), \quad (4)$$

которое представим в виде:

$$\ln(C/C_0) = -\beta mt/V. \quad (5)$$

Отсюда следует, что если для достижения фиксированного отношения C/C_0 для двух сорбентов (сравниваем пенополиуретан и торф) требуется разное время (в наших опытах для пенополиуретана требуется 40 мин., для торфа – 20 мин.), то величина β для пенополиуретана должна быть в два раза меньше, чем для торфа, а именно

$$\beta_{\text{пп}}/\beta_{\text{т}} = 40/20 = 2.$$

Таким образом, торф обладает емкостью в 2,5 раза меньшей, чем пенополиуретан, но в 2 раза лучшей кинетикой сорбции.

Воспользуемся данными кинетических опытов для расчета $\beta_{\text{пп}}$ и $\beta_{\text{т}}$.

Для времени сорбции 20 мин. $C = 2,6$ мг/л, при $C_0 = 36,6$ из формулы (5) при $V = 400$ мл и $m = 2,1$ г получим:

$$\beta_{\text{т}} = 0,41 \text{ с}^{-1}.$$

Эта величина определялась для $m = 2,1$ г, поэтому для расчета на 0,8 г сорбента пенополиуретана мы примем величину $0,41 \times 0,8/2,1 = 0,16$.

Поскольку $\beta_{\text{пп}}/\beta_{\text{т}} = 2$, то $\beta_{\text{пп}} = 0,08 \text{ с}^{-1}$.

«НОВОСОРБ»

1. Изотерма сорбции близка к линейной, причем коэффициент распределения, равный отношению равновесных концентраций в сорбенте (измеренный в мг/г) к равновесной концентрации в растворе (измеренный в г/мл, что эквивалентно отношению г/г), равен 560.

2. Кинетика сорбции, как следует из кинетических кривых, аналогична кинетике на торфе, то есть примерно в два раза лучше, чем на пенополиуретане.

Таким образом, минеральный сорбент «Новосорб» обладает самой малой емкостью из трех изученных сорбентов, однако имеет хорошую кинетику сорбции, поэтому может быть использован как «финишный» сорбент в многослойном фильтре.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ДИНАМИКИ СОРБЦИИ ПРИ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ИЗОТЕРМЕ

Лимитирующим компонентом избран нефтепродукт. Для большей математической ясности рассмотрен предельный случай – динамика при прямоугольной изотерме, лимитирующая стадия кинетики – внешняя диффузия. Модель динамики сорбции при прямоугольной изотерме имеет вид [1]:

$$v \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial a}{\partial t} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \begin{cases} \beta C, & \text{если } a < a_0 \\ 0, & \text{если } a = a_0 \end{cases}. \quad (7)$$

Здесь (6) – уравнение баланса в слое сорбента, (7) – уравнение внешнелиффузионной кинетики.

Введены следующие переменные: $C(x, t)$ – концентрация сорбируемого компонента в растворе, $a(x, t)$ – концентрация сорбируемого компонента в сорбенте (в неподвижной фазе), x – координата вдоль слоя сорбента, $x = 0$ – входное сечение, t – время ($t = 0$ – начало процесса сорбции), β – внешнелиффузионный кинетический коэффициент, C_0 – концентрация сорбируемого компонента в исходном растворе, a_0 – емкость сорбента (в расчете на единицу объема слоя сорбента). Концентрации C и a зависят от координаты вдоль слоя сорбента x и t .

Прямоугольный характер изотермы проявляется в том, что поглощение вещества сорбентом происходит с постоянной скоростью до тех пор, пока не будет исчерпана емкость a_0 .

Решение этой системы выполняем при следующих условиях:

$$C(0, t) = C_0, \quad (8)$$

$$C(x, 0) = a(x, 0) = 0. \quad (9)$$

Первое условие означает, что во входное сечение слоя сорбента поступает раствор, содержащий сорбируемый компонент в постоянной концентрации C_0 , по второму условию сорбент свободен от сорбируемого компонента в начальный момент времени.

Решение сформулированной краевой задачи известно и имеет вид [1]:

$$\text{при } t < a_0 / (\beta C_0) \quad C = C_0 \exp(-\beta x/v), a = \beta t C_0 \exp(-\beta x/v), \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{при } a_0 / (\beta C_0) < t < a_0 / (\beta C_0) + x a_0 / (v C_0) \\ C = a C_0 / a_0 = C_0 \exp(-\beta x/v + \beta t C_0 / a_0 - 1), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{при } t \geq a_0 / (\beta C_0) + x a_0 / (v C_0) \quad C = C_0, a = a_0, \quad (12)$$

Можно записать это решение в более простой форме, перейдя к безразмерным переменным:

$$u = \frac{C}{C_0}, \quad q = \frac{a}{a_0}, \quad X = \frac{\beta x}{v}, \quad T = \frac{a C_0}{a_0} t. \quad (13)$$

Здесь u и q – безразмерные концентрации в растворе и сорбенте, X и T – безразмерные координата вдоль слоя и время. Тогда решение (5)–(7) примет вид:

$$\begin{aligned} u(X, T) &= \exp(-X), \quad q(X, T) = T \exp(-X) \text{ при } 0 \leq T \leq 1, \\ u(X, T) &= q(X, T) = \exp(-X + T - 1) \text{ при } 1 \leq T < 1 + X, \\ u(X, T) &= q(X, T) = 1 \text{ при } T \geq 1 + X. \end{aligned} \quad (14)$$

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ДВУХСЛОЙНОГО ФИЛЬТРА

Первый и второй слои состоят из сорбентов емкостью a_{01} и a_{02} , кинетическими коэффициентами β_1 и β_2 , толщинами слоев l_1 и l_2 . Выше отмечалось, что пенополиуретан на стадии аутосорбции обладает самой высокой емкостью, однако его кинетика примерно в два раза хуже, чем у торфа.

Представляет интерес выяснить: является ли двухслойный сорбент более эффективным, чем однослойный?

Поскольку по конструктивным соображениям сорбционные фильтры для автодороги М-18 «Кола» должны иметь слои малой толщины, возможна ситуация, когда уровень проскока, если заполнить весь фильтр l первым сорбентом, может не отвечать требованиям глубины очистки: вследствие плохой кинетики (малости коэффициента β_1) выходная концентрация, в соответствии с (5) равная $C = C_0 \exp(-\beta_1 l/v)$, может оказаться больше требуемой C_{np} .

Для упрощения требуемый уровень C_{np}/C_0 обозначим через $\varepsilon = C_{np}/C_0$. В фильтре только из пенополиуретана возможно $\exp(-\beta_1 l/v) > \varepsilon$.

Если фильтр целиком заполнен вторым сорбентом, то, поскольку $\beta_2 < \beta_1$, условие проскока может быть выполнено, так как $\exp(-\beta_1 l/v) > \exp(-\beta_2 l/v)$, если различие между β_2 и β_1 будет значимым.

Для приведенных коэффициентов β имеем: $\beta_1 = 0,08 \text{ с}^{-1}$, $\beta_2 = 0,16 \text{ с}^{-1}$.

Если слой в 6 см будет состоять только из пенополиуретана, а скорость равна 0,1 см/с, то уровень проскока будет равен $\exp(-4,8) = 0,0074$.

Если слой в 6 см будет состоять только из торфа, уровень проскока будет равен $\exp(-9,6) = 0,000054$.

Поскольку емкость торфа значительно меньше емкости пенополиуретана, используя решение (14), сравним время защитного действия для двух случаев:

1. Фильтр состоит только из торфа толщиной l ;
2. Фильтр состоит из пенополиуретана толщиной l_1 и торфа толщиной l_2 .

Для уровня проскока ε время защитного действия t_3^I в соответствии с решением (11) будет равно:

$$t_3^I = \frac{a_{02}}{\beta_2 C_0} (1 + \ln \varepsilon) + \frac{a_{02} l}{C_0 v}. \quad (15)$$

Во втором случае на входе во второй слой поддерживается постоянная концентрация C_{10} , данная формулой:

$$C_{10} = C_0 \exp(-\beta_1 l_1/v). \quad (16)$$

На рис. 4 представлено распределение концентраций загрязнений по слоям сорбента двухслойного фильтра.

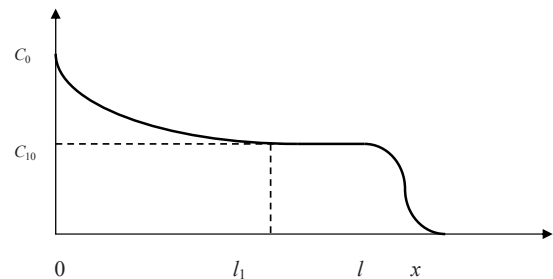


Рис. 4. Распределение концентрации $C(x, t)$ по загрузке из двухслойного фильтра

Время защитного действия во втором случае будет даваться формулой:

$$t_3^{II} = \frac{a_{02}}{\beta_2 C_{10}} (1 + \ln \frac{C_{np}}{C_{10}}) + \frac{a_{02} (l - l_1)}{C_{10} v}. \quad (17)$$

Входная концентрация во второй слой по (16) будет равна $C_{10} = C_0 \exp(-\beta_1 l_1/v)$. Важно знать, при каком соотношении сорбционных параметров отношение t_3^{II}/t_3^I будет больше единицы.

Обозначим это отношение через τ . Используя выражение (17) для C_{10} , а также полученные формулы (15) и (17), после несложных преобразований получим выражение:

$$\tau = \exp X_1 \frac{1 + \ln \varepsilon + \frac{\beta_1 l_1}{v} + \frac{\beta_2 l_2}{v}}{1 + \ln \varepsilon + \frac{\beta_2 l}{v}}. \quad (18)$$

Поскольку длины слоев l_1 и l_2 выбираются из условия обеспечения проскока ε , то должно выполняться условие:

$$\varepsilon = \exp\left(-\frac{\beta_1 l_1}{v} - \frac{\beta_2 l_2}{v}\right). \quad (19)$$

Заменяя ε в формуле (18) по (19), получим

$$\tau = \exp X_1 \frac{1}{1 + X_1 \left(\frac{\beta_2}{\beta_1} - 1\right)}. \quad (20)$$

При длине первого слоя 3 см $X_1 = 2,4$; поскольку $\beta_2/\beta_1 = 2$, то $\tau = 3,41$.

Итак, комбинированный сорбент, у которого $\beta_2 = 2\beta_1$, $l_2 = l_1$, выходная концентрация $\varepsilon = \exp\left(-\frac{\beta_1 l_1}{v} - \frac{\beta_2 l_2}{v}\right) = \exp(-7,2) = 0,00063$ на порядок меньше, чем для слоя l_1 целиком из первого сорбента $\varepsilon = 0,0074$. Увеличивается время защитного действия по сравнению с однослойным вариантом, когда весь слой заполнен вторым сорбентом $\tau = 3,41$.

Эксперимент и анализ модели дали практические выводы:

1. Сорбционные методы очистки дорожных ливневых и талых стоков в целях предотвраще-

ния загрязнения окружающей среды нефтепродуктами имеют право на жизнь.

2. Равновесие в системе раствор – сорбент устанавливается для торфа и «Новосорба» за 20 мин., для пенополиуретана – за 40 мин., то есть торф и «Новосорб» обладают более высокими кинетическими свойствами, чем пенополиуретан.

3. Наибольшей сорбционной емкостью в изученном диапазоне концентраций обладает пенополиуретан.

4. Двухслойный фильтр из пенополиуретана и торфа эффективнее однослойного: больше время защитного действия, выше кинетика с меньшей проскоковой концентрацией.

5. Трехслойный фильтр (пенополиуретан, торф и «Новосорб») снижает концентрацию нефтепродуктов в 40 и более раз, удаляет взвешенные вещества, снижает pH.

Полученные рекомендации позволили разработать проекты (совместно с ООО «Геолайн»), изготовить (совместно с ООО «Металлист»), смонтировать (совместно с ООО «Технострой») и передать в штатную эксплуатацию около 100 ЛОС в водоохранных зонах мурманского участка автодороги М-18 «Кола» [2].

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веницианов Е. В., Рубинштейн Р. Н. Динамика сорбции из жидких сред. М.: Наука, 1983. 240 с.
2. Водный кодекс Российской Федерации. М.: Проспект: КноРус, 2009. 48 с.
3. Графова Е. О., Аюкаев А. И., Веницианов Е. В. Математическое моделирование в исследовании процессов водоочистки. «Сухое» фильтрование // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2009. № 7 (101). С. 18–25.

ГЕОРГИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ БОРИСОВ

кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории моделирования природно-технических систем, Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
borisov@krc.karelia.ru

ТАМАРА ПЕТРОВНА ТИХОМИРОВА

кандидат технических наук, доцент, ученый секретарь, Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
tihomirov@krc.karelia.ru

УВЕЛИЧЕНИЕ РЕСУРСОВ ИЗОЛЯЦИИ И ПОДШИПНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЕМ НАИВЫГОДНЕЙШЕГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК

С использованием метода неопределенных множителей Лагранжа обосновывается максимальное увеличение ресурса изоляции и подшипников электрических двигателей путем перераспределения нагрузки во времени и между ними.

Ключевые слова: электрические двигатели, ресурс изоляции, износ подшипников, метод неопределенных множителей Лагранжа

В связи со значительным износом основных фондов, достигшим в электроэнергетике 60 %, а также низкой степенью инвестирования снизилась надежность работы эксплуатируемого оборудования, в частности электродвигателей, потребляющих до 60 % вырабатываемой в стране электроэнергии [1], [7].

В 85–95 % случаев отказ электродвигателей вызван повреждением обмоток, основные из которых приходятся на межвитковые замыкания при пробое их изоляции. В заключительном периоде эксплуатации увеличивается частота постепенных эксплуатационных отказов, что вызвано старением и износом электродвигателей. В этот период отмечается существенное нарушение свойств изоляции, уменьшение ее электрической прочности, а также износ тел качения подшипников [5]. Ввиду этого в заключительный период эксплуатации электрических двигателей важно эффективно использовать их остаточный ресурс для максимального продления времени эксплуатации. В связи с этим в статье обосновываются методы оптимального распределения нагрузки у самого распространенного типа асинхронных электрических двигателей с короткозамкнутым ротором по критериям минимума наработки ресурса изоляции и подшипников.

Для электрических двигателей с изоляцией, имеющей теплостойкость класса А, расчетный срок службы изоляции $T_{из}$, или ее расчетный ресурс, определяется зависимостью (в годах) [2], [4]:

$$T_{из} = 7,15 \cdot 10^4 \exp[-0,088(\nu_{oc} + \Delta\nu_n)], \quad (1)$$

где ν_{oc} – температура окружающей среды, принимаемая по ГОСТ 183-74 п. 1.12 равной 40 °С; $\Delta\nu_n$ – превышение температуры изоляции над

температурой окружающей среды (°С), принимаемой для изоляции класса А равной 60 °С [5].

Данная формула и принимаемые значения температур используются для определения длительности непрерывной эксплуатации изоляции двигателей или проектного ресурса их изоляции при номинальной максимальной рабочей температуре [2], [5].

При эксплуатации электрических двигателей распространен мониторинг их нагрузок и крайне редко используются измерения температуры обмоток. Ввиду этого желательно найти возможность определять наработку ресурса изоляции двигателей в зависимости от их нагрузок.

При работе двигателя в продолжительном режиме превышение температуры изоляции обмотки над температурой окружающей среды принимает установившееся значение, равное [5]

$$\Delta\nu = R \cdot \Delta P, \quad (2)$$

где R – тепловое сопротивление поверхности электрического двигателя, $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$, ΔP – потери мощности в электрическом двигателе, Вт.

Величину теплового сопротивления двигателя R можно определить исходя из того, что за номинальную мощность электрического двигателя принимается мощность на валу в продолжительном режиме работы, при которой установившаяся температура обмотки превышает температуру окружающей среды на величину $\Delta\nu^{\max}$, соответствующую принятым нормам перегрева класса нагревостойкости изоляции (ГОСТ 183-74). Тогда в соответствии с формулой (2) значение теплового сопротивления

$$R = \frac{\Delta\nu^{\max}}{\Delta P_n}, \quad (3)$$

где ΔP_n – потери мощности двигателя при номинальной мощности на валу, Вт; Δv^{\max} – допустимое классом нагревостойкости изоляции превышение температуры обмотки двигателя температуры окружающей среды, °С.

Величина потерь мощности двигателя при номинальной мощности определяется по формуле

$$\Delta P_n = P_n (1 - \eta_n), \quad (4)$$

где η_n – номинальный (паспортный) КПД; P_n – номинальная мощность двигателя.

Следовательно, установившаяся температура изоляции обмотки при продолжительном режиме составит величину

$$v_{из} = v_{oc} + \Delta v^{\max} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta P_n}. \quad (5)$$

Потери мощности электрических двигателей переменного тока разделяют на постоянные и переменные, последние зависят от квадрата коэффициента нагрузки $K_{нг}$. Рекомендации современных методик проектирования электрических машин по выбору потерь мощности дают такое соотношение потерь, что наибольшее значение КПД составляет при коэффициенте нагрузки $K_{нг} = 0,7-0,8$ или $K_{нг} = 0,75$. Наибольший КПД у них с известным приближением будет получаться при равенстве переменных потерь в проводах обмоток $\Delta P_{пер}$ сумме постоянных потерь $\Delta P_{пост}$ [4], [5].

В соответствии с этим примем, что при $P = 0,75P_n$

$$\Delta P_{пост} = \Delta P_{пер}, \quad (6)$$

где P – текущее значение мощности.

Так как суммы потерь мощности в электродвигателе

$$\Delta P = \Delta P_{пост} + \Delta P_{пер} = \Delta P_{пост} + \Delta P_{пер} \cdot K_{нг}^2, \quad (7)$$

где $\Delta P_{пер}$ – переменные потери при номинальной мощности двигателя, то при $P_2 = 0,75P_{2н}$ и $K_{нг} = 0,75$

$$\Delta P = \Delta P_{пост} + \Delta P_{пер} \cdot 0,75^2 = \Delta P_{пост} + \Delta P_{пер} \cdot 0,5625,$$

а по условию (6)

$$\Delta P_{пост} = \Delta P_{пер} \cdot 0,5625. \quad (8)$$

Следовательно,

$$\Delta P = \Delta P_{пер} \cdot 0,5625 + \Delta P_{пер} \cdot K_{нг}^2 = \Delta P_{пер} (0,5625 + K_{нг}^2). \quad (9)$$

Используя эту формулу и известные КПД двигателя при номинальной нагрузке, когда $K_{нг} = 1$, получаем, что

$$\Delta P_n = 1,5625 \Delta P_{перн}, \quad (10)$$

$$\text{откуда } \Delta P_{перн} = \frac{\Delta P_n}{1,5625} = 0,64 \Delta P_n,$$

$$\text{а } \Delta P_{пост} = 0,5625 \cdot 0,64 \Delta P_n = 0,36 \Delta P_n.$$

Тогда потери мощности в электродвигателе во всем диапазоне изменения коэффициента нагрузок $0 \leq K_{нг} \leq 1$ определяются формулой

$$\Delta P = 0,36 \Delta P_n + 0,64 \Delta P_n \cdot K_{нг}^2 = \Delta P_n \cdot (0,36 + 0,64 K_{нг}^2). \quad (11)$$

Используя формулы (2, 3, 11), получаем зависимость превышения температуры изоляции обмотки над температурой окружающей среды от коэффициента нагрузки электродвигателя

$$\Delta v = R \cdot \Delta P = \frac{\Delta v^{\max}}{\Delta P_n} \Delta P = \Delta v^{\max} (0,36 + 0,64 K_{нг}^2). \quad (12)$$

Вследствие этого в условиях эксплуатации с изменяющимися v_{oc} и $K_{нг}$ расчетный ресурс изоляции класса А обмоток новых электрических двигателей T_p будет определяться формулой

$$T_p = 7,15 \cdot 10^4 \cdot \exp(-0,088(v_{oc} + \Delta v_n^{\max} (0,36 + 0,64 K_{нг}^2))). \quad (13)$$

Формула (13) дает зависимость ресурса изоляции электрических двигателей от меняющихся у них коэффициентов нагрузки и позволяет сформулировать следующую задачу наивыгоднейшего распределения нагрузок между параллельно работающими двигателями.

Параллельно на общую нагрузку работают n технологических агрегатов с приводом от электрических двигателей с номинальной мощностью $P_{н1}, P_{н2}, \dots, P_{ни}, \dots, P_{нn}$. Текущее значение суммарной нагрузки двигателей составляет величину P_c

$$P_c = P_1 + P_2 + \dots + P_i + \dots + P_n. \quad (14)$$

У каждого i -го двигателя расчетный ресурс изоляции при нагрузке P_i определяется по формуле (13). Учитывая, что $K_{ни} = \frac{P_i}{P_{ни}}$, формула (14) переписывается в виде

$$P_c = K_{н1} \cdot P_{н1} + K_{н2} \cdot P_{н2} + \dots + K_{ни} \cdot P_{ни} + \dots + K_{нn} \cdot P_{нn}. \quad (15)$$

Требуется определить при условии (15) такие текущие значения нагрузки каждого электрического двигателя, которые дают максимальный расчетный ресурс изоляции всех двигателей.

Для решения такой задачи запишем ее условия в виде системы уравнений

$$\begin{cases} T_{p1} = F(K_{н1}); \\ T_{p2} = F(K_{н2}); \\ \dots \\ T_{pi} = F(K_{ни}); \\ \dots \\ T_{pn} = F(K_{нn}); \\ P_c = K_{н1} \cdot P_{н1} + K_{н2} \cdot P_{н2} + \dots + K_{ни} \cdot P_{ни} + \dots + K_{нn} \cdot P_{нn}, \end{cases} \quad (16)$$

где i – номер электрического двигателя, $i = 1, 2, \dots, n$; $K_{ни}$ – коэффициент нагрузки i -го двигателя.

Требуется найти такие текущие значения коэффициента нагрузки каждого электрического двигателя $K_{ни}$, которые доставляют максимум суммы

$$\max \sum_{i=1}^n F(K_{ни}). \quad (17)$$

При дифференцируемости функций $T_{pi} = F(K_{ни})$ условный минимум их суммы находится мето-

дом неопределенных множителей Лагранжа [6] при равенстве производных первой степени

$$\frac{\partial T_{p1}}{\partial K_{n1}} = \dots = \frac{\partial T_{pi}}{\partial K_{ni}} = \dots = \frac{\partial T_{pn}}{\partial K_{nn}}. \quad (18)$$

Подставляем в (13) значения $\nu_{oc} = 40^\circ\text{C}$ и $\Delta\nu_{max} = 60^\circ\text{C}$ [5], задаваемые ГОСТами, дифференцируем и, учитывая (18), получаем

$$K_1 = K_2 = \dots = K_i = \dots = K_n. \quad (19)$$

Таким образом, максимальный суммарный ресурс, или календарный срок службы изоляции [2], будет достигаться при одинаковой степени (одинаковом коэффициенте) нагрузки каждого из параллельно работающих на общую нагрузку электрических двигателей с одинаковым классом нагревостойкости изоляции. Из этого вывода вытекают следствия:

1. Ввиду равенства коэффициентов нагрузки K_{ni} , учитывая формулу (15), получаем

$$P_c = K_{ni}(P_{n1} + P_{n2} + \dots + P_{ni} + \dots + P_{nn}) = K_{ni} \sum_{i=1}^n P_{ni}. \quad (20)$$

Откуда $K_{ni} = \frac{P_c}{\sum_{i=1}^n P_{ni}}$, то есть для определения

наивыгоднейшего коэффициента нагрузки каждого из параллельно работающих электродвигателей их заданную суммарную нагрузку необходимо поделить на суммарную номинальную мощность.

2. Равенство в соответствии с формулой (12) температур перегрева и нагрева изоляции обмоток всех двигателей.

3. Равенство наработки ресурса изоляции всех двигателей и, следовательно, теоретически одновременное исчерпание ресурса изоляции.

4. При равенстве номинальных мощностей параллельно работающих двигателей максимальное значение суммы ресурсов их изоляции получается при равенстве нагрузок.

Исходя из последнего следствия при возможности регулирования нагрузки у автономно работающего электрического двигателя максимум ресурса его изоляции или календарного срока ее службы получается при работе с постоянной нагрузкой.

Вторым видом постепенных эксплуатационных отказов электрических двигателей является отказ их узлов трения – подшипников в резуль-

тате износа [5]. Срок их службы также зависит от температуры. Так, в работе [3] отмечается, что «даже относительно небольшой перегрев на $30\text{--}5^\circ\text{C}$ по корпусу резко – в несколько раз – снижает срок службы подшипника». Там же приведен линейный график зависимости срока службы подшипника от температуры перегрева корпуса электродвигателя. Эта зависимость может быть описана линейным уравнением вида

$$T_{подш} = a - b \cdot \Delta\nu, \quad (21)$$

где $\Delta\nu$ – температура перегрева корпуса электродвигателя; a, b – эмпирические коэффициенты.

Как и в случае с нагревом изоляции электродвигателя, температура перегрева его корпуса пропорциональна квадрату потребляемой от сети мощности P_i , то есть

$$T_{подш i} = a - b \cdot (K_{ni} \cdot P_{ni})^2. \quad (22)$$

Эта функция также непрерывна, дифференцируема, как и в случае зависимости срока службы изоляции от температуры.

Вследствие этого и для подшипниковых узлов с целью достижения максимума их суммарного срока службы требуется одинаковый коэффициент нагрузки параллельно работающих машин. Для одиночно работающего двигателя максимальный срок службы подшипников достигается при равномерном распределении во времени его нагрузки.

ВЫВОДЫ

1. Расчетный ресурс изоляции и подшипников электрических двигателей зависит от квадрата коэффициента его нагрузки или квадрата мощности на валу.

2. Условный максимум ресурса изоляции и подшипников электрических параллельно работающих на общую нагрузку двигателей с одинаковым классом теплостойкости изоляции достигается при равенстве коэффициентов их нагрузки, а при неодинаковых классах изоляции – при равенстве их относительных приростов расчетных ресурсов изоляции и подшипников по нагрузке.

3. Условный минимум использованного ресурса изоляции и подшипников электрического одиночно работающего двигателя достигается при его работе в постоянном режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Браславский И. Я., Ишматов З. Ш., Поляков В. Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод / Под ред. И. Я. Браславского. М.: Изд. Центр «Академия», 2004. 256 с.
- ГОСТ Р 27.002-2009. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. 32 с.
- Ильинский Н. Ф. Энергосберегающий электропривод насосов // Электротехника. 1995. № 7. С. 3–8.
- Костенко М. П., Писаревский Л. М. Электрические машины. Часть вторая. Машины переменного тока. М.: Л.: Госэнергоиздат, 1958. 651 с.
- Проектирование электрических машин: Учебник для вузов / Под ред. И. П. Копылова. 3-е изд. М.: Высш. шк., 2002. 757 с.
- Фихтенгольц Г. М. Основы математического анализа. Т. II. М.: Физматгиз, 1968.
- Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. Утверждена распоряжением Правительства РФ № 1715 р. от 13 ноября 2009 г.

VALERIY M. LEVIN

Doctor of Physics and Mathematics, Researcher, Mexican Oil
Institute (Mexico City, Mexico)
vlevine@imp.mx

SERGUEY K. KANAUN

Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Technological
Institute of Higher Education of Monterrey (Mexico City,
Mexico)
kanaoun@itesm.mx

APPLICATION OF MAXWELL METHOD IN SOLUTION OF HOMOGENIZATION PROBLEM FOR ANIZOTROPIC ELASTIC MEDIA WITH ELLIPSOIDAL INCLUSIONS

The Maxwell method is applied to calculate effective elastic constants of matrix composite materials containing a random set of anisotropic ellipsoidal inclusions. It is shown that the method allows derivation of analytical equations for effective elastic constants that coincide with the equations obtained by the Mori-Tanaka method and other self-consistent methods known in literature.

Key words: Matrix composites, homogenization problem, self-consistent schemes, Maxwell's method, effective properties

INTRODUCTION

Intensive development of the theory of heterogeneous media in the past few decades is the result of a constantly increasing role of composite materials in the modern industry. Nowadays, composites successfully compete with traditional homogeneous materials like metals, homopolymers and ceramics. Synthesis of composite materials requires comprehensive knowledge of influence of details of their microstructure on macro properties.

One of the important problems of the mechanics of heterogeneous materials is the so-called homogenization problem. The solution of this problem allows replacing a heterogeneous material by a homogeneous one with the same response to external loading. Because exact solutions of the homogenization problem exist only for composites with very specific microstructures, various methods of approximate solution of this problem were proposed (the review of these methods may be found, e. g., in [8]). One of these methods belongs to J. C. Maxwell [9]. In application to the conductivity problem, the Maxwell method was discussed in details in [7], [8]. The method is based on the hypothesis of non-interacting inclusions. But it is shown in [7] that the equations for the effective conductivity derived by the Maxwell method coincide with the ones obtained by other methods that apparently take into account the inclusion interactions.

In his original work [9], Maxwell calculated effective conductivity of an isotropic medium with an array of isotropic spherical inclusions. In the second part of twentieth century, the Maxwell method was used for the calculation of the effective elastic constants of the composites with spherical particles. For isotropic matrix and inclusion phases, the homogenization problem was solved by this method in [6]. It turned out that the method leads to the equations for the effective elastic constants that coincide with

the ones obtained by other self-consistent methods (the effective field method [4] and the Mori-Tanaka method [1], [10]).

In the present work, the Maxwell method is extended to the case of homogeneous anisotropic medium containing a random set of ellipsoidal homogeneous anisotropic inclusions. It is shown that the Maxwell method is the most simple and straightforward way of deriving the equations for the effective elastic constants that coincide with the equations obtained by other self-consistent methods.

THE MAXWELL SCHEME FOR ELASTIC COMPOSITES

The Maxwell approach is based on the solution of the so-called one-particle problem. In the case of elasticity, it is the problem for an isolated inclusions in an infinite homogeneous matrix subjected to a constant external field.

Let an infinite elastic medium with the stiffness tensor C^0 contains an inhomogeneity (inclusion) with the stiffness $C^0 + C^1$ in a finite region V with the characteristic function $V(x)$ ($V(x) = 1$ when $x \in V$, $V(x) = 0$, when $x \notin V$). The system of differential equations for the stress $\sigma_{ij}(x)$ and strain $\varepsilon_{ij}(x)$ tensors in such a medium is:

$$\nabla_j \sigma_{ij}(x) = -q_i(x), \quad \sigma_{ij}(x) = C_{ijkl}(x) \varepsilon_{kl}(x), \quad \varepsilon_{kl}(x) = \nabla_{(i} u_{j)}(x). \quad (2.1)$$

$$C_{ijkl}(x) = C_{ijkl}^0 + C_{ijkl}^1 V(x)$$

Here $u_i(x)$ is the displacement vector, the parenthesis in indices mean symmetrization. This problem may also be formulated in term of an integral equation for the strain field in the medium with the inclusion [5]

$$\varepsilon_{ij}(x) + \int_V K_{ijkl}(x-x') C_{klmn}^1(x') dx' = \varepsilon_{ij}^0(x). \quad (2.2)$$

Here $\varepsilon_{ij}^0(x)$ is the external strain field applied to the medium,

$$C_{ijkl}^1 = C_{ijkl} - C_{ijkl}^0, \quad K_{ijkl}(x) = -[\nabla_j \nabla_l G_{ik}(x)]_{(ij)(kl)}, \quad (2.3)$$

$G_{ik}(x)$ is the Green's function of the operator $\nabla_j C_{ijkl}^0 \nabla_l$ for the unbounded elastic medium. This function is a vanishing at infinity solution of the equation

$$\nabla_j C_{ijkl}^0 \nabla_l G_{km}(x) = -\delta_{im} \delta(x), \quad (2.4)$$

where $\delta(x)$ is Dirac's delta-function.

Let the region V be ellipsoid with the semi-axes a_1, a_2, a_3 . If the external field ε_{ij}^0 is constant, then, according to Eshelby's theorem [3], the strain field ε_{ij}^+ inside V is also constant and determined by the equation

$$\varepsilon_{ij}^+ = \Lambda_{ijkl}^e \varepsilon_{kl}^0, \quad \Lambda_{ijkl}^e = (I_{ijkl} + A_{ijmn}(a) C_{mnkl}^1)^{-1}. \quad (2.5)$$

Here $I_{ijkl} = \delta_{i(k} \delta_{l)}$ is the unit rank four tensor, $A_{ijkl}(a)$ is the constant tensor that is presented as integral over the unit sphere Ω in the 3D-space

$$A_{ijkl}(a) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} K_{ijkl}^*(a^{-1}k) d\Omega, \quad K_{ijkl}^*(k) = [k_j k_l G_{ik}^*(k)]_{(ij)(kl)}, \quad (2.6)$$

In these equations, $K_{ijkl}^*(k)$ is the Fourier transform of the function $K_{ijkl}(x)$ in equation (2.3), k is the Fourier transform parameter, and $a = (a_{ij})$ is a linear transformation that converts an ellipsoidal domain V into a unit sphere. For an isotropic medium, the function $K_{ijkl}^*(k)$ has the form

$$K_{ijkl}^*(k) = \frac{1}{\mu_0} [m_i \delta_{j(k} m_{l)} - \kappa_0 m_i m_j m_k m_l], \quad m_i = \frac{k_i}{|k|}, \quad \kappa_0 = \frac{\lambda_0 + \mu_0}{\lambda_0 + 2\mu_0}, \quad (2.7)$$

Where λ_0 and μ_0 are the Lamé constants of the medium. The tensor $A_{ijkl}(a)$ in equations (2.5) has the symmetry of ellipsoid (orthorhombic symmetry) and is defined by 9 essential components. Explicit expressions for $A_{ijkl}(a)$ in the case of an arbitrary ellipsoid and its limit forms (oblate and prolate ellipsoids) for some special symmetries of the tensor C_{ijkl}^0 can be found in [5].

Note that the integral equation similar to (2.2) can be derived for the stress tensor $\sigma_{ij}(x)$ in a homogeneous medium with an isolated inclusion. Multiplying the both sides of equation (2.2) by the tensor C_{ijkl}^0 and taking into account the equivalences

$$\varepsilon_{ij} = B_{ijkl}(x) \sigma_{kl}(x), \quad B_{ijkl}(x) = (C_{ijkl}(x))^{-1}, \quad (2.8)$$

we obtain

$$C_{ijkl}^0 B_{klmn} \sigma_{mn}(x) + \int_V C_{ijkl}^0 K_{klmn}(x-x') C_{mnpq}^1 B_{pqrs} \sigma_{rs}(x') dx' = C_{ijkl}^0 \varepsilon_{kl}^0(x). \quad (2.9)$$

For the following obvious relations

$$\begin{aligned} C_{ijkl}^0 B_{klmn} &= C_{ijkl}^0 (B_{klmn}^0 + B_{klmn}^1) = I_{ijmn} + C_{ijkl}^0 B_{klmn}^1, \\ C_{ijkl}^0 B_{klmn} &= (C_{ijkl}^0 - C_{ijkl}^0) B_{klmn} = I_{ijmn} - C_{ijkl}^0 B_{klmn}^1 = -C_{ijkl}^0 B_{klmn}^1, \\ B_{ijkl}^1 &= B_{ijkl} - B_{ijkl}^0, \quad B_{ijkl}^0 = (C_{ijkl}^0)^{-1}, \end{aligned} \quad (2.10)$$

we finally yield the equation for the tensor $\sigma_{ij}(x)$ in the form

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}(x) + \int_V S_{ijkl}(x-x') B_{klmn}^1 \sigma_{mn}(x') dx' &= \sigma_{ij}^0(x), \\ S_{ijkl}(x) &= C_{ijmn}^0 K_{mnpq}(x) C_{pqrs}^0 - C_{ijkl}^0 \delta(x), \quad \sigma_{ij}^0(x) = C_{ijkl}^0 \varepsilon_{kl}^0(x). \end{aligned} \quad (2.11)$$

If the external field σ_{ij}^0 is constant and the region V is ellipsoidal, the stress field σ_{ij}^+ inside the inclusion is also constant and defined by the expressions

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^+ &= \Lambda_{ijkl}^s \sigma_{kl}^0, \quad \Lambda_{ijkl}^s = (I_{ijkl} + D_{ijmn}(a) B_{mnkl}^1)^{-1}, \\ D_{ijkl}(a) &= C_{ijmn}^0 A_{mnpq}(a) C_{pqkl}^0 - C_{ijkl}^0. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Let us apply now the Maxwell scheme for the calculation of the effective elastic stiffness tensor of the composite material with a random set of ellipsoidal inclusions with arbitrary anisotropy of the inclusion and matrix phases.

As in [7], we consider a large sphere V^A of the radius R_A that contains N "small" ellipsoidal inclusions subjected to a constant external field ε_{ij}^0 applied to the heterogeneous medium. If this field acts on every inclusion (inclusions don't interact!), the field inside the inclusions is defined by the expressions

$$\varepsilon_{ij}^{(k)} = \Lambda_{ijkl}^e(a_k) \varepsilon_{kl}^0, \quad \Lambda_{ijkl}^e(a_k) = (I_{ijkl} + A_{ijmn}(a_k) C_{mnkl}^1)^{-1}, \quad (2.13)$$

where the tensor $A_{ijkl}(a_k)$ ($k = 1, 2, \dots, N$) is given in equation (2.6) and the linear transformation a_k depends on the shape and orientation of the k -th ellipsoidal inclusion.

The strain field ε_{ij}^A inside the homogeneous sphere V^A with the effective stiffness tensor C_{ijkl}^* of the composite is

$$\varepsilon_{ij}^A = \Lambda_{ijkl}^* \varepsilon_{kl}^0, \quad \Lambda_{ijkl}^* = (I_{ijkl} + A_{ijmn} C_{mnkl}^{1*})^{-1}, \quad C_{mnkl}^{1*} = C_{mnkl}^* - C_{mnkl}^0, \quad (2.14)$$

where A_{ijkl} is defined by the same formula (2.6), in which transformation a_{ij} is a unit tensor ($a_{ij} = \delta_{ij}$).

Far from the center of the large sphere, the disturbances of the strain field induced by N small inclusions and by the homogeneous large sphere are

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij}'(x) &= \frac{1}{4\pi\mu_0 R_A^3} F_{ijkl}(n^A) C_{klmn}^1 \sum_{k=1}^N v_k \Lambda_{mnrs}^e(a_k) \varepsilon_{rs}^0, \\ \varepsilon_{ij}''(x) &= \frac{1}{4\pi\mu_0 R_A^3} F_{ijkl}(n^A) C_{klmn}^{1*} \Lambda_{mnrs}^* \varepsilon_{rs}^0, \end{aligned} \quad (2.15)$$

where $F_{ijkl}(n^A)$ is a tensor function on a unit sphere (its explicit expression is insignificant), v_k is a volume of the k -th inclusion. Equating the fields $\varepsilon_{ij}'(x)$ and $\varepsilon_{ij}''(x)$ we obtain the equation

$$C_{ijkl}^1 \sum_{k=1}^N \frac{v_k}{V} \Lambda_{klmn}^e(a_k) = C_{ijkl}^{1*} \Lambda_{klmn}^*. \quad (2.16)$$

This equation may be rewritten in the form

$$p P_{ijkl} = C_{ijmn}^{1*} (I_{mnkl} + A_{mnpq} C_{pqrs}^{1*})^{-1}. \quad (2.17)$$

Here p is the volume fraction of the inclusions, and it is denoted

$$P_{ijkl} = \frac{1}{\langle v(a) \rangle} \langle C_{ijmn}^1 (I_{mnkl} + A_{mnpq}(a) C_{pqrs}^1)^{-1} v(a) \rangle, \quad v(a) = \frac{4}{3} \pi a_1 a_2 a_3, \quad (2.18)$$

where averaging is performed over the ensemble distribution of the ellipsoid semi-axes and orientations.

The solution of equation (2.17) with respect to the effective moduli tensor C_{ijkl}^* yields

$$C_{ijkl}^* = C_{ijkl}^0 + pP_{ijmn} (I_{mnkl} - pA_{mnrs} P_{rskl})^{-1}. \quad (2.19)$$

Note that in the case of multi-phase composites the tensor C_{ijkl}^* is defined by the same formula (2.19), in which the averaging is performed over the ensemble realizations of elastic property tensor C_{ijkl}^1 in equation (2.18).

The same method allows deriving expression for the tensor of the effective elastic compliances B_{ijkl}^* of the medium with a random set of ellipsoidal inclusions

$$B_{ijkl}^* = B_{ijkl}^0 + pQ_{ijmn} (I_{mnkl} - pD_{mnrs} Q_{rskl})^{-1}, \quad (2.20)$$

$$D_{ijkl} = C_{ijmn}^0 A_{mnrs} C_{rskl} - C_{ijkl}^0, \quad (2.21)$$

$$Q_{ijkl} = \frac{1}{\langle v(a) \rangle} \langle B_{ijmn}^1 (I_{mnkl} + D_{mnrs}(a) B_{rskl}^1)^{-1} v(a) \rangle$$

and $D_{ijkl}(a)$ is defined in (2.12).

Let the inclusions be spheres of a random radius a isotropically distributed in space. In this case

$$A_{ijkl}(a) = A_{ijkl} \quad (2.22)$$

and equation (2.19) is simplified as follows

$$C_{ijkl}^* = C_{ijkl}^0 + pC_{ijmn}^1 [I_{mnkl} + (1-p)A_{mnrs} C_{rskl}^1]^{-1}. \quad (2.23)$$

Suppose that the materials of the inclusions and the matrix are isotropic with the bulk K , K_0 and shear μ , μ_0 elastic moduli. Then, the equation (2.23) leads to the following expressions for the effective elastic moduli K^* and μ^*

$$K^* = K_0 + p(K - K_0) \left[1 + (1-p) \frac{3(K - K_0)}{3K_0 + 4\mu_0} \right]^{-1} \quad (2.24)$$

$$\mu^* = \mu_0 + p(\mu - \mu_0) \left[1 + (1-p) \frac{6(K_0 + 2\mu_0)(\mu - \mu_0)}{5\mu_0(3K_0 + 4\mu_0)} \right]^{-1}. \quad (2.25)$$

The formulas for the effective compliances $1/K^*$ and $1/\mu^*$ may be obtained from (2.24), (2.25) or from the general formula (2.20).

As was mentioned above, in [6] (this work is often cited in geophysical community) a generalization of the Maxwell scheme was proposed for the calculation of the effective dynamic properties of the matrix composites with isotropic host material and isotropic spherical and spheroidal inclusions. In the long-wave approximation, for the static bulk and shear effective elastic moduli of such materials, the authors obtained the expressions coincided with (2.24) and (2.25). By derivation of these equations a spherical form of the large region V^A containing a set of small spheres was adopted.

Note that in [6], the authors started with the solution of a plane elastic wave scattering problem on small and large spheres. Thus, the reader could suppose that in [6], the solution of the dynamic homogenization problem would be presented at least in the long wave limit. But in result, the authors obtained only static effective bulk and shear moduli defined in equations (2.24) and (2.25), when frequency ω is equal to zero. As a matter of fact, when ω is not zero,

the solution of the one-particle problems depends on new undimensional parameters: the ratio of the external wave length and the radius of small and large spheres. But the radius of the large sphere cannot be reasonably defined. Meanwhile in statics, the solution of the one-particle problem does not depend on the sphere radius. Hence, application of the Maxwell scheme for the solution of the dynamic homogenization problem is impossible in principle.

In the considered examples, a spherical form of the large region V^A was accepted. It was mentioned in [2] that taking an ellipsoidal form of the region V^A it is possible to describe the properties of a broader class of the composite materials. Naturally, the choice of the large ellipsoid is not unique. In the other words, possibility to vary the form of the region V^A demonstrates ambiguity of the Maxwell scheme. But for some cases, this choice of a certain form of the large region may be justified.

Let us consider a composite with isotropic ellipsoidal inclusions of the same orientation. In spite of isotropy of the matrix phase the macro properties of the composite will be anisotropic. It seems reasonable to take for the region V^A not a sphere but an ellipsoid which aspect ratio and orientation coincide with those of the inclusions. In this case the Maxwell scheme leads to the following expression for the effective elastic stiffness tensor

$$C_{ijkl}^* = C_{ijkl}^0 + pC_{ijmn}^1 [I_{mnkl} + (1-p)A_{mnrs}(a)C_{rskl}^1]^{-1}. \quad (2.26)$$

DISCUSSION AND CONCLUSION

In [4], the self-consistent effective field method was used for the construction of the tensor of the effective elastic moduli of the matrix composites containing a random set of ellipsoidal inclusions. An explicit expression for this tensor was obtained in the following form

$$C_{ijkl}^* = C_{ijkl}^0 + pP_{ijmn} [I_{mnkl} - pA_{ijrs}^{\Phi} P_{rskl}]^{-1}. \quad (3.1)$$

Here A_{ijkl}^{Φ} is a constant tensor that is the following integral

$$A_{ijkl}^{\Phi} = \int K_{ijkl}(x) \Phi(x) dx. \quad (3.2)$$

Where $\Phi(x)$ is a specific correlation function that characterizes geometrical structure of the inclusion array (it determines the region in the vicinity of each inclusion where the probability of the presence of other inclusions is small). If this region has the symmetry of an ellipsoid, the integral (3.2) is calculated explicitly. For a spherical region, when the centers of the inclusions are distributed homogeneously, $A_{ijkl}^{\Phi} = A_{ijkl}$, and expression (2.19) coincides with (3.1) obtained in the frame of the simplest variant of the effective field method that takes into account interactions between the inclusions (the term in the square brackets in (3.1) is responsible for such interactions). For isotropic matrix and isotropic spherical inclusions, formula (3.1) gives the expressions (2.24)

and (2.25) of the Maxwell method for the bulk and shear effective elastic moduli.

When all the inclusions are identical ellipsoids and their semi-axes are parallel (have the same orientations), the equation (3.1) takes the form

$$C_{ijkl}^* = C_{ijkl}^0 + p \left[(C_{ijkl}^1)^{-1} + A_{ijkl}(a) - p A_{ijkl}^\Phi \right]^{-1}. \quad (3.3)$$

If the symmetry of the function $\Phi(x)$ coincides with the symmetry of a typical ellipsoid with the same aspect ratios the expression (3.3) is transformed to

$$C_{ijkl}^* = C_{ijkl}^0 + p \left[(C_{ijkl}^1)^{-1} + (1-p) A_{ijkl}(a) \right]^{-1}. \quad (3.4)$$

This equation again coincides with (2.26) obtained by the Maxwell approach.

Let us address now to the Mori-Tanaka method (MTM). In this method, the field acting on every inclusion in the composite is assumed to be equal to the field averaged over the matrix phase. This field is different from the external field applied to the composite material. Thus, in the MTM, interactions between the inclusions are taken into account. In the adopted notations, the MTM leads to the following expression for the tensor of the effective elastic stiffness of the two-phase composite material with the ellipsoidal inclusions [4]

$$C_{ijkl}^* = C_{ijkl}^0 + n_0 \langle \nu P_{ijmn}(x) \rangle [I_{mnkl} - n_0 \langle \nu A_{mnrs}(x) P_{rskl}(x) \rangle]^{-1}, \quad (3.5)$$

where n_0 is the numerical concentration of the inclusions, ν is the volume of the typical inclusions,

$$P_{ijkl}(x) = C_{ijmn}^1 [I_{mnkl} + A_{mnrs}(x) C_{rskl}^1]^{-1}. \quad (3.6)$$

And $A_{ijkl}(x)$ is the constant tensor $A_{ijkl}(a_k)$ when $x \in \nu_k$. Generally speaking, the equation (3.5) differs from (3.1) and (2.26), but for the composite with the aligned ellipsoidal inclusions formula (3.5) gives the same result as (3.1) and (2.26). For the isotropic phase materials and spherical inclusions, equation (3.5) leads to the expressions (2.24) and (2.25) of the Maxwell method for the bulk and shear effective moduli.

It is necessary to emphasize that the Maxwell method allows deriving equations for the effective elastic moduli of the composite materials in the most economic fashion. The advantage of the effective field method [4] is in the possibility to take into account the peculiarities of spatial distribution of the inclusions by introducing a specific correlation function of a random field of the inclusions. It is equivalent to justification of the choice of the form of the large region in the Maxwell method. But inside the original Maxwell scheme, the form of this region cannot be defined uniquely.

REFERENCES

1. Benveniste Y. A new approach to the application of the Mori-Tanaka theory in composite materials // *Mechanics of Materials*. 1977. Vol. 6. P. 147–157.
2. Berriman J., Berge P. Critique of two explicit schemes for estimating elastic properties of multiphase composites // *Mechanics of Materials*. 1996. Vol. 22. P. 149–164.
3. Eshelby J. The determination of the elastic field of an elliptical inclusions, and related problems // *Proceedings of the Royal Society of London*. 1957. A211. P. 376–396.
4. Kanaun S., Levin V. *Self-Consistent Methods for Composites*. Vol. I. Static Problem. Dordrecht: Springer, 2008. 386 p.
5. Kunit I. *The Theory of Elastic Media with Microstructure II*. Berlin: Heidelberg: N. Y.: Springer, 1983. 272 p.
6. Kuster G., Toksoz M. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media I. Theoretical formulation. II. Experimental results // *Geophysics*. 1974. Vol. 39. P. 587–618.
7. Levin V., Kanaun S. Generalized Maxwell method for the calculation of the effective conductivity of matrix composite material // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. Сер. «Естественные и технические науки». 2012. № 4(125). С. 87–90.
8. Markov K. Elementary Micromechanics of Heterogeneous Media // *Heterogeneous Media. Micromechanics Modeling and Simulations* / Eds. K. Markov, L. Preziosi. Boston: Birkhauser, 2001. P. 1–162.
9. Maxwell J. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. N. Y.: Dover, 1954. (Republication of 3rd edition 1891).
10. Mori T., Tanaka K. Average stress in matrix and average energy of materials with misfitting inclusions // *Acta Metallurgica*. 1973. Vol. 21. P. 571–574.

УДК 630*658.511, 630*658.512, 519.85, 630*656.073, 630*37

ЮРИЙ ЮРЬЕВИЧ ГЕРАСИМОВ

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

АНТОН ПАВЛОВИЧ СОКОЛОВ

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

ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ СЮНЁВ

доктор технических наук, профессор, проректор по НИР, заведующий кафедрой тяговых машин лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
siounev@psu.karelia.ru

ЮРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ СУХАНОВ

старший преподаватель кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
yurii_ptz@bk.ru

АПРОБАЦИЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ДРЕВЕСИНЫ В БИОЭНЕРГЕТИКЕ: ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ*

Описываются результаты апробации компьютерной системы поддержки принятия оптимальных решений по стимулированию рационального использования древесной биомассы и отходов лесозаготовок в биоэнергетике.

Ключевые слова: древесная биомасса, лесосечные отходы, лесосечные работы, логистика, ГИС-технологии

Россия обладает огромным потенциалом для производства биотоплива из древесного сырья. Однако лесная биоэнергетика у нас только начинает развиваться. В этой связи особо актуальными становятся вопросы выбора технологических решений по заготовке и переработке топливной древесины, которые были бы наиболее эффективными в условиях России.

Для решения этой задачи ПетрГУ в сотрудничестве с НИИ леса Финляндии уже несколько лет ведет работы по созданию компьютерной системы поддержки принятия оптимальных решений по стимулированию рационального использования древесной биомассы и отходов лесозаготовок в биоэнергетике [2], [6], [8], [14]. Подробное теоретическое описание этой системы, заложенных в ее основу методик, применяемых подходов и средств содержится в работах [4], [5], [7], [9], [10], [11], [12], [13], [15], [16].

Компьютерная система поддержки принятия решений позволяет с помощью имитационного моделирования определять эффективность тех или иных технологических решений. При этом учитываются практически все наиболее влияющие факторы, что позволяет найти наиболее рациональный способ организации работ, состав и характеристики используемых машин и оборудования.

Методика учитывает также и экологические последствия изыятия дополнительных объемов

древесины из леса путем расчета для каждой конкретной делянки допустимых объемов лесосечных отходов, которые станут сырьем для производства топлива. Это необходимо для недопущения деградации лесных экосистем.

В статье [1] описаны результаты апробации разработанной системы на примере одного из лесозаготовительных предприятий, имеющего лесосырьевую базу в Республике Карелия. В этой статье приводятся технико-технологические выводы по результатам сравнения нескольких вариантов технологий заготовки и переработки топливной древесины в условиях рассматриваемого предприятия.

Настоящая статья будет посвящена технико-экономической интерпретации полученных результатов. Основной целью исследования было определить вариант технологии производства древесного топлива, наиболее подходящий для условий, в которых работает рассматриваемое лесозаготовительное предприятие. Для увеличения выхода топлива было предложено, наряду с дровяной древесиной, использовать для его производства также и лесосечные отходы.

Для достижения поставленной цели были выбраны четыре часто встречающихся у нас в стране и за рубежом варианта технологии заготовки топливной древесины и для каждого из них осуществлено имитационное моделирование с помощью компьютерной модели [1].

Информация по этим четырем технологиям, а также по используемому оборудованию содержится в табл. 1.

Технология № 1 базируется на применении одного комплекса машин, состоящего из передвижной рубительной машины (ПРМ) производительностью 85 насыпных куб. м щепы в час и двух автомобилей-щеповозов вместимостью 90 насыпных куб. м щепы. Количество задействованных на каждой делянке автомобилей-щеповозов определяется системой в зависимости от объемов сырья и расстояния транспортировки. Для этого решается оптимизационная задача.

Технология № 2 использует два комплекса, идентичных комплексу в технологии № 1. Эта технология отличается тем, что, наряду с лесосечными отходами, вся дровяная древесина перерабатывается передвижной рубительной машиной в топливную щепу прямо на делянках. Таким образом, в данном случае всем 8 потребителям доставляется из леса только готовая щепка.

Технология № 3 заключается в вывозке не щепы, а насыпных лесосечных отходов для дальнейшей переработки непосредственно у потребителей. Все потребители в этом случае должны иметь СРМ. Используется один комплекс из двух автомобилей для перевозки лесосечных отходов вместимостью 90 насыпных куб. м отходов.

Технология № 4 использует самоходный пакетировщик лесосечных отходов, производящий пакеты, которые в дальнейшем транспортируются потребителям обычными автомобилями-сортиментовозами.

Для осуществления моделирования в систему была введена детальная информация по функционированию рассматриваемого лесозаготовительного предприятия в течение полугодия:

- Дорожная сеть с указанием скорости движения по отдельным участкам дорог.
- Местоположение и характеристики 188 делянок, включая потенциальные объемы каждого вида продукции на каждой из них.

- Местоположение и характеристики 13 пунктов доставки, включая помесечные планы поставок по каждому виду продукции.
- Характеристики 6 используемых лесозаготовительных комплексов типа «харвестер – форвардер», включая их достигнутую производительность с учетом применяемых на рассматриваемом предприятии несплошных рубок.
- Характеристики 4 автомобилей-сортиментовозов, включая их места базирования в двух гаражах.

На предварительном этапе с помощью системы были определены:

- Оптимальный заготовительный план, то есть распределение делянок по заготовительным комплексам и порядок их заготовки.
- Оптимальные маршруты и время движения от каждой точки (потребитель, делянка, гараж) до всех остальных.
- Доступные объемы лесосечных отходов для каждой делянки с учетом лесорастительных условий, сезона заготовки, технологических и эколого-лесоводственных ограничений.

В результате моделирования для каждого варианта технологии были получены детальные данные по работе каждого комплекса на заготовке деловой и топливной древесины, а также автомобилей на вывозке древесины для каждого дня рассматриваемого полугодия. Они были проанализированы в работе [1].

Для того чтобы выполнить анализ рассматриваемых технологий с экономической точки зрения, был сделан сравнительный расчет прямых производственных затрат [3]. Исходные данные и результаты этого расчета приведены в табл. 2.

Дополнительные и прочие расходы не принимались во внимание, так как целью было именно сравнение технологий между собой при прочих равных условиях, имеющих место на рассматриваемом предприятии. Поэтому реальная себестоимость может отличаться от рассчитанной, но соотношение ее значений для разных технологий должно сохраниться.

Таблица 1

Рассматриваемые технологии

Технология	Комплекс машин	Машина	Количество	Производительность
1. Переработка отходов	№ 1	Передвижная рубительная машина	1	85 насыпн. м ³ /ч
		Автомобиль-щеповоз	2	90 насыпн. м ³ /рейс
2. Переработка отходов и дров	№ 1	Передвижная рубительная машина	1	85 насыпн. м ³ /ч
		Автомобиль-щеповоз	2	90 насыпн. м ³ /рейс
	№ 2	Передвижная рубительная машина	1	85 насыпн. м ³ /ч
		Автомобиль-щеповоз	2	90 насыпн. м ³ /рейс
3. Вывозка отходов	№ 1	Автомобиль для перевозки лесосечных отходов	2	90 насыпн. м ³ /рейс
4. Пакетирование	№ 1	Пакетировщик лесосечных отходов	1	60 насыпн. м ³ /ч

Таблица 2

Сравнительный расчет затрат

Машина	Технология										
	№ 1			№ 2			№ 3		№ 4		
	Форвардер	Рубительная машина	Щеповоз	Форвардер	Рубительная машина	Щеповоз	Форвардер	Автомобиль для перевозки лесосечных отходов	Форвардер	Пакетировщик	Сортиментовоз
Стоимость машины, тыс. руб.	8500	8000	11500	8500	8000	11 500	8500	11 500	8500	18 000	–
Число машин	1	1	2	1	2	4	1	2	1	1	–
Расход топлива, л/ч	10	37	–	10	37	–	10	–	10	27	–
Расход топлива, л/100 км	–	–	23	–	–	23	–	23	–	–	23
Цена топлива, руб./л	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Отработано часов по результатам моделирования	3564	379,9	1115,3	2946,8	1048,4	2813,6	3513,6	1556,1	2201,1	313	837,3
Пробег по результатам моделирования, км	–	–	40 290	–	–	92 085		50 674	–	–	14 103
Норма амортизационных отчислений, %	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
Норма расходов на ТО и Р, % от стоимости машины	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Норма оплаты труда, руб./ч	180	180	200	180	180	200	180	200	180	200	200
Общая выработка по результатам моделирования, пл. куб. м	12 474			34 425			12 297,6		13 757		
Условно-постоянные затраты, тыс. руб.											
Амортизационные отчисления	1402,5	1320	3795	1402,5	2640	7590	1402,5	3795	1402,5	2970	0
Переменные затраты, тыс. руб.											
Расходы на ГСМ	1069,2	421,7	278	884	1163,7	635,4	1054,1	349,6	660,3	253,5	97,3
Расходы на ТО и Р	255	240	690	255	480	1380	255	690	255	540	0
Оплата труда	641,5	68,4	223,1	530,4	188,7	562,7	632,4	311,2	396,2	62,6	167,5
Социальные отчисления	192,5	20,5	66,9	159,1	56,6	168,8	189,7	93,4	118,8	18,8	50,2
Итого переменных затрат	2158,1	750,6	1258	1828,6	1889	2746,9	2131,3	1444,2	1430,4	874,9	315
Всего затрат, тыс. руб.	3560,7	2070,6	5053	3231,1	4529	10 336,9	3533,8	5239,2	2832,9	3844,9	315
Итого затрат, тыс. руб.	10684,2			18097,1			8773		6992,8		
Себестоимость продукции, руб./куб. м	857			526			713		508		

В технологии № 4 не учитываются амортизационные отчисления на сортиментовоз, так как в нашем случае вывозка пакетов отходов осуществляется наряду с вывозкой деловых и дровяных сортиментов теми же автомобилями и привлечение дополнительного автомобиля не требуется. Отработанные часы и пробег в данном случае – это разность общих отработанных

часов и общего пробега на вывозке для технологий № 4 и № 1.

В результате в целом наименьшее значение себестоимости показала технология № 4, несмотря на весьма значительную стоимость машины пакетировщика. Таким образом, среди технологий, где конечным продуктом выступают лесосечные отходы, эта технология является наи-

лучшей, технология № 3 может быть исключена из дальнейшего рассмотрения.

Напрямую сравнивать технологии № 1 и № 2 с технологией № 4 нельзя, так как цена на щепу будет заведомо выше цены на лесосечные отходы. Поэтому сначала необходимо определиться с лидером среди двух технологий, где конечным продуктом является щепа, то есть среди технологий № 1 и № 2.

По значению себестоимости технология № 2 существенно опережает технологию № 1. Однако имеются факторы, которые не дают сразу отдать предпочтение технологии № 2. Эти факторы связаны с дровяной древесиной. Действительно, при использовании технологии № 1 предприятие продает потребителям круглую дровяную древесину, а при использовании технологии № 2 она полностью перерабатывается в щепу. Поэтому при сравнении этих двух технологий необходимо учесть экономический эффект от продажи дровяной древесины в случае использования технологии № 1. Лучшим способом было бы для каждого варианта рассчитать потенциальную прибыль и по ее значению выбрать лучшую технологию. Однако для этого расчета у нас не хватает данных в части себестоимости заготовки дровяной древесины. Чтобы упростить задачу, было предложено рассчитать разницу прибыли для этих двух технологий:

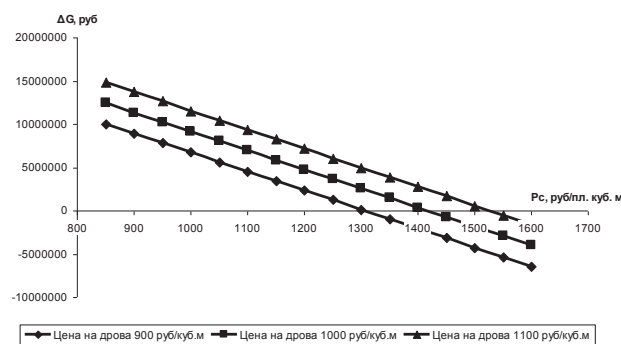
$$\Delta G = G_1 - G_2 = (P_c \cdot V_{c1} + P_f \cdot V_f - C_{c1} \cdot V_{c1} - C_{f1} \cdot V_f) - (P_c \cdot V_{c2} - C_{c2} \cdot V_{c2} - C_{f2} \cdot V_f) = (P_c - C_{c1}) \cdot V_{c1} + (P_f - C_{f1}) \cdot V_f - (P_c - C_{c2}) \cdot V_{c2},$$

где G_1 – прибыль при использовании технологии № 1; G_2 – прибыль при использовании технологии № 2; P_c – цена на щепу с доставкой; V_{c1} – объем щепы, получаемый при использовании технологии № 1; P_f – цена на дровяную древесину с доставкой; V_f – заготавливаемый объем дровяной древесины; C_{c1} – себестоимость получения щепы при использовании технологии № 1; C_{f1} – себестоимость заготовки дровяной древесины; C_{f2} – себестоимость транспортировки дровяной древесины; V_{c2} – объем щепы, получаемый при использовании технологии № 2; C_{c2} – себестоимость получения щепы при использовании технологии № 2.

При выводе этой зависимости себестоимость заготовки дровяной древесины C_{f1} сокращается, что избавляет нас от лишних расчетов. Полученная по результатам имитационного моделирования зависимость величины ΔG от уровня цен на щепу и дровяную древесину показана на рисунке.

На графике (см. рисунок), если точка, соответствующая текущим ценам на щепу и дровяную древесину, оказывается выше оси абсцисс,

это означает, что в данных условиях предпочтительнее технология № 1. Если эта точка окажется ниже оси абсцисс – выгоднее использовать технологию № 2.



Зависимость величины ΔG от уровня цен на щепу и дровяную древесину

В нашем случае технология № 2 будет выгодной, если при цене на дровяную древесину в 900 руб./куб. м щепа будет стоить дороже 1300 руб. за плотный кубометр. При цене на дровяную древесину в 1000 руб. щепа должна стоить уже больше 1400 руб. и т. д.

На сегодняшний день цена на дровяную древесину, как правило, выше цены на топливную щепу. Поэтому можно сделать вывод, что в рассматриваемых условиях при наличии спроса на дровяную древесину предпочтительнее использовать технологию № 1.

Для того чтобы сделать окончательный выбор между технологиями № 1 и № 4, необходимо руководствоваться уровнем цен на щепу и лесосечные отходы. В нашем случае, если цена на щепу окажется выше цены на лесосечные отходы более чем на 349 руб./пл. куб. м, будет выгоднее использовать технологию № 1. Если разница цен будет меньше этой величины, большую эффективность покажет технология № 4.

Таким образом, проведенное исследование позволяет заключить, что в условиях рассматриваемого лесозаготовительного предприятия для производства топливной древесины целесообразно использовать один комплекс машин, включающий в себя форвардер, рубительную машину и два автомобиля-щеповоза. Дровяную древесину лучше перевозить потребителям в круглом виде.

В случае, если разность цен топливной щепы и лесосечных отходов в плотной мере с учетом доставки будет меньше 349 руб. за куб. м, целесообразным становится использование самоходного пакетировщика лесосечных отходов с вывозкой пакетов с помощью имеющегося парка автомобилей-сортиментовозов.

* Работа выполнена в соответствии с Программой стратегического развития (ПСР) Петрозаводского государственного университета на 2012–2016 гг. в рамках проекта «Новые трансграничные решения в области интенсификации ведения лесного хозяйства и повышения степени использования топливной древесины в энергетике», финансируемого Европейским союзом по программе приграничного сотрудничества KARELIAENPI.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов Ю. Ю., Давыдков Г. А., Катаров В. К., Кильпелайнен С. А., Перский С. Н., Рожин Д. В., Селиверстов А. А., Соколов А. П., Суханов Ю. В., Сюнёв В. С. Апробация системы поддержки принятия решений в лесной биоэнергетике: технико-технологическое обоснование // Научный журнал КубГАУ. 2012. № 8 (82). С. 564–588.
2. Герасимов Ю. Ю., Селиверстов А. А., Суханов Ю. В., Сюнёв В. С. Основные факторы планирования производства древесного топлива из древесной биомассы // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2011. № 8 (121). С. 73–76.
3. Герасимов Ю. Ю., Сибиряков К. Н., Мошков С. Л., Вяльккю Э., Карвинен С. Расчет эксплуатационных затрат лесосечных машин. Йоэнсуу: Изд-во НИИ леса Финляндии, 2009. 48 с.
4. Герасимов Ю. Ю., Соколов А. П. Методика принятия решений по оптимизации лесозаготовительных планов // Научный журнал КубГАУ. 2011. № 5 (69). С. 320–334.
5. Герасимов Ю. Ю., Сюнёв В. С., Соколов А. П. Алгоритмы определения оптимальных маршрутов на графах для решения задач управления системами транспортировки древесины для лесопромышленного комплекса и биоэнергетики // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2010. Вып. 8. С. 30–33.
6. Герасимов Ю. Ю., Сюнёв В. С., Соколов А. П., Селиверстов А. А., Катаров В. К., Суханов Ю. В., Рожин Д. В., Тюрлик И. И., Фирсов М. В. Рациональное использование древесины и лесосечных отходов в биоэнергетике: оценка потенциалов и технологических подходов // Научный журнал КубГАУ. 2011. № 9 (73). С. 576–587.
7. Селиверстов А. А., Герасимов Ю. Ю., Суханов Ю. В., Сюнёв В. С., Катаров В. К. Оценка эффективности производства топливной щепы на лесном терминале // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 8. С. 25–27.
8. Селиверстов А. А., Сюнёв В. С., Герасимов Ю. Ю., Суханов Ю. В., Катаров В. К. Оценка эффективности производства топливной щепы на лесном терминале // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 8. С. 25–27.
9. Соколов А. П., Герасимов Ю. Ю. Алгоритм синтеза оптимального транспортного плана в системе поддержки принятия решений для лесопромышленного комплекса и биоэнергетики // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2010. Вып. 8. С. 144–148.
10. Соколов А. П., Герасимов Ю. Ю. Геоинформационная система для решения оптимизационной задачи транспортной логистики круглых лесоматериалов // Известия высших учебных заведений «Лесной журнал». 2009. № 3. С. 78–85.
11. Соколов А. П., Герасимов Ю. Ю., Селиверстов А. А. Методика оптимизации парка автомобилей на вывозке сортиментов на основе имитационного моделирования в среде ГИС // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2009. № 11(105). С. 72–77.
12. Суханов Ю. В., Герасимов Ю. Ю., Селиверстов А. А., Соколов А. П. Технологические цепочки и системы машин для сбора и переработки древесной биомассы в топливную щепу при сплошнолесосечной заготовке в сортиментах // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 4(12). С. 101–107.
13. Суханов Ю. В., Герасимов Ю. Ю., Селиверстов А. А., Сюнёв В. С. Системы машин для производства топливной щепы из древесной биомассы по технологии заготовки деревьями // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 1. С. 7–13.
14. Gerasimov Y., Karjalainen T. Energy wood resources in Northwest Russia // Biomass and Bioenergy. 2011. Vol. 35. P. 1655–1662.
15. Gerasimov Y. Y., Sokolov A. P., Karjalainen T. GIS-based Decision-Support Program for Planning and Analyzing Short-Wood Transport in Russia // Croatian Journal of Forest Engineering. 2008. Vol. 29. Issue 2. P. 163–175.
16. Gerasimov Y., Sokolov A., Siounev V. Optimization of industrial and fuel wood supply chain associated with cut-to-length harvesting // Systems. Methods. Technologies. 2011. № 3 (11). P. 118–124.

ВАДИМ АНДРЕЕВИЧ КУРОПТЕВ

аспирант кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
kuroptev@petrsu.ru

ВАДИМ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ ПУТРОЛАЙНЕН

кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры электроники и электроэнергетики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
vputr@petrsu.ru

ГЕНРИХ БОЛЕСЛАВОВИЧ СТЕФАНОВИЧ

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
gstef@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОТИПА ЭЛЕМЕНТА ReRAM НА ОСНОВЕ НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКИХ АНОДНЫХ ОКСИДНЫХ ПЛЕНОК НИОБИЯ*

Статья посвящена результатам разработки и экспериментального исследования прототипа элемента ReRAM (resistive random access memory) на основе биполярного резистивного переключения в нестехиометрических анодных оксидных пленках ниобия. Показана высокая практическая значимость и перспективность данного эффекта для разработки ReRAM.

Ключевые слова: элементы ReRAM, биполярное резистивное переключение, анодные оксиды ниобия

Эффект резистивного переключения, заключающийся в обратимом переходе между высоко- и низкоомными состояниями с резко различающимся (от одного порядка) сопротивлением в целом ряде оксидов переходных металлов [3], [14], считается одним из наиболее перспективных для разработки энергонезависимой памяти с новыми качественными свойствами [9]. По виду вольт-амперных характеристик резистивное переключение феноменологически разделяется на два больших класса: униполярное (УРП) и биполярное (БРП). При УРП скачок сопротивления зависит от амплитуды прикладываемого напряжения, полярность напряжения роли не играет, обязательным изначальным условием является так называемая «формовка» – подача значительного по величине напряжения импульса, переводящего структуру из высокоомного состояния в низкоомное. При БРП изменение сопротивления структуры контролируется полярностью прикладываемого напряжения, осуществление «формовки» не обязательно, величины напряжения по сравнению с УРП значительно снижены. Исследование эффекта БРП проводилось в структурах на основе оксидов NiO [11], TiO₂ [7], [8], [9], [13], BiFeO₃ [6], [15], Cr₂O₃ [5] и др. Ранее нами было показано [10], что такой эффект может быть реализован в том числе и в его униполярной разновидности в анодных оксидах ниобия, включенных в состав простой конденсаторной структуры.

Перспективной, но фактически нераскрытой темой является изучение БРП в нестехиометрических оксидах ниобия, полученных окислением металла при высоких плотностях тока анодирования. Проведение такого исследования позволило бы разработать научную и технологическую базу создания электронной памяти (энергонезависимой, перезаписываемой) на основе оксидов переходных металлов, получаемых низкотемпературными способами, допускающих ее включение в состав электронных компонентов на прозрачных, гибких подложках (стекло, пластик, бумага и т. п.).

Таким образом, ключевыми задачами работы являлись разработка и экспериментальное исследование прототипа элемента ReRAM (resistive random access memory, резистивная память с произвольным доступом) на основе БРП в пленках нестехиометрических анодных оксидов ниобия.

Исходными требованиями к разрабатываемому прототипу являлись следующие положения:

а) функциональный материал – нестехиометрический оксид ниобия Nb_xO_y (требование нестехиометричности обусловлено необходимостью неравновесного содержания кислородных анионов и соответствующих им кислородных вакансий, движение которых под воздействием поля определяет механизм БРП);

б) способ получения – анодное окисление с величинами плотности тока анодирования бо-

лее высокими, чем в случае получения высших анодных оксидов, что является одним из методов достижения нестехиометричности получающегося оксида [2];

в) вид переключения – БРП без процесса «формовки»;

г) критерий выбора конкретных значений технологических параметров – максимальное отношение сопротивлений в высоко- и низкоомном состояниях.

Для проведения анодирования ниобия использовался специализированный электроизмерительный стенд, состоящий из прецизионного источника-измерителя Keithley-2410, представляющего собой комбинацию прецизионного, малошумящего, высокостабильного источника питания постоянного тока с малошумящим, высокоимпедансным мультиметром, компьютера для управления процессом анодного окисления и непосредственно самой электрохимической ячейки.

Анодируемый металл обезжиривался в ацетоне, затем подвергался очистке в изопропиловом спирте в ультразвуковой ванне в течение 90 сек., далее помещался в качестве анода в электрохимическую ячейку с раствором электролита (использовались 0,01 N; 0,1 N и 1 N растворы H_3PO_4 , NaOH) в деионизованной воде, не растворяющим окисел и металл, при комнатной температуре. При пропускании тока через ячейку происходил перенос ионов кислорода из электролита в металл и образование на его поверхности анодной окисной пленки. Анодирование осуществлялось в гальваностатическом режиме при разных параметрах процесса (химического состава и концентрации электролита, плотности тока анодирования, длительности). После окисления в электролите образцы промывались в дистиллированной воде и высушивались в потоке горячего воздуха.

В качестве основы для изготовления прототипов элементов ReRAM использовались аморфные структуры (подтверждено анализом на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М) на основе оксидов $Nb_2O_5 \div Nb_xO_y$ с толщиной оксида ≈ 1 мкм. Изучаемые структуры были получены анодным окислением как ниобиевой фольги, так и тонких пленок ниобия, нанесенных магнетронным методом на установку ВУП-5М на кремниевые подложки (КДБ, КЭФ). Далее посредством термического напыления с помощью ВУП-5М на оксидную пленку наносились электроды (толщина ≈ 1 мкм) из различных металлов (Al, Nb); в ряде случаев также использовался прижимной металлический контакт (W, Pt).

Для исследования влияния геометрии применяемого электрода, в частности его площади и периметра, на характер БРП и с целью прояснения механизмов переключения и выявления оптимальных технологических параметров

прототипа были использованы контакты разных размеров (от 0,04 до 3,14 мм²). Для решения задач по исследованию влияния кристалличности функционального материала структуры на ее рабочие характеристики были проведены вакуумный отжиг образцов и их рентгенографическое исследование. Отжиг образцов осуществлялся лампой OSRAM HaloStar UV-Stop 24 V в установке ВУП-5М, при температуре 500 °C в вакууме, при давлении остаточных паров $5 \cdot 10^{-3}$ Па. Для измерения толщины анодных пленок применялись методы анодной спектроскопии [1] и спектрофотометрии (использовался спектрофотометр СФ-56 с рабочим диапазоном длин волн 190–1100 нм) [4].

В качестве основных методов анализа электрофизических свойств исследуемых сэндвич-структур использовались методики измерения вольт-амперных характеристик на основе Keithley-2410 и оптического микроскопа Лабомет-2, для чего образец помещался на зондовый стенд, позволяющий устанавливать измерительный зонд на контактную площадку размером порядка 15 мкм.

На верхний электрод структуры подавалось медленно изменяющееся линейно-нарастающее напряжение разной полярности в последовательности 0 В \rightarrow 5 В \rightarrow 0 В \rightarrow –5 В \rightarrow 0 В. Скорость нарастания напряжения выбиралась такой, чтобы все релаксационные процессы в структуре успевали завершиться. Время окончания данных процессов было определено в ходе исследования токовой релаксации в прототипах после подачи одиночных микросекундных импульсов. Для предотвращения необратимого пробоя структур ограничивалась величина пропускаемого через них тока (в зависимости от конкретной реализации структуры от 1 мкА до 1 А).

Результатом разработки прототипа элемента ReRAM (рис. 1) на основе нестехиометрических анодных оксидных пленок ниобия и БРП без процесса «формовки» (рис. 2) стало сочетание следующих оптимальных технологических параметров, удовлетворивших исходным требованиям и реализовавших элемент энергонезависимой памяти:

- 1) основа прототипа – ниобиевая фольга;
- 2) технологический процесс получения функционального материала – анодное окисление в 0,1 N растворе NaOH при плотности тока анодирования 13,3 мА/см² в течение 150 сек. без последующего отжига; характеристики процесса анодирования, зафиксированные в ходе создания прототипа, указаны в табл. 1;
- 3) верхние электроды прототипа – алюминиевые минимальных линейных размеров (в случае проведенных исследований с площадью 0,2 мм²);
- 4) величины рабочих напряжений (записи, стирания, чтения): 5 В, –5 В, 3 В.

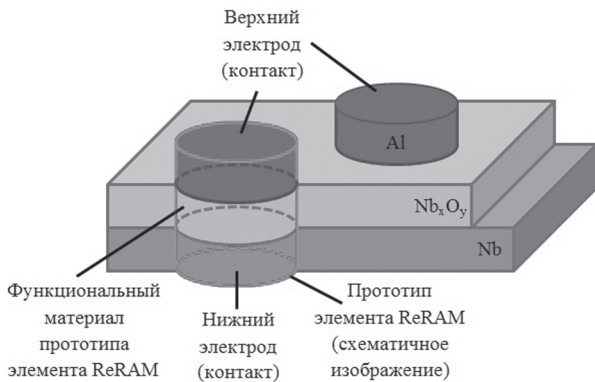


Рис. 1. Прототип элемента ReRAM в виде сэндвич-структуры $\text{Nb}/\text{Nb}_x\text{O}_y/\text{Al}$

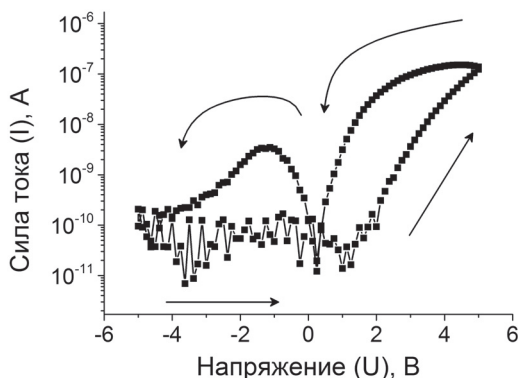


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика БРП в анодных пленках ниобия (шум в нижней части графика обусловлен пределом точности Keythley-2410)

Характеристики процесса анодирования ниобия, зафиксированные при создании прототипа элемента ReRAM

Скорость изменения напряжения, В/с	0,75
Напряжение искрения, В	100
Толщина оксидной пленки по методу анодной спектроскопии, нм	1080 ± 50
Толщина оксидной пленки по методу спектрофотометрии, нм	1000 ± 100
Отношение сопротивлений прототипа в высоко- и низкоомном состояниях, отн. ед.	~ 100

Одними из наиболее информативных характеристик в области разработки прототипов новых элементов памяти (не только ReRAM) являются их динамическое устаревание (endurance performance) и время сохранения состояния (retention characteristics).

Для оценки динамического устаревания была проведена экспериментальная эксплуатация структуры $\text{Nb}/\text{Nb}_x\text{O}_y/\text{Al}$ в 100 циклов (рис. 3). Результаты данного исследования свидетельствуют о том, что в течение повторяющихся циклов БРП низкоомное состояние более интенсивно претерпевает изменения, что связано, скорее всего, с уменьшением количества кислородных анионов, принимающих участие в организации/разрушении проводящих нитей в толще окси-

да, что соответствует современным взглядам на механизмы протекания БРП [5], [11], [12]. Одна часть ионов может растворяться в верхнем электроде, другая – уходить под воздействием поля вглубь оксида, снижая степень нестехиометричности последнего, третья – попадать в потенциальные ямы с высокими энергиями высвобождения и т. д.

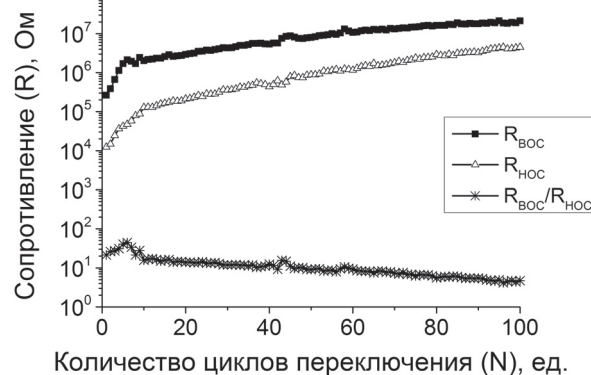


Рис. 3. Динамика величины сопротивления в высокоомном (R_{BOC}) и низкоомном состояниях (R_{HOC}) структуры $\text{Nb}/\text{Nb}_x\text{O}_y/\text{Al}$ и их отношения в безразмерных единицах ($R_{\text{BOC}}/R_{\text{HOC}}$) в течение 100 циклов БРП

Для оценки времени сохранения состояния прототипа элемента ReRAM в виде структуры $\text{Nb}/\text{Nb}_x\text{O}_y/\text{Al}$ также был проведен отдельный эксперимент, в котором 50 прототипов были переведены в низкоомное состояние, другие 50 – в высокоомное, величина сопротивления которых проверялась каждый день на протяжении месяца (рис. 4). Полученный результат эксперимента хорошо коррелирует с результатами исследования динамического устаревания по величинам сопротивлений в разных состояниях и может быть интерпретирован как термодиффузия кислородных анионов в основную толщу оксида из области, близкой к верхнему электроду, протекающая без внешнего воздействия и снижающая степень нестехиометричности оксида.

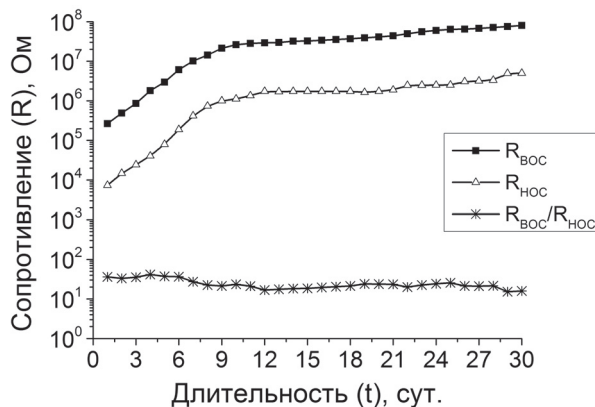


Рис. 4. Динамика величины сопротивления в высокоомном (R_{BOC}) и низкоомном состояниях (R_{HOC}) структуры $\text{Nb}/\text{Nb}_x\text{O}_y/\text{Al}$ и их отношения в безразмерных единицах ($R_{\text{BOC}}/R_{\text{HOC}}$) в течение месяца без проведения БРП

Таким образом, в работе представлены результаты разработки и исследования прототипа элемента ReRAM на основе нестехиометрических анодных оксидных пленок ниобия. Полученные сведения, включающие технологические параметры изготовления прототипов и их ключевые характеристики, такие как динамическое устаревание в ходе эксплуатации и время сохранения состояния прототипа после однократной записи, служат доказательством перспективности про-

веденных работ по данному направлению. Кроме того, достигнутые результаты указывают на необходимость продолжения исследований, в частности, в области дальнейшей оптимизации рабочих характеристик разрабатываемых прототипов элементов ReRAM. Также отдельного рассмотрения заслуживает факт значительного (по сравнению с классическими представлениями [2]) утолщения полученных анодных пленок, вызванного, вероятно, увеличенной плотностью тока анодирования.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития Петрозаводского государственного университета на 2012–2016 годы, Минобрнауки РФ, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (2009–2013)» (государственные контракты № 14.740.11.0895, № 14.740.11.0137, № 16.740.11.0562, № 14.740.11.1157, № 14.В37.21.0755, № 14.В37.21.0747, № 14.В37.21.1066), АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (государственные контракты № 2.3282.2011, № 2.2774.2011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедева Т. С., Шpileва П. В., Войтович И. Д. Применение контролируемого анодного окисления для экспресс-контроля в технологии пленок и тонкопленочных структур // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2003. № 5. С. 42–45.
2. Одынец Л. Л., Орлов В. М. Анодные оксидные пленки. Л.: Наука, 1990. 200 с.
3. Пергамент А. Л., Ханин С. Д. Электронное переключение в тонких слоях оксидов переходных металлов // *Известия РГПУ им. А. И. Герцена*. 2007. Т. 7. № 26. С. 69–85.
4. Раков А. В. Спектрофотометрия тонкопленочных полупроводниковых структур. М.: Сов. радио, 1975. 175 с.
5. Chen S.-C., Chang T.-C. et al. Bipolar resistive switching of chromium oxide for resistive random access memory // *Solid-State Electronics*. 2011. Vol. 62. Is. 1. P. 40–43.
6. Chen S., Wu J. Unipolar resistive switching behavior of BiFeO₃ thin films prepared by chemical solution deposition // *Thin Solid Films*. 2010. Vol. 519. P. 499–504.
7. Ho Do Y., Sik Kwak J. et al. Oxygen ion drifted bipolar resistive switching behaviors in TiO₂–Al electrode interfaces // *Thin Solid Films*. 2010. Vol. 518. P. 4408–4411.
8. Ho Do Y., Sik Kwak J. et al. TiN electrode-induced bipolar resistive switching of TiO₂ thin films // *Current Applied Physics*. 2010. Vol. 10. P. 71–74.
9. Freitas R. F., Wilcke W. W. Storage-class memory: The next storage system technology // *IBM J. Res. & Dev.* 2008. Vol. 52. № 4–5. P. 439–447.
10. Kundozeroва Т. В., Grishin A. M., Stefanovich G. B., Velichko A. A. Anodic Nb₂O₅ Nonvolatile RRAM // *IEEE Transactions on electron devices*. 2012. Vol. 59. № 4. P. 1144–1148.
11. Lee S. R., Kim H. M. et al. Role of oxygen vacancies formed between top electrodes and epitaxial NiO films in bipolar resistance switching // *Current Applied Physics*. 2012. Vol. 12. Is. 2. P. 369–372.
12. Lian W., Long S. et al. Approaches for improving the performance of filament-type resistive switching memory // *Chinese Sci. Bull.* 2011. Vol. 56. № 4–5. P. 461–464.
13. Mähne H., Slesazek S. et al. The influence of crystallinity on the resistive switching behavior of TiO₂ // *Microelectronic Engineering*. 2011. Vol. 88. P. 1148–1151.
14. Sawa A. Resistive Switching in Transition Metal-Oxide // *Materials Today*. 2008. Vol. 11. P. 28–36.
15. Shuai Y., Zhou S. et al. Nonvolatile bipolar resistive switching in Au/BiFeO₃/Pt // *J. Appl. Phys.* 2011. Vol. 109. 124117.

АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ СЕМЕНОВ

аспирант кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
alexsem26@gmail.com

АЛЕКСАНДР ЛЕОНОВИЧ ПЕРГАМЕНТ

доктор физико-математических наук, доцент кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
aperg@psu.karelia.ru

МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ ПУСТЫЛЬНИК

кандидат физико-математических наук, Институт внеземной физики научного общества им. Макса Планка (Гархинг, Федеративная Республика Германия)
pustyltnik@mpe.mpg.de

МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА ГАЗОВОЙ СРЕДЫ КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЫ С ЧАСТИЦАМИ МЕЛАМИНФОРМАЛЬДЕГИДА*

Экспериментально исследовано изменение состава газовой среды комплексной плазмы. Частицы (сферы диаметром $1,31 \pm 0,07$ мкм) меламинаформальдегида размещались в плазме радиочастотного разряда в смеси газов аргона и кислорода (90%-Ar, 10%-O₂). Приведены результаты масс-спектрометрических измерений состава газовой среды с частицами и без частиц. Обсуждаются оценочные данные об изменении состава газовой среды комплексной плазмы.

Ключевые слова: комплексная плазма, упорядоченные плазменно-пылевые структуры, масс-спектрометрия

ВВЕДЕНИЕ

Пылевая (комплексная) плазма сегодня является одной из наиболее перспективных, стремительно развивающихся областей исследования, включающей в себя фундаментальные вопросы физики плазмы, гидродинамики, нелинейной физики, кинетики фазовых переходов, физики твердого тела, а также прикладные проблемы (плазменные технологии, новые материалы, нанотехнологии и т. д.) [1], [2], [3], [4]. Упорядоченные плазменно-пылевые структуры (УППС) состоят из заряженных в плазме пылевых частиц, размеры которых могут быть от долей до сотен микрон [1], [2], [3].

В настоящее время для исследования УППС часто применяют частицы, изготовленные из вещества меламинаформальдегида (MF-R). Частицы из MF-R немецкой фирмы Microparticles GmbH используются сегодня в большинстве экспериментов, связанных с исследованием УППС, в том числе в экспериментах, которые проводятся в условиях микрогравитации на международной космической станции. Существующая сегодня технология позволяет изготавливать частицы с аттестованными одинаковыми размерами, разброс величины диаметра таких частиц может составлять сотые доли микрометра.

Масс-спектрометрические (МС) исследования широко применяются для анализа газовой среды в реактивной плазме (метан, ацетилен, аргон-ацетилен и др.) при формировании частиц в них

за счет химических реакций [8], [9], [11]. Однако исследований состава газовой среды и его изменений в период наблюдения УППС в неактивной плазме (Ar, ArO₂, Ne и др.) крайне мало. Важно знать, как происходит деструкция частиц, составляющих УППС, какая доля материала с их поверхности попадает в газовую среду и как при этом могут меняться характеристики разряда.

Цель данной работы заключалась в анализе состава газовой среды комплексной плазмы, состоящей из частиц MF-R, методами масс-спектрометрии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальная установка (рис. 1) состояла из газоразрядной камеры, куда в определенный момент времени из специального устройства (диспенсера) инжектировались частицы MF-R.

Сама камера была изготовлена из алюминия, а электроды – из стали. Горизонтальные окна были выполнены из стекла толщиной 3 мм. Образовавшиеся внутри камеры упорядоченные плазменно-пылевые структуры (рис. 2) подсвечивались «лазерным ножом» и визуально контролировались с помощью скоростной видеокамеры.

Система видеоконтроля эксперимента позволяла просканировать весь объем камеры и оценить, насколько он заполнен частицами. Скорость потока газа через газоразрядную камеру контролировалась автоматически при помощи

специального контроллера протока газа, который, в свою очередь, управлялся программными средствами и отдельным автоматическим клапаном, регулирующим откачку газа из камеры. В экспериментах использовалась смесь газов аргона и кислорода в следующем процентном соотношении: 90 %-Ar, 10 %-O₂. Контроль параметров газового разряда осуществлялся автоматически при помощи программных средств и специального блока управления и сопряжения. Во всех экспериментах использовался радиочастотный (RF) разряд с прикладываемой мощностью - 1,6 W. Проток газа в камере составлял значение 0,08 ссст. Рабочие давления в камере и в масс-спектрометре в период проведения измерений составляло 0,36 mbar и $1,5 \times 10^{-5}$ mbar соответственно. Во всех экспериментах использовались частицы полимера меламинаформальдегид (MF-R), диаметром $D = 1,31 \pm 0,07 \mu\text{m}$. Время измерений составляло 2 часа с момента инжектирования частиц в камеру. Химическая формула и структура материала частиц, используемых в экспериментах, представлена на рис. 3.

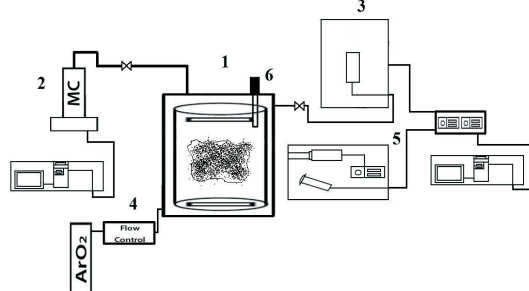


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 – газоразрядная камера; 2 – масс-спектрометр с управляющим компьютером; 3 – система откачки камеры; 4 – система подачи газа; 5 – система видеонаблюдения и регистрации частиц в разряде; 6 – диспенсер

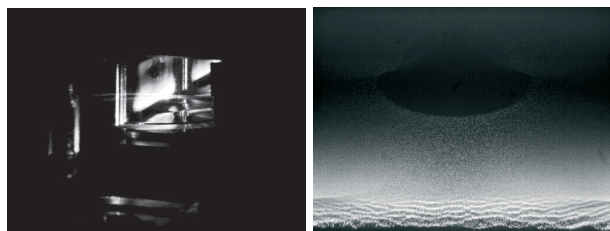


Рис. 2. Упорядоченные плазменно-пылевые структуры внутри газоразрядной камеры

Масс-спектрометр подключался непосредственно к камере при помощи отдельного вывода с перекрывающим клапаном. Прибор имел отдельную откачку и отдельно управлялся при помощи специальных программных средств и блока сопряжения с компьютером. В экспериментах использовался масс-спектрометр фирмы Microvision, модель Microvision Plus. Основные технические характеристики масс-спектрометра представлены в табл. 2. Важно отметить, что для масс-спектрометра данной модели давление

анализируемого газа внутри прибора не должно превышать величину 10^{-4} mbar, в противном случае велика вероятность выхода из строя накаливаемого катода. Поэтому в проводимых экспериментах величина внутреннего давления газа в масс-спектрометре не превышала значения 3×10^{-5} mbar. При данных значениях удалось достичь максимума чувствительности в измерениях с использованием данного прибора.

Полимер	Химическая и структурная формулы
Melamine formaldehyde resin (MF-R)	C ₄ H ₆ N ₆ O

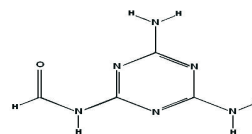


Рис. 3. Структура частиц MF-R

Таблица 2

Основные технические характеристики масс-спектрометра Microvision Plus	
Диапазон измеряемых масс	1–100 а. е. м., 1–200 а. е. м., 1–300 а. е. м. стандартное исполнение – 1–6 а. е. м., 1–100 а. е. м. – высокоточное стандартное исполнение
Максимальное рабочее давление	$7,5 \times 10^{-5}$ Torr (1×10^{-4} mbar)
Минимальное определяемое парциальное давление	$1,5 \times 10^{-11}$ Torr (2×10^{-11} mbar) чаша Фарадея, $3,8 \times 10^{-14}$ Torr (5×10^{-14} mbar) чаша Фарадея и УВЭ с КП, $7,5 \times 10^{-15}$ Torr (1×10^{-14} mbar) чаша Фарадея с одиночным УВЭ
Разрешение	Менее 10 % между пиками с равными высотами по всему диапазону измеряемых масс

Перед каждым измерением камера несколько раз откачивалась и подвергалась тренировке путем прожига радиочастотным разрядом плазмы при максимальной мощности на протоке газа. Это делалось с целью удаления различных примесей и соединений, которые могли возникнуть в период долгой откачки. Масс-спектрометр также включался заблаговременно перед каждым измерением с целью прогрева накаливаемого катода. Сами измерения проводились в несколько этапов. На первом этапе исследований проводился анализ газовой среды камеры без частиц. Время измерений составляло 2 часа. На втором этапе проводился анализ газовой среды с частицами. Измерения начинались с того момента, как была сформирована пылевая структура с максимальным числом частиц. Время от включения разряда до начала измерений составляло не более 1 минуты. Третьим этапом тестирования установки являлся эксперимент с чистым углеродом. В плазму при тех же условиях помещался кусок твердого углерода (размеры, чистота 99,9 %) и проводился анализ газовой среды. Данный эксперимент позволил идентифицировать ряд пиков, которые являлись спорными, когда на одну и ту же массу могло приходиться несколько возможных соединений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 4 представлен масс-спектр состава газовой среды аргон-кислородной плазмы без частиц. Анализ газовой среды проводился непрерывно в течение двух часов до 80 массы (из 200 возможных), что позволило более динамично следить за изменениями в составе газовой среды внутри камеры. При этом давление в масс-спектрометре составляло постоянную величину $1,5 \times 10^{-5}$ mbar. Данная величина и ее постоянство позволяют сравнивать интенсивность различных масс в каждом отдельном спектре. Показанные на рисунке спектры нормализованы на интенсивность ионов аргона Ar^+ ($m/e = 40$ а. е. м.), а сами пики интенсивностей масс построены в логарифмической шкале.

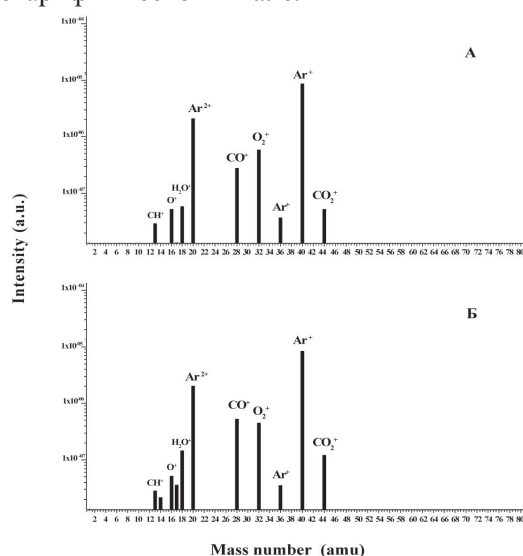


Рис. 4. Масс-спектр ArO_2 плазмы без частиц: А – в начальный момент времени, Б – через 2 часа экспозиции

В отсутствии частиц в камере, спектр газовой среды состоит из Ar ($m/e = 40, 20, 36$ а. е. м., последние два являются изотопами с меньшим относительным содержанием в плазме) и других компонентов (табл. 3). В данном спектре также присутствуют примеси, которые, как правило, осаждаются на стенках и стеклах камеры в виде пленки и паров: десорбированные пары воды (H_2O^+ : $m/e = 18$ а. е. м., компонента OH^+ : $m/e = 17$ а. е. м., интенсивность пика которой возрастает в 2,7 раза за два часа наблюдений), оксид углерода (CO^+ : $m/e = 28$ а. е. м., CO_2^+ : $m/e = 44$ а. е. м.) и кислорода (O_2^+ : $m/e = 32$ а. е. м., O^+ : $m/e = 16$ а. е. м.). Также в спектре присутствуют компоненты С-Н соединений (CH^+ : $m/e = 13$ а. е. м., компонента CH_2^+ : $m/e = 14$ а. е. м. возрастает в 1,1 раза за два часа наблюдений). Стоит отметить, что величина интенсивности пика водорода H_2^+ в данных измерениях имела очень маленькую величину и за 2 часа измерений не превысила значение 1×10^{-8} mbar.

На рис. 5 представлен масс-спектр состава газовой среды аргон-кислородной плазмы после инъекции в нее частиц. В табл. 4 приведен

список наблюдаемых в данном спектре масс и их интенсивности в начальный момент времени, когда была сформирована УППС, и через 2 часа ее экспозиции в плазме.

Таблица 3

Динамика изменений основных пиков масс в спектре газовой среды аргон-кислородной плазмы без частиц внутри камеры за 2 часа экспозиции

m/e	Вещество	Значение парциального давления вещества, $t = 0$ (ч.)	Значение парциального давления вещества, $t = 2$ (ч.)
13	CH^+	$3,00 \times 10^{-8}$	$2,84 \times 10^{-8}$
14	CH_2^+	$1,93 \times 10^{-8}$	$2,21 \times 10^{-8}$
16	$\text{CH}_4^+, \text{O}^+$	$4,83 \times 10^{-8}$	$5,08 \times 10^{-8}$
17	OH^+	$1,30 \times 10^{-8}$	$3,48 \times 10^{-8}$
18	H_2O^+	$5,31 \times 10^{-8}$	$1,43 \times 10^{-7}$
20	Ar_2^+	$2,06 \times 10^{-6}$	$2,01 \times 10^{-6}$
28	$\text{CO}^+, \text{C}_2\text{H}_4^+$	$4,29 \times 10^{-7}$	$5,27 \times 10^{-7}$
32	O_2^+	$4,98 \times 10^{-7}$	$4,48 \times 10^{-7}$
36	Ar^+	$3,67 \times 10^{-8}$	$3,54 \times 10^{-8}$
40	Ar^+	$8,47 \times 10^{-6}$	$8,30 \times 10^{-6}$
44	CO_2^+	$7,26 \times 10^{-8}$	$1,19 \times 10^{-7}$

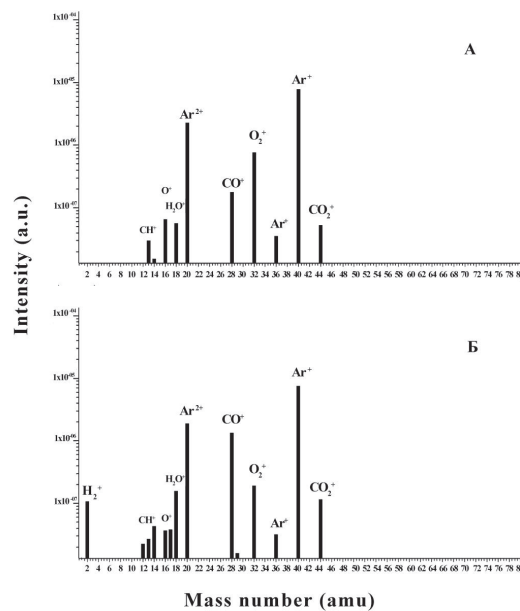


Рис. 5. Масс-спектр ArO_2 плазмы с частицами: А – в начальный момент времени, Б – через 2 часа экспозиции

По сравнению со спектром масс без частиц в плазме в данном спектре можно отметить присутствие новых пиков, интенсивность которых не была столь высока ранее: водород (H_2^+ : $m/e = 2$ а. е. м.), углерод (C^+ : $m/e = 12$ а. е. м.), этил ($\text{CH}_2\text{-CH}_3$ (C_2H_5^+): $m/e = 29$ а. е. м.) [5], [6], [7], [10]. Также стоит отметить значительное изменение некоторых масс в спектре: уменьшение кислорода (O_2^+ : $m/e = 32$ а. е. м.) в 1,46 раза и кислорода (O^+ : $m/e = 16$ а. е. м.) в 1,35 раза, уменьшение радикала OH^+ (OH^+ : $m/e = 17$ а. е. м.) в 3,06 раза, увеличение количества углекислого газа (CO^+ : $m/e = 28$ а. е. м. и CO_2^+ : $m/e = 44$ а. е. м.).

Однако величина отношения интенсивностей данных масс углекислого газа приблизительно схожа с величиной отношения интенсивностей масс в отсутствие частиц в камере. Уменьшение содержания кислорода может быть связано с образованием кислород-содержащих комплексов, концентрация которых находится на пределе чувствительности прибора. Безусловно, этот вопрос требует дальнейшего исследования.

Таблица 4

Динамика изменений основных пиков масс в спектре газовой среды аргон-кислородной плазмы с частицами внутри камеры за 2 часа экспозиции

m/e	Вещество	Значение парциального давления вещества, $t = 0$ (ч.)	Значение парциального давления вещества, $t = 2$ (ч.)
2*	H_2^+	$4,86 \times 10^{-9}$	$1,00 \times 10^{-7}$
12*	C^+	$2,03 \times 10^{-9}$	$2,12 \times 10^{-8}$
13	CH^+	$2,83 \times 10^{-8}$	$2,66 \times 10^{-8}$
14	CH_2^+, N_2^+	$4,03 \times 10^{-8}$	$4,21 \times 10^{-8}$
16	CH_3^+, O^+	$2,79 \times 10^{-8}$	$3,77 \times 10^{-8}$
17	OH^+	$1,27 \times 10^{-8}$	$3,89 \times 10^{-8}$
18	H_2O^+	$5,23 \times 10^{-8}$	$1,58 \times 10^{-7}$
20	Ar_2^+	$2,03 \times 10^{-6}$	$1,86 \times 10^{-6}$
28	$CO^+, C_2H_4^+$	$1,12 \times 10^{-6}$	$1,23 \times 10^{-6}$
29*	$CH_3CH_2^+ (C_2H_5^+)$	$9,31 \times 10^{-9}$	$1,47 \times 10^{-8}$
32	O_2^+	$1,44 \times 10^{-7}$	$2,10 \times 10^{-7}$
36	Ar^+	$3,33 \times 10^{-8}$	$3,22 \times 10^{-8}$
40	Ar^+	$7,17 \times 10^{-6}$	$7,46 \times 10^{-6}$
44	CO_2^+	$7,22 \times 10^{-8}$	$1,21 \times 10^{-8}$

Примечание. * – новые массы, интенсивность которых заметно увеличилась.

Величина интенсивности этила (CH_3-CH_2 ($C_2H_5^+$)) : m/e = 29 а. е. м.) выросла за 2 часа экспозиции в 1,58 раза, углерода (C^+ : m/e = 12 а. е. м.) – в 10,4 раза. Важно отметить, что в предварительных экспериментах было установлено, что за время, равное трем часам экспозиции частиц в плазме при тех же условиях, они полностью выгорали, поэтому в период проведения данного эксперимента было произведено несколько

инъекций частиц через каждые 40 минут. Это было важно для поддержания необходимого объема вещества внутри камеры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был исследован состав газовой среды аргон-кислородной плазмы с наличием УППС, построенных из частиц меламинформальдегида (MF-R) диаметром $1,31 \pm 0,07$ мкм и в их отсутствие при помощи масс-спектрометра. В период экспозиции частиц в плазме в масс-спектре наблюдались летучие молекулярные фрагменты углеводородов ($C_2H_5^+$, C^+) и водорода (H_2^+), которые были высвобождены с поверхности частиц под действием энергетических компонентов плазмы. Это вызвано такими физическими процессами, как разрыв химических связей под действием ионной компоненты плазмы, или энергетической метастабильностью, а также процессами химического травления, индуцированных реактивными радикалами и атомами в плазме.

Данные исследования имеют важное значение для экспериментов с УППС, в которых используются частицы из меламинформальдегида. Нам не удалось уловить какого-либо конкретного цельного элемента, который бы однозначно говорил о разрушении определенной части структуры частиц и позволял бы точно определить, что данный фрагмент был выделен из «тела» частицы. Это требует более детального экспериментального исследования и проведения дополнительных тестовых экспериментов. Однако полученные спектры указывают на выделение отдельных элементов и небольших химических соединений из состава материала частиц, которые образуют другие, более устойчивые химические соединения уже непосредственно в самой газоразрядной камере.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем благодарность А. Д. Хахаеву, Л. А. Луизовой, А. И. Щербине, S. Shimizu за ценные дискуссии и полезные замечания, сделанные при подготовке данной статьи.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваулина О. С., Петров О. Ф., Фортов В. Е. и др. Пылевая плазма: теория и эксперимент. М.: Физматлит, 2009. 316 с.
2. Луизова Л. А., Хахаев А. Д. Условия существования упорядоченных плазменно-пылевых структур и задачи диагностики // Материалы ФНТП-2002. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2002. С. 62–78.
3. Нефедов А. П., Петров О. Ф., Молотков В. И. и др. Возникновение жидкостных и кристаллических структур в пылевой плазме // Письма в ЖЭТФ. 2000. Т. 72. № 4. С. 313.
4. Фортов В. Е., Храпак А. Г., Храпак С. А., Молотков В. И., Петров О. Ф. Пылевая плазма. Успехи физических наук. 2004. Т. 174. № 5. С. 495–544.
5. Beynon J. H. Mass Spectrometry and its Applications to Organic Chemistry. Amsterdam: Elsevier, 1960.
6. Budzikiewicz H., Djerassi C., Williams D. H. Mass Spectrometry of Organic Compounds. San Francisco: Holden-Day Inc., 1967.
7. Hill H. C. Introduction to Mass Spectrometry. London: Heyden, 1966.
8. Hollenstein Ch. The physics and chemistry of dusty plasmas. Plasma Phys. Control. Fusion 42 R93, 2000.
9. Hong J., Truica-Marasescu F., Martinu L., Wertheimer M. R. An investigation of plasma-polymer interactions by mass-spectrometry // Plasma and Polymers. 2002. Vol. 7. № 3. P. 245–259.
10. McLafferty F. W. Interpretation of Mass Spectra. N. Y.: W. A. Benjamin, Inc., 1966.

TOWARD MAGNETO-OPTICAL LASING MEDIA

Luminescent properties of several Er-doped garnet films as building blocks were compared in all-garnet heteroepitaxial magneto-optical photonic crystals: $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, and $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$. Long-lived near-IR luminescence in Er substituted gallium and iron garnet layers used both as Bragg mirrors, and microcavities promise magneto-optical photonic crystals to become an active lasing medium.

Key words: Magneto-optical photonic crystals, garnet materials

INTRODUCTION

Newer photonic integrated circuits (PICs) own variety of functions as lasing, modulation, wavelength multiplexing, etc. integrating all optical components on the same semiconducting platform. Optical isolators are irreplaceable part of PICs. Laser sources are sensitive to feedback – a light back-scattered from other elements the laser is coupled and from external elements on the transmission line. Optical isolators prevent unwanted feedbacks providing unidirectional propagation of optical signals. Due to spontaneous magnetization breaking time inversion symmetry $t \rightarrow -t$, ferromagnetic materials demonstrate nonreciprocal Faraday effect: rotation of the plane of polarization of the light in a different direction according to the direction of propagation of the light. Rare earth iron garnets are the principal materials for non-reciprocal passive optical devices in telecommunication applications.

Bismuth substituted rare earth iron garnets combine high Faraday rotation (FR) and transparency in visible and near infrared light. Completely substituted bismuth iron garnet $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ in the form of a single layer epitaxial film keeps the record value of FR $\theta_F = -8.4^\circ/\mu\text{m}$ at 633 nm [1], [10]. Further increase of FR was offered by light localization in magneto-optical photonic crystals (MOPCs). Rosenberg's idea [11] to enhance FR by placing MO-material in a resonant cavity has been practically realized in one dimensional (1D) MOPC by Inoue *et al* [5]. Ultimate MO performance was recently achieved in all-garnet MOPCs: 1D heteroepitaxial $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ [6], $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ [7], $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ [4], [8], and $\text{Bi}_3\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}/\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ [9] crystals. So far, $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ MOPC with 6 pair quarter-wavelength reflectors in two Bragg mirrors and half-wavelength $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ microcavity in-between demonstrated the highest specific FR $\theta_F = -20.5^\circ/\mu\text{m}$ at 750 nm [8]. Even though superior FR, the accompanying high optical absorption hinders practical applications of $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ films. It is still a challenging task to engineer MO crystals which compromise a strong FR with modest optical insertion loss.

Reduction of bismuth concentration and substitution of the Fe^{3+} ion by other trivalent diamagnetic ions strongly suppress light absorption [12], [13]. We employed combined Al, Ga, and Er substitution of, respectively, ferric and bismuth ions to enhance transmissivity and make MOPCs luminescent. In this paper we review our recent results on synthesis and characterization of optical properties of garnet materials and magneto-optical photonic crystals with enhanced transmissivity, remnant Faraday rotation and strong luminescence at room temperature.

EXPERIMENTAL

Erbium-doped ferrimagnetic iron- and diamagnetic gallium-contained garnet films and their multilayers were sintered onto $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}(111)$ single crystal substrates. $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (LGG), $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (GGG), and $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG) films were prepared by pulsed laser deposition (PLD) whereas $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (BIG), $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (SGG), and $\text{Bi}_3\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ films were grown by rf-magnetron sputtering. The details of pulsed laser deposition and sputtering of garnet films have been published elsewhere, in the works [6] and [4], [8], respectively.

Synthesis and characterization of single layer iron- and gallium contained films should always precede preparation of MOPCs. First, reference epitaxial films were deposited to optimize growth conditions and to determine refractive indices $n(\lambda)$ and deposition rates. Then, MOPCs for the resonance wavelength λ_{res} were grown with corresponding Bragg reflectors having thickness of $\lambda_{\text{res}}/4n(\lambda_{\text{res}})$ and a microcavity which thickness is a multiple of $\lambda_{\text{res}}/2n(\lambda_{\text{res}})$.

X-ray diffraction analyses verified morphotropic epitaxial quality of all garnet films [4], [8]. The composition of deposited garnets was controlled by the Rutherford backscattering spectroscopy. Doping with 0.5 at.% of Er (0.1 garnet formula units) corresponds to the following volume concentration of Er^{3+} : $4.21 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ in $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ and $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, $3.97 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ in bismuth substituted iron garnets, and $3.84 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ in $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$.

Optical dispersion in garnets within 450 to 1000 nm range was examined using fiber-optic *OceanOptics* PC200 and HR4000 spectrometers. Transmittance vs. λ spectra were normalized to the intensity of the light transmitted through a blank $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ substrate. Photoluminescence (PL) in Er-doped garnets we studied using confocal *LabRam* HR800 Raman microscope with nitrogen cooled InGaAs array (900–1700 nm) at 514,5 nm Ar-laser pumping. Decay of the luminescence at room temperature was measured pumping Er-doped films with square pulse modulated 980 nm laser and detecting 1530 nm PL with the Ge uncooled detector shielded with 2 mm thick Si filter.

To compare PL intensities spectra were normalized to films thickness. Such normalization gives reliable relative estimation for transparent gallium garnets meantime underestimates the effectiveness of PL in iron garnets. Incident Ar-laser light in iron garnets is absorbed completely at film surface at the depth $\sim \lambda/(2\pi\sqrt{\epsilon})$. Dielectric permittivity ϵ grows rapidly at the absorption edge. Therefore, in Er-doped iron garnets green light generates PL in very shallow film surface layer.

FILMS OPTICAL PROPERTIES

As an example, Figs 1 and 2 present transmission and Faraday rotation spectra in 0,9 μm thick $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ film and in 1,6 μm thick $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ film. For all rare earth iron garnets Faraday rotation has a local maximum close to the absorption edge around 520 nm ($19\,231\text{ cm}^{-1}$, 2.38 eV). In $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ specific FR has a peak value of $\theta_F = -29,9\text{ deg}/\mu\text{m}$ at 535 nm and equals $-1,63\text{ deg}/\mu\text{m}$ at 980 nm. Aluminum-gallium substitution for iron leads to reduction of saturation magnetization and consequent decrease of FR: peak $\theta_F = -12,6\text{ deg}/\mu\text{m}$ at 526 nm and $-0,58\text{ deg}/\mu\text{m}$ at 980 nm. Diamagnetic ions substitution for Fe^{3+} significantly increases transmissivity: $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ film has the same transmittance as unsubstituted $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ though its thickness is almost twice larger. The absorption coefficient $\alpha = \ln(1/T)/\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ film thickness is $0,21\text{ dB}/\mu\text{m}$ at 750 nm against $0,62\text{ dB}/\mu\text{m}$ in pure $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ film.

Table 1

Material parameters of $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ garnet (resonance transition wavelength λ_0 and frequency ω_0 , plasma frequency ω_p and oscillator strength f , half linewidth Γ and parameter of spin-orbit coupling Δ)

Transition	λ_0 , nm	$\hbar\omega_0$, eV	$\hbar\omega_p/f$, eV	$\hbar\Gamma$, eV	$\hbar\Delta$, eV
First	300	4,14	8,82	$< 10^{-3}$	$< 10^{-3}$
Second	480	2,59	0,84	0,09	0,13
Third	407	3,05	0,84	0,03	0,17

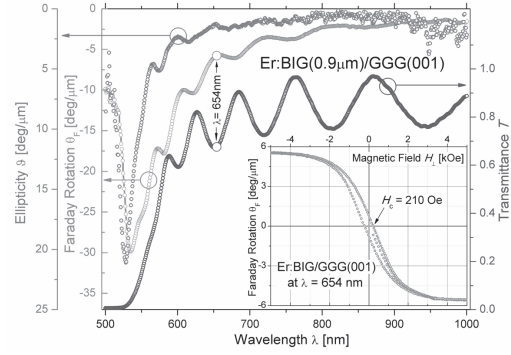


Fig. 1. Transmittance $T(\lambda)$, specific FR $\theta_F(\lambda)$ and ellipticity $\eta(\lambda)$ spectra for the 0,9 μm thick $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ film recorded in saturating perpendicular magnetic field $H = 3,5\text{ kOe}$. Inset shows specific FR $\theta_F[\text{deg}/\mu\text{m}]$ vs. H hysteresis loop traced at the wavelength $\lambda = 654\text{ nm}$. Two circular symbols \circ depict the magnitudes of the transmittance and FR at this wavelength

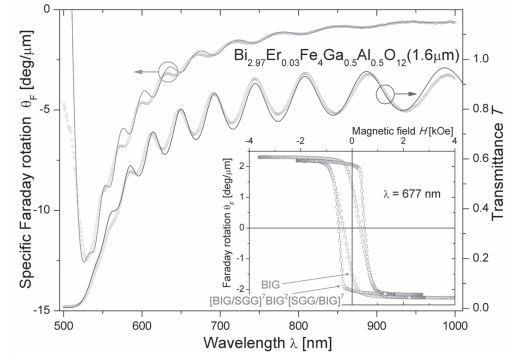


Fig. 2. Transmittance T and specific FR θ_F spectra of the reference 1,6 μm thick $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ film. Solid lines show spectra modelled with fitting parameters collected in the Table 1.

Inset compares FR θ_F vs. perpendicular magnetic field H hysteresis loops traced at $\lambda = 677\text{ nm}$ in the reference $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ film and magneto-optical photonic crystal (MOPC) $[\text{BiG}/\text{SGG}]^2[\text{BiG}^2/\text{SGG}/\text{BiG}]^2$ designed for $\lambda_{\text{res}} = 775\text{ nm}$

The spectra in $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ film were fitted (solid lines in Fig. 2) to the theory which accounts three resonance transitions in electric dipole approximation [2]. A complete set of microscopic parameters giving the best fit to the experimental data in $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ garnet is listed in Table 1.

Also, useful interpolation Sellmeier-like formulas for the complex refractive indices can be presented in the wavelength range of our interest as follows for $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ –

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{2.75}{1 - (128\text{nm}/\lambda)^2},$$

and for $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ garnet –

$$[n(\lambda) - ik(\lambda)]^2 = 1 + \frac{4.58}{1 - (303\text{nm}/\lambda)^2} + \frac{0.11}{1 - (494\text{nm}/\lambda)^2 + i0.08(494\text{nm}/\lambda)}.$$

Besides increased transparency, substitution of ferric ions on tetrahedral positions by diamagnetic Al^{3+} and Ga^{3+} ions induces a perpendicular magnetic anisotropy. Insets in Figs. 1 and 2 show θ_F vs. H hys-

teresis curves recorded under normal incident red laser illumination. $\text{Er:Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ film is in-plane magnetized - θ_F vs. H loop shows a typical magnetization in the “hard”-axis direction. $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ films demonstrate perpendicular magnetization with characteristic square hysteresis loops and remnant Faraday rotation.

LUMINESCENCE IN GARNET FILMS

As seen in Figs. 1 and 2, the maximum of FR in iron garnets occurs near the absorption edge around 520 nm. Therefore, for new MO-applications we should trade off FR against absorption to achieve superior MO-figure of merit Q [deg] = $2\theta_F/\alpha$. As a necessary condition, any method chosen to compensate the absorption of the signal light should not harm the resonant electronic transition (s) responsible for FR. One of the solutions would be to introduce optical gain simultaneously preserving FR.

Er-doped fiber amplifiers, invented in 1987, dominate in commercial WDM signal transmission systems operating in C (1530–1565 nm) and L (1565–1625 nm) bands. Pumping Er-doped fibers with solid state lasers, the inverted electron population at $^4I_{13/2}$ level can be achieved. As a result, absorption of telecom C and L optical signal is reduced and optical gain occurs when a pumping overcomes a threshold power. Since Er^{3+} ion easily substitutes any rare earth occupying dodecahedral sites in the garnet structure, both MO-active iron garnet and transparent gallium garnet layers could be grown to host luminescent erbium centers.

Fig. 3 shows photoluminescence spectra in Er-doped films pumped by green Ar-laser. Radiative intra- $4f\text{Er}^{3+}$ transitions appear to be very different in gallium and iron garnets. The latter films show very strong C -band (1530–1565 nm) PL. In $\text{Er:Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ and $\text{Er:Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ at $\lambda_{\text{PL}}=1530$ nm luminescence, respectively, is 5.2 and 4.1 times stronger than in $\text{Er:La}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$. On the contrary, at 514.5 nm pumping, intensive luminescence at $\lambda_{\text{PL}}=540$ and 980 nm caused by radiative transitions from, respectively, $^4S_{3/2}$ and $^4I_{11/2}$ excited Er^{3+} states to the $^4I_{15/2}$ ground state was clearly observed only in $\text{Er:La}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ garnet. As seen in the left frame of Fig. 3, PL in $\text{Er:Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ in this range is weak and broaden; meanwhile it is completely undetectable for $\text{Er:Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ and $\text{Er:Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$. Strong absorption in a broad charge transfer band and weaker one at the resonant $^6A_{1g} \rightarrow ^4T_{1g}$ transition of octahedrally coordinated Fe^{3+} ion completely extinguishes 540 and 980 nm PL in Er-doped iron garnets.

Two effects are responsible for enhanced C -band PL in iron garnets. The first is a strong absorption that pumping green light experiences in iron garnets below 520 nm. The second is the *sensitizing effect*. The $^4I_{11/2}$ energy level of Er^{3+} and the $^4T_{1g}$ level of octahedrally coordinated ferric ion are nearly resonant in energy. Fe^{3+} can be excited either by a pump 514.5 nm

Ar-laser in its very broad charge transfer absorption band, or by a solid state 980 nm laser whose light is absorbed at the narrow discrete band around $^4T_{1g}$ level. There are sixteen octahedrally coordinated Fe ions per one Er atom in the erbium substituted iron garnet unit cell. In PL process, the net Fe^{3+} absorption cross section at 980 nm is 16 times higher than that of Er^{3+} . Therefore, pump radiation at 980 nm is efficiently absorbed by Fe^{3+} and then is transferred to Er^{3+} .

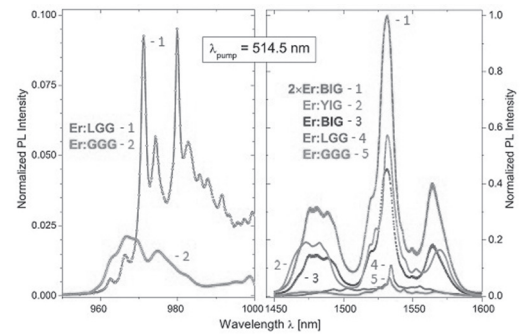


Fig. 3. Comparison of PL spectra in Er-doped garnet films pumped by 514,5 nm Ar-laser. Film compositions $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ (2xEr:BiG), $\text{Bi}_{2.9}\text{Er}_{0.1}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (Er:BiG), $\text{Y}_{2.9}\text{Er}_{0.1}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (Er:YIG), $\text{La}_{2.9}\text{Er}_{0.1}\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (Er:LGG), and $\text{Gd}_{2.9}\text{Er}_{0.1}\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (Er:GGG) are shown as the shorthands. All the spectra have been normalized to the films thickness. There was no noticeable luminescence observed in 2xEr:BiG, Er:BiG, and Er:YIG iron garnet films at 540 and 980 nm

The analysis of data on C -band luminescence decay at room temperature showed, that the excited $^4I_{13/2}$ state lifetime is ranged from 400 μs for $\text{Er:Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ and 1 ms for $\text{Er:Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ to 4 ms for $\text{Er:La}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ and almost 6 ms for $\text{Er:Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$. While pumped by 980 nm laser, the integral C -band PL intensity from $\text{Er:La}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, $\text{Er:Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, and 2xEr:BiG was found to be in the ratio of 0.79:0.49:1 compared to 0.21:0.45:1 at 514 nm pumping (see Fig. 3). It evidences that the 514 nm pumping of $\text{Er:Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ films is much more efficient than 980 nm one. We rely this upon incomparable stronger absorption of green light in $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ compared to $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$.

MAGNETO-OPTICAL PHOTONIC CRYSTALS

Erbium ions can be added both to the garnet layers in Bragg reflectors and/or microcavities. This raises a challenging task to engineer Er-substituted all-garnet MOPCs that combine lasing/amplifying and nonreciprocal optical properties with MO remanence. Luminescent MOPCs promise built-in *intelligence*: ability to simultaneously recognize, process and store optical data, make color filtering, and amplify optical signals.

Photonic crystal (with $7\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ / $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ reflectors in two Bragg mirrors and half-wavelength $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ microcavity in-between designed for 775 nm) spectra have a stop band structure – the band gap with the transmittance central peak at the resonance wavelength $\lambda_{\text{res}} = 775$ nm. Table 2 collects the properties of fabricated MOPC: resonance net Θ_F and specific Θ_F

Faraday rotation (the latter is normalized to the total thickness of $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ layers notified in the Table 2 with the abbreviation BIG), resonance bandwidth $\delta\lambda$ as well as MO-quality factor defined at λ_{res} as $Q [\text{deg}] = 2|\Theta_F|/\ln(1/T)$. Compared to the reference $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ film, MOPC demonstrates enhanced MO properties: specific FR θ_F and quality factor Q were increased, correspondingly, by the factor of 12 and 2. As a band pass filter, 775 nm MOPC possesses narrow bandwidth $\delta\lambda$ and a strong light rejection within the stop band characterized by peak-to-valley transmittance ratio as high as 23 dB.

Table 2

Properties of $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}/\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ photonic crystal and reference films ($\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ is notified with the abbreviation BIG)

Film composition	λ_{res} , nm	MOPC thickness, nm	MO-layers thickness, nm	Resonance bandwidth $\delta\lambda$, nm
[BIG/SGG]/ BIG ² /[SGG/BIG] ⁷	775	2594	1207	3,8
	at 775 nm		1600	
Reference BIG	at 750 nm		700	
	at 640 nm			
Reference $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	at 750 nm			
Film composition	λ_{res} , nm	Resonance FR		Quality factor at λ_{res} $Q = 2 \Theta_F /\ln(1/T)$, deg
		$ \Theta_F $, deg/ μm	$ \Theta_F $, deg	
[BIG/SGG]/ BIG ² /[SGG/BIG] ⁷	775	14,1	17,0	99,3
	at 775 nm	1,2	1,9	57,0
Reference BIG	at 750 nm	1,6	2,6	68,7
	at 640 nm	3,3	5,3	42,0
Reference $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	at 750 nm	3,6	2,5	50,0

Single layer $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ film and $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}/\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ MOPC have out-of-plane magnetization. As it is seen in inset to Fig. 2, squareness of magnetization loop increased for MOPC and remnant (latched) Faraday rotation appeared as large as 95 % of the saturated value. Strengthening of perpendicular anisotropy in MOPC compare to a reference $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ film, we rely upon the in-plane compressive strain and corresponding out-of-plane rhombohedral distortions of $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ unit cell. In a single layer $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ film, a strain induced by a large film-to-substrate lattice mismatch releases through a nucleation of copious misfit dislocations leading to cracks in thicker films. In multilayered garnet films, finite thickness of layers hinders a nucleation of misfit dislocations. As a result, mismatch strain is accumulated while a magnetostriction converts it to the uniaxial magnetic anisotropy.

Normalized C-band PL spectra in 7-reflectors MOPC and single layer $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ film of the same effective thickness were compared.

Both samples have sharp emission peaks related to the main $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ laser transition. Fine structure of the spectrum reflects Stark splitting of $^4I_{13/2}$ and $^4I_{15/2}$ manifolds of dodecahedral coordinated Er^{3+} ions. Peak PL intensity in MOPC decreased compare to a single layer $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ film by a factor of 1.6. This is related to a larger total thickness of the MOPC (2.6 against 1.2 μm).

C-band PL decay curves in 7-reflectors MOPC and reference $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ film were compared. Both experimental time dependencies are fitted to the exponential decay with two lifetimes. The main PL component in a single layer $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ and MOPC has a magnitude of 96 % and 97 % and is quenched at 700 μs and 600 μs , respectively. Long-life component survives within 1,8 ms in $\text{Er}:\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}$ film and 2,4 ms in MOPC. Longer lifetime in MOPC we rely upon the Er^{3+} excitations in distorted dodecahedral complexes localized at $\text{Bi}_{2.97}\text{Er}_{0.03}\text{Fe}_4\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_{12}/\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ interfaces.

CONCLUSIONS

Long-lived near-infrared PL of Er^{3+} ions at 1530 nm related to the main $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ laser transition occurs in Er-doped rare earths/bismuth iron and gallium garnet epitaxial films. Intensive PL at room temperature suggests that a number of different pumping and lasing schemes can be realized through the proper design of Er-doped $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{RE}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ magneto-optical photonic crystals. Optical gain combined with high FR can be achieved localizing light either in optically dense $\text{Er}:\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ cavity or in $\text{Er}:\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ mirrors in crystals with transparent $\text{Er}:\text{RE}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ cavities.

Al and Ga substitution of ferric ions in $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ garnet reduces optical absorption by a factor of 3 and induces perpendicular magnetic anisotropy. Photonic crystals earn a record high magneto-optical quality and remnant Faraday rotation. At $\lambda_{\text{res}} = 775$ nm, specific FR $\theta_F = -14,1$ deg/ μm and MO-quality factor $Q = 99,3$ deg exhibit the highest to date MOPC performance. Owing gain [3], luminescent all-garnet heteroepitaxial photonic crystals promise great potential for MO memory, light guiding, filtering and switching, exceptional dispersion, nonreciprocal properties as well as integration with semiconductor platforms.

ACKNOWLEDGMENT

The author wishing to acknowledge financial support from the Swedish Research Council (Vetenskapsrådet) through the Advanced Optics and Photonics (ADOPT) Linné center grant and Ministry of Education and Science of Russian Federation Program «Scientific and Educational Community of Innovation Russia (2009–2013)» through contracts № 14.740.11.0895.

REFERENCES

1. Adachi N., Denysenkov V. P., Khartsev S. I., Grishin A. M., Okuda T. Epitaxial $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (001) films grown by pulsed laser deposition and reactive ion beam sputtering techniques // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 88. № 5. P. 2734–2739.
2. Dzibrou D. O., Grishin A. M. Fitting transmission and Faraday rotation spectra of $[\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}]^m$ magneto-optical photonic crystals // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 106. Is. 4, 043901.
3. Grishin A. M. Amplifying magneto-optical photonic crystal // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 97. Is. 4, 061116.
4. Grishin A. M., Khartsev S. I., Kawasaki H. 980 nm $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ magneto-optical photonic crystal // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 90. Is. 19, 191113.
5. Inoue M., Arai K., Fujii T., Abe M. Magneto-optical properties of one-dimensional photonic crystals composed of magnetic and dielectric layers // J. Appl. Phys. 1998. Vol. 83. Is. 11, 6768.
6. Kahl S., Grishin A. M. Enhanced Faraday rotation in all-garnet magneto-optical photonic crystal // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 84. № 9. P. 1438–1440.
7. Khartsev S. I., Grishin A. M. $[\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}]^m$ magneto-optical photonic crystals // Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 87. Is. 12, 122504.
8. Khartsev S. I., Grishin A. M. High performance $[\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}]^m$ magneto-optical photonic crystals // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 101. Is. 5, 053906.
9. Khartsev S. I., Grishin A. M. High performance latching-type luminescent magneto-optical photonic crystals // Optics Letters. 2011. Vol. 36. Is. 15. P. 2806–2808.
10. Okuda T., Koshizuka N. et al. Synthesis of new magneto-optical material, bismuth iron garnet // IEEE Translation Journal on Magnetics in Japan. 1988. Vol. 3. Is. 6. P. 483–484.
11. Rosenberg R., Rubinstein C. B., Herriot D. R. Resonant optical Faraday rotator // Appl. Opt. 1964. Vol. 3. P. 1079–1083.
12. Scott G. B., Lacklison D. E. Magneto-optic properties and applications of bismuth substituted iron garnets // IEEE Transactions on magnetics. 1976. Vol. 12. Is. 4. P. 292–311.
13. Scott G. B., Lacklison D. E., Page J. L., Hewett J. Absorption spectra and magneto-optic figure's of merit in the $\text{Bi}_{3-x}\text{Fe}_{5-y}\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ // Appl. Phys. 1976. Vol. 9. P. 71–77.

АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ КОТОВ

кандидат филологических наук, доцент кафедры русского языка филологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

andrewcot@onego.ru

МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ НЕКРАСОВ

преподаватель кафедры теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

nekrassov.mikhail@gmail.com

АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ СЕДОВ

преподаватель кафедры теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

sedov_a@mail.ru

АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ РОГОВ

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

rogov@psu.karelia.ru

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ СОЗДАНИЯ РАЗМЕЧЕННЫХ КОРПУСОВ МАЛОЙ РАЗМЕРНОСТИ*

Описывается информационная система, позволяющая создавать грамматически и синтаксически размеченные корпуса. Приводится модель, на основе которой построена система. Содержится краткий анализ существующих русскоязычных размеченных корпусов текстов и их особенностей, сравнение этих корпусов с корпусами, созданными при помощи описываемой системы.

Ключевые слова: размеченные корпуса, система грамматической разметки, система синтаксической разметки, проблемы омонимии

ЛИНГВИСТИЧЕСКИЕ КОРПУСА

Корпусная лингвистика – молодое направление прикладной лингвистики. Являясь разделом языкознания, она занимается выявлением закономерностей функционирования языка через его анализ и изучение с помощью лингвистического корпуса. Корпусная лингвистика включает в себя два аспекта:

- создание и разметка (аннотирование) корпусов текстов и разработка средств поиска по ним,
- экспериментальные исследования на базе корпусов [7].

Различают корпуса с морфологической (грамматической), синтаксической, акцентной и прочими разметками. Зачастую при создании корпуса используется смешанная разметка.

Перечислим основные корпуса русских текстов, существующие на данный момент:

1. Национальный корпус русского языка (НКРЯ) (<http://www.ruscorpora.ru/>) – наиболее крупный и известный корпус русских текстов.

2. Хельсинкский аннотированный корпус русских текстов ХАНКО (<http://www.slav.helsinki.fi/hanco/index.html>).

3. Корпус русского литературного языка (<http://www.narusco.ru/>).

4. Открытый корпус OpenCorpora (<http://www.opencorpora.org/>) – находящийся в разработке корпус с открытым кодом.

5. Корпус русских публицистических текстов второй половины XIX века СМАЛТ (<http://smalt.karelia.ru/corpus/index.phtml>), разработанный в ПетрГУ.

Здесь перечислены далеко не все существующие корпуса русского языка. НКРЯ, например, состоит из целого ряда более мелких специализированных корпусов.

Сравнение корпусов

Все рассматриваемые корпуса содержат морфологическую (или грамматическую) разметку, хотя сами наборы морфологических признаков отличны. Синтаксическая разметка не присутствует в корпусе русского литературного языка, в OpenCorpora она заявлена, но доступа к ней пока нет. В тех же корпусах, где есть синтаксическая разметка, она представлена различными подходами. Синтаксическая разметка ХАНКО опирается на общепринятые классификации традиционной описательной грамматики – в рамках не раз подвергавшейся обоснованной критике теории членов предложения. Синтаксическая разметка НКРЯ построена на классификации,

доступной узкому кругу специалистов и требующей детального предварительного знакомства. Она представлена в терминах деревьев зависимостей и синтаксических отношений, принятых в теории «Смысл-Текст».

В корпусе СМАЛТ в основу синтаксической разметки положена идея структурной схемы предложения, восходящая к трудам представителей Пражского лингвистического кружка и получившая развитие на почве русского языка благодаря работам Н. Ю. Шведовой и ее последователей [1], [5]. Синтаксическая разметка – это следующий этап обработки корпуса текстов (после морфологической), она позволяет решать потенциальному адресату (в первую очередь лингвисту) целый спектр различных научно-исследовательских задач как в сфере русского, так и общего синтаксиса. В частности, на ее основе можно судить о частотном соотношении двух- и однокомпонентных предикативных структур в русском языке, о формальных способах выражения предикативных отношений, о развитии синтаксического строя русского языка. Подобный анализ позволяет объективировать и упорядочить, насколько это возможно, систему разметки. Отметим, что все пути синтаксического аннотирования в целом решают разные задачи, имеют свои достоинства и недостатки и представляют интерес для различного рода лингвистических исследований.

Если сравнивать представительность корпусов, то НКРЯ отличается от остальных корпусов сбалансированностью и многообразием текстов. Однако это достоинство НКРЯ порождает и главный недостаток крупных корпусов – слабую точность разметки. Некоторые из проектов, в рамках которых создавался НКРЯ, предусматривали краткие сроки разработки и автоматическую разметку. В связи с этим процент брака и неточностей в этой разметке существенен. Наибольший процент неточностей в автоматической размеченных грамматических корпусах возникает из-за проблемы омонимии¹. В изначальном варианте НКРЯ омонимия снималась вручную, и размер корпуса был невелик [6]. Однако потом стало происходить значительное расширение корпуса и во многих случаях переход на автоматическую разметку, оставляющую омонимию. При автоматической разметке, как правило, в случае омонимии слову ставятся в соответствие все возможные наборы параметров. Сейчас в НКРЯ подавляющая часть корпуса хранится без снятия омонимии. Для СМАЛТ было принято решение выбрать основным фактором создания корпуса не большой размер, а высокую точность и однозначность разметки. Высокая точность разметки достигается при использовании специалистов-филологов, часть работы должна проделываться ими вручную довольно тщательно.

Учитывая это, при разработке универсальной программы по созданию размеченных корпусов небольшого размера было решено разработать

специальные программы для грамматической и синтаксической разметки текстов, с которыми должны работать специалисты. Программы должны удовлетворять следующим особенностям.

- Пользователь должен иметь возможность построить программу для определения / изменения грамматических или синтаксических параметров слова или предложения.
- Разбор должен быть максимально удобен, прост и быстр.

В основе работы программы грамматической разметки корпуса СМАЛТ лежит универсальная модель построения корпуса с грамматической разметкой.

МОДЕЛЬ ПОСТРОЕНИЯ КОРПУСА С ГРАММАТИЧЕСКОЙ РАЗМЕТКОЙ

Корпус представляет собой набор текстов $Texts = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$. В общем случае каждый текст может быть представлен в виде группированного набора слов $T_i = \{w_{ij}\}$ (j – номер слова в тексте). Для удобства навигации по корпусу лучше вводить дополнительные структурные единицы текста. Далее будем обозначать отдельное слово текста, как w . В общем случае $posAtr: w \rightarrow Pos \in Positions \subset N^k$. $Positions = (Pos_1, Pos_2, \dots, Pos_k)$. Здесь для слова w задается k его координат в тексте. Примерами дополнительных структурных единиц текста могут быть: главы, параграфы, абзацы, предложения. Модель предусматривает объединение мельчайших структурных единиц (слов) в словосочетания. Каждое словосочетание представимо в виде некоторого подмножества из слов предложения. $SS_j = \{w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{ik}\} \subset S$, причем $\bigcup SS_j = S$ (отдельные слова в модели можно тоже принимать за словосочетания). Каждое слово может входить только в одно словосочетание, поэтому пересечение любых двух словосочетаний всегда пусто: $SS_k \cap SS_l = \emptyset$, при $k \neq l$.

Кроме позиции для каждого слова необходимо определять набор его морфологических параметров. Для существительного это могут быть: падеж, число, род, одушевленность / неодушевленность. Сами морфологические параметры представляют собой еще один вектор: $intAtr: w \rightarrow intParams \in N^k$: $intParams = (Param_1, Param_2, \dots, Param_k)$, где k – количество грамматических признаков слова. Морфологические признаки закодированы натуральными числами. Расшифровка этих признаков хранится в отдельном конфигурационном файле и при необходимости может быть изменена администратором программы или даже самим пользователем.

Было решено хранить морфологические признаки в виде дерева. Структуру дерева можно описать следующим образом: $MorfAtrs: G = \langle V, E \rangle$, причем $V = MorfParams \cup MorfItems$, а $\forall (i, j) \in E$, либо $i \in MorfParams, j \in MorfItems$, либо $i \in MorfItems, j \in MorfParams$. Иными словами, различают множество морфологических

параметров *MorfParams* и значений этих параметров *MorfItems*. Ребро $(i, j) \in E$, $i \in \text{MorfParams}$, $j \in \text{MorfItems}$ характеризует принадлежность значения j параметру i .

Для каждого слова имеется возможность определять ряд дополнительных строковых параметров. Причем для каждого корпуса они могут быть индивидуальны: нет необходимости их встраивать для всех корпусов. При создании программы универсальной разметки необходим механизм инициализации произвольного количества таких параметров. Формально *StrAttr*: $w \rightarrow \text{strParams} = \{\text{strParam}_i\}$, $i = \overline{1, I}$, структура же *strParams* задается пользователем в отдельном конфигурационном файле.

В результате каждому слову ставится в соответствие кортеж: $w \rightarrow \langle \text{Pos}, \text{intParams}, \text{sParams} \rangle$ (позиция слова, морфологический разбор и некоторые строковые атрибуты слова), который можно считать грамматической разметкой данного слова.

ПРОГРАММА ГРАММАТИЧЕСКОЙ РАЗМЕТКИ

Процесс грамматического разбора текста делится на 2 этапа: этап преформатирования и этап разметки.

Этап преформатирования

На вход программы подается текст в кодировке Unicode, который необходимо разметить. При загрузке текста программа автоматически разбивает текст на структурные компоненты: главы, абзацы и предложения. Это первый этап разбора текста – этап преформатирования. Он проходит в полуавтоматическом режиме: программа на основании ряда эмпирических правил разбивает текст на структурные единицы, после чего пользователь проверяет правильность этого разбиения и при необходимости редактирует его.

Этап разметки

Следующим этапом является грамматический разбор текста. Пользователю выводится текст, где возможна только покомпонентная навигация. Это значит, что при грамматическом разборе пользователь может перемещаться по структурным компонентам текста, в данном случае по словам. В нижней части экрана выводится информация о разборе текущего слова, пользователь может изменить ее. Разбор представляет собой ряд выпадающих списков для морфологических признаков и поля для ввода необходимой текстовой информации. Слова, не размеченные ранее пользователем, выделяются красным цветом, размеченные слова выделяются зеленым.

В программе имеется возможность объединения нескольких слов в словосочетания, образующие составную часть.

Автоматическая грамматическая разметка

В системе грамматического разбора реализован алгоритм автоматической разметки. Система

ищет (по написанию) текущее разбираемое слово в словаре, в случае удачного поиска пользователю выдается разбор найденного слова в качестве разбора текущего. Далее пользователь может изменить разбор или сохранить предложенный. Чтобы избежать постоянного обращения к базе данных в процессе разбора, автоматическая разметка всех неразмеченных слов текста производится до того, как пользователь приступил к проверке, по окончании этапа преформатирования.

Отметим основные проблемы автоматической разметки.

1. Некоторые слова остаются неразмеченными, так как не все слова есть в словаре. Стоит отметить, что с расширением словаря неизвестных слов становится все меньше.

2. С расширением словаря остро проявляются проблемы *омонимии*. Она заключается в том, что для некоторого слова в словаре может содержаться несколько вариантов его атрибуции, поэтому встает вопрос, как выбрать из них верный. Один из вариантов решения этой проблемы представлен в виде следующей модели. Рассматриваются триады: тройки подряд идущих слов v_1, v_2 и v_3 с соответствующими им разборами a_1, a_2 и a_3 . Порядок слов считается важным. Введем

понятие вероятности разбора $P(a_i) = \frac{n(a_i, v_i)}{N(v_i)}$,

где $n(a_i, v_i)$ – количество встречаемых в корпусе разборов a_i слова v_i , а $N(v_i)$ – общее количество разборов слова, встречаемых в корпусе. Запишем: $P(a_1 a_2 a_3) = \alpha P(a_3) P(a_2 | a_3) P(a_1 | a_2 a_3) + (1 - \alpha) P(a_1) P(a_2 | a_1) P(a_3 | a_1 a_2)$.

Основу формулы составляют два слагаемых, каждое из которых представляет собой формулу условной вероятности. Разбор a_3 , на котором достигается максимум функции $P(a_3)$, принимается как разбор по умолчанию в случае омонимии. Весовой коэффициент α задает степень влияния каждого слагаемого на итоговую сумму. Если триады слов $v_1 v_2 v_3$ ранее не встречались в корпусе в данном порядке, рассматривается уже двойка слов, для которой приводятся аналогичные результаты. Если двойка не встречалась, в качестве разбора a_i слова v_i принимается $\arg \max P(a_i) = \frac{n(a_i, v_i)}{N(v_i)}$, то есть самый часто

встречаемый в корпусе разбор слова v_i .

Приведем общий алгоритм автоматической грамматической разметки в виде псевдокода:

Цикл по всем словам в тексте

Количество вхождений текущего слова в словаре равно?

Если 0 => слово разбирается с нуля

Если 1 => найденный разбор – разбор по умолчанию

Если больше 1, цикл по каждому разбору i
Количество слов перед текущим в предложении?

Если $0 \Rightarrow \alpha_1 = 1, k_1 = P(a_1)$
 Если $1 \Rightarrow \alpha_1 = 2, k_1 = P(a_1)P(a_2 | a_1)$
 Если больше $1 \Rightarrow \alpha_1 = 3, k_1 =$
 $= \alpha P(a_3)P(a_2 | a_3)P(a_1 | a_2 a_3)$
 Количество слов после текущего в пред-
 ложении?
 Если $0 \Rightarrow \alpha_2 = 1, k_2 = P(a_1)$
 Если $1 \Rightarrow \alpha_2 = 2, k_2 = P(a_1)P(a_2 | a_1)$
 Если больше $1 \Rightarrow \alpha_2 = 3, k_2 =$
 $= P(a_1)P(a_2 | a_1)P(a_3 | a_1 a_2)$
 $\alpha = \alpha_1 / (\alpha_1 + \alpha_2)$
 $P_i = \alpha k_1 + (1-\alpha) k_2$
 $P = \max P_i$

МОДЕЛЬ ПОСТРОЕНИЯ КОРПУСА С СИНТАКСИЧЕСКОЙ РАЗМЕТКОЙ

Опишем модель построения синтаксического корпуса СМАЛТ. Корпус представляет собой набор текстов $Texts = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$. В отличие от грамматического разбора, минимальной структурной единицей текста здесь, в зависимости от выбранного подхода к синтаксической разметке, могут выделяться не только слова, но также предложения, части предложений либо клаузы². Рассмотрим вариант с разбиением текстов на клаузы.

Определим формально понятие клаузы. Для этого возьмем за основу предложение S , позиционированное в тексте. Данное предложение разбивается на части и может быть представлено как множество: $S = \{Part_1, Part_2, \dots, Part_n\}$. В этом виде клаузы предложения представимы в виде некоторого подмножества из частей предложения. $Cl_j = \{Part_{i1}, Part_{i2}, \dots, Part_{ik}\} \subset S$, причем $\bigcup_j Cl_j = S$ и, вообще говоря, пересечение клауз может быть непустым. Резюмируя это, отметим два основных момента: каждая клауза может быть разбита на несколько частей внутри одного предложения; некоторые части предложения могут входить сразу в несколько клауз. Разметка клаузы очень проста: $Cl_j \rightarrow Scheme \in N$

В результате была разработана модель разбора, при котором предложения текста могут разделяться на части, а эти части группируются в клаузы, причем важен порядок этой группировки. Например, предложение поделено на 4 части: $Part_1, Part_2, Part_3, Part_4$. Если объединяется $Part_1$ и $Part_3$, а затем $Part_2$ и $Part_4$, то получается единая клауза $Part_1-Part_3-Part_2-Part_4$. Если объединяется $Part_1$ и $Part_2$, а затем $Part_3$ и $Part_4$, то организуется ветвление и в итоге получаются две клаузы $Part_1-Part_2$ и $Part_3-Part_4$. Текст представляется в виде графа, в котором части предложения являются вершинами, а связные комбинации вершин образуют клаузы.

ПРОГРАММА СИНТАКСИЧЕСКОГО РАЗБОРА

Программа для синтаксической разметки имеет структуру, схожую со структурой программы для грамматической разметки. Однако из-за описанных особенностей модели синтаксического разбора в программе существует и

ряд отличий. Разбор текста также делится на 2 этапа: этап преформатирования и этап синтаксической разметки.

Этап преформатирования аналогичен этапу преформатирования грамматического разбора. Отметим, что разбиение предложения на части и объединение частей в клаузы для удобства пользователей проводится на этапе разметки.

На этапе синтаксической разметки пользователь сопоставляет каждой клаузе текста одну из синтаксических схем путем выбора одной из них из списка, предложенного на нижней панели. Пользователь имеет возможность редактировать разметку текста и разбивать предложения на части. Отдельно выделяется текущая клауза, которая размечается в данный момент, и выводится контекст этой клаузы. Покомпонентная навигация программы позволяет пользователю передвигаться по частям предложения. Основная сложность для разметчика кроется в правильном разбиении предложения на части и сцеплении этих частей в клаузы.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

На базе описанной выше информационной системы были построены несколько корпусов: корпус СМАЛТ и корпус финноязычных текстов.

Подробнее про создание корпуса СМАЛТ написано в [4] и [2]. Основу корпуса составляют публицистические тексты разной тематики из петербургских журналов XIX века в дореволюционной графике, при этом все слова ретранслируются и в современную графику. В корпусе присутствует метаразметка текстов по следующим параметрам: автор текста, журнал, дата написания. Корпус на данный момент состоит из 101 текста, из них 74 содержат грамматическую разметку и 95 – синтаксическую. В грамматически атрибутированных текстах корпуса содержится 169 136 слов. Количество лексем в грамматической части корпуса равно 21 630, словоформ – 48 320. В синтаксической части корпуса размечено 47 336 клауз. Строковые параметры корпуса СМАЛТ – начальная форма, современное написание и современное написание начальной формы.

Подробнее про корпус финноязычных текстов написано в [3]. Корпус состоит из 107 статей газеты «Karjalan Sanomat», содержащих грамматическую разметку. Строковые грамматические параметры корпуса финноязычных текстов – начальная форма и перевод слова.

ПРЕДОСТАВЛЕНИЕ ДОСТУПА К КОРПУСАМ

Для доступа к корпусам было решено использовать веб-ресурс, предоставляющий возможности просмотра информации о корпусе, списке публикаций, авторах, а также поиска интересующей информации в корпусе с возможностью выбора только необходимых текстов (формиро-

вание собственного подкорпуса). Доступ к корпусу СМАЛТ расположен по адресу: <http://smalt.karelia.ru/corpus/index.phtml>. Корпус финноязычных текстов находится в тестовом режиме, доступ к нему пока не открыт.

На данном ресурсе пользователь может ознакомиться с текстами корпусов, осуществить поиск по заданным параметрам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализировав различные существующие на данный момент корпусы и сравнив их с корпусом СМАЛТ, разрабатываемым в ПетрГУ, мы пришли к следующим выводам.

- Корпус СМАЛТ не претендует на представительность и полноту НКРЯ, однако он изначально планировался как корпус со специфическим содержанием и точной разметкой.
- Синтаксический подкорпус СМАЛТ построен на принципе разметки, не применяемом в

других крупных русскоязычных корпусах, и поэтому может быть интересен определенному кругу исследователей.

- Универсальность моделей и программ, используемых для разметки корпуса СМАЛТ и корпуса финноязычных текстов, позволяет использовать их для создания различных корпусов, в том числе и для специфических языков.
- Наличие как оригинальной графики, так и современного написания слова и начальной формы в корпусе СМАЛТ делает его интересным для исследователей дореволюционного русского языка и его связи с современным языком.

Размеченный корпус СМАЛТ может быть использован при научных изысканиях в области истории языка, грамматики, лексикографии, а также при изучении соответствующих курсов студентами филологических специальностей. Кроме того, он может быть востребован специалистами по литературе XIX века.

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

ПРИМЕЧАНИЯ

¹ Омонимия – в нашем случае это ситуация, при которой одинаково написанные слова имеют различные грамматические разборы.

² Клауза – элементарное предложение в составе сложного, вершиной которого является глагол.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грамматика современного русского литературного языка / Под ред. Н. Ю. Шведовой. М.: Наука, 1970.
2. Котов А. А., Гурин Г. Б., Седов А. В., Некрасов М. Ю., Сидоров Ю. В., Рогов А. А. Особенности создания электронного ресурса «материалы к синтаксическому словарю» // Российский научный электронный журнал «Электронные библиотеки», Том 13 – Выпуск 2, 2010 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2010/part2/KGSNSR>
3. Петрова А. А., Ленина А. А. Результаты совместного проекта РГНФ – АФ «перевод с финского на русский и с русского на финский в поликультурном мире»: создание лингвистического корпуса финноязычных текстов газеты «Karjalan sanomat» и его перспективы [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.petrus.ru/Faculties/Balfin/AAPetrova_2011.html
4. Рогов А. А., Гурин Г. Б., Котов А. А. Некоторые особенности грамматически размеченного корпуса по русской публицистике второй половины XIX века // Труды международной конференции «Корпусная лингвистика-2008». СПб., 2008. С. 326–333.
5. Русская грамматика / Под ред. Н. Ю. Шведовой. М.: Наука, 1980. Т. 1, 2.
6. Сичинава Д. В. Национальный корпус русского языка: очерк предыстории // Национальный корпус русского языка: 2003–2005. М.: Индрик, 2005. С. 21–30.
7. Энциклопедическая статья «Корпусная лингвистика» // Электронный портал «Фонд знаний Ломоносов» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.lomonosov-fund.ru/enc/ru/encyclopedia:01210:article>

ИГОРЬ ОЛЕГОВИЧ СЕМЕНОВ

аспирант кафедры информатики и математического обеспечения математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

isemenov@cs.karelia.ru

ГЕННАДИЙ СЕРГЕЕВИЧ СИГОВЦЕВ

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информатики и математического обеспечения математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

sigovtsev@cs.karelia.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПЛАНИРОВАНИИ СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО УЧЕБНОГО КУРСА*

Рассматривается использование когнитивной карты для моделирования содержания электронного учебного курса. Вводятся количественные характеристики модели и на их основе предлагается оптимизационная модель. Описывается применение генетического алгоритма для решения задачи оптимизации содержания электронного учебного курса.

Ключевые слова: модель содержания электронного учебного курса, когнитивная карта, генетический алгоритм

ВВЕДЕНИЕ

Электронные учебные курсы (ЭУК) все активнее используются в различных формах образовательного процесса. Существуют графовые модели структуризации учебного материала, составляющего содержание ЭУК, предложенные разными авторами. Например, в [7] рассматривается задача структурирования содержания электронного учебного ресурса с использованием модели структуры в виде ориентированного дерева. Узлами дерева являются учебные элементы, составляющие содержание ресурса, а его дуги отражают отношение иерархической подчиненности элементов друг другу. Такого типа модели могут рассматриваться как варианты семантических сетей, являющихся широко распространенным и наиболее универсальным способом представления знаний в различных предметных областях [2]. Узлы такой сети соответствуют объектам, понятиям, свойствам и т. д. предметной области, называемым обобщенным термином «концепт». Различного рода отношения между концептами образуют дуги сети. В том числе это могут быть иерархические отношения, а также отношения, которые указывают на использование при изучении какого-то концепта информации, связанной с другими концептами, то есть отношения «предыдущий – последующий». Например, в [1] предложен вариант информационно-логической модели электронного курса в виде ориентированного мультиграфа (дугами представлены семь типов отношений между структурными единицами учебного материала). Эта модель предназначена для организации работы с ЭУК и позволяет задать определенный порядок изучения курса, в стиле, характерном для программированного обучения.

В данной работе предлагается использовать для математического моделирования содержания ЭУК аппарат когнитивных карт, представляющих собой с математической точки зрения взвешенные ориентированные графы. Это позволяет ввести в модель содержания некоторые количественные показатели, которые затем применяются для сравнения и выбора варианта модели в зависимости от заданных ограничений. Предложенная модель позволяет также сформулировать постановку оптимизационной задачи планирования содержания ЭУК. При рассмотрении оптимизационного варианта модели содержания предлагается использование одного из вариантов генетического алгоритма.

КОГНИТИВНАЯ КАРТА – МОДЕЛЬ СОДЕРЖАНИЯ ЭУК

Разновидностью графовых моделей являются когнитивные карты, используемые как инструмент формализации и анализа сложных слабо-структурированных систем при когнитивном моделировании [4]. Понятия когнитивной карты и семантической сети по сути весьма близки, но в когнитивных картах отношения между концептами используются для указания характера и степени влияния одного концепта на другой.

Модель предметной области ЭУК в виде семантической сети концептов с отношениями «предыдущий – последующий» становится числовой когнитивной картой, если этим отношениям будут назначены веса, характеризующие важность знания одного концепта при изучении другого [6]. В предлагаемом варианте модели содержание учебного материала, используемого в ЭУК, представлено в виде множества концептов, которым могут соответствовать различные

структурно-информационные элементы содержания: понятия, суждения, примеры, различного рода иллюстрации, вопросы, задания и т. д. Веса отношений не могут быть получены каким-то формальным способом, а должны быть заданы экспертом и/или разработчиком ресурса, отражая их знания и представления о предметной области.

Пререквизитом концепта будем называть концепт, который является «предшествующим» для данного концепта или для некоторого его пререквизита. Предполагается логическая корректность модели в том смысле, что задаваемые в ней отношения не должны приводить к возникновению «логических кругов», когда некий концепт оказывается принадлежащим множеству его пререквизитов. Кроме того, каждому концепту назначается количественная характеристика – важность концепта для знания предметной области, к которой относится ЭУК (понятия, суждения, примеры...), или важность с дидактической точки зрения (контрольные вопросы, задания...). Важность концепта также является экспертной оценкой, устанавливаемой разработчиком курса. В математическом смысле описываемая модель является взвешенным ориентированным ациклическим графом.

В зависимости от задаваемых ограничений модель дает возможность отбирать учебный материал, руководствуясь некоторым критерием, также имеющим количественное выражение.

Для анализа когнитивных карт применяется ряд характеристик, которые можно использовать в моделировании содержания ЭУК. К числу таких характеристик относятся: влияние одного концепта на другой; влияние концепта на карту; влияние карты на концепт. Для определения этих характеристик введем следующие обозначения: w_{ij} – вес дуги, соединяющей вершины i и j ($i, j \in \{1, \dots, N\}$, N – количество вершин, $w_{ij} \in [0, 1]$). Величина влияния вершины i на вершину j $V_{ij} = 0$,

если не существует ни одного пути из i в j , иначе $V_{ij} = \max_l \prod_{s=0}^{m_l-1} w_{k_s^l, k_{s+1}^l}$, где $k_0^l, k_1^l, \dots, k_{m_l}^l$ – номера вершин, образующих путь l из вершины i в вершину j . Степень влияния вершины i на карту определяется как усредненное суммарное влияние на все вершины карты: $Q_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N V_{ij}$. Аналогично определяется и степень влияния карты на вершину: $Q_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N V_{ij}$. Объединяя степень влияния концепта Q_i и экспертную оценку его важности P_i , получаем показатель значимости концепта в учебном курсе в виде $\alpha \cdot Q_i + \beta \cdot P_i$, где α, β – весовые коэффициенты. (Значения коэффициентов устанавливаются экспертом – разработчиком курса.)

На модельном уровне проектирование содержания учебного курса можно рассматривать как отбор некоторого количества концептов, образующих вместе с соответствующими отноше-

ниями между ними когнитивную карту – модель предметной области. Указанные выше числовые характеристики позволяют вести отбор концептов, ориентируясь на величину их значимости.

ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СОДЕРЖАНИЯ ЭУК

При наличии дополнительных числовых параметров концептов и связанных с ними ограничений, не позволяющих включить в модель учебного курса все имеющиеся в модели учебного материала концепты, задаче планирования содержания можно придать оптимизационный характер. Примером такого параметра является экспертная оценка затрат времени на изучение концепта t_i . Тогда ограничением для множества концептов, включаемых в учебный курс, будет требование, чтобы общее время изучения курса не превосходило заданной величины T . В качестве подлежащей максимизации целевой функции в этом случае будет выступать суммарная значимость концептов, включаемых в модель курса.

Используем бинарные переменные: $x_i = 1$, если концепт с номером i включен в модель содержания курса, иначе $x_i = 0$. $M = \sum_{i=1}^N x_i$ – количество концептов в модели содержания ЭУК. Степень влияния концепта i на модель содержания ЭУК зависит от того, какие другие концепты включе-

ны в эту модель: $\tilde{Q}_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^N x_j \cdot V_{i,j}$.

Задача оптимизации модели содержания учебного курса в приведенных выше обозначениях имеет следующий вид.

Целевая функция:

$$\sum_{i=1}^N x_i \cdot (\alpha \cdot \tilde{Q}_i + \beta \cdot P_i) \rightarrow \max. \quad (1)$$

Весовые коэффициенты $\alpha, \beta \geq 0, \alpha + \beta = 1$.

Ограничение на время изучения:

$$\sum_{i=1}^N x_i \cdot t_i \leq T. \quad (2)$$

Условие корректности по отношению «предшествующий – последующий»:

$$\sum_{i=1}^N (1 - x_i) \cdot \sum_{j=1}^N x_j \cdot V_{i,j} = 0. \quad (3)$$

Задача (1)–(3) относится к классу задач целочисленной нелинейной оптимизации.

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Для решения данной задачи предлагается использовать метод, основанный на генетическом алгоритме. Генетический алгоритм (ГА) – это эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации путем вариации искомых параметров с использованием набора операторов селекции, скрещивания и мутации, имитирующих процесс, напоминающий биологическую эволюцию [3]. Базовая схема ГА для рассматриваемой задачи имеет следующий вид.

1. Варьируемым параметром алгоритма является множество тех значений индекса i переменных x_i , для которых $x_i = 1$. Хромосомами, на множестве которых действует ГА, являются вектора $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ (то есть каждая хромосома – это вариант модели содержания ЭУК).

2. Для упрощения реализации генетического алгоритма предлагается используемые в нем хромосомы генерировать без учета корректности получаемой модели по отношению «предыдущий – последующий» между концептами. Это «компенсируется» модификацией целевой функции (в ГА она называется функцией приспособленности) добавлением (со знаком минус) штрафного слагаемого за использование в текущей модели курса концептов, предшественники которых в эту модель не входят. Величина штрафа пропорциональна суммарной величине влияния на концепты модели тех концептов, которые в модель не включены. Таким образом, функция приспособленности в нашем случае имеет вид:

$$F(X) = \sum_{i=1}^N \left[x_i \cdot (\alpha \cdot \tilde{Q}_i + \beta \cdot P_i) - \gamma \cdot (1 - x_i) \cdot \frac{1}{M} \sum_{j=1}^N x_j \cdot V_{i,j} \right], \quad (4)$$

где γ – вес штрафного слагаемого.

3. Задается численность популяции P и случайным образом создается начальная популяция из P хромосом, для каждой из которых выполнено условие (3).

4. Для хромосом текущей популяции вычисляются значения функции приспособленности (4), которые используются оператором селекции, определяющим пары хромосом для скрещивания. Для селекции применяется метод рулетки, или турнирный метод с выбором хромосом с наибольшим значением функции приспособленности из случайно сформированных групп.

5. Для каждой пары хромосом, выбранной на предыдущем этапе с заданной вероятностью, выполняется оператор скрещивания. Используется один из вариантов кроссовера, который осуществляет обмен случайно выбранными участками хромосом пары родителей, создавая пару хромосом-потомков. Хромосома-потомок заменяет хромосому-родителя в следующей

популяции, если для нее выполнено условие (3). Иначе в следующую популяцию переходит хромосома-родитель.

6. В заключение с заданной вероятностью к каждой хромосоме применяется оператор мутации, инвертирующий случайно выбранный ген. (Это означает, что или ранее входивший в модель курса концепт из нее удаляется, или отсутствовавший концепт добавляется в модель.)

Описанный итерационный процесс продолжается, пока не будет выполнен критерий остановки алгоритма. Это выполнение некоторого условия, интерпретируемого как нахождение субоптимального решения, или исчерпание числа итераций. Для тестирования и подбора параметров ГА разработана программная система, которая позволяет сравнить результаты работы алгоритма на тестовой задаче оптимизации модели содержания ЭУК, а также проводить эксперименты с моделями содержания существующих ЭУК. В частности, для тестовой задачи проведены расчеты по сравнению качественных параметров ГА: вид оператора селекции (метод рулетки и турнирный метод) и вид оператора скрещивания (одноточечный, трехточечный и равномерный кроссовер). Для рассматриваемой задачи показано преимущество турнирной селекции и равномерного скрещивания. Также рассмотрено влияние количественных параметров: вероятности скрещивания и вероятности мутации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная в работе математическая модель содержания ЭУК на основе когнитивной карты и оптимизационный вариант этой модели дают возможность спроектировать содержание, соответствующее по объему и структуре назначению курса, и организовать рациональную систему навигационных ссылок внутри курса. Такого типа модель в форме когнитивной карты использовалась для проектирования содержания электронного учебного ресурса по дисциплине «Информационные технологии», реализованного в среде программной системы «1С:Электронное обучение. Конструктор курсов» [7].

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башмаков А. И., Башмаков И. А. Разработка компьютерных учебников и обучающих систем. М.: Информационно-издательский дом «Филинъ», 2003. 616 с.
2. Башмаков А. И., Башмаков И. А. Интеллектуальные информационные технологии. М., 2005. 304 с.
3. Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Генетические алгоритмы. М.: Физматлит, 2006. 320 с.
4. Моделирование систем / С. И. Дворецкий, Ю. Л. Муромцев, В. А. Погонин, А. Г. Схиртладзе. М.: Академия, 2009. 320 с.
5. Семенов И. О., Сиговцев Г. С. Модуль анализа и планирования содержания учебных курсов для LCMS 1С:Электронное обучение. Конструктор курсов // Новые информационные технологии в образовании. Ч. 2. М.: 1С-Пабблишинг, 2012. С. 130–134.
6. Сиговцев Г. С., Семенов И. О. Разработка электронного учебного курса с использованием когнитивной карты как модели содержания // Дистанционное и виртуальное обучение. 2012. № 3.
7. Соловов А. В. Моделирование структуры электронных образовательных ресурсов // Информационные технологии. 2007. № 2. С. 43–48.

ЕВГЕНИЙ ВИКТОРОВИЧ БЫЧКОВ

аспирант кафедры уравнений математической физики механико-математического факультета, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск, Российская Федерация)
bychkov42@gmail.com

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ДИСПЕРГИРУЮЩИХ СРЕДАХ

Целью статьи является численное исследование задачи Шоултера – Сидорова для вырожденного уравнения Буссинеска – Лява, а также численное исследование задачи Коши для невырожденного уравнения Буссинеска – Лява в одномерном случае. В работе используются метод фазового пространства и метод Галеркина.

Ключевые слова: задача Шоултера – Сидорова, уравнение соболевского типа, фазовое пространство, метод Галеркина

ВВЕДЕНИЕ

Пусть Ω ограниченная область в R^n , $n \in N$ с границей $\partial\Omega$ класса C^∞ . В цилиндре $\Omega \times \bar{R}_+$ рассмотрим уравнение Буссинеска – Лява

$$(\lambda - \Delta)\ddot{u} = \alpha(\Delta - \lambda')\dot{u} + \beta(\Delta - \lambda'')u + \Delta f(u) \quad (1)$$

с краевыми условиями

$$u(x, t) = 0, \quad (x, t) \in \partial\Omega \times \bar{R}_+ \quad (2)$$

и условиями Коши

$$u(x, 0) = u_0(x), \quad \dot{u}(x, 0) = u_1(x) \quad (3)$$

или условиями Шоултера – Сидорова

$$(\lambda - \Delta)(u(x, 0) - u_0(x)) = 0, \quad (\lambda - \Delta)(\dot{u}(x, 0) - u_1(x)) = 0, \quad (4)$$

где $\alpha, \beta, \lambda, \lambda', \lambda'' \in R$, $f(u)$ – функция класса C^∞ , $u(x, t)$ – искомая функция, она может иметь различный физический смысл в зависимости от задачи. Уравнение (1) является более общим случаем уравнения

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} = mc_0^2 \tau \frac{\partial^3 \rho}{\partial t^2 \partial x} - mc_0^2 \frac{\partial^4 \rho}{\partial t^2 \partial x^2}, \quad (5)$$

где ρ – плотность, c_0 – скорость звука, τ – время релаксации, первый член в правой части отвечает за затухание звуковой волны вследствие теплопроводности и вязкости, а второй регулирует дисперсионные эффекты [5]. Уравнение (5) описывает распространение гравитационно-гироскопических волн в диспергирующих средах, например поверхностно-акустические волны. Обозначим через $\sigma(\Delta) = \{\lambda_k\}$ множество собственных значений однородной задачи Дирихле для оператора Лапласа в области Ω . При λ , не принадлежащем $\sigma(\Delta)$, задача (1), (2), (3) хорошо исследована и доказаны теоремы о существовании единственного решения, например [4]. В противном случае задача (1), (2), (3) является принципиально неразрешимой при произвольных начальных значениях $u_0(x)$, $u_1(x)$, она была исследована в [6] с помощью метода фазового пространства. Задача (1), (2), (4) сводится

в подходящим образом выбранных банаховых пространствах к задаче Шоултера – Сидорова

$$P(u(0) - u_0) = 0, \quad P(\dot{u}(0) - u_1) = 0, \quad (6)$$

где P – некоторый спектральный проектор, а задача (1), (2), (3) – к задаче Коши

$$u(0) = u_0, \quad \dot{u}(0) = u_1 \quad (7)$$

для уравнения соболевского типа

$$A\ddot{u} = B_1\dot{u} + B_0u + N(u). \quad (8)$$

Стоит заметить, что задача Шоултера – Сидорова является частным случаем начально-конечной задачи [1], [3]. Целью работы является исследование существования решения и численное решение задачи (1), (3), (4) при произвольных начальных значениях $u_0(x)$, $u_1(x)$, а также численное исследование задачи (1), (2), (4), при λ , не принадлежащем $\sigma(\Delta)$, методом Галеркина.

ЗАДАЧА ШОУЛТЕРА – СИДОРОВА ДЛЯ УРАВНЕНИЯ БУССИНЕСКА – ЛЯВА

Задачу (1), (2), (4) сведем к абстрактной задаче (6), (8), для этого зададим пространства

$$U = \{u(x) \in W_2^{l+2}(\Omega) \mid u(x, t) = 0, u(x, t) \in \partial\Omega \times R\}$$

$$F = W_2^l(\Omega).$$

Тогда операторы A , B_1 , B_0 имеют следующий вид: $A = (\lambda - \Delta)$, $B_1 = \alpha(\Delta - \lambda')$, $B_0 = \beta(\Delta - \lambda'')$ и принадлежат пространству $L(U, F)$ (линейных и ограниченных операторов). Оператор, определенный формулой $N(u) = \Delta f(u)$ при $l > n/2 - 2$, принадлежит классу C^∞ [4]. Обозначим через $\{\varphi_k\}$ множество соответствующих им собственных функций, ортонормированных в смысле скалярного произведения пространства $L_2(\Omega)$. Построим проектор $P(\bullet) = I - \sum_{\lambda=\lambda_k} \langle \bullet, \varphi_k \rangle \varphi_k$, действующий в пространстве U , и проектор Q , имеющий тот же вид, но определенный в пространстве F . Обозначим через U^0 и F^0 соответственно $\ker P$

и $\ker Q$. Тогда условия Шоултера – Сидорова (4) можно переписать в виде

$$I - \sum_{\lambda=\lambda_k} \langle u(0) - u_0, \varphi_k \rangle \varphi_k = 0, \quad I - \sum_{\lambda=\lambda_k} \langle \dot{u}(0) - u_1, \varphi_k \rangle \varphi_k = 0.$$

Редукция задачи (1), (2), (4) к задаче (6), (8) окончена.

В [2] доказано, что если λ не принадлежит $\sigma(\Delta)$ или $\lambda = \lambda' \neq \lambda''$, тогда пучок операторов B_l и B_0 является полиномиально A -ограниченным, ∞ является устранимой особой точкой и выполнены все условия теоремы о существовании единственного локального решения абстрактной задачи (7), (8) [6].

Заметим, что в случае задачи Шоултера – Сидорова начальные условия задаются как проекции на образ оператора при старшей производной, который в случае, когда ∞ – устранимая особая точка A -резольвенты пучка \bar{B} , совпадает с образом проектора P . Таким образом, начальные значения задачи Шоултера – Сидорова автоматически попадают в фазовое пространство заданного уравнения, в отличие от начальных значений в задаче Коши.

Следовательно, для задачи (1), (2), (4) справедлива

Теорема 1. Пусть $l > n/2 - 2$, $\lambda = \lambda' \neq \lambda''$ или λ не принадлежит $\sigma(\Delta)$ и отображение $(I - Q)(B_0 + N'_{u_0}): U^0 \rightarrow F^0$ является топологическим изоморфизмом. Тогда для любых $u_0, u_1 \in U$ существует единственное решение задачи (1), (2), (4) (задачи (1), (2), (3)).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ В ДИСПЕРГИРУЮЩИХ СРЕДАХ

На основе теоретических результатов был разработан и реализован алгоритм численного решения задачи Шоултера – Сидорова для уравнения Буссинеска – Лява (1) в среде Maple 15.0. Разработанная программа позволяет:

1. Ввести коэффициенты $\alpha, \beta, \lambda, \lambda', \lambda''$, функцию $f(u)$, начальные данные $u_0(x), u_1(x)$ и длину отрезка.
2. Вывести приближенное решение задачи Шоултера – Сидорова (Коши) для уравнения (1) с условиями Дирихле.
3. Получить графическое изображение полученного приближенного решения.
4. Построить фазовое пространство уравнения (1).

Решение задачи (1), (2), (4) будем искать в виде галеркинской суммы

$$\tilde{u}(x, t) = \sum_{n=1}^3 u_n(t) \varphi_n(x), \quad (9)$$

где $\varphi_k(x)$ – собственные функции оператора Лапласа.

Пример 1. Требуется найти численное решение задачи (1), (2), (3) при $\lambda = \lambda' = \lambda'' = 0$, $\alpha = \beta = 1$, $f(u) = u^3$, $u(0, t) = u(\pi, t) = 0$, $u_0 = \sin(x) - \sin(2x) + 3\sin(3x)$, $u_1 = 5\sin(x)$ на отрезке $[0, \pi]$.

Решение. В полосе $[0, \pi] \times R_+$ рассмотрим задачу

$$u(0, t) = u(\pi, t) = 0, \quad (10)$$

$$u(x, 0) = \sin(x) - \sin(2x) + 3\sin(3x), \quad \dot{u}(x, 0) = 5\sin(x), \quad (11)$$

$$-\Delta \ddot{u} = \Delta \dot{u} + \Delta u + \Delta(u^3). \quad (12)$$

Собственные функции φ_k однородной задачи Дирихле для оператора Лапласа на отрезке $[0, \pi]$ имеют вид $\sqrt{\frac{2}{\pi}} \sin(kx)$. Очевидно, уравнение (12) является невырожденным. В этом случае фазовым пространством является пространство U . В силу (9) решение имеет вид

$$\tilde{u}(x, t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} (u_1(t) \sin(x) + u_2(t) \sin(2x) + u_3(t) \sin(3x)).$$

Подставив $\tilde{u}(x, t)$ в уравнение (12) и умножив скалярно в смысле $L_2([0, \pi])$ полученное равенство на функции φ_k , $k = 1, 2, 3$, получим систему нелинейных дифференциальных уравнений (13) для нахождения $u_k(t)$.

$$\begin{cases} 5,01326 \left(\frac{d^2}{dt^2} u_2(t) \right) = -5,01326 \left(\frac{d}{dt} u_2(t) \right) - 5,01326 u_2(t) - 4,78732 u_1(t) u_2(t) u_3(t) - \\ - 4,78732 u_2(t) (u_1(t))^2 - 4,78732 (u_1(t))^2 u_2(t) - 2,39366 (u_2(t))^3, \\ 1,25331 \left(\frac{d^2}{dt^2} u_1(t) \right) = -1,25331 \left(\frac{d}{dt} u_1(t) \right) + 0,598414 (u_1(t))^2 u_1(t) - 0,598414 u_3(t) - \\ - 1,25331 u_1(t) - 1,19683 u_1(t) (u_1(t))^2 - 0,598414 (u_2(t))^2 u_1(t) - 1,19683 u_1(t) (u_2(t))^2 \\ 11,2798 \left(\frac{d^2}{dt^2} u_3(t) \right) = -11,2798 \left(\frac{d}{dt} u_3(t) \right) + 1,79524 (u_1(t))^3 - 10,7715 u_3(t) (u_1(t))^2 - \\ - 10,7715 (u_2(t))^2 u_3(t) - 5,38573 u_1(t) (u_2(t))^2 - 11,2798 u_3(t) - 5,38573 (u_3(t))^3. \end{cases} \quad (13)$$

На рис. 1 изображен график приближенного решения задачи (10)–(12) с шагами $\Delta x = 0,003$ и $\Delta t = 0,2$.

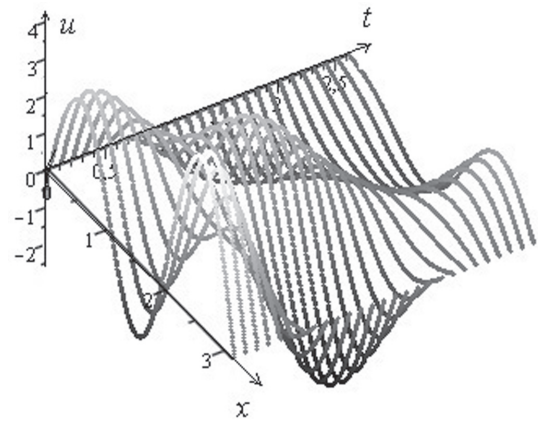


Рис. 1. График приближенного решения задачи (10)–(12)

Пример 2. Требуется найти численное решение задачи (1), (2), (4) при $\lambda = \lambda' = -9$, $\lambda'' = 0$, $\alpha = \beta = 1$, $f(u) = u^3$, $u(0, t) = u(\pi, t) = 0$, $u_0 = \sin(x) - \sin(2x) + 3\sin(3x)$, $u_1 = 5\sin(x)$ на отрезке $[0, \pi]$. Решение. Задача (1), (2), (4) примет вид

$$(-9 - \Delta) \ddot{u} = (\Delta + 9) \dot{u} + \Delta u + \Delta(u^3), \quad (14)$$

$$u(0, t) = u(\pi, t) = 0, \quad (15)$$

$$(-9 - \Delta)(u(x, 0) - \sin x + \sin 2x - 3\sin 3x) = 0, \quad (-9 - \Delta)(\dot{u}(x, 0) - 5\sin x) = 0. \quad (16)$$

Уравнение (14) является вырожденным. В силу (9) решение имеет вид

$$\tilde{u}(x, t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} (u_1(t) \sin(x) + u_2(t) \sin(2x) + u_3(t) \sin(3x)).$$

Проделив те же процедуры, что и в примере 1, получим алгебро-дифференциальную систему уравнений (17).

Алгебраическое уравнение определяет фазовое пространство уравнения (14). Решив систему из двух дифференциальных уравнений, подставив результат в алгебраическое уравнение, получим решение задачи (14)–(16).

$$\begin{cases} -10,0265 \left(\frac{d^2}{dt^2} u_1(t) \right) = 10,0265 \left(\frac{d}{dt} u_1(t) \right) + 0,598414(u_1(t))^2 u_3(t) - 0,598414(u_2(t))^2 u_3(t) - \\ - 1,19683 u_1(t)(u_2(t))^2 - 1,19683 u_1(t)(u_3(t))^2 - 2,50663 u_1(t) - 0,598414(u_1(t))^3, \\ -6,26657 \left(\frac{d^2}{dt^2} u_2(t) \right) = -6,26657 \left(\frac{d}{dt} u_2(t) \right) - 6,26657 u_2(t) - 4,78732 u_2(t)(u_3(t))^2 - \\ - 4,78732(u_1(t))^2 u_2(t) - 4,78732 u_1(t) u_2(t) u_3(t) - 2,39366(u_2(t))^3, \\ 0 = 10,7715 u_1(t)(u_2(t))^2 + 10,7715(u_1(t))^2 u_3(t) - 1,79524(u_3(t))^3 + 12,5313 u_3(t) + \\ + 5,38573(u_3(t))^3 + 5,38573 u_1(t)(u_2(t))^2. \end{cases} \quad (17)$$

В таблице приведено численное решение алгебро-дифференциальной системы при начальных условиях

$$u_1(0) = \sqrt{\frac{\pi}{2}}, \quad u_2(0) = -\sqrt{\frac{\pi}{2}}, \quad \dot{u}_1(0) = 5\sqrt{\frac{\pi}{2}}, \quad \dot{u}_2(0) = 0.$$

Приближенное решение системы (17)

t	$u_1(t)$	$u_2(t)$	$u_3(t)$
0	1,253	-1,253	-0,152
0,1	1,853	-1,272	-0,070
0,2	2,408	-1,340	0,018
0,3	2,929	-1,482	0,081
0,4	3,429	-1,734	0,098
0,5	3,925	-2,154	0,045
0,6	4,439	-2,845	0,116
0,7	5,010	-3,998	-0,450
0,8	5,713	-6,042	-1,032
0,9	6,744	-10,228	-1,968
1,0	8,8407	-23,046	-3,618

На рис. 2 изображено фазовое пространство (16). На рис. 3 построено поточечно численное решение примера 2 с шагами $\Delta x = 0,002$ и $\Delta t = 0,1$

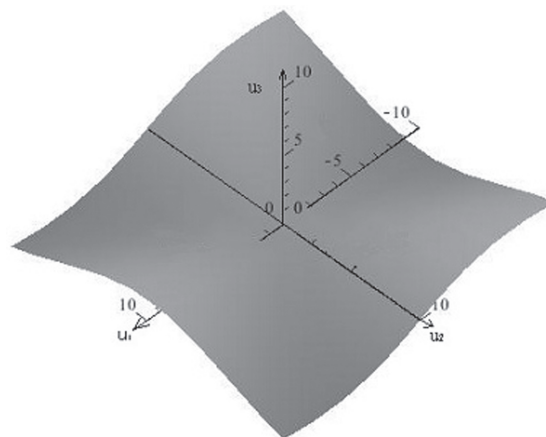


Рис. 2. Фазовое пространство уравнения (16)

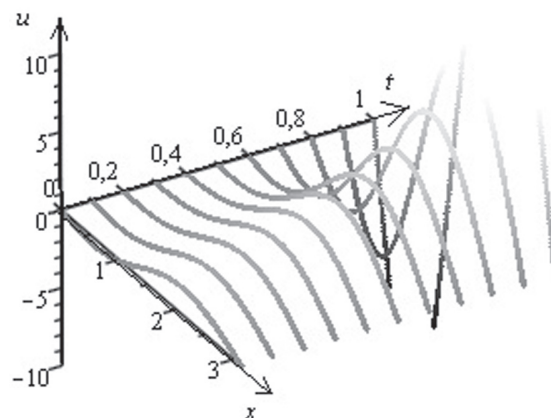


Рис. 3. График приближенного решения задачи (16)–(18)

БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаю благодарность Георгию Анатольевичу Свиридюку за поддержку и ценные советы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Загребина С. А. Начально-конечная задача для линейной системы уравнений Навье – Стокса // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Математическое моделирование и программирование». 2011. № 4 (221). Вып. 7. С. 35–39.
- Замышляева А. А. Фазовые пространства одного класса линейных уравнений соболевского типа второго порядка // Вычислительные технологии. 2003. Т. 8. № 4. С. 45–54.
- Замышляева А. А. Начально-конечная задача для неоднородного уравнения Буссинеска – Лява // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Математическое моделирование и программирование». 2011. № 37 (254). Вып. 10. С. 22–29.
- Замышляева А. А., Бычков Е. В. Фазовое пространство полулинейного уравнения Буссинеска // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Математическое моделирование и программирование». 2012. № 18 (27). Вып. 12. С. 13–19.
- Солдатов А. П., Шхануков М. Х. Краевые задачи с нелокальными условиями А. А. Самарского для псевдопараболического уравнения высокого порядка // ДАН. 1987. Т. 297. № 3. С. 547–552.
- Zamyshlyeva A., Bychkov E. The Cauchy problem for the second order semilinear Sobolev type equation // Global and stochastic Analysis. 2012. Vol. 2. № 1. P. 159–166.

ХРОНИКА

В октябре 2012 года кафедра фармакологии, организации и экономики фармации) отметил юбилей – 50 лет со дня создания.

Курс фармакологии был организован в 1962 году в составе кафедры патологической физиологии. Его возглавил В. Б. Прозоровский, в 1965 году – А. И. Шевченко. В 1974 году была создана кафедра фармакологии, гигиены и организации здравоохранения. В разное время на курсе работали доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой физиологии человека и животных медицинского факультета ПетрГУ, член-корреспондент РАЕН Ю. В. Лупандин; кандидаты медицинских наук А. А. Коккарев, Е. А. Вишняков, Д. В. Акимов; старшие преподаватели Л. П. Кокконен, Е. В. Шурыгина, И. В. Чернова; ассистенты Л. И. Кулакова, А. М. Бейм, З. А. Ругоева, М. Г. Савина; лаборанты Л. И. Ермолаева, Р. Г. Палийчук, Г. И. Муравенко, Т. А. Никонова, М. Н. Левченко.

В связи с открытием и лицензированием в 2003 году на медицинском факультете новой специальности «Фармация» (очная и заочная формы обучения) в состав кафедры вошли дисциплины «Управление и экономика фармации», «Медицинское и фармацевтическое товароведение», «Токсикологическая химия», «Фармацевтическая гомеопатия», «Фитотерапия», «Фармация за рубежом» и «Фитология». Кроме этого, были введены дисциплины «Токсикология» и «Профилактика социально значимых болезней и их последствий среди молодежи». В 2007 году кафедра была переименована в кафедру фармакологии, организации и экономики фармации с курсами микробиологии и гигиены. С 2009 года кафедрой заведует доктор медицинских наук И. А. Виноградова.

В данное время основными направлениями научной работы кафедры являются фундаментальные («Влияние светового режима на показатели биологического возраста, продолжительность жизни, возрастную патологию и их фармакологическая коррекция») и прикладные

исследования («Маркетинговые исследования фармацевтического рынка антигистаминных и обезболивающих препаратов в г. Петрозаводске»). По направлениям исследований написано 5 кандидатских и 2 докторские диссертации, в настоящее время выполняются одна докторская и 4 кандидатские диссертации.

Коллективом курса разработано более тридцати учебных пособий, учебно-методических рекомендаций, опубликовано свыше 600 печатных работ, научные результаты представлены на 27 международных и 49 всероссийских симпозиумах. Научно-исследовательская работа сотрудников поддержана в разное время грантами фондов РФФИ, РФФИ-Север, РГНФ, РГНФ-Север, Университеты России, Интеграция и программой ФСР МФП НТС «Участник молодежного научно-инновационного конкурса 2010».

В 2011 году старший преподаватель Т. А. Лотош стала лауреатом премии им. академика В. В. Фролькиса Научного медицинского общества геронтологов и гериатров Украины, а старший преподаватель В. Д. Юнаш – лауреатом премии Геронтологического общества РАН молодым ученым России.

Сегодня на кафедре работает 26 человек, из них 16 на курсе фармакологии.

Кафедра принимает активное участие в Программе стратегического развития «Университетский комплекс ПетрГУ в научно-образовательном пространстве Европейского Севера: стратегия инновационного развития». На базе Института высоких биомедицинских технологий планируется создание лаборатории доклинических исследований, клеточной патологии и биорегуляции.

Пожелаем кафедре фармакологии, организации и экономики фармации новых научных достижений!

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Обращаем ваше внимание на то, что в связи с включением журнала в международные реферативные базы меняются требования к оформлению статей с 1 января 2013 года.

Представляемые рукописи должны соответствовать тематике журнала и содержать материалы, не опубликованные ранее в других изданиях.

Статья предоставляется в распечатанном виде на бумаге формата А4 (в двух экземплярах) и в электронном виде. Печатная версия статьи подписывается всеми авторами.

Статья набирается в текстовом редакторе **Microsoft Word**. Объем оригинальной и обзорной статьи не должен превышать 0,5–0,7 печатного листа. **Поля:** верхнее и нижнее – 2 см, правое и левое – 3 см. Абзацный отступ – 0,5 см. **Шрифт:** Times New Roman, размер – 14 пунктов, аннотация, список литературы – 12 пт, межстрочный интервал – полуторный. Нумерация страниц – справа внизу страницы.

Статья должна состоять из следующих элементов на **русском и английском языках**:

УДК (индекс универсальной десятичной классификации) в левом верхнем углу.

Сведения об авторе (имя, отчество, фамилия автора (-ов) полностью; ученая степень и звание; место работы: вуз, факультет, кафедра; должность; электронный и почтовый адреса, контактные телефоны).

Название статьи жирным шрифтом заглавными буквами.

Аннотация (объем от 120 до 250 слов) является кратким резюме большей по объему работы, имеющей научный характер.

Аннотация включает следующие аспекты:

- предмет, цель работы;
- метод или методологию проведения работы;
- результаты работы;
- область применения результатов;
- выводы.

Требования к аннотации см. на сайте журнала: uchzap.petrsgu.ru.

Ключевые слова – от 3 до 8 слов (или словосочетаний, несущих в тексте основную смысловую нагрузку).

Список литературы должен быть представлен на отдельных листах в 2 вариантах:

1. На русском языке в соответствии с **ГОСТ 7.1-2003**. Цитируемая в статье литература (ав-

тор, название, место, издательство, год издания и страницы (от и до или общее количество)) приводится в алфавитном порядке, сначала отечественные, затем зарубежные авторы;

2. Список литературы (References) должен быть записан на языке оригинала латинскими буквами. На сайте <http://www.translit.ru/> можно бесплатно воспользоваться программой транслитерации русского текста в латиницу. Правила оформления на латинице даны на сайте журнала: uchzap.petrsgu.ru.

Примечания даются в виде концевых сносок. Архивные и другие источники выделяются перед списком литературы, нумерация сохраняется сквозная.

В тексте статьи ссылка дается в квадратных скобках, через точку с запятой – цитируемая страница, если это необходимо.

Таблицы – каждая печатается на отдельной странице, нумеруется соответственно первому упоминанию ее в тексте и снабжается заголовком. Таблицы предоставляются в текстовом редакторе Microsoft Word (формат .doc). **Иллюстрации** (рисунки, фотографии, схемы, диаграммы) нумеруются, снабжаются подписями и предоставляются в виде отдельных растровых файлов (в форматах .tif, .bmp, .pdf). В бумажной версии на обороте каждой иллюстрации ставится номер и пометка «верх», «низ». В тексте статьи указывается место таблицы или рисунка.

Таблиц и иллюстраций не должно быть более 5.

Статьи, поступившие в редакцию, подлежат обязательному рецензированию. Если у рецензентов возникают замечания, статья возвращается на доработку.

Редакция оставляет за собой право внесения в текст редакторских изменений, не искажающих смысла статьи.

Статьи на английском языке должны иметь письменное заключение из Центра языковой подготовки ПетрГУ.

Материалы, не соответствующие предъявленным требованиям, редакция не рассматривает.

Решение о публикации принимается редакционной коллегией журнала.

CONTENTS

BIOLOGY

Ivanter D. E., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Kurkhinen Yu. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

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

DARK FIELD MOUSE (*MICROTUS AGRESTIS* L.) IN ORIGINAL ANTHROPOGENIC LANDSCAPES OF EASTERN SCANDINAVIA

Summary: Ecological and population features of the dark field mouse (*Microtus agrestis* L.) in conditions of anthropogenic transformation of taiga ecosystem in Eastern Scandinavia are studied. Consistencies for spatial population structure, population size, and interrelationships with other competing species are analyzed.

Key words: Population, ecosystem, dynamics of population size, inhabited sites 7

Novichonok A. O., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Evdokimova E. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

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

Kurbatova J. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

PRELIMINARY FOREST PLANT BIOMASS INVENTORY IN MONSOON TROPICAL FOREST IN CAT TIEN NATIONAL PARK (South Vietnam)

Summary: The results of forest plant biomass inventory in monsoon tropical forest in Cat Tien National Park are presented. The study demonstrates the differences in plant biomass production between forest areas with different levels of anthropogenic disturbance.

Key words: Cat Tien National Park, forest inventory, *Lagerstroemia calyculata*, tropical forest biomass 13

Pyartman A. K., Saint Petersburg State Technological University (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

Remizova L. A., Saint Petersburg State Technological University (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

EXTRACTION OF LANTHANIDES' NITRATES (III) WITH TRIOCTYLPROP-2-YNYLAMMONIUM NITRATE

Summary: Acetylenic quaternary ammonium salts are more selective on the extraction of lanthanides (III) than their saturated analogs.

Key words: Extraction, coordination, lanthanides, acetylenic quaternary ammonium salts 17

Rizhkov L. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

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

Marchenko L. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

EFFECT OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC FACTORS ON CHEMICAL COMPOSITION OF WATER IN LOSOSINKA RIVER

Summary: Long-term research results on the chemical composition of the city river Lososinka are presented. The process of chemical composition development under the influence of natural and anthropogenic factors is studied.

Key words: Storm water runoff, chemical composition, heavy metals, catch basin, salmon water reservoir, precipitation 20

Bolotnikova O. I., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Mikhailova N. P., Saint Petersburg State Technological Institute (Saint Petersburg, Russian Federation)

Ginai A. I., Saint Petersburg State Technological Institute (Saint Petersburg, Russian Federation)

XYLITOL AND ETHANOL PRODUCTION BY STRAINS OF XYLOSE ASSIMILATING YEAST *PACHYSOLEN TANNOPHILUS* WITH DIFFERENT PLOIDY

Summary: Microaerophilic fermentation of D-xylose by *P. tannophilus* isogenic strains with different ploidy was studied. In spite of the tendency to dissociation a diploid batch culture has accumulated xylitol (2,75 g l⁻¹; 0,04 g g⁻¹) and ethanol (0,64 g l⁻¹; 0,17 g g⁻¹) better than haploid one. The possibility of xylitol and ethanol producers on the base of *P. tannophilus* collection cultures is discussed.

Key words: D-xylose, yeast *P. tannophilus*, xylitol, ethanol 25

Kholoptseva E. S., Institute of Biology, Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Drozhdov S. N., Institute of Biology, Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Sazonova T. A., Institute of Biology, Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Khilkov N. I., Institute of Biology, Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

EFFECT OF SOIL TEMPERATURE ON LIGHT-THERMAL CHARACTERISTICS OF BIRCH SEEDLINGS *BETULA PENDULA*

Summary: The effect of the soil temperatures (15, 20 and 25 °C) on light-thermal characteristics on intact two-year birch seedlings was studied in the controlled environment in a pre-planned multifactor experiment. The greatest possible maximum of net-photosynthesis in birch seedlings was reached at soil temperature of 15 °C, air temperature of 20,6 °C, and light intensity of 34,6 klux. At two other soil temperatures, the potential maximum of the net-photosynthesis was about 10 % lower and was achieved at a higher level of light intensity and lower level of air temperature.

Key words: *Betula pendula* Roth., multifactor pre-planned experiment, CO₂-exchange, net-photosynthesis, soil temperature, light-temperature characteristics 28

Yakimova A. E., Institute of Biology, Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

SMALL MAMMALS IN NUTRITION OF PREDATORS INHABITING EUROPEAN TAIGA

Summary: Nutrition characteristics incorporating small mammals as a share in nourishment of small and medium size predators are provided. Correlation between the overall quantity of the predators and their prey is presented.

Key words: Predators, prey, small mammals, share in nourishment 32

MEDICAL SCIENCE

Vvedensky V. P., Outpatient Department № 2 (Yaroslavl, Russian Federation)

Klyuchevsky V. V., Yaroslavl State Medical Academy (Yaroslavl, Russian Federation)

EFFICIENCY OF ENDOBRONCHIAL THERAPY OF VENTILATOR-ASSOCIATED PNEUMONIA IN CASES OF CONCOMITANT INJURY

Summary: When treating ventilator-associated pneumonia in patients with concomitant injuries, effectiveness of visually controlled endobronchial instillations of perfluorane combined with fiberoptic high frequency ventilation of the lungs was higher than efficiency in cases with noninvasive patient surveillance.

Key words: Ventilator-associated pneumonia, endobronchial instillations of perfluorane, high frequency ventilation of the lung . 37

Nikitina K. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Karapetyan T. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

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

CHARACTERISTIC FEATURES OF MICROELEMENT BLOOD COMPOSITION UPON OCCURRENCE AND DEVELOPMENT OF COMMUNITY-ACQUIRED PNEUMONIA IN SENIOR AND ELDERLY PATIENTS

Summary: Research results of the microelement status of blood in Karelian residents of different age groups are presented. The study involved healthy donors and patients with community-acquired pneumonia. Distinctive differences in mass concentration of microcells in healthy donors and sick patients are noted. Multidirectional changes of microelements' concentration in the blood of the patients of different age groups during recovery process are shown.

Key words: Microelement status, community-acquired pneumonia, age 41

EARTH SCIENCE

Belashev B. Z., Institute of Geology, Karelian Research Center of RAS, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Gorkovets V. Ya., Institute of Geology, Karelian Research Center of RAS, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Raevskaya M. B., Institute of Geology, Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

STUDY OF STRUCTURAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF FERRIFEROUS QUARTZITES OF SOUTH KORPANGA AREA OF KOSTOMUKSHA ORE FIELD

Summary: Structural and magnetic properties of ferruginous quartzite and of their magnetite were studied in connection with the development of the south Korpangsky area of Kostomuksha ore field. The methods of mineralogical, X-ray, thermal, Mössbauer analysis, electron microscopy, and kappa analysis were used. Cracks of tectonic origin were found in ferruginous quartzite. These cracks lead to over grinding magnetite in crushing process. The composition and content of mineral impurities in magnetite was determined. The contents of isomorphic impurities in magnetite was estimated. Purest ores conform with final progressive stages of metamorphism.

Key words: Ferruginous quartzite, magnetite, X-ray analysis, the Curie temperature, Mössbauer spectroscopy, kappa analysis . . 46

AGRICULTURAL SCIENCE

Timeyko L. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Korneyev Yu. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Evstratova L. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

WAYS TO IMPROVE POTATO PRODUCTIVITY IN NORTHWEST RUSSIA

Summary: Results of the long-term field experiment concerning employment of mineral and organic fertilizers, their types, doses, and methods of application are studied. Improvement of farming techniques during potato cultivation process on soils of different textural composition and fertile quality are discussed in the article.

Key words: Potato, mineral and organic fertilizers, row spacing, harvest 52

Misheneva E. Yu., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Morozova Yu. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

CHARACTERISTIC FEATURES OF YOUNG RUSSIAN SADDLE HORSES

Summary: Measurements, motor, and jumping qualities of the Russian riding breed of stallions produced in 2004–2005 (Starozhilovsky stud farm, Ryazan region) are studied. Sire origin is taken into account. Posterity of the breed has some female and male horses that reveal characteristic features of the targeted breed. Sexual dimorphism is not determined. Young horses of different origin differ greatly by motor and jumping qualities. Variability of all characteristic features is not significant.

Key words: Russian Saddle Horse, Starozhilovsky stud farm, recreation of Russian riding breed, compliance to breed requirements, external characteristics, motor and jumping abilities, sexual dimorphism 57

Raevsky B. V., Forest Research Institute, Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Schurova M. L., Branch of FGI «Roslesozachita» – «Forest protection centre of Leningrad region», department of «Karelian Seed Station» (Petrozavodsk, Russian Federation)

CONSERVATION AND MANAGEMENT OF FOREST GENETIC RESOURCES OF CONIFEROUS FOREST FORMING SPECIES IN KARELIA

Summary: Contemporary condition of the forest industry dealing with conservation and management of forest genetic resources in Karelia is considered. It was emphasized that the system of plus tree selection in Karelia is in critical condition and requires urgent measures to improve the situation.

Key words: Forest genetic resources, plus stands, plus trees, seed orchards 61

Tsarev V. A., Voronezh State Forest-Technical Academy (Voronezh, Russian Federation)

MODERN FOREST MANAGEMENT PROBLEMS IN RUSSIAN FEDERATION AND ECONOMIC LOSSES CAUSED BY ITS IMPERFECTION

Summary: Problems of modern forest management in Russia are discussed. The damage caused to national economy is shown on the examples of growing fire areas and volumes of illegal cuttings. In some respect, the damage to national economy is inflicted by the adopted forest control system and insufficient protection of forest funds. Proposals on the improvement of the existing forest management system are given.

Key words: Forest management, forest policy, fires, illegal cuttings, forest code 65

ENGINEERING SCIENCE

Borisov A. Yu., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

LANDSCAPE ORGANIZATION OF TRADITIONAL KARELIAN SETTLEMENTS (case study of General land survey maps of XVIII century)

Summary: A possibility of the General land survey maps of the XVIII century to be used as a source for historical and architectural analysis of the planning structure of traditional rural settlements is studied. The analysis is performed on the example of landscape plans of Povenetsky and Pudozhsky districts. It includes a research of the inhabited territory, analysis of the planning structure, and significance degree study of such construction orientation elements as the Sun, proximity to water basins, and access to roads.

Key words: Traditional rural settlement, historical and architectural analysis, maps of the General land survey, occupation of the territory, planning structure, planning form of settlement, orientation of the buildings, priorities of orientation 68

Grigor'ev I. V., Saint Petersburg State Technical Academy (Saint Petersburg, Russian Federation)

Bylev A. B., Saint Petersburg State Technical Academy (Saint Petersburg, Russian Federation)

Hahina A. M., Saint Petersburg State Technical Academy (Saint Petersburg, Russian Federation)

Nikiforova A. I., Saint Petersburg State Technical Academy (Saint Petersburg, Russian Federation)

MATHEMATICAL MODEL OF CONDENSING EFFECT CAUSED BY HARVESTING EQUIPMENT ON SIDE BANDS OF LOGWAY

Summary: A general theoretical discussion on the waves in soils is presented. Assessment data of ground condensation are provided. It is shown, that by the choice of different high-speed regimes of harvesting machines, the mechanism of ground condensation can be regulated.

Key words: Logging, condensation of ground, a route of traffic, turn of a tractor 72

Ajukaev R. I., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Grafova E. O., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Venitsianov E. V., Water Problems Institute, RAS (Moscow, Russian Federation)

MATHEMATICAL MODELING AND CALCULATION OF THIN MULTILAYERED FILTERS FOR SORPTION TREATMENT OF SUPERFICIAL DRAIN FROM SUBURBAN HIGHWAYS

Summary: The use of thin multilayered filters for highway cleansing from rain and thaw drain is viewed perspective in conditions of the north-west of Russia. Effectiveness of the thin multilayered filters is substantiated by the theory of "sorption dynamics". Optimal sorption materials are considered. Results of the engineering calculation are provided.

Key words: Cleansing of superficial drain, thin multilayered filtering, sorption dynamics, curves of sorption 78

Borisov G. A., Institute of Applied Mathematical Research, Karelian Research Center of RAS, (Petrozavodsk, Russian Federation)

Tikhomirova T. P., Institute of Applied Mathematical Research, Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

EXTENDING SERVICE LIFE OF ISOLATION AND BEARINGS IN ELECTRIC MOTORS BY OPTIMIZING LOAD DISTRIBUTION

Summary: Using the Lagrange undetermined multipliers' method we prove that the service life of isolation and bearings of electric motors can be maximized by redistribution of the load by time and objects.

Key words: Electric motors, isolation service life, bearing wear, Lagrange undetermined multipliers' method 83

Levin V. M., Mexican Oil Institute (Mexico City, Mexico)

Kanaun S. K., Technological Institute of Higher Education of Monterrey (Mexico City, Mexico)

APPLICATION OF MAXWELL METHOD IN SOLUTION OF HOMOGENIZATION PROBLEM FOR ANIZOTROPIC ELASTIC MEDIA WITH ELLIPSOIDAL INCLUSIONS

Summary: The Maxwell method is applied to calculate effective elastic constants of matrix composite materials containing a random set of anisotropic ellipsoidal inclusions. It is shown that the method allows derivation of analytical equations for effective elastic constants that coincide with the equations obtained by the Mori-Tanaka method and other self-consistent methods known in literature.

Key words: Matrix composites, homogenization problem, self-consistent schemes, Maxwell's method, effective properties. 86

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

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

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

Sukhanov Yu. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

APPROBATION OF DECISION-SUPPORT SYSTEM FOR FOREST ENERGY: ECONOMICAL BACKGROUND

Summary: The approbation results of decision-support system for rational bioenergy use of woody biomass and logging residues are described in the article.

Key words: Woody biomass, logging residues, wood harvesting, logistics, GIS-technologies 90

PHYSICS AND MATHEMATICS

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

Putrolaynen V. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Stefanovich G. B., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

RESEARCH OF RERAM ELEMENT PROTOTYPE BASED ON NONSTOICHIOMETRIC ANODE OXIDE FILMS OF NIOBIUM

Summary: The article is concerned with the results of development and research of ReRAM element prototype (memristor) based on bipolar resistive switching in nonstoichiometric anodic oxide films of niobium. High practical importance and promising outlook of this effect for ReRAM development have been established.

Key words: ReRAM elements, bipolar resistive switching, anodic niobium oxides 95

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

Pergament A. L., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Pustyl'nik M. Yu., Max Plank Institute of Extraterrestrial Physics (Munich, Germany)

MASS-SPECTROMETRIC STUDIES OF GASEOUS MEDIUM OF COMPLEX PLASMA WITH PARTICLES OF MELAMINFORMALDEGID

Summary: The change in composition of the gaseous environment of complex plasmas is experimentally studied. The particles (spheres with diameter $1,31 \pm 0,07 \mu\text{m}$) of melaminformaldehyde (MF-R) were stationed in the radio-frequency plasma discharge in a gas mixture of argon and oxygen (90%-Ar, 10%-O₂). The mass-spectrometric measurement results of the gaseous medium with particles and without particles are presented. The estimates of changes in the composition of complex plasma gaseous medium are discussed.

Key words: Complex plasma, ordered plasma-dust structures, mass-spectrometry 99

Grishin A.M., Royal Institute of Technology (Stockholm-Kista, Sweden)

TOWARD MAGNETO-OPTICAL LASING MEDIA

Summary: Luminescent properties of several Er-doped garnet films as building blocks were compared in all-garnet heteroepitaxial magneto-optical photonic crystals: La₃Ga₅O₁₂, Gd₃Ga₅O₁₂, Y₃Fe₅O₁₂, Bi₃Fe₅O₁₂, and Bi_{2,97}Er_{0,03}Fe₄Al_{0,5}Ga_{0,5}O₁₂. Long-lived near-IR luminescence in Er substituted gallium and iron garnet layers used both as Bragg mirrors, and micro-cavities promise magneto-optical photonic crystals to become an active lasing medium.

Key words: Magneto-optical photonic crystals, garnet materials 103

Kotov A. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Nekrasov M. Yu., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

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

Rogov A. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

INFORMATION SYSTEM FOR MARKED SMALL DIMENSION CORPUSES' DEVELOPMENT

Summary: The paper contains a brief analysis of the existing Russian language corpuses and their features. These corpuses are compared with corpus SMALT developed in PetrSU. The paper considers universal models instrumental in the development of varied grammatical and syntactical marked corpuses. Information system, based on these models, is the main focus of the article.

Key words: Marked corpuses, system for grammatical marking, system for syntactical marking, homonymy problems 108

Semenov I. O., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Sigovtsev G. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

MATHEMATICAL MODELING IN CONTENT PLANNING OF ELECTRONIC TRAINING COURSE

Summary: The application of cognitive maps to model content of electronic training courses is considered. Some quantitative characteristics of the model are introduced. Optimization model is proposed based on the obtained quantitative characteristics. The use of a genetic algorithm aimed to optimize the content of the electronic training course is described.

Key words: Content model of electronic training course, cognitive map, genetic algorithm 113

Bychkov E. V., South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation)

NUMERICAL MODELING OF LONGITUDINAL VIBRATIONS IN DISPERSIVE MEDIUMS

Summary: The aim of the paper is a numerical investigation of the Showalter – Sidorov problem for degenerate Boussinesq – Löve equation, as well as numerical study of the Cauchy problem for non-degenerate Boussinesq – Löve equation in one-dimensional case. The phase space method and the Galerkin method were used during research.

Key words: Showalter – Sidorov problem, the Sobolev type equation, phase space, Galerkin method 116

SCIENTIFIC INFORMATION 119

INFO FOR THE AUTHORS 120