ISSN 1998-1643

Министерство образования и науки
Российской Федерации

Научный журнал

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ПЕТРОЗАВОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

(продолжение журнала 1947–1975 гг.)

№ 2 (131). Март, 2013

Серия: Естественные и технические науки

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

Зам. главного редактора
В. Б. Акулов, доктор экономических наук, профессор
Э. 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

© ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ)», 2013

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)

ISSN 1998-1643

Ministry of Education and Science
of the Russian Federation

Scientific Journal

PROCEEDINGS OF PETROZAVODSK STATE UNIVERSITY

(following up 1947–1975)

№ 2 (131). March, 2013

Natural & Engineering Sciences

Chief Editor
Anatoly V. Voronin, Doctor of Technical Sciences, Professor

Chief Deputy Editor
Vladimir B. Akulov, Doctor of Economic Sciences, Professor
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

© FBSEI «Petrozavodsk State University (PetrSU)», 2013

Editorial Council

V. BOLSHAKOV
Doctor of Biological Sciences,
Professor, the RAS Member (Ekaterinburg)

I. DUDANOV
Doctor of Medical Sciences, Professor,
the RAMS Corresponding Member (Petrozavodsk)

V. ZAKHAROV
Doctor of Philological Sciences,
Professor (Moscow)

A. ISAYEV
Doctor of Biological Sciences,
Professor, the RAS Member (Moscow)

MAREK VOCHOZKA
Doctor of Economic Sciences
(Ceske Budejovice, Czech Republic)

N. MEL'NIKOV
Doctor of Technical Sciences,
Professor, the RAS Member (Apatity)

I. MULLONEN
Doctor of Philological Sciences,
Professor (Petrozavodsk)

V. ORPHINSKY
Doctor of Architecture, Professor,
Full Member of Russian Academy
of Architectural Sciences (Petrozavodsk)

PAAVO PELKONEN
Doctor of Technical Sciences,
Professor (Joensuu, Finland)

I. ROMANOVSKY
Doctor of Physical-Mathematical Sciences,
Professor (St. Petersburg)

E. SENYAVSKAYA
Doctor of Historical Sciences, Professor (Moscow)

HELENA SULKALA
Doctor of Philosophy,
Professor (Oulu, Finland)

L. TIMOFEEVA
Doctor of Political Sciences, Professor (Moscow)

A. TITOV
Doctor of Biological Sciences, Professor,
the RAS Corresponding Member (Petrozavodsk)

M. CHARKICH
the Leading Professor of Serbian Academy
of Sciences and Arts (Belgrade, Serbia)

R. YUSUPOV
Doctor of Technical Sciences, Professor,
the RAS Corresponding Member (St. Petersburg)

Editorial Board of the Series
"Natural & Engineering Sciences"

A. BOLGOV
Doctor of Agricultural Sciences,
Professor (Petrozavodsk)

V. VAPIROV
Doctor of Chemistry, Professor (Petrozavodsk)

E. MARKOVSKAYA
Doctor of Biological Sciences, Professor (Petrozavodsk)

N. NEMOVA
Doctor of Biological Sciences,
Professor, the RAS Corresponding Member
(Petrozavodsk)

V. PATYAKIN
Doctor of Technical Sciences, Professor (St. Petersburg)

E. RAT'KOVA
Series Executive Secretary (Petrozavodsk)

A. ROGOV
Doctor of Technical Sciences, Professor (Petrozavodsk)

V. SYSUN
Doctor of Physical-Mathematical Sciences,
Professor (Petrozavodsk)

V. SYUNEV
Doctor of Technical Sciences,
Professor (Petrozavodsk)

V. SHCHIPTSOV
Doctor of Geological-Mineralogical Sciences,
Professor (Petrozavodsk)

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЯ

Антипина Г. С.
Водоросли, высшие растения и лишайники города Петрозаводска: видовое разнообразие 7

Дроздов С. Н., Холопцева Е. С.
Возможности использования многофакторного эксперимента в исследовании эколого-физиологических характеристик растений 11

Лукин А. А., Ивантер Д. Э., Беляев Д. С.
Современное состояние ихтиофауны Выгозерского водохранилища 16

Онищенко И. Н., Рыжков Л. П., Онищенко Н. А.
Вохтозеро – водоем садкового рыбоводства 23

Лябзина С. Н., Узенбаев С. Д.
Экология жуков-мертвоедов (Coleoptera, Silphidae) в Карелии 27

Холодов Е. В.
Лесной северный олень в национальном парке «Водлозерский» 33

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

Делиева А. Н., Долинина Л. Ю., Галкина О. В., Трофимов В. И.
Особенности клеточного и гуморального механизмов местного воспаления при ХОБЛ различной степени тяжести 36

Мичурина С. В., Васендин Д. В., Ищенко И. Ю.
Особенности структурных и микроструктурных изменений в тимусе в «катаболической» фазе после воздействия экспериментальной гипертермии 41

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Нилов М. Ю.
Геофизические критерии выделения Au-Cu-Mo-порфировых штокверковых зон на примере участка Кадилампи в Западной Карелии 48

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

Емельянова А. С., Лупова Е. И.
Изменение числовых характеристик вариационных пульсограмм в результате перенесенного острого стресса у коров-первотелок 52

Гаврилов В. Н.
Выращивание ели европейской (*Picea abies (L.) Karst.*) при реконструкции осушаемого березняка осоково-сфагнового 55

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Питухин А. В., Скобцов И. Г., Серебрянский Н. И.
Определение оптимального количества постов в зоне ремонта предприятия технического сервиса 59

Ефлов В. Б., Питухин Е. А., Стафеев Ф. В.
Анализ выполнения запросов в СУБД H2 62

Лисов В. Ю., Язов В. Н.
Экспериментальное определение сопротивления почвы сдвигу 66

Рочев А. А.
К расчету пространственных упругопластических составных стержней 69

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Khartsev S., Grishin A., Manuilov S.
Magnetostatic waves in $Y_3Fe_5O_{12}$ films on silicon . 73

Подгорный В. И., Белашев Б. З., Осауленко Р. Н., Терновой А. Н.
Синтез карбидов в плазме дугового разряда и их идентификация 78

Крупянский Д. С., Лобов Д. В., Осауленко Р. Н.
Реализация метода молекулярной динамики посредством технологии NVIDIA CUDA 84

Гостев В. А., Лехто Э. Г.
Газоразрядный генератор активного кислорода. 87

Данилов С. В., Фофанов А. Д.
Компьютерное моделирование и рентгеноструктурный анализ углеродных нанотрубок. . . 90

Лери М. М., Павлов Ю. Л.
Лесной пожар на случайном графе со сгораемыми ребрами 96

Печников А. А., Дербенева О. Ю.
Анализ гиперссылок веб-пространства Петрозаводского государственного университета .100

Шлей М. Д., Рогов А. А., Матюшичев К. В.
Особенности компьютерной реализации построения зон видимости объектов с учетом застройки и рельефа местности 107

Томчук К. К., Зилинберг А. Ю.
Иерархическая модель и базовые алгоритмы временной сегментации речевых сигналов 114

Рецензии

Петросян Л. А.
Рец. на кн.: Мазалов В. В., Менчер А. Э., Токарева Ю. С. Переговоры. Математическая теория 120

Память

Герасимова Л. И., Лупандин Ю. В., Мейгал А. Ю.
Памяти нейрофизиолога В. В. Правдича-Неминского 121

Юбилеи

К 50-летию А. Л. Пергамента. 122
К 75-летию Е. А. Румянцева. 122
К 85-летию Олави Бертела Хеллмана 123

Contents 124

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

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

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ РАН

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

Требования к оформлению статей см.:
http://uchzap.petrsu.ru/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 18.03.2013. Формат 60x90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
10 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. (2-й завод – 165 экз.) Изд. № 46.

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

Март, № 2 **Биология** **2013**

УДК 582.2

ГАЛИНА СТАНИСЛАВОВНА АНТИПИНА
доктор биологических наук, профессор кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
antipina@petrsu.ru

ВОДОРОСЛИ, ВЫСШИЕ РАСТЕНИЯ И ЛИШАЙНИКИ ГОРОДА ПЕТРОЗАВОДСКА: ВИДОВОЕ РАЗНООБРАЗИЕ*

Урбанофлоры региона являются важными и самостоятельными объектами флористических исследований. Цель работы – анализ видового разнообразия водорослей, мохообразных, сосудистых растений и лишайников, распространенных на территории Петрозаводска. Работа выполнена в 1980–2012 годах. Видовой состав растений и лишайников исследован в пределах административных границ города; таксоны растений и лишайников понимаются в широком смысле (s. l.). В городской экосистеме представлены водоросли (не менее 406 видов), мохообразные (216 видов), сосудистые растения (1086 видов) и лишайники (171 вид), всего около 2000 видов организмов. Они относятся к 851 роду, 289 семействам, 134 порядкам, 42 классам, 18 отделам, 3 царствам (Дробянки, Растения, Грибы), 2 надцарствам (Прокариоты и Эукариоты). Отмечено произрастание 35 редких видов флоры Карелии: 5 видов мохообразных, 26 видов сосудистых растений, 4 видов лишайников. Гетерогенность городской среды, мозаичность почвенного и растительного покрова, экотонные эффекты обеспечивают формирование в городе специфического явления – урбанистической концентрации видов. Полученные данные являются основой мониторинга видового состава фототрофного компонента экосистемы крупного города таежной зоны.

Ключевые слова: водоросли, мхи, сосудистые растения, лишайники, флора, культурные растения

Урбанофлоры (флоры городов) в последние десятилетия стали важными и самостоятельными объектами флористических исследований. На территории г. Петрозаводска такие исследования ведутся в течение 30 лет. На первом этапе основное внимание уделялось сосудистым растениям, позднее был изучен видовой состав водорослей, мохообразных и лишайников. В результате таких планомерных и разносторонних исследований для Петрозаводска получены данные не только о составе высших растений, но и всего (за исключением автотрофных бактерий) автотрофного компонента городской экосистемы – прокариотических и эукариотических водорослей, мохообразных, сосудистых растений, лишайников.

Петрозаводск (62° с. ш., 34° в. д.) – крупный город Северо-Запада России, его площадь 113,0 км^2, население около 266 тыс. человек. Преобладающие почвы – подзолы аллювиально-железисто-гумусовые [7], гидрографическая сеть относится к бассейну Онежского озера. Климат умеренно-холодный, характеризуется умеренно-мягкой зимой и умеренно-теплым летом [3], что благоприятно для произрастания многих видов растений и лишайников.

Территория города, как и Карелии в целом, относится к Североевропейской провинции Циркумбореальной флористической области Голарктического флористического царства [10]. Основная часть города принадлежит к биогеографической провинции Karelia olonetsensis, а поселок Соломенное – к провинции Karelia onegensis [5], которые соответствуют Олонецкому и Заонежскому флористическим районам [8]. Естественная растительность на окраинах города, между городскими районами, по берегу Онежского озера, в долинах рек Лососинки и Неглинки представлена хвойными лесами.

Город отличается значительной гетерогенностью природной среды. Участки естественной растительности обеспечивают произрастание лесных, болотных, скальных и прибрежно-водных видов растений и лишайников, местообитания которых обычно утрачиваются в условиях урбанизированного ландшафта [1]. В то же время наличие вторичных экотопов – промышленных, транспортных, рудеральных, культурных и т. д. – дает возможность распространения адвентивных видов – заносных и дичающих из культуры. В последние годы в городе расширяется малоэтажное строительство с озелененными придомовыми участками. Важным является и сохранение частного сектора старой застройки с приусадебными участками и огородами, где выращиваются многие виды культурных растений.

Цель данной работы – анализ видового разнообразия водорослей, мохообразных, сосудистых растений и лишайников, распространенных на территории Петрозаводска.

В инвентаризации видового состава различных групп организмов принимали участие к. б. н. В. И. Андросова, д. б. н. Г. С. Антипи-

© Антипина Г. С., 2013

на, д. б. н. В. А. Бакалин, к. б. н. М. А. Бойчук, к. б. н. Е. П. Гнатюк, к. б. н. А. В. Еглачев, д. б. н. С. Ф. Комулайнен, к. б. н. А. С. Лантратова, к. б. н. П. Н. Лапшин, д. б. н. Е. Ф. Марковская, к. б. н. А. В. Сонина, к. б. н. В. Н. Тарасова, И. М. Тойвонен.

В работе приняты следующие общие методические подходы:

1. Видовой состав растений и лишайников исследован в пределах административных границ города;

2. Таксоны растений и лишайников принимаются в широком смысле (s. l.), без выделения подвидов, микровидов и т. д.

3. В анализ включены виды, выявленные на территории города за 1980–2012 годы. Систематические списки видов представлены в работах [1], [2], [9]. В списки включены и виды, указанные для города в других работах [4].

Результаты исследования показывают, что для территории такого крупного города таежной зоны, как Петрозаводск, характерно высокое видовое разнообразие водорослей, мохообразных, сосудистых растений и лишайников.

Территория Петрозаводска характеризуется разнообразной альгофлорой. Здесь выявлено не менее 406 видов водорослей (с учетом не идентифицированных до видов зигнемовых и эдогониевых водорослей), которые принадлежат к 163 родам, 74 семействам, 30 порядкам, 13 классам, 10 отделам (рис. 1).

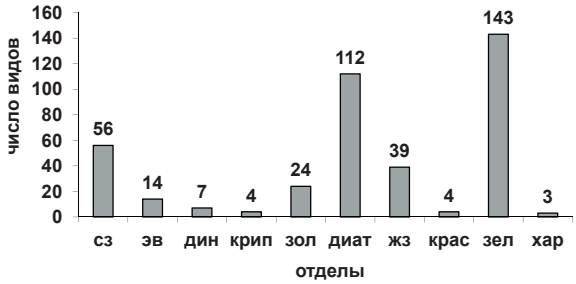


Рис. 1. Видовое разнообразие водорослей: (сз – Синезеленые, эв – Эвгленовые, дин – Динофитовые, крип – Криптофитовые, зол – Золотистые, жз – Желтозеленые, крас – Красные, зел – Зеленые, хар – Харовые)

Широко представлены в различных экотопах города эукариотические водоросли, принадлежащие к отделам Зеленые водоросли и Диатомовые водоросли, и прокариотические Синезеленые водоросли. Ведущими семействами альгофлоры городской территории являются *Naviculaceae* (отдел Диатомовые водоросли, 31 вид), *Chlamydomonadaceae* (отдел Зеленые водоросли, 26 видов) и *Chrysomonadaceae* (отдел Золотистые водоросли, 24 вида).

Альгофлора города дает представление о типичной флоре водорослей различных водоемов и почв Карелии. Наибольшим разнообразием характеризуются гидрофильные водоросли (271 вид), распространенные в Онежском озере, озере Четырёхвёрстном, реках Лососинка и Неглинка, ручьях, болотных озерках, канавах, временных водоемах. Разнообразны и водоросли вневодных местообитаний, прежде всего почвенные (248 видов), распространенные в почвах лесных, луговых участков и в нарушенных почвах вторичных экотопов. Ряд видов нитчатых синезеленых и зеленых водорослей проявляют признаки апофитности, то есть усиливают развитие в нарушенных почвах, характерных для обочин дорог, дворов, спортивных площадок и т. д. Характер альгофлоры города соответствует голарктическим и бореальным флорам.

Бриофлора города представлена 216 видами, относящимися к 122 родам, 53 семействам, 15 порядкам, 7 классам, 2 отделам. Значительное видовое богатство обусловлено наличием в городе участков естественной растительности (лесных, болотных, луговых и др.), в которых распространены печеночники и мхи.

Флора печеночников включает 44 вида, относящихся к 29 родам, 14 семействам, 3 порядкам, 2 классам. Ведущими семействами являются *Jungermanniaceae* (17 видов) и *Cephaloziaceae* (6 видов). Флора мхов насчитывает 172 вида из 93 родов, 39 семейств, 12 порядков, 5 классов. Ведущие семейства – *Sphagnaceae* (22 вида); *Dicranaceae*, *Brachytheciaceae* (по 14 видов). Выявлено 5 редких видов мхов [6]. В различных местообитаниях можно познакомиться с типичными лесными, луговыми, болотными, прибрежно-водными и скально-каменистыми мхами, характерными для таежной зоны.

На территории Петрозаводска выявлены 1086 видов сосудистых растений, которые относятся к 493 родам, 128 семействам, 75 порядкам, 18 классам, 5 отделам (рис. 2). Среди них наибольшим числом видов представлены покрытосеменные растения, ведущими семействами являются *Asteraceae* – 126 видов, *Rosaceae* – 92 вида, *Poaceae* – 89 видов.

Рис. 2. Видовое разнообразие систематических групп сосудистых растений, число видов

Урбанофлора в нашем понимании представляет собой совокупность популяций видов растений, самостоятельно существующих на городской территории, то есть в нее не включаются

культивируемые виды, у которых отсутствует самостоятельное семенное или вегетативное возобновление [1]. Собственно урбанофлора Петрозаводска представлена 871 видом сосудистых растений. Аборигенная фракция флоры образована 437 видами (в том числе 126 видами-апофитами), адвентивная – 434 (рис. 3). Уникальной особенностью города является сохранение местообитаний 26 редких видов растений региональной флоры [6], которые приурочены в основном к участкам естественной растительности.

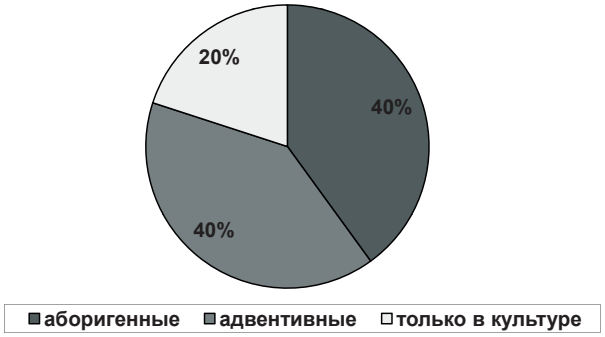


Рис. 3. Соотношение групп сосудистых растений

Для Петрозаводска характерен широкий ассортимент декоративных, пищевых, лекарственных и растений, выращиваемых в культуре: не менее 433 видов (из них 74 – аборигенные). Среди них выделяется группа растений (144 вида), для которых отмечено самостоятельное семенное или вегетативное возобновление, то есть они рассматриваются нами как виды, дичающие из культуры, и включаются в состав адвентивной фракции урбанофлоры. Вторая группа культивируемых растений (215 видов) существует только в условиях искусственного выращивания, и эти виды в составе урбанофлоры нами не рассматриваются.

На территории Петрозаводска выявлен 171 вид лишайников, которые относятся к 73 родам, 34 семействам, 14 порядкам, 4 классам и одному отделу *Ascomycota*. Ведущими семействами являются *Parmeliaceae* (28 видов), *Cladoniaceae* (24 вида), *Lecanoraceae* (16 видов) и *Physciaceae* (16 видов). Такое расположение ведущих семейств характерно для лихенобиоты бореальной зоны. Значительное разнообразие лишайников на территории Петрозаводска обусловлено географическим положением города, сохранением на его территории участков естественной растительности, среди которых особое место занимают лесные и скальные участки, разнообразием природных и антропогенных субстратов, обеспечивающих поселение и развитие лишайников. Своеобразную группу лишайников (50 видов) формируют виды, которые в городских условиях осваивают антропогенные субстраты – стены и крыши домов, деревянные заборы и т. п. На территории города можно познакомиться с основными видами лишайников, типичных для таежной зоны. В городе отмечены местообитания 4 редких видов лишайников [6].

Таким образом, территория Петрозаводска характеризуется высоким видовым разнообразием водорослей, мохообразных, сосудистых растений и лишайников (рис. 4). В городе распространены не менее 1879 видов организмов, которые относятся к 851 роду, 289 семействам, 134 порядкам, 42 классам, 18 отделам, 3 царствам (Дробянки, Растения, Грибы), 2 надцарствам (Прокариоты и Эукариоты) живой природы. Вместе с автотрофными бактериями они формируют автотрофный компонент городской экосистемы.

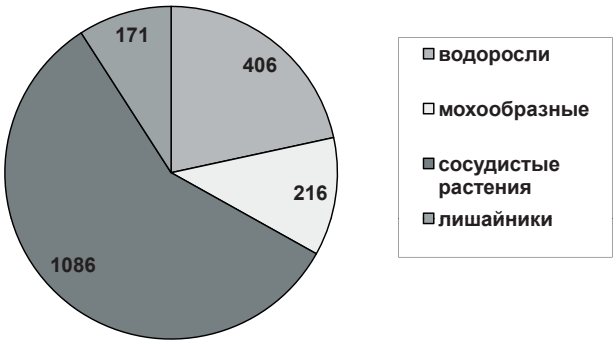


Рис. 4. Видовое разнообразие водорослей, мохообразных, сосудистых растений и лишайников, число видов

В Петрозаводске отмечено произрастание 35 редких видов, включенных в Красную книгу Республики Карелия [6]: это 5 видов мохообразных, 26 видов сосудистых растений, 4 вида лишайников. Большинство из них приурочено к естественным лесным, луговым, болотным, прибрежно-водным растительным сообществам, которые в северном городе представляют своеобразные убежища для произрастания редких видов растений и лишайников.

Полученные результаты свидетельствуют о высоком видовом разнообразии растений и лишайников на урбанизированных территориях Севера на примере города Петрозаводска. Гетерогенность условий городской среды, мозаичность почвенного и растительного покрова, экотонные эффекты обеспечивают формирование специфического явления – урбанистической концентрации видов. Представленные материалы являются основой мониторинга видового состава фототрофного компонента экосистемы крупного города таежной зоны и ежегодного пополнения систематических списков растений и лишайников города за счет новых флористических находок.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипина Г. С. Урбанофлора Карелии. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2002. 200 с.
2. Антипина Г. С., Шуйская Е. А., Гнатюк Е. П., Рохлова Е. Л. Аннотированный список интродуцированных видов травянистых растений, культивируемых в городе Петрозаводске // 2012, Hortus bot. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http:// hb.karelia.ru
3. Климат Карелии: изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 224 с.
4. Кравченко А. В. Конспект флоры Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 403 с.
5. Кравченко А. В., Гнатюк Е. П., Кузнецов О. Л. Распространение и встречаемость сосудистых растений по флористическим районам Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. 75 с.
6. Красная книга Республики Карелия. Петрозаводск: Карелия, 2007. 364 с.
7. Морозова Р. М., Федорец Н. Г. Земельные ресурсы Карелии и их охрана. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 152 с.
8. Раменская М. Л. Анализ флоры Мурманской области и Карелии. Л.: Наука, 1983. 213 с.
9. Растения и лишайники города Петрозаводска. Аннотированные списки видов / Под ред. Г. С. Антипиной. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2010. 208 с.
10. Тахтаджян А. Л. Флористические области Земли. Л.: Наука, 1978. 247 с.

Antipina G. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

ALGAE, HIGHER PLANTS, AND LICHENS OF PETROZAVODSK: SPECIES DIVERSITY

The urban flora of the region is an important and separate object of floristic studies. The purpose of the study is to analyze species diversity of the wide spread plants growing on the territory of Petrozavodsk: algae, mosses, lichens, and vascular plants. The research was carried out during the 1982–2012 period. Species composition of the plants and lichens within administrative boundaries of Petrozavodsk was studied. Taxa of the plants are regarded in their "broad sense" (s. l.) Urban ecosystem includes algae (at least 406 species), bryophytes (216 species), vascular plants (1086 species), and lichens (171 species), the total amount reaches about 2,000 species. They belong to 851 genera, 289 families, 134 orders, 42 classes, 18 divisions, three kingdoms (Bacteria, Plants, Fungi), and 2 upper kingdoms (Prokaryotes and Eukaryotes). The growth of 35 rare species on the territory of Karelia was registered (5 species of mosses, 26 species of vascular plants, 4 species of lichens). Development of the phenomenon characteristic of the city environment – urban concentration of species in the city ecosystem – is caused by heterogeneity of the urban environment, mosaic structure of the soil layer, and vegetation cover. The obtained data are used for monitoring phototrophic composition of the large taiga city ecosystem.

Key words: algae, mosses, vascular plants, lichens, flora, cultivated plants

REFERENCES

1. Antipina G. S. *Urbanoflora Karelii* [Urbanoflora of Karelia]. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2002. 200 p.
2. Antipina G. S., Shuyskaya E. A., Gnatyuk E. P., Rokhlova E. L. Annotirovannyy spisok introdutsirovannykh vidov travyanistykh rasteniy, kul'tiviruemykh v gorode Petrozavodske [Annotated list of introduced species of herbaceous plants cultivated in Petrozavodsk]. *Hortus bot.* 2012. Available at: http://garden.karelia.ru/bgm_data/18.pdf
3. *Klimat Karelii: izmenchivost' i vliyanie na vodnye ob"ekty i vodosbory* [Climate of Karelia: variability and impact on water objects and watersheds]. Petrozavodsk, KarSC Publ., 2004. 224 p.
4. Kravchenko A. V. *Konspekt flory Karelii* [Summary of Karelian flora]. Petrozavodsk, KarSC Publ., 2007. 403 p.
5. Kravchenko A. V., Gnatjuk E. P., Kuznetsov O. L. *Rasprostranenie i vstrechaemost' sosudistykh rasteniy po floristicheskim rayonam Karelii* [Distribution and occurrence of vascular plants in floristic regions of Karelia]. Petrozavodsk, KarSC Publ., 2000. 75 p.
6. *Krasnaya kniga Respubliki Kareliya* [Red Book of the Republic of Karelia]. Petrozavodsk, Karelia Publ., 2007. 364 p.
7. Morozova R. M., Fedorets N. G. *Zemel'nye resursy Karelii i ikh okhrana* [Land Resources of Karelia and their protection]. Petrozavodsk, KarSC Publ., 2004. 152 p.
8. Ramenskaya M. L. *Analiz flory Murmanskoy oblasti i Karelii* [Analysis of the flora of the Murmansk region and the Republic of Karelia]. Leningrad, Nauka Publ., 1983. 213 p.
9. *Rasteniya i lishayniki goroda Petrozavodska. Annotirovannye spiski vidov* [Plants and Lichens of Petrozavodsk. Annotated lists of species]. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2010. 208 p.
10. Takhtadzhyan A. L. *Floristicheskie oblasti Zemli* [Floristic regions of the Earth]. Leningrad, Nauka Publ., 1978. 247 p.

Поступила в редакцию 05.05.2012

Март, № 2 **Биология** **2013**

УДК 581.08.132:[574.24:581]

СТАНИСЛАВ НИКОЛАЕВИЧ ДРОЗДОВ
доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт биологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
drozdov@krc.karelia.ru

ЕКАТЕРИНА СТАНИСЛАВОВНА ХОЛОПЦЕВА
кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт биологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
holoptseva@krc.karelia.ru

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В ИССЛЕДОВАНИИ ЭКОЛОГО-ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТЕНИЙ

Успешное выращивание растений и тем более введение в культуру новых видов возможно, если почвенно-климатические условия региона соответствуют их экологической характеристике. В настоящее время такая оценка базируется на многолетних метеоролого-фенологических наблюдениях с последующим их регрессионным анализом, но и это не гарантирует получения достаточно полной информации. Возрастание роли экологических показателей в характеристике генотипа, учитывая изменения климата, требует их перевода из качественного описания в количественное. Последнее стало возможным в связи с развитием фитотроники и вычислительной техники, которые обеспечивают постановку и проведение многофакторных планируемых экспериментов на базе системного подхода. Для этих целей наиболее объективным показателем реакции интактных растений на условия внешней среды является их CO_2-обмен, оперативно передающий информацию о состоянии объекта в данный момент времени и доступный для непрерывных измерений. Результаты исследований представляются в виде уравнений регрессии, связывающих «отклик» растения – интенсивность нетто-фотосинтеза – с переменными в опыте факторами среды – светом и температурой. Показатели факторов внешней среды, обеспечивающие оптимальные величины процесса фотосинтеза, можно рассматривать как количественную экологическую характеристику экотипа (сорта) на конкретной фазе его развития. Полученные знания могут найти применение в селекционной работе, интродукции растений, прогнозировании влияния изменения климата на границы ареалов распространения видов, в географическом и внутрихозяйственном размещении растительных культур, особенно в защищенном грунте и т. д.

Ключевые слова: методика, CO_2-обмен, нетто-фотосинтез, экологическая характеристика растений

Широкое почвенно-климатическое разнообразие территории России, даже в пределах одного географического региона, диктует необходимость выведения сортов, эколого-физиологическая характеристика которых отвечает конкретным условиям их выращивания [6], [16]. Это требует всестороннего знания разных показателей. Но если необходимые почвенно-климатические данные в настоящее время могут быть получены в достаточно полном объеме, то эколого-физиологическая характеристика генотипа (сорта) – в лучшем случае только на качественном уровне. В то же время возрастание роли экологических показателей в характеристике генотипа, особенно в связи с изменениями климата, требует их перевода из качественного описания в количественное.

В настоящее время эколого-физиологическая оценка растений в естественных и искусственно созданных ценозах чаще всего базируется на многолетних метеоролого-фенологических наблюдениях, показателях продуктивности и морфо-анатомической характеристике растений. Сами объекты являются результатом длительного периода их жизнедеятельности, включающего широкую амплитуду влияния комплекса факторов внешней среды. Это не позволяет определить их дифференцированного воздействия на формирование конкретных функций и структур организма. Физиологические показатели используются гораздо реже, в то время как именно они отражают пластичность организма и возможность его выживания в экстремальных условиях среды. При этом эпизодические, многократные их определения в природных условиях или в однофакторном эксперименте не позволяют прогнозировать динамику процесса из-за влияния на него различного сочетания сопутствующих факторов среды и не менее сильного их последействия. Даже многолетний планируемый сбор экспериментального материала в естественных условиях внешней среды со строгой регистрацией ее динамики и последующим регрессионным анализом не гарантирует количественного определения влияния конкретного фактора на исследуемый биологический процесс из-за возможного отсутствия нужного сочетания интенсивности факторов внешней среды в собранном материале [9].

Развитие фитотроники, обеспечивающей получение регулируемых условий внешней среды, и вычислительной техники предоставило возмож-

© Дроздов С. Н., Холопцева Е. С., 2013

ность осуществления в биологии системных исследований и проведения активных многофакторных планируемых экспериментов. Это позволяет перейти от изучения качественных зависимостей к их количественным выражениям, к определению силы и закономерности влияния исследуемых факторов среды различной интенсивности на биологические процессы, получить экологическую характеристику генотипа, сорта [9].

Широко распространенный в биологии молекулярно-биохимический подход вскрывает состав и структуру объекта, но не может ответить на вопрос об их взаимодействии, об эмерджентных свойствах системы, возникающих лишь на достаточно высоком уровне ее организации [7]. Ответы на эти вопросы могут быть получены только на основе системного подхода [14], так как для биосистемы первичной является организующая роль в отношении составляющих ее взаимосвязанных элементов, свойства которых в значительной мере обусловлены вхождением в систему. Элементы не играют однозначной роли в функционировании биосистемы: в одних и тех же процессах могут участвовать разные составляющие, и наоборот, одни и те же элементы могут осуществлять разные функции. Если аналитический метод позволяет судить о составе объекта, то системный подход позволяет показать, как организована его жизнедеятельность, даже абстрагируясь от его состава. Информативность молекулярного подхода возрастает в сочетании с системным и, главное, получает реальную достоверность при наличии сведений о состоянии живого объекта, зависящего от многих внутренних и внешних факторов. Так, один и тот же внешний фактор оказывает разное влияние на направленность биохимических процессов в зависимости от его интенсивности, вида и даже генотипа растений. В частности, температура 30 °С обеспечивает, при других соответствующих условиях внешней среды, оптимум нетто-фотосинтеза на ранних фазах развития кукурузы, в то же время у всходов огурца индуцирует процессы адаптации к теплу, а у рассады капусты белокочанной – повреждения. Аналогичная картина наблюдается и при действии умеренных температур: так, в частности, температура 20 °С, обеспечивающая оптимум видимого фотосинтеза у большинства сельскохозяйственных культур, у хлопчатника является закаливающей к холоду, а у картофеля и овсяницы луговой – к теплу [4], [20], [21].

Необходимость достижения максимальной информативности проводимых опытов и представления полученных данных в сжатой и наглядной форме привела к идее планирования эксперимента, то есть к использованию определенных схем получения статистически надежных данных. Результаты экспериментов, поставленных по таким схемам, могут быть представлены весьма компактно, в виде полиномов – уравнениями регрессии. Последние и являются, в сущности, математическими моделями исследуемых процессов с эмпирическими константами. Успешность эмпирического моделирования и объективность моделей определяются качеством эксперимента, полнотой охвата им многообразия связей растения со средой. Однако привлечение большего числа переменных факторов обуславливается длительностью и трудоемкостью эксперимента и возможностью обработки полученных результатов [13], [19].

Одним из путей решения проблемы являются исследования закономерностей влияния факторов внешней среды на биологические процессы в регулируемых условиях среды в активном эксперименте с планированием схем опытов, позволяющих получить статистически надежные данные при ограниченном числе вариантов и, соответственно, сокращенных трудозатратах. Однако радиус обследуемого пространства не должен выходить за пределы технических возможностей установки и биологических особенностей объекта – его зональной реакции на влияние интенсивности факторов внешней среды, что наиболее обстоятельно изучено на примере температурного фактора [3], [8]. Анализ литературных данных и проведенные исследования показали [4], [5], [21], что диапазон действующих в природе температур по влиянию на растения подразделяется на пять зон – фоновую и по две закаливающих и повреждающих в областях повышенных и пониженных их значений. Границы зон и потенциальная терморезистентность растений находятся под контролем генома и специфичны для генотипа, но изменяются в онтогенезе и под влиянием условий внешней среды.

Изменения температуры в пределах фоновой зоны не оказывают влияния на направленность метаболизма и терморезистентность растений и не имеют последействия. Действие более низких или высоких, чем фоновой зоны, температур индуцирует изменение метаболизма растений и повышение их терморезистентности. Величина этих изменений и их последействие зависят от дозы воздействия и биологических особенностей генотипа. Эффект действия закаливающих температур возрастает по мере удаления от границы фоновой зоны, а по мере повышения устойчивости растений происходит расширение этой зоны. Повреждающие температуры вызывают нарушение энергообеспечения клеток и в конечном итоге их гибель.

Особое значение при разработке программы многофакторного планируемого эксперимента имеет выбор исследуемых показателей – «отклика», функция которого должна всесторонне отражать свойство объекта, определяться количественно, быть статистически эффективной, иметь физический смысл и легко вычисляться. Наиболее объективным показателем реакции растений на условия среды выступает хозяйственно по-

лезный урожай, но, так как он является итогом жизненного цикла растений в вегетационный период, вклад в него отдельных факторов оценить практически невозможно. Поэтому в активном многофакторном планируемом эксперименте для определения физиолого-экологической характеристики генотипа (сорта) наиболее объективным показателем реакции на условия внешней среды является CO_2-обмен интактных растений, оперативно отражающий реакцию растений на изменения условий внешней среды и доступный для инструментального непрерывного измерения без контакта с растением [12], [18].

В зависимости от задачи исследования для изучения влияния на растения могут быть выбраны разные факторы внешней среды: температура почвы и воздуха, свет, фотопериод, концентрация углекислоты, влажность, физиологически активные вещества и т. д.

Так как факторы внешней среды имеют различную размерность – °С, Вт/м^2, клк, г и т. д., реализация активного эксперимента возможна лишь в том случае, если все переменные будут выражены в сопоставимых единицах. Это достигается переводом реальных единиц в относительные, нормированные. Для этого верхний уровень исследуемого фактора в опыте обозначается как +1, минимальный – 1, а средний – обычным 0.

Совместная обработка данных эксперимента методом нелинейного регрессионного компьютерного анализа с применением соответствующих программ позволяет определить коэффициенты уравнения регрессии в кодированных единицах, которые легко пересчитываются в натуральные. Коэффициенты уравнения в кодированных единицах весьма информативны: они отражают силу влияния фактора (членов уравнения) на реакцию, отклик растения. Ведущим является фактор с наибольшей величиной коэффициента.

Планирование многофакторных экспериментов, методики их проведения и обработки экспериментального материала проводится на основании теории планирования экспериментов [1], [9]. Планы предусматривают обследование всего пространства переменных факторов при наименьшем числе точек опытов, но без потери точности. В качестве примера приводим план двухфакторного эксперимента (табл. 1).

Исследуемые растения выращиваем в регулируемых условиях среды в песчаной культуре при поливе питательным раствором, дополненном микроэлементами, при оптимальных для исследуемой культуры pH, фотопериоде, температуре воздуха и почвы и интенсивности освещенности. Посев проводим калиброванными проросшими семенами. По достижению заданной схемой плана эксперимента фазы развития сосуды с растениями, соответствующими по внешним признакам стандарту (число листьев, их размер, диаметр и высота стебля, отсутствие внешних повреждений и т. д.), переносим в установку для исследования CO_2-газообмена, где по выбранному плану проводим активный многофакторный эксперимент. Ограниченное количество растений в опыте и отзывчивость «отклика» на всевозможные отклонения в исследуемом материале требует высококачественной подготовки, обеспечивающей его однородность. Поэтому, помимо проверки на соответствие внешнему стандарту, желательно определение выравненности по CO_2-обмену при условиях выращивания, которое не должно превышать 10 %.

Таблица 1

Несимметричный квази-D-оптимальный план

Ступень плана	Уровни факторов (X_1 – освещенность, X_2 – температура воздуха)		Y, отклик растения
	X_1	X_2	
1	-1	-1	Y_1
2	1	-1	Y_2
3	-1	1	Y_3
4	1	1	Y_4
5	1	0	Y_5
6	0	1	Y_6
7	0	0	Y_7

Погрешность измерения интенсивности освещенности и температуры не должна превышать 0,5 %, концентрации углекислоты и скорости воздушного потока – 2,5 %. Во время 40–60-минутной экспозиции на каждой ступени плана при помощи газоанализатора регистрируем значение разности содержания углекислоты в токе воздуха на входе и выходе из установки и пересчитываем на еди-ницу сухого вещества целых растений. При условии выравненности материала и указанной выше точности измерения экспериментальные модели имеют погрешность в пределах оптимальных зон факторов до 5 %. Расчет ассимиляции углекислоты растениями на каждой ступени двухфакторного эксперимента по несимметричному квази-D-оптимальному трехуровневому плану и обработка экспериментальных данных методом множественного регрессионного анализа позволяют получить модель влияния исследуемых факторов внешней среды (например, интенсивности света и температуры) на нетто-фотосинтез интактных растений:

$$NP = a_0 + a_1E + a_2t + a_3Et + a_4E^2 + a_5t^2,$$

где NP – интенсивность нетто-фотосинтеза, мг CO_2 на 1 г сухой массы в 1 ч; E – освещенность, Вт/м^2; t – температура воздуха, ºС; a_0–a_5 – коэффициенты, определенные по опытным данным.

Желательно иметь интенсивность освещенности растений в установке до 600 Вт/м^2, близкой по качеству к естественному свету, которая может быть обеспечена тремя лампами ДРЛФ-400, тремя галогеновыми лампами накаливания КГ-1000 или КГ-500 и водным экраном со слоем воды 3–5 см [17].

Силу влияния различной интенсивности фактора на нетто-фотосинтез интактных растений

рассчитываем по тангенсу угла наклона температурных и световых кривых на интересующей части исследуемого фактора [11]. За фоновую зону принимаем условия среды, обеспечивающие интенсивность газообмена выше 90 % от максимального [10], к которой примыкают зоны закаливания [4].

Определение эколого-физиологической характеристики нетто-фотосинтеза ряда сортов 3 видов растений показало (табл. 2), что как по уровню потенциального видимого фотосинтеза, так и по светотемпературным условиям, обеспечивающим его достижение, исследуемые сорта значительно различаются. Наиболее высокий потенциальный максимум нетто-фотосинтеза имеют бобовые, что подтверждают литературные данные о его роли у азотфиксирующих культур [15]. В то же время проведенные исследования показали значительное внутривидовое эколого-физиологическое разнообразие, в ряде случаев перекрывающее межвидовое.

Таким образом, использование многофакторных планируемых экспериментов в регулируемых условиях внешней среды на основе системного подхода позволяет перейти от качественной к количественной характеристике CO_2-газообмена генотипа. Это может найти применение в селекционной работе, интродукции растений, прогнозировании влияния изменения климата на границы ареалов распространения видов, географическом и внутрихозяйственном размещении сельскохозяйственных культур, особенно в защищенном грунте и т. д.

Изучение эколого-физиологической характеристики ряда одновидовых сортов показало их широкое внутривидовое разнообразие. Поэтому нельзя судить об экологической характеристике вида по изучению одного из его представителей, а необходимо определить ее у ряда контрастных по этому показателю экотипов или сортов.

Таблица 2

Потенциальный максимум нетто-фотосинтеза интактных растений на ранних фазах их развития и свето-температурные условия внешней среды, обеспечивающие его достижение

Вид, сорт	Нетто-фотосинтез, мг CO_2 /г · ч	Освещенность, Вт/м^2	Температура воздуха, ^{0}С	
			максимальная	оптимальная
Картофель (*Solanum tuberosum*)				
с. Пушкинец	10,6	500	24	15–35
с. Елизавета	11,5	420	17	6–28
с. Нида	13,3	440	20	12–28
Клевер (*Trifolium pratense L.*)				
с. Тимирязевец	18,1	390	20	12–28
с. Нива	20,2	460	24	15–34
с. Вик	30,0	550	32	20–45
Гречиха (*Fagopyrum esculentum M.*)				
с. Богатырь	18,0	470	45	8–24
с. Тройка	20,0	420	18	11–24
с. Молва	16,0	380	10	4–21

Учитывая, что фотосинтез является одним из основополагающих процессов продуктивности растений, чутко реагирующим на изменения внешней среды, интенсивность ее факторов, обеспечивающих достижение оптимума нетто-фотосинтеза интактных растений, можно рассматривать как экологический оптимум исследуемого генотипа. При этом статистические модели, полученные на основании планируемых многофакторных экспериментов и связывающие «отклик» растения с условиями внешней среды, являются эколого-физиологической характеристикой генотипа (сорта) на исследуемой фазе его развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голикова Т. И., Панченко Л. А., Фридман М. З. Каталог планов второго порядка. Вып. 47. Ч. 1. М., 1974. 383 с.
2. Дроздов С. Н., Сычева З. Ф., Будыкина Н. П., Курец В. К. Эколого-физиологические аспекты устойчивости растений к заморозкам. Л.: Наука, 1977. С. 1–227.
3. Дроздов С. Н., Курец В. К., Титов А. Ф. Терморезистентность активно вегетирующих растений. Л., 1984. 168 с.
4. Дроздов С. Н., Курец В. К. Перспективы применения системного подхода в физиологических исследованиях // Физиология растений. 1984. Т. 51. № 4. С. 617–621.
5. Дроздов С. Н., Курец В. К. Некоторые аспекты экологической физиологии растений. Петрозаводск, 2003. 172 с.
6. Жученко А. А. Адаптивная стратегия селекции растений. Т. 1. М.: Агроруд, 2003. 780 с.
7. Кочерина Н. В., Драгавцев В. А. Введение в теорию эколого-генетической организации полигенных признаков растений и теорию селекционных индексов. СПб.: АФИ, 2008. 87 с.
8. Курец В. К., Попов Э. Г. Моделирование продуктивности и холодоустойчивости растений. Л.: Наука, 1979. 160 с.
9. Курец В. К., Попов Э. Г. Статистическое моделирование системы связей растение – среда. Л.: Наука, 1991. 152 с.
10. Лархер В. Экология растений. М.: Мир, 1978. 184 с.
11. Малкина И. С., Цельникер Ю. Л., Якшина А. М. Фотосинтез и дыхание подроста. М.: Наука, 1970. 183 с.
12. Молчанов А. Г. Баланс CO_2 в экосистемах сосняков и дубрав в разных лесорастительных зонах. М., 2007. 284 с.
13. Налимов В. В. Теория эксперимента. М.: Наука, 1971. 207 с.
14. Пресман А. С. Организация биосистемы и ее космические связи. М.: Геосинтез, 1997. 237 с.
15. Ржанова Е. И. Физиология зернобобовых культур // Физиология сельскохозяйственных растений. М., 1970. Т. 6. С. 5–232.
16. Романенко Г. А. Сельскохозяйственная наука в России в 21 веке // Вестник РАСХН. 1999. № 2. С. 3–7.
17. Таланов А. В., Безденежных В. А., Хилков Н. И. Установка для исследования газообмена интактных растений // Влияние факторов внешней среды и физиологически активных веществ на терморезистентность и продуктивность растений. Петрозаводск: КФАН СССР, 1982. С. 142–150.
18. Тооминг Х. Г. Солнечная радиация и формирование урожая. Л., 1977. 23 с.
19. Федоров В. Д., Гильманов Т. Г. Экология. М.: МГУ, 1980. 464 с.

20. D r o z d o v S. N., T i t o v A. F., B a l a g u r o v a N. I., K r i t e n k o S. P. The effect of temperature on cold and heat resistance of growing plants cold-resistant species // J. Experimental Botany. 1984. Vol. 35. № 180. P. 1603–1608.
21. D r o z d o v S. N., T i t o v A. F., T a l a n o v a V. V., K r i t e n k o S. P., S h e r u d i l o E. G., A k i m o v a T. B. The Effect of Temperature on Cold and Heat Resistance of Growing Plants // J. Experimental Botany. 1984. Vol. 35. № 180. P. 1595–1602.

Drozdov S. N., Institute of Biology, Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)
Kholoptseva E. S., Institute of Biology, Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

POSSIBILITY OF USING MULTIFACTOR EXPERIMENTS IN STUDY OF PLANTS' ECOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL CHARACTERISTICS

A successful cultivation of the plants and an introduction to the culture of new species are possible if the soil and climatic conditions of the region correspond to their ecological characteristics. This assessment is based on the long-term meteorological-phenological observations with subsequent regression analysis. However, it does not guarantee the acquisition of complete and sufficient information. With the growth of the role played by the ecological parameters in genotype characterization, particularly in connection with potential climate change, it becomes essential that their qualitative description should be transformed into quantitative one. This became possible with the development of phytotronics and computers, which makes it feasible to provide planning and to conduct multifactor experiments based on a systematic approach. The most objective indicator of the intact plants' response to the impact of environmental conditions is their CO_2-exchange. It quickly conveys information about the state of the object at a particular moment and is available for continuous measurements. The research results are presented in the form of regression equations connecting the plants "response" – the net photosynthesis intensity – and the factors used in the experiment as variables – light and temperature. The values of the environmental factors provisional of the net photosynthesis can be regarded as a quantitative ecological ecotype (variety) characteristic of a specific phase of its development. Obtained knowledge can be used in selection, plant introduction, prognosis of climate change effects on species distribution, geographical planning of plants' planting, greenhouse plants' planting

Key words: methodology, CO_2-exchange, net-photosynthesis, ecological characteristics of plants

REFERENCES

1. G o l i k o v a T. I., P a n c h e n k o L. A., F r i d m a n M. Z. *Katalog planov vtorogo poryadka* [Catalogue of plans of the second order]. № 47. Part 1. Moscow, 1974. 383 p.
2. D r o z d o v S. N., S y c h e v a Z. F., B u d y k i n a N. P., K u r e t s V. K. *Ekologo-fiziologicheskie aspekty ustoychivosti rasteniy k zamorozkam.* [Ecological and physiological aspects of plant resistance to frost]. Leningrad, Nauka Publ., 1977. P. 1–227.
3. D r o z d o v S. N., K u r e t s V. K., T i t o v A. F. *Termorezistentnost' aktivno vegetiruyushchikh rasteniy* [Thermoresistance of active vegetative plants]. Leningrad, 1984. 168 p.
4. D r o z d o v S. N., K u r e t s V. K. Some prospects of systematic approach in physiological studies. [Perspektivy primeneniya sistemnogo podkhoda v fiziologicheskikh issledovaniyakh]. *Fiziologiya rasteniy* [Plant Physiol]. 1984. Vol. 51. № 4. P. 617–621.
5. D r o z d o v S. N., K u r e t s V. K. *Nekotorye aspekty ekologicheskoy fiziologii rasteniy* [Some environmental aspects of plant physiology]. Petrozavodsk, 2003. 172 p.
6. Z h u c h e n k o A. A. *Adaptivnaya strategiya selektsii rasteniy* [Adaptive strategy of plant selection]. Vol. 1. Moscow, 2003. 780 p.
7. K o c h e r i n a N. V., D r a g a v t s e v V. A. *Vvedenie v teoriyu ekologo-geneticheskoy organizatsii poligennykh priznakov rasteniy i teoriyu selektsionnykh indeksov* [Introduction to environmental and genetic organization of polygenic traits of plants and the theory of selection indices]. St. Petersburg, AFI Publ., 2008. 87 p.
8. K u r e t s V. K., P o p o v E. G. *Modelirovanie produktivnosti i kholodoustoychivosti rasteniy* [Modelling of growth and cold resistance of plants]. Leningrad, Nauka Publ., 1979. 160 p.
9. K u r e t s V. K., P o p o v E. G. *Statisticheskoe modelirovanie sistemy svyazey rastenie – sreda* [Statistical modeling of plant-environment relationships]. Leningrad, Nauka Publ., 1991. 152 p.
10. L a r k h e r V. *Ekologiya rasteniy* [Plant ecology]. Moscow, Mir Publ., 1978. 184 p.
11. M a l k i n a I. S., T s e l ' n i k e r Yu. L., Y a k s h i n a A. M. *Fotosintez i dykhanie podrosta* [Photosynthesis and respiration of undergrowth]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 183 p.
12. M o l c h a n o v A. G. *Balans CO_2 v ekosistemakh sosnyakov i dubrav v raznykh lesorastitel'nykh zonakh* [CO_2 balance in pine and oak ecosystems in different areas of forest growth]. Moscow, 2007. 284 p.
13. N a l i m o v V. V. *Teoriya eksperimenta* [The theory of the experiment]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 207 p.
14. P r e s m a n A. S. *Organizatsiya biosistemy i ee kosmicheskie svyazi* [Biosystem organization and space communications]. Moscow, Geosintez Publ., 1997. 237 p.
15. R z h a n o v a E. I. Physiology legumes [Fiziologiya zernobobovykh kul'tur]. *Fiziologiya sel'skokhozyaystvennykh rasteniy* [Physiology of crop plants]. Moscow, 1970. T. 6. P. 5–232.
16. R o m a n e n k o G. A. Agricultural science in Russia in the 21st Century [Sel'skokhozyaystvennaya nauka v Rossii v 21 veke]. *Vestnik RASKhN* [Journal of Agricultural Sciences]. 1999. № 2. P. 3–7.
17. T a l a n o v A. V., B e z d e n e z h n y k h V. A., K h i l k o v N. I. Apparatus for studying gas exchange of intact plants [Ustanovka dlya issledovaniya gazoobmena intaktnykh rasteniy]. *Vliyanie faktorov vneshney sredy i fiziologicheski aktivnykh veshchestv na termorezistentnost' i produktivnost' rasteniy* [Influence of environmental factors and physiologically active substances on thermoresistance and plant productivity]. Petrozavodsk, KFAN USSR, 1982. P. 142–150.
18. T o o m i n g Kh. G. *Solnechnaya radiatsiya i formirovanie urozhaya* [Solar radiation and formation of a crop]. Leningrad, 1977. 23 p.
19. F e d o r o v V. D., G i l ' m a n o v T. G. *Ekologiya* [Ecology]. Moscow, MGU, 1980. 464 p.
20. D r o z d o v S. N., T i t o v A. F., B a l a g u r o v a N. I., K r i t e n k o S. P. The effect of temperature on cold and heat resistance of growing plants cold-resistant species [Vliyanie temperatury na kholodo- i teploustoychivost' vegetiruyushchikh rasteniy kholodoustoychivykh vidov]. *Eksperimental'naya botanika* [Experimental Botany]. 1984. Vol. 35. № 180. P. 1603–1608.
21. D r o z d o v S. N., T i t o v A. F., T a l a n o v a V. V., K r i t e n k o S. P., Sherudilo E. G., Akimova T. B. The Effect of Cold and Heat Resistance of Growing Plants [Vliyanie temperatury na kholodo- i teploustoychivost' vegetiruyushchikh rasteniy]. *Eksperimental'naya botanika* [Experimental Botany]. 1984. Vol. 35. № 180. P. 1595–1602.

Поступила в редакцию 17.09.2012

Март, № 2 **Биология** **2013**

УДК 574.52

АНАТОЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ЛУКИН
доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (Апатиты, Российская Федерация)
alukin@inbox.ru

ДМИТРИЙ ЭРНЕСТОВИЧ ИВАНТЕР
кандидат биологических наук, директор Северного научно-исследовательского института рыбного хозяйства, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
ivanter@research.karelia.ru

ДЕНИС СЕРГЕЕВИЧ БЕЛЯЕВ
руководитель, Северо-Западное территориальное управление Росрыболовства (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
info@sztufar.ru

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИХТИОФАУНЫ ВЫГОЗЕРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА*

Проведена ревизия ихтиофауны одного из крупнейших водных объектов Республики Карелия – Выгозерского водохранилища. В водохранилище обитают 17 видов рыб, принадлежащих к 9 семействам. Ихтиофауна Выгозерского водохранилища до сих пор недостаточно изучена и требует серьезных исследований. Дано описание биологии некоторых видов рыб. Проанализирована статистика промысловых уловов за последние 80 лет. Установлено, что за время формирования водохранилища численность лососевых и сиговых значительно снизилась, а вновь вселенные рыбы (судак и корюшка) натурализовались и являются одними из основных промысловых видов. Промысловый лов рыб на Выгозерском водохранилище в настоящее время находится в депрессивном состоянии. Уменьшился вылов не только ценных промысловых видов (ряпушка, сиг, судак), но и массовых видов (плотва, язь, окунь). Для изменения сложившейся ситуации на водохранилище должны проводиться работы, направленные на восстановление численности лососевых и сиговых рыб.

Ключевые слова: промысел, рыбное сообщество, динамика уловов, биология рыб

Выгозерское водохранилище – крупнейшая озерно-речная система Карелии многоцелевого хозяйственного использования. Воды Выгозера используются для нужд энергетики, целлюлозно-бумажной и алюминиевой промышленности, судоходства, предприятий сферы обслуживания, рыболовства и рекреации. Выгозеро занимает третье место по площади среди озер Карелии (после Ладожского и Онежского озер). В 1931 году во время строительства Беломорско-Балтийского канала и каскада Выгских ГЭС озеро было превращено в Выгозерско-Ондское водохранилище [16]. В 1936 году был введен в строй Сегежский ЦБК, который до недавнего времени являлся одним из крупнейших промышленных узлов в Карелии. Промышленные выбросы Сегежского ЦБК во многом определяют антропогенную нагрузку на водохранилище. Тем не менее на акватории водоема до сих пор существуют промышленный лов рыбы и активное любительское и спортивное рыболовство. Водохранилище является излюбленным местом отдыха жителей не только Карелии, но и других регионов России.

Цель предлагаемой работы – исследование современного состояния рыбного сообщества Выгозерского водохранилища.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Площадь водной поверхности Выгозерского водохранилища – 1159 км², общая площадь (с островами) – 1285 км². Наибольшая длина равна 89,2 км, наибольшая ширина – 23,5 км. Водохранилище вытянуто в общем направлении с северо-запада на юго-восток, расчленено на отдельные части и большие заливы. Выгозеро – неглубокий водоем со сложным строением рельефа дна. Средняя глубина равна 6,2 м, наибольшая глубина около 18 м. На область глубин 0–4 м приходится 30 % площади дна, на 0–7 м – около 52 %, на глубины свыше 7 м (дно прежнего Выгозера) – около 48 %. На обширной затопленной акватории водохранилища имеются многочисленные отмели и луды. Подобная морфология свидетельствует о большом рыбохозяйственном потенциале Выгозерского водохранилища.

В основу работы положены архивные данные, материалы многолетних ихтиологических исследований (с 1982 года и по настоящее время), собранные во время экспедиций, проверок промысловых бригад и рыбаков-любителей совместно с сотрудниками управления «Карелрыбвод», и данные рыбопромысловой статистики. При проверке промысловых бригад, рыбаков-

© Лукин А. А., Ивантер Д. Э., Беляев Д. С., 2013

любителей и изъятии браконьерских сетей проводились массовые промеры размерно-весовых показателей рыб и отбиралась чешуя для определения возраста.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Список видов рыб Выгозерского водохранилища за последние 70–80 лет несколько раз менялся (табл. 1). По опросным данным местных рыбаков-любителей, в придаточной системе Выгозерского водохранилища кроме видов, перечисленных в табл. 1, встречаются минога, кумжа, хариус, гольян, колюшки. Об исследованиях миног р. Выг пишет Л. С. Берг [4], в работах И. Н. Арнольда [3] упоминается озерная форель. Все это свидетельствует о том, что ихтиофауна Выгозерского водохранилища по-прежнему недостаточно изучена и требует серьезных исследований. Ниже мы приводим биологическую характеристику некоторых основных промысловых видов рыб Выгозерского водохранилища.

Таблица 1

Список видов рыб Выгозерского водохранилища

Вид рыб	Годы			
	1920–30 [9]	1940–50 [6]	1960–80 [6]	2005–2012 [12]
1. Атлантический лосось *Salmo salar* L.	+	+	+	+
2. Европейская ряпушка *Coregonus albula* (L.)	+	+	+	+
3. Сиг обыкновенный *Coregonus lavaretus* (L.)	+	+	+	+
4. Хариус *Thymallus thymallus* (L.)	+	–	+	–
5. Корюшка *Osmerus eperlanus* (L.)	–	+	+	+
6. Щука *Esox lucius* (L.)	+	+	+	+
7. Плотва *Rutilus rutilus* (L.)	+	+	+	+
8. Язь *Leuciscus idus* (L.)	+	+	+	+
9. Гольян *Phoxinus phoxinus* (L.)	+	–	+	–
10. Уклейка *Alburnus alburnis* (L.)	+	–	+	+
11. Лещ *Abramis brama* (L.)	+	+	+	+
12. Судак *Stizostedion lucioperca* (L.)	–	+	+	+
13. Окунь *Perca fluviatilis* (L.)	+	+	+	+
14. Ерш *Gymnocephalus cernua* (L.)	+	+	+	+
15. Колюшка девятииглая *Pungitius pungitius* (L.)	+	–	+	–
16. Налим *Lota lota* (L.)	+	+	+	+
17. Подкаменщик обыкновенный *Cottus gobio* (L.)	+	–	+	+
Всего	15	12	17	14

Лосось. О биологии выгозерского лосося практически ничего неизвестно. Анализ литературных данных и собственные опросные исследования свидетельствуют о том, что этот вид был всегда малочисленным. Это может быть связано с тем, что пресноводная популяция лосося в Выгозерском водохранилище появилась сравнительно недавно [1]. Б. М. Александров и соавторы предполагают, что формирование выгозерского озерного лосося происходило за счет оставшейся после создания водохранилища молоди атлантического лосося (семги) [1]. Лосось (семга) поднимался в Выгозеро из Белого моря по р. Выг и правому рукаву Надвоицкого водопада. Пройдя Выгозеро, он входил в р. Сегежу для нереста. Молодь семги после 2–3 лет жизни в реке скатывалась в море, но часть ее на 1–2 года задерживалась в Выгозере, достигая размеров 30–35 см. В 1927 году на правом рукаве Надвоицкого водопада был построен лоток для сплава леса, а в 1932 году плотиной был перегорожен весь водопад. В результате доступ семги в Выгозеро был прекращен.

Опираясь на данные, полученные от местного населения, можно говорить о том, что половозрелый лосось достигает массы от 3 до 6 кг. В настоящее время численность лосося поддерживается за счет искусственного воспроизводства. Работы по вселению семги в реки Сегежу и Выг были начаты в 2004 году. С Выгского рыбоводного завода перевезено и выпущено в р. Сегежу 15 280 экз., в р. Выг – 40 320 экз. двухгодовиков семги. В мае 2005 года Карельский союз рыболовецких колхозов вселил в р. Выг 167 000 экз. семги в возрасте 4 лет при массе 800 г. В 2007 году в р. Выг было выпущено 70 800 экз. семги в возрасте 2 лет и 5000 экз. годовиков.

Промысел. Достоверных сведений об уловах лосося на Выгозере и в Выгозерском водохранилище нет. Промысел лосося всегда носил случайный характер. В настоящее время лосось периодически попадается в уловах местного населения, что свидетельствует о его наличии в Выгозерском водохранилище.

Европейская ряпушка распространена по всей акватории Выгозерского водохранилища. Тело невысокое и прогонистое. Окраска тела: спина темно-зеленая, почти черная, бока серебристо-белые, верхушка рыла темная.

Основные нерестилища ряпушки расположены в западной части и островном районе водохранилища. Нерест происходит на песчано-каменистых и илистых грунтах, на глубине до 8–9 м. Начало нереста отмечается при температуре воды в прибрежной зоне 5–6°, разгар при температуре 2–4°. Иногда нерест заканчивается уже подо льдом. Сроки нереста чаще приходятся на конец октября – начало ноября. Ряпушка становится половозрелой в возрасте 2 лет. Плодовитость колеблется от 980 (у двухлеток) до 3286 (у четырехлеток) икринок. В промысловых уловах ряпушка чаще всего представлена пятью возрастными группами (1+–5+ лет). Наиболее многочисленны двухлетние и трехлетние особи (1+–2+), которые на протяжении последних 80 лет составляют более 70 % промыслового улова (табл. 2). Сравнительный анализ ряпушки, выловленной в 1945 и 2007 годах, показывает, что в настоящее время в промысловой части популяции ряпушки преобладают особи старших

возрастных групп, а масса рыб, выловленных в наше время, выше, чем в прошлом веке (табл. 2).

Таблица 2

Размерно-весовой и возрастной состав промысловых уловов ряпушки Выгозера

Показатель	Возрастные группы				
	1+	2+	3+	4+	5+
1939 [9]					
Масса, г	8,9	12,1	16,7	21,9	–
Количество экз., %	40,7	48,9	9,1	1,3	–
1945 [9]					
Масса, г	5,34	9,33	13,2	18,4	–
Количество экз., %	82,1	14,2	1,6	0,7	
1956 [1]					
Длина АД, см	9,1	10,5	12,4	14,2	16,7
Масса, г	7,3	11,2	21,5	26,5	37,5
Количество экз., %	72–90				
2007 (наши данные)					
Длина АД, см	9,9	11,7	13,0	14,2	17,0
Масса, г	10,9	17,8	22,5	34,0	65,0
Количество экз., %	10,6	63,6	15,2	1,5	0,8

Промысел. Ряпушка наряду с сигами составляла основу промысла старого Выгозера. Ее вылов достигал 140 т (1920 год) и 75 т (1930 год), а удельный вес в общем улове – 35 %.

Статистика промысла начиная с 1930 года и до 90-годов XX века показывает значительные колебания в уловах ряпушки (9,3–75 т), составляя в среднем около 32 т. Так, например, в 1941 году было поймано всего 9 т ряпушки, но уже в 1942 году эти уловы возросли до 46,7 т, в 1943 году вылов достигал 70,2 т. В 1951–1957 годах годовой вылов ряпушки колебался от 5 до 43,6 т.

До середины 1990-х годов ее вылов в основном не превышал среднемноголетних показателей и достигал максимальных величин в 90–100 т (1991, 1992 годы). Среднегодовые уловы за 2001–2006 годы составляли 33,8 т, с колебаниями от 1,99 (2007 год) до 37,2 т (2002 год) (табл. 3). По нашим данным, более половины общих уловов приходится на любительский лов.

Таким образом, состояние популяции ряпушки можно оценить как удовлетворительное. Скорее всего, в этом случае следует говорить о недоиспользовании промыслового вида, что в первую очередь определяется экономическими условиями.

Сиг. В настоящее время в Выгозерском водохранилище обитают два вида сиговых рыб: европейская ряпушка и сиг *C. lavaretus* L., который представлен рядом экологических форм. Ранее сигов Выгозера подразделяли на две группы: озерно-речных и озерных. В каждой группе были описаны по нескольку форм сигов, отличающихся по морфологическим и биологическим особенностям, некоторым из них был присвоен статус вида [13]. С нашей точки зрения, сиги Выгозерского водохранилища и сопредельных водоемов принадлежат к полиморфному виду *Coregonus lavaretus* (Linnaeus, 1758) [13; 11].

Таблица 3

Динамика уловов некоторых видов рыбы в Выгозерском водохранилище (т)

Годы		
1937–1944	1950–1980	2001–2011
Ряпушка		
9,0–70,2 / 36,3	5–90 / 46,4	1,99–37,2 / 29,8
Сиг		
0,1–12,8 / 5,1	2–5,6 / 2,7	0,33–3,7 / 1,53
Корюшка		
–	1,2–12,6 / 9,1	1,3–0,2 / 0,6
Лещ		
30,5–76,5 / 49,6	70,2–21,5 / 35,5	17,6–29,9 / 14,0
Плотва		
74–6,3 / 40,5	8,0–14,2 / 7,1	4,0–8,0 / 5,6
Язь		
0,1–7,0 / 4,6	0,2–5,2 / 2,3	0,1–0,6 / 0,4
Судак		
–	0,2–50,4 / 20	1,3–19,5 / 11,1
Щука		
161,1–56,7 / 105,9	24,5	1,08–19,1 / 6,6
Окунь		
1,2–60,6 / 38,4	4,2–28 / 21,4	4,2–9,6 / 6,1
Налим		
22,2–59,3 / 53,1	2,6–6,7 / 4,7	1,0–10,5 / 4,3

Примечание. В числителе – максимальные и минимальные выловы рыб, в знаменателе – средние значения.

С превращением озера в водохранилище нижние участки рек, где были расположены нерестилища сига, оказались затопленными. Численность сига в 30-е годы прошлого века упала настолько, что П. В. Зыков в 1947 году писал, что сиги полностью утратили свое промысловое значение, хотя еще в 1921–1922 годах ряпушка и сиги составляли основу промысла на Выгозере [2].

По данным Б. М. Александрова и соавторов [1], превращение Выгозера в водохранилище повлияло на условия обитания и озерных сигов. Прежде наблюдалась приуроченность тех или иных форм к отдельным заливам и губам. Теперь они широко распространились по всему водохранилищу, кроме того, некоторые озерно-речные сиги стали размножаться в самом водохранилище. В результате создались условия для образования гибридов между различными экологическими формами сигов Выгозера. Подобное явление, связанное с сокращением численности и скрещиванием ряда экологических форм сигов на нерестилищах, наблюдалось нами

на Онежском озере и представляет собой вполне закономерный процесс, направленный на сохранение вида [5].

В настоящее время отсутствуют данные о наличии тех или иных экологических форм, численности популяций озерных и озерно-речных сигов. Так, по опросам местных жителей, в озере до сих пор встречается мелкий озерный сиг, которого прежде называли «арнольдовским». Длина половозрелых особей 21–30 см, в среднем 27 см; масса 70–320 г, в среднем 230 г. Половозрелость в массе наступает на пятом году жизни. В промысловых уловах встречаются особи от 4 до 8 лет.

Озерные сиги представлены несколькими формами, отличающимися линейными размерами, весом, формой тела и головы, количеством и строением жаберных тычинок. Нерест озерных сигов начинается в конце октября, на каменистых и каменисто-песчаных грунтах. Половозрелость наступает у самцов на пятом и шестом году, у самок – на шестом и седьмом году. Длина половозрелых особей от 26 до 54 см, средняя – 38 см, масса от 300 до 1600 г, в среднем 600 г. В промысловых уловах встречаются особи от 5 до 16 лет. Плодовитость этих сигов колеблется от 19 до 70 тыс. икринок в зависимости от возраста и массы. Основу уловов составляют четыре возрастные группы – от семилеток до десятилеток.

Промысел. По данным П. В. Зыкова [9], до образования Выгозерского водохранилища вылов сигов достигал нескольких десятков тонн. В период с 1937 по 1944 год наблюдается стремительное сокращение уловов сига. В 1937 году было поймано 12,8 т, а 1944-м – 0,1 т. В 1949–1980 годах уловы сига в водохранилище колебались от 2 до 5,6 т, большая их часть приходилась на озерных сигов. В настоящее время основная масса озерных сигов вылавливается в островном районе, Койкиницком заливе и в открытой части водохранилища. Уловы колеблются от 0,33 до 3,7 т (табл. 3).

Корюшка в настоящее время распространена на всей акватории водоема. В водохранилище корюшка проникла из оз. Сегозера, которое через р. Сегежу имеет сток в Выгозеро. В свою очередь, и для Сегозера корюшка является вселенцем. Ее икра была завезена из Ладожского озера в 1953–1955 годах [7].

В промысловых уловах 2000-х годов возрастной ряд корюшки насчитывал пять групп (от 1+ до 6+ лет). Доминирующее положение занимают особи 2+–3+ лет. Средняя длина корюшки 11,1 см, средняя масса – 12,0 г. Современные показатели несколько ниже тех, которые приводит в своих работах А. М. Гуляева [7]. В 60-е годы прошлого века средняя длина корюшки составляла 17 см, масса – 28 г, при колебаниях длины от 6,7 до 21,8 см и массы от 17 до 82 г.

Половозрелой корюшка Выгозера становится в возрасте 2 лет. Нерест корюшки начинается вскоре после ледохода, когда температура воды достигает 4 °С, разгар нереста при температуре 6–9 °С. Икру корюшка откладывает на песчаных, каменистых, реже на песчано-илистых грунтах, после нереста отходит в глубь водоема. Плодовитость колеблется в значительных пределах – от 5320 до 72 742 икринок (средняя – 23 192) [7]. Плодовитость увеличивается с возрастом, но даже в пределах одной возрастной группы она может значительно колебаться.

Промысел. В промысловых уловах корюшка появилась в начале 60-х годов прошлого столетия. На первом этапе ее среднегодовой вылов составлял 1,2 т. Однако уже в 1976–1985 годах наблюдался рост промысловых запасов корюшки. Ее среднегодовой вылов увеличился до 9,1 т. Максимальные уловы корюшки отмечались в 1986–1995 годах и составляли 24,6 т, или 14,4 % от общих уловов рыбы по водоему [18]. В последние годы (1996–2010) вылов корюшки резко упал. Среднегодовой вылов за эти годы составил всего 0,6 т (табл. 3).

Щука распространена по всему водохранилищу, но основными районами ее обитания являются участки вдоль юго-западного побережья.

Нерестилища щуки расположены в устьях рек, ручьев, в проливах и губах озера, которые хорошо защищены от ветров, имеют незначительные глубины и слабое течение. В островном районе места нереста расположены в почти замкнутых заливах и на затопленных болотах. Начало нереста в первых числах мая, массовый нерест происходит сразу же за вскрытием озера и в зависимости от его сроков падает на вторую или третью декаду мая. Половая зрелость наступает на 5–7-м году жизни. Продолжительность нереста – 15–20 дней. Плодовитость выгозерской щуки колеблется от 6930 до 129 320 икринок. Средний размер выгозерской щуки в конце 60-х годов XX века составлял 48 см, средняя масса – 1,1 кг [7]. Это значительно ниже тех показателей, которые представлены в работе П. В. Зыкова [9]. Средняя масса щуки в 1939 году составляла 3,1 кг, но уже в 1945 году этот показатель снизился до 1,25 кг. В настоящее время в уловах встречаются рыбы от 3 до 13 лет, но преобладают особи в возрасте 5–8 лет, которые впервые идут на нерест и имеют среднюю массу около 1 кг при средней длине (АД) 50 см. По опросным данным, в водохранилище до настоящего времени встречаются особи до 105 см длиной и массой до 9–10 кг.

Промысел. До войны (в 1937–1940 годах) щука являлась одним из основных промысловых видов рыб Выгозерского водохранилища. Ее вылов колебался от 133 до 161 т [9]. За военный период уловы щуки снизились до 56,7 т. В последующие годы (1946–1955) продолжалась тенденция к снижению уловов до 35,6 т, а в дальнейшем до 24,5 т (1956–1965) и до 10,9 т (1966–1975) [18]. С конца

1970-х годов среднегодовой вылов щуки остается на уровне 6,6–7,1 т. За последнее десятилетие этот показатель колебался от 1,08 до 19,1 т (табл. 3).

Лещ встречается по всей акватории водохранилища, но главные места его обитания расположены в южном и юго-западном районах. Нерест начинается при температуре воды 13–14 °С и заканчивается при 15–17 °С. Плодовитость выгозерского леща колеблется в очень широких пределах: от 26 до 131 тыс. икринок при средней плодовитости в 69 тыс. икринок.

Выгозерский лещ сравнительно мелкий, его средняя длина в уловах 30,7 см, средний вес 580 г. Наиболее крупный экземпляр леща имел длину 40 см и вес 2 кг [6]. Рост леща в Выгозере очень замедленный. Обычно в семнадцатилетнем возрасте лещ вырастает до 31,5 см и достигает 680 г веса [12]. Созревание отдельных особей леща наблюдается на седьмом году жизни, но большинство половозрелых особей имеют возраст 9–11 лет при длине 23–26 см и массе 260–300 г. Самцы созревают раньше самок, но в нерестовой части стада преобладают самки. В уловах встречаются лещи от 8 до 20 лет, но преобладают рыбы в возрасте от 14 до 18 лет.

Промысел. После образования Выгозерского водохранилища лещ всегда был одним из основных объектов промысла. Его среднегодовые уловы за четыре предвоенных года составили 40 т, а за годы войны этот показатель увеличился до 60 т. Уловы леща в Выгозере в 1949–1957 годах колебались от 57,5 до 101,3 т. В 1966–1975 годах в среднем добывалось 29,5 т леща (29,1 % от общего вылова рыбы) [18]. В настоящее время (2001–2007 годы) среднегодовой вылов леща составляет 14 т (табл. 3).

Судак был акклиматизирован в Выгозерском водохранилище поэтапно с 1948 по 1954 год. За этот период в водоем было выпущено 3500 производителей, взятых из Онежского озера [10]. Уже к середине 1960-х годов на водоеме сформировалось промысловое стадо судака. Его первый нерест прошел в 1950 году в Муногубе, Вонгангубе и центральной части водохранилища (у Черной ламбы), а осенью 1951 года молодь судака уже залавливалась в ряпушковые мережи [1].

Судак – одна из самых долгоживущих рыб Карелии. Например, в Онежском озере отмечены случаи поимки особей, возраст которых превышал 30 лет [5]. Половой зрелости достигает в шестилетнем возрасте, но в массе становится половозрелым на восьмом-девятом году жизни. Плодовитость судака колеблется у самок 6–8 лет от 250 до 310 тыс. икринок, достигая максимума у рыб старших возрастных групп. У рыб в возрасте 14–15 лет абсолютная плодовитость может достигать 1 500 000 икринок. Нерест судака Выгозерского водохранилища происходит в зависимости от погодных условий во второй декаде июня – начале июля на относительно мелководных местах (2–12 м) с песчано-каменистыми грунтами [8]. Помимо нерестовых судак образует и преднерестовые скопления на глубинах 10–12 м. В нересте принимают участие до 10 и более возрастных групп.

В период с 2000 по 2007 год АД судака колебалась от 44 до 68 см, средняя масса – от 1100 до 1700 г. В уловах судак представлен 13 возрастными группами, до 20 лет. Более 40 % составляют рыбы в возрасте 7+–9+. Роль старших возрастных групп в уловах невелика (чуть более 1 %). Незначительная доля в уловах рыб старших возрастных групп связана, вероятно, с интенсивным промыслом. По данным А. А. Рюкшиева [15], предельный возраст выгозерского судака составлял 18 лет (17+) при длине 68 см и массе 5200 г. По опросным данным рыбаков-любителей, в Выгозере встречаются судаки массой до 7–9 кг.

Промысел. Уловы сформировавшегося в 1960-е годы промыслового стада судака на первом этапе постоянно возрастали. Минимальный вылов судака за 1962–1995 годы составил 0,2 т (1966), максимальный – 50,4 т (1989), среднемноголетний – около 20 т. В 2000-х годах вылов судака был подвержен значительным колебаниям. Его уловы в настоящее время снизились до 1,3–2,8 т. Средний за десятилетия вылов судака составил 11,1 т (табл. 3). Судак интенсивно отлавливается рыбаками-любителями (в основном продольниками), что не находит отражения в официальной статистике. Его неучтенный вылов достаточно велик и, по экспертным оценкам, более чем в 3 раза превосходит официально зарегистрированный.

Налим. В водохранилище обитают две экологические формы налима: озерный и озерно-речной [1]. Озерный налим чаще всего встречается в центральной, южной и юго-восточной частях водоема. Озерно-речной налим на нерест мигрирует в реки Сегежу, Верхний Выг, Вожму, Каменку, Уроксу и др.

Налим в Выгозере отличается тугорослостью и не достигает больших размеров. Масса наиболее крупных особей не превышала 5 кг. Средняя масса налима приблизительно 950 г. В промысловых уловах встречаются особи от 2 до 16 лет, основу составляют особи в пяти-девятилетнем возрасте (4+–8+).

Половозрелым налим становится в возрасте 3–4 лет. Нерест начинается со второй половины февраля и продолжается до середины марта. Продолжительность нереста 15–50 дней. Плодовитость колеблется от 42 тыс. до 636 тыс. икринок. С прогревом воды (с июня по сентябрь) налим отходит в более глубокие участки озера. Подходы к берегам осенью связаны с его питанием ряпушкой. Кроме ряпушки налим питается плотвой, мелким окунем, ершом, летом частично беспозвоночными. Весной подходит к нерестилищам плотвы и мелкого окуня.

Промысел. Налим является одним из основных промысловых видов Выгозерского водохранилища. В довоенные годы (1939–1940) его в среднем добывалось 53,1 т. Столько же было добыто в 1930 году (53 т). Среднегодовой вылов за 1949–1951 годы составил 55,6 т, за 1952–1957 годы – 35 т.

С начала 70-х годов прошлого века отмечается резкое сокращение численности налима. В 1960–1978 годах средний вылов колебался от 2,6 до 6,7 т [6]. В последние годы (2001–2006) уловы налима держатся на уровне 4,0–10,5 т (табл. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ихтиофауна Выгозерского водохранилища недостаточно изучена. Можно с уверенностью говорить о том, что в настоящее время в водохранилище обитают не менее 17 видов рыб, принадлежащих к 9 семействам. Анализ литературных данных и опрос местного населения показывают, что список этих видов может быть расширен.

Промысловый лов рыб на Выгозерском водохранилище в настоящее время находится в депрессивном состоянии. Уловы рыбы за последние годы значительно уменьшились (табл. 3), при том что Сегежский ЦБК существенно снизил техногенную нагрузку на водоем за счет сокращения производства. Уменьшился вылов не только ценных промысловых видов (ряпушка, сиг, судак), но и таких массовых видов, как плотва, язь, окунь (табл. 3). Причин этого явления несколько: а) промышленный лов рыбы на водоеме ведется нерационально; б) добыча рыбы экономически невыгодна рыбакам-промысловикам; в) на водоеме отмечен рост любительского рыболовства и браконьерства; г) в последние годы увеличился трафик судов по акватории Выгозерского водохранилища, что ведет к увеличению техногенной нагрузки на водоем, особенно в его южной части.

Для изменения сложившейся ситуации на водохранилище должны проводиться работы, направленные на восстановление численности лососевых и сиговых рыб (это запрет на вылов сига, искусственное воспроизводство лососевых и сиговых) и увеличение вылова мелкого частика (плотва, окунь). Колебания уловов за последние 80 лет (от 750 т в 1932 году до 79,1 т в настоящее время) показывают, что промысловый потенциал Выгозерского водохранилища остается достаточно высоким.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Б. М., Макарова Е. Ф., Смирнов А. Ф. Оз. Выгозеро // Озера Карелии. Петрозаводск: Госиздат, 1959. С. 417–425.
2. Арнольд И. Н. О рыбопромысловых исследованиях на озере Выг Олонецкой губернии // Известия Государственного института опытной агрономии. 1924. Вып. 11. С. 4–5.
3. Арнольд И. Н. Ихтиофауна и рыбный промысел на озере Выг Олонецкой губернии // Труды 1-го Всероссийского съезда гидробиологов в Ленинграде в 1924 г. Л., 1925. С. 454–456.
4. Берг Л. С. Рыбы пресных вод и сопредельных стран. 4-е изд. Ч. 1. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1948. С. 36–38.
5. Биоресурсы Онежского озера / Под ред. В. И. Кухарева, А. А. Лукина. Петрозаводск, 2008. 271 с.
6. Вебер Д. Г. Биологические особенности Выгозерской ихтиофауны // Гидробиология Выгозерского водохранилища. Петрозаводск: Изд-во Карельского филиала АН СССР, 1978. С. 103–134.
7. Гуляева А. М. О корюшке Выгозерского водохранилища // Вопросы ихтиологии и гидробиологии внутренних водоемов. Известия ГосНИОРХ. 1967. Т. 62. С. 164–169.
8. Гуляева А. М., Кудерский Л. А. Результаты акклиматизации судака в Выгозерском водохранилище // Биологические основы рыбного хозяйства на внутренних водоемах Прибалтики. Минск, 1963. С. 94–95.
9. Зыков П. В. Выгозеро и его рыбные запасы // Труды первой научно-технической конференции по рыбной промышленности Карело-Финской ССР. Петрозаводск: Госиздат Карело-Финской ССР, 1947. С. 204–238.
10. Кудерский Л. А. Морфологические особенности судака, акклиматизированного в Выгозерском водохранилище // Известия ГосНИОРХ. Т. 62. С. 141–152.
11. Курицын А. Е. Морфо-экологическая характеристика сига *Coregonus Lavaretus* L. озерно-речных систем Средней Карелии: Автореф. дисс. … канд. биол. наук. Петрозаводск, 2011. 22 с.
12. Макарова Е. Ф. Лещ Выгозерского водохранилища // Рыбное хозяйство Карелии. Вып. 7. Петрозаводск, 1958. С. 168–179.
13. Правдин И. Ф. Сиги водоемов Карело-Финской ССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1954. 324 с.
14. Решетников Ю. С., Лукин А. А. Современное состояние разнообразия сиговых рыб Онежского озера и проблемы определения их видовой принадлежности // Вопросы ихтиологии. 2006. Т. 46. № 6. С. 732–746.
15. Рюкшиев А. А. Сравнительная экологическая характеристика судака (*Sander Lucioperca* L.) в естественном ареале и водоемах вселения (на примере Карелии): Автореф. дис. … канд. биол. наук. Петрозаводск, 2010. 22 с.
16. Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997 гг. Петрозаводск: КарНЦ, 1998. 188 с.
17. Стерлигова О. П., Ильмаст Н. В. Состояние популяций корюшки *Osmerus eperlanus* Выгозера и Сямозера, сформировавшихся в результате расселения // Вопросы ихтиологии. 2012. Т. 52. № 3. С. 358–364.
18. Черепанова Н. С., Георгиев А. П. Особенности рыбохозяйственного использования Выгозерского водохранилища в ретроспективном аспекте // Материалы всероссийской конференции «Водные и наземные экосистемы: проблемы и перспективы исследований». Вологда: Изд-во ВГПУ, 2008. С. 387–389.

Lukin A. A., Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Center (Apatity, Russian Federation)
Ivanter D. E., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Belyaev D. S., Northwestern Territorial Administration of Russian Fisheries (St. Petersburg, Russian Federation)

CONTEMPORARY ICHTHYOFAUNA STATUS OF VYGOZERO RESERVOIR

The study represents a revision of ichthyofauna belonging to one of the largest water bodies of Karelian Republic – Vygozero reservoir. The fish community of the reservoir consists of 17 species from 9 families. Nevertheless, our findings testify to the fact that at present ichthyofauna of Vygozero reservoir is insufficiently studied. Biology of some fish species was given. Statistics of commercial catches for the last 80 years were analyzed. It was found out that numerical strength of Salmonidae and Coregonidae has considerably decreased. Acclimatized fish (pikeperch and smelts) have naturalized and become one of the main commercial species. At present fisheries of Vygozero reservoir are in a depressive state. The catch of valuable commercial species (vendace, whitefish, and pikeperch) has decreased. The catch of widespread species such as roach, ide, and perch has also declined. To improve the situation at the reservoir recovery works for Salmonidae and Coregonidae are necessary.

Key words: fisheries, fish community, catches' dynamics, fish biology

REFERENCES

1. A l e k s a n d r o v B. M., M a k a r o v a E. F., S m i r n o v A. F. Vygozero Lake [Oz. Vygozero]. *Ozera Karelii* [Lakes of Karelia]. Petrozavodsk, Gosizdat, 1958. P. 417–425.
2. A r n o l d I. N. Fisheries' study on the lake Vig of Olonets region [O rybopromyslovykh issledovaniyakh na ozere Vyg Olonetskoy gubernii]. *Izvestiya Gosudarstvennogo Instituta Opytnoy Agronomii*. 1924. Vol. 11. P. 4–5.
3. A r n o l d I. N. Ichtyofauna and fisheries on Vyg lake of Olonets region [Ikhtiofauna i rybnyy promysel na ozere Vyg Olonetskoy gubernii]. *Trudy 1-go Vseros. s"ezda gidrobiologov.* Leningrad, 1925. P. 454–456.
4. B e r g L. S. USSR Freshwater Fish and border countries [Ryby presnykh vod SSSR i sopredel'nykh stran]. Moscow, Leningrad, Izdatelstvo AN SSSR, 1948. P. 36–38.
5. *Bioresursy Onezhskogo ozera* [Bioresources of Onega lake]. Petrozavodsk, KSC RAS Publ., 2008. 271 p.
6. V e b e r D. G. Biological specification of Vygozero ichthyofauna [Biologicheskie osobennosti Vygozerskoy ikhtiofauny]. *Gidrobiologiya Vygozerskogo vodokhranilishcha*. Petrozavodsk, 1978. P. 103–134.
7. G u l y a e v a A. M. Smelts of Vygozero waterbodies [O koryushke Vygozerskogo vodokhranilishcha]. *Voprosy ikhtiologii i gidrobiologii vnutrennikh vodoemov. Izvestiya GosNIORH.* 1967. Vol. 62. P. 164–169.
8. G u l y a e v a A. M., K u d e r s k i y L. A. Results of pikeperch acclimatization to Vigozero waterbodies [Rezul'taty akklimatizatsii sudaka v Vygozerskom vodokhranilishche]. *Biologicheskie osnovy rybnogo khozyaystva na vnutrennikh vodoemakh Pribaltiki*. Minsk, 1963. P. 94–95.
9. Z y k o v P. V. Fish stocks of Vygozero [Vygozero i ego rybnye zapasy]. *Trudy pervoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po rybnoy promyshlennosti Karelo-Finskoy SSR.* Petrozavodsk, Gosizdat Karelo-Finskoy SSR, 1947. P. 204–238.
10. K u d e r s k i y L. A. Morphological specifics of acclimatised pikeperch to Vygozero waterbodies [Morfologicheskie osobennosti sudaka akklimatizirovannogo v Vygozerskom vodokhranilishche]. Izvestiya GosNIORKH. Vol. 62. P. 141–152.
11. K u r i t s y n A. E. *Morfo-ekologicheskaya kharakteristika siga Coregonus Lavaretus L. ozerno-rechnykh sistem sredney Karelii. Avtoref. diss. kand. biol. nauk* [Morpho-ecological characteristics of whitefish *Coregonus lavaretus* L. of lake-river systems of middle part of Karelia. Cand. biol. sci. diss.]. Petrozavodsk, 2011. 22 p.
12. M a k a r o v a E. F. Bream of Vygozero waterbodies [Leshch Vygozerskogo vodokhranilishcha]. *Rybnoe khozyaystvo Karelii.* Issue 7. Petrozavodsk, 1958. P. 168–179.
13. P r a v d i n I. F. *Sigi vodoemov Karelo-Finskoy SSR* [Whitefishes of Karelia-Finland SSR whaterbodies]. Moscow, Leningrad, AN USSSR Publ., 1954. 324 p.
14. R e s h e t n i k o v Yu. S., L u k i n A. A. Modern diversity state of Onega lake whitefish and systematic issues [Sovremennoe sostoyanie raznoobraziya sigovykh ryb Onezhskogo ozera i problemy opredeleniya ikh vidovoy prinadlezhnosti]. *Voprosy ikhtiologii* [Questions of Ichthyology]. 2006. Vol. 46. № 6. P. 732–746.
15. R y u k s h i e v A. A. Comparative ecological characteristics of pikeperch in native areal and acclimatization of water bodies (on the example of Karelia). Cand. biol. sci. diss. [Sravnitel'naya ekologicheskaya kharakteristika sudaka (Sander Lucioperca L.) v estestvennom areale i vodoemakh vseleniya (na primere Karelii). Avtoref. diss. kand. biol. nauk]. Petrozavodsk, 2010. 22 p.
16. *Sovremennoe sostoyanie vodnykh ob"ektov Respubliki Kareliya. Po rezul'tatam monitoringa 1992–1997 gg.* [Modern status water bodies of Karelian Republic]. Petrozavodsk, Academy of Science of Karelian Research Centre RAS Publ., 1998. 188 p.
17. S t e r l i g o v a O. P., I l ' m a s t N. V. Population state of smelts *Osmerus eperlanus* of Vygozero and Syamozero resulted from acclimatization [Sostoyanie populyatsiy koryushki *Osmerus eperlanus* Vygozera i Syamozera, sformirovavshiysya v rezul'tate rasseleniya]. *Voprosy ikhtiologii* [Questions of Ichthyology]. 2012. Vol. 52. № 3. P. 358–364.
18. C h e r e p a n o v a N. S., G e o r g i e v A. P. Fishery features of Vygozero waterbodies in retrospective aspects [Osobennosti rybokhozyaystvennogo ispol'zovaniya Vygozerskogo vodokhranilishcha v retrospektivnom aspekte]. *Materialy vserossiyskoy konferentsii "Vodnye i nazemnye ekosistemy: problemy i perspektivy issledovaniy"* [Proc. Rus. Conf. "Water and Terrestrial Ecosystem: problem and perspective investigation"]. Vologda, 2008. P. 387–389.

Поступила в редакцию 24.10.2012

Март, № 2 **Биология** **2013**

УДК 639

ИЛЬЯ НИКИТИЧ ОНИЩЕНКО
аспирант кафедры зоотехнии, товароведения и экспертизы продовольственных товаров агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
mazik-t@yandex.ru

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

НИКИТА АЛЕКСАНДРОВИЧ ОНИЩЕНКО
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры зоотехнии, товароведения и экспертизы продовольственных товаров, декан агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
nao@sampo.ru

ВОХТОЗЕРО – ВОДОЕМ САДКОВОГО РЫБОВОДСТВА*

Приведены сведения о гидролого-гидрохимическом режиме озера Вохтозера и о его биоресурсах (водной растительности, зоопланктоне, зообентосе и ихтиофауне). Озеро относится к холодноводным водоемам с выраженной температурной стратификацией в летний период. Средние месячные температуры воды с мая по октябрь колеблются в пределах 10,9–18,7 °С, газовый режим благоприятный. В 2007 году было создано форелевое садковое хозяйство, так как акватория водоема благоприятная. В составе ихтиофауны водоема обнаружены ряпушка, сиг, пелядь, форель, щука, налим, ерш, окунь, плотва, язь. Летом местные рыбы интенсивно питаются остатками гранулированных кормов в зоне размещения садков. Осенью они мигрируют от садков в другие районы водоема и остатки гранулированного корма концентрируются в придонных слоях воды, увеличивая количество взвешенных веществ и азотисто-фосфорных соединений. Существенных различий в химическом составе вод в районе садков, в 100 м от них и в контрольной зоне (4,5 км от садков) не отмечено. Низкие количественные показатели водной среды были выявлены и в 1970-е годы. При соблюдении всех требований садковое хозяйство на данном водоеме может функционировать очень долго.

Ключевые слова: гидрология, уровневый режим, гидрохимия, гидробионты, зоопланктон, зообентос, ихтиофауна, форель, биоресурсы

В 2012 году в садковых хозяйствах Карелии выращено 17,5 тыс. тонн рыбной продукции. Экологическая емкость внутренних водоемов республики позволяет выращивать до 25–30 тыс. т. При дальнейшем развитии садкового рыбоводства потребуется иметь сведения не только о состоянии водоемов, но и о воздействии на них существующих садковых хозяйств.

В качестве объекта исследования было выбрано озеро Вохтозеро, которое в 60–70-е годы прошлого века использовалось для озерного товарного рыбоводства. В озеро вселяли пелядь для выращивания и формирования маточного стада, а 6 лет назад было создано садковое хозяйство для выращивания радужной форели. В статье использованы как литературные, так и собственные материалы. Гидрохимический анализ вод выполнен в лаборатории гидрохимии Института водных проблем Севера КарНЦ РАН.

Озеро Вохтозеро принадлежит к бассейну Ладожского озера. Акватория озера 8,78 км^2. Наибольшая длина водоема 7,8 км, ширина – 2,0 км. Максимальная глубина (35 м) – в северо-западной части водоема. Восточная часть водоема относительно мелководна с глубинами 6–8 м. Средняя глубина – 11,1 м. Общий объем водной массы озера – 98,1 млн м^3, площадь водосбора – 43 км^2. Коэффициент условного водообмена (КУВ), определяемый отношением среднегодового объема водных масс, поступающих в озеро с его водосбора, к объему водных масс самого озера, равен 0,2. Озеро Вохтозеро вытянуто с юго-востока на северо-запад, имеет четыре ярко выраженных залива, на его акватории располагаются десять небольших островов общей площадью 0,02 км². С западной стороны к основной части озера примыкает широкий плес, а его восточная часть вытянута в широтном направлении. В озеро впадают пять небольших ручьев. Сток осуществляется через реку Вохту (Вухтанъеки), вытекающую из южной части водоема и впадающую в северо-восточную часть озера Ведлозера (рис. 1). Длина береговой линии 34,2 км. Берега на севере возвышенные, каменистые, покрытые

© Онищенко И. Н., Рыжков Л. П., Онищенко Н. А., 2013

большей частью сосновым лесом, с южной стороны преобладают низкие заболоченные берега, покрытые смешанным лесом [3].

Рис. 1. Озеро Вохтозеро: станция 1 – садки; 2 – в 100 метрах от садков; 3 – станция «Карьер» в 4500 м от садков

Дно водоема очень неровное, встречается ряд глубоких впадин (ям), подводных возвышений и луд, которые в основном регулируют направления внутренних течений. В прибрежных районах дно выстлано каменистыми или каменисто-песчаными россыпями. Местами встречаются песчаные отмели. Центральная часть дна озера покрыта мощными иловыми отложениями светло-бурого цвета [3].

Вохтозеро относится к холодноводным водоемам с хорошо выраженной температурной стратификацией в летний период. В конце первой декады мая озеро освобождается от ледяного покрова. В это время температура воды в поверхностном слое переходит рубеж 4 ºС. К концу мая она уже превышает 10 ºС. Максимальный прогрев воды обычно наблюдается в середине июля. К этому времени поверхностные слои воды нагреваются до 23–25 ºС. В отдельные годы температура воды достигает 27–28 ºС. Продолжительность такого периода может достигать 10–15 суток, как это наблюдалось в 2010 году. Обычно высокие температуры наблюдаются в течение 2–3 суток. При прогреве воды различия в температуре между придонными и поверхностными водами достигают 5–7 ºС. Слой температурного скачка располагается на глубине 4–5 метров. Наличие летней температурной стратификации следует использовать при размещении садковых модулей. В начале сентября начинается процесс охлаждения поверхностных вод и уже к концу месяца температура воды опускается ниже 10 ºС. В конце октября поверхностные слои воды охлаждаются до 4 ºС, начинается процесс льдообразования, а в конце ноября озеро полностью покрывается льдом. Средняя толщина льда около 50 см, максимальная – до 80 см. В середине апреля начинается таяние льда, к концу первой декады мая озеро полностью освобождается от ледяного покрова.

Как правило, образование ледяного покрова и освобождение озера ото льда происходят спокойно, без его подвижек и ледоходов. Этому способствуют относительно незначительные размеры акватории озера, его конфигурация и высокие залесенные берега, лед постепенно вытаивает на месте, что очень важно для функционирования садкового хозяйства.

Средние месячные температуры воды за многолетний период составляют: в мае – 10,9 °С, в июне – 15,6 °С, в июле – 18,7 °С, в августе – 16,9 °С, в сентябре – 11,4 °С.

Внутригодовая динамика температурного режима в бассейне Вохтозера определяет в нем сезонные изменения уровневого режима. Весенний подъем уровня воды в озере начинается во второй декаде апреля в период интенсивного таяния снежного покрова, с максимумом в конце первой декады мая. Его величина не превышает 0,7–0,8 м. Во второй половине мая, после паводка, начинается медленное снижение уровня, которое завершается в конце августа. Минимальные летние уровни обычно устанавливаются во второй декаде августа. В конце сентября – начале октября уровень воды в озере вновь повышаются от длительных осенних дождей, но не более чем на 0,3 м. С декабря по март происходит зимний спад уровня с минимумом в конце марта. Как правило, минимальные летние и зимние уровни по своим значениям приблизительно равны.

Воды Вохтозера зеленовато-желтого цвета с низким уровнем цветности (50–60 градусов) отличаются высокой прозрачностью (до 5 м). Газовый режим благоприятный, на протяжении всего года содержание кислорода колеблется около 10 мг/л. Активная реакция воды слабо кислая (pH – 5,9–6,1), очень малое количество взвешенных веществ (4,7–6,8 мг/л), что способствует функционированию садкового хозяйства (см. таблицу). Только в одном случае, осенью, было отмечено значительное содержание взвесей в придонных слоях воды (25,1 мг/л).

Содержание бикарбонатов в Вохтозере, как и в большинстве водоемов этого района, в основном не превышает 10 мг/л. Воды озера бедны органическими соединениями, в частности легко окисляемыми органическими веществами. Величина ПО колеблется в пределах 5–6 мгО/л (ПДК – 10 мгО/л). Азотистые соединения в основном представлены органической формой (0,4–0,7 мгN/л), а в составе минерального азота превалируют нитраты (0,01–0,09 мгN/л), причем их содержание возрастает от поверхности ко дну. Летом в зоне садков на глубине 16 м содержание нитратов достигало величины 0,21 мгN/л (см. таблицу). В это время интенсивно развивался фитопланктон, наблюдалось «цветение» воды. Минеральный фосфор также содержится в незначительных количествах (0,001–0,06 мгР/л). Количество общего фосфора в основном не превышает 0,01 мгР/л. Содержание обеих форм фосфора в исследованные сезоны года в максимальных количествах отмечено у дна на глубине 16 м. Вертикальные распределения азотистых и

фосфорных соединений хорошо согласуются друг с другом, а осенью – и с распределением взвешенных веществ. Возможна также некоторая связь между вертикальным распределением органических компонентов (остатков пищи, экскрементов) с распределением местных видов рыб. Наши наблюдения показали, что летом местные рыбы интенсивно питаются остатками гранулированных кормов в зоне размещения садков. Осенью они мигрируют от садков в другие районы водоема и остатки гранулированного корма концентрируются в придонных слоях воды, увеличивая количество взвешенных веществ и азотисто-фосфорных соединений.

Химический состав воды озера Вохтозера

Компонент	Июль				Октябрь				
	Садки, глубина, м			Карьер, глубина 2 м	Садки, глубина, м			100 м от садков, глубина 2 м	Карьер, глубина 2 м
	1	4	16		1	4	16		
pH	6,04	5,91	5,94	5,88	6,05	5,92	6,11	5,96	6,01
O_2, мг/л	10,3	–	10,8	11,0	10,0	–	9,9	10,6	10,8
Взв. в-ва, мг/л	6,8	6,6	6,3	6,1	4,0	4,6	25,1	8,2	7,8
HCO_3, мг/л	9,58	8,84	8,11	9,58	8,84	9,09	8,6	8,84	13,76
ПО, мгО/л	5,28	5,81	–	4,81	5,81	6,14	–	6,11	6,38
NH_4, мг/л	0,06	0,04	0,03	0,05	0,04	0,05	0,03	0,04	0,04
NO_3, мг/л	0,01	0,07	0,21	0,01	0,09	0,09	0,09	0,09	0,03
NO_2, мг/л	<0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,002
$N_{орг}$, мг/л	0,66	0,49	0,42	0,48	0,47	0,48	0,59	0,43	0,70
$N_{общ.}$, мг/л	0,73	0,60	0,66	0,54	0,60	0,61	0,71	0,56	0,77
$P_{мин.}$, мг/л	0,004	0,003	0,006	0,003	0,001	0,001	0,014	0,002	0,010
$P_{общ.}$, мг/л	0,01	0,01	0,012	0,012	0,010	0,011	0,046	0,010	0,046

Примечание. Анализ воды выполнен в лаборатории гидрохимии Института водных проблем Севера КарНЦ РАН (2011 год).

Особо следует отметить, что существенных различий в химическом составе вод в районе садков, в 100 м от них и в контрольной зоне «Карьер» (4,5 км от садков) нами не отмечено. Не менее интересен и тот факт, что низкие количественные показатели в воде Вохтозера были отмечены в 1970-е годы (ПО – 5–7 мгО/л, HCO_3 – 10–11 мг/л). Прозрачность вод в то время была 5–6 м. Кислородный режим также был благоприятный, содержание кислорода превышало 10 мг/л [1]. Высшая водная растительность хорошо развита и широко распространена на многих участках водоема. Большие заросли водных растений размещены в заливах водоема и в прибрежных участках с песчаным и песчано-каменным дном. Преобладают заросли тростника. Также часто встречаются рдесты, хвощи, осока.

Кормовые ресурсы рыб Вохтозера, зоопланктон и зообентос находятся в удовлетворительном состоянии. В составе зоопланктона преобладают: по численности – циклопиды (29 %), по биомассе – кладоцеры (48 %). Средняя численность зоопланктона – 20,6 тыс. экз./м^3, средняя биомасса – 0,62 г/м^3. Донная фауна весьма разнообразна. Литораль населена хирономидами, ручейниками, поденками, веснянками. В поверхностных слоях иловых отложений встречаются хирономиды, олигохеты, ручейники, поденки. В глубоких слоях иловых отложений обнаружены хирономиды, олигохеты, пизидиумы и др. Средняя численность зообентоса – 2,4 тыс. экз./м^2, биомасса – 3,9 г/м^2 [1].

В составе ихтиофауны водоема обнаружены 10 видов рыб: ряпушка, сиг, пелядь, форель, щука, налим, ерш, окунь, плотва, язь. Наиболее многочисленны плотва (39 % от величины общего улова), ряпушка (35 %) и окунь (21 %). Пелядь и сиг появились в результате проведения рыбоводно-мелиоративных работ в 70-е годы прошлого века. В то время предпринимались попытки создания в Вохтозере маточного стада пеляди и сига, но они оказались безуспешными из-за большой глубины водоема. Форель – результат садкового рыбоводства.

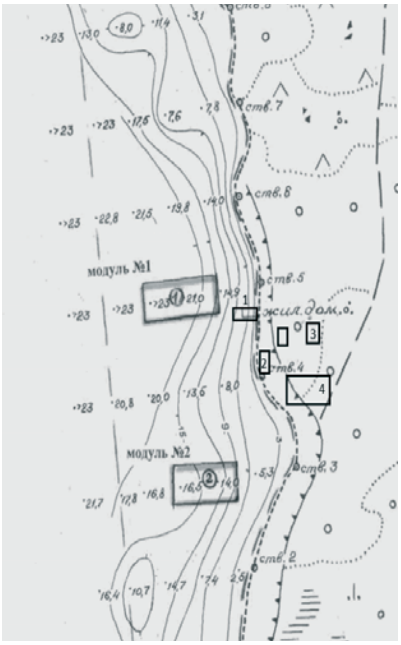


Рис. 2. Карта глубин и расположения садковых модулей ООО «Радужная форель»

На северо-восточном берегу северо-западного плеса Вохтозера в 2007 году было создано форелевое садковое хозяйство ООО «Радужная форель». Акватория водоема в этом районе благоприятна для функционирования хозяйства: 10-метровая изобата проходит в 50 м от берега, далее глубины увеличиваются до 15–20 м и более (рис. 2). С ближайшим населенным пунктом Савиново хозяйство связано проселочной автодорогой (расстояние 6 км). В настоящее время рыбоводно-биологическим обоснованием (РБО) определена мощность хозяйства в 300 т товарной продукции. В 2008–2011 годах в хозяйстве ежегодно выращивалось до 160 т товарной форели. В дальнейшем мощность хозяйства будет доведена до биологически обоснованных объемов (300 т). Вохтозеро по своим физическим, гидрологическим, гидрохимическим и гидробиологическим показателям является типичным водоемом для организации садковой аквакультуры. Оно холодно- и глубоководно, бедно органическими компонентами, имеет слабо кислую, почти нейтральную, активную реакцию воды. Если соблюдать все биотехнические нормативы [4], своевременно осуществлять профилактические мероприятия [5] и не допускать загрязнения водоема, то садковое хозяйство мощностью до 300 т может функционировать очень продолжительное время.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отчет «Святозерско-щекильская группа озер» // Архив СеврыбНИИпроекта / Б. М. Александров, З. А. Горбунова, Л. И. Гордеева-Перцева, А. А. Заболоцкий и др. Петрозаводск, 1973. 456 с.
2. Отчет Лаборатории экологических проблем Севера ПетрГУ // Архив лаборатории. Петрозаводск, 2002. 34 с.
3. Рыбоводно-биологическое обоснование на организацию форелевого садкового хозяйства на озере Вохтозеро Пряжинского района. Петрозаводск: ООО «Аквакультура», 2008. 84 с.
4. Рыжков Л. П., Нечаева Т. А., Евсеева Н. В. Садковое рыбоводство – проблемы здоровья рыб. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. 120 с.
5. Рыжков Л. П., Кучко Т. Ю. Садковое рыбоводство. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. 163 с.

Onishchenko I. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Ryzhkov L. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Onishchenko N. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

VOKHTOZERO – WATER RESERVOIR OF CAGE CULTURE FISHERY

The article is concerned with hydrological and hydrochemical regimes of Lake Vohtozero and its biological resources (aquatic plants, zooplankton, zoobenthos and fish fauna). The lake belongs to cold-water reservoirs with significant temperature stratification in summer. The average monthly temperature from May to October ranges from 10,9 to 18,7 °C; gas regime is friendly. Due to favourable water conditions for fish growth, a trout cage farm was organized in the area in 2007. The fish fauna of the lake consists of whitefish, cisco, peled, trout, pike, burbot, ruffe, perch, roach, and ide. In summer, the fish of the lake lives off voluminous leftovers of pelleted fish food gravitated in the zone around netcages. In autumn, the fish migrate from the netcage area to other parts of the lake. The fish food leftovers concentrate in the bottom layers of the water by this increasing the amount of particulate matter and nitrogen-phosphorus compounds. No significant differences in the chemical composition of the water in the netcage area, in the range from 100 meters up to 4,5 km.(control area) were revealed. Compliance with all netcage fish farming requirements secures long-term capacity of the fish farm.

Key words: hydrology, water level regime, hydrochemistry, aquatic, zooplankton, zoobenthos, fish fauna, trout, biological resources

REFERENCES

1. Otchet “Svyatozersko-shchekil’skaya gruppa ozer” [A Report “Svyatozersko-shchekilskaya group of lakes”]. *Arkhiv SevrybNIIproekta*. Aleksandrov B. M., Gorbunova Z. A., Gordeeva-Pertseva L. I., Zabolotskiy A. A., Petrozavodsk, 1973, 456 p.
2. Otchet Laboratorii ekologicheskikh problem Severa PetrGU [A Report of Petrozavodsk State University laboratory about environmental problems of the North]. *Arhiv labratorii*, Petrozavodsk, 2002. 34 p.
3. *Rybovodno-biologicheskoe obosnovanie na organizatsiyu forelevogo sadkovogo khozyaystva na ozere Vokhtozero Pryazhinskogo rayona* [Fish breeding biological basis for the organization of trout cage farm in Lake Vohtozero District Priazhinsky]. Petrozavodsk, LLC “Akvakul’tura” Publ., 2008. 84 p.
4. Ryzhkov L. P., Nechaeva T. A., Evseeva N. V. *Sadkovoe rybovodstvo – problemy zdorov’ya ryb* [Cage aquaculture – fish health problems]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2007. 120 p.
5. Ryzhkov L. P., Kuchko T. Yu. *Sadkovoe rybovodstvo* [Cage aquaculture]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2008. 163 p.

Поступила в редакцию 17.12.2012

Март, № 2 **Биология** **2013**

УДК 595.7

СВЕТЛАНА НИКОЛАЕВНА ЛЯБЗИНА
кандидат биологических наук, доцент кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
slyabzina@petrsu.ru

СЕРГЕЙ ДАВЛЕТЬЯНОВИЧ УЗЕНБАЕВ
кандидат биологических наук, доцент кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
uzenbaev@petrsu.ru

ЭКОЛОГИЯ ЖУКОВ-МЕРТВОЕДОВ (COLEOPTERA, SILPHIDAE) В КАРЕЛИИ*

В Карелии видовой состав некрофильных жуков-мертвоедов (семейство Silphidae) включает 11 видов. Цель данной работы − изучение экологических особенностей жуков семейства Silphidae в Карелии (биотопическое распределение, сезонная динамика, поисковая активность). Жуки распространены во всех исследуемых биоценозах, наибольшее число видов (10) отмечено в открытых типах. Многие виды мертвоедов имеют сходную биотопическую приуроченность как в Северной (Карелия), так и в Центральной (Польша, Чехия) Европе. В течение сезона у жуков наблюдается периодическая активность, а смена динамики у могильщиков позволяет снизить конкуренцию за ограниченный ресурс и при этом оставаться главными утилизаторами тканей. Впервые проведены исследования по мечению и повторному отлову жуков. В течение трех лет на экспериментальной площадке отлавливали жуков и ставили метки на надкрыльях в виде надрезов. Выявлено, что определенная часть популяции у видов могильщиков *Nicrophorus investigator* и *N. vespilloides* сохраняется на второй год (до 1 %). У вторично отловленных особей изменялись морфометрические показатели (увеличение массы тела). В биоценозах жуки активно перемещаются в поисках пищи и могут находить новые трупы или возвращаться на приманки с расстояния 150 м.

Ключевые слова: некробионты, жуки-могильщики, мечение, Карелия

Семейство Мертвоеды (Silphidae) включает более 250 видов жесткокрылых, которые распространены на всех материках [15], [16]. В европейской части отмечено свыше 30, а в Восточной Фенноскандии встречается 16 представителей [10], [17].

На территории Карелии на трупах животных зарегистрированы 11 видов (табл. 1) [6]. Кроме этих видов в заповеднике «Кивач» Н. Н. Кутенковой [5] на лугах отмечены единичные находки могильщиков *Nicrophorus fossor* (Erich.) и *N. vetstigator* (Herb.), которые обычны для южных регионов [9].

Семейство Silphidae подразделяется на два подсемейства: Nicrophorinae – жуки, способные зарывать небольшие трупы животных, и Silphinae – поверхностно-падальные мертвоеды. По трофическим связям большинство видов в семействе питаются трупными тканями (некрофаги), но также имеются хищники – мертвоед трехреберный *Phosphuga atrata* (L.), нападающий на моллюсков, и вредители сельскохозяйственных культур – *Aclypea opaca* (L.) и *A. undata* (Müll.), которые поедают всходы и листья капусты, свеклы или картофеля. В Карелии иногда отмечаются повреждения этими жуками [8].

Мертвоеды являются обязательным компонентом трупной фауны, они не только утилизируют мертвые ткани, в таких субстратах также происходит развитие их преимагинальных стадий. Фенологические сроки развития некоторых видов используются в судебной медицине в целях установления давности наступления смерти.

Цель данной работы − изучение экологических особенностей жуков-мертвоедов в Карелии (биотопическое распределение, сезонная динамика, поисковая активность).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Исследования проводились в весенне-осенние периоды 2000−2012 годов на биологической станции ПетрГУ (с. Кончезеро, Кондопожский район), в окрестностях с. Лососинное (Прионежский район) и на территории природного парка о. Валаам (Сортавальский район, август 2009 года).

Отлов жуков осуществляли с трупов позвоночных животных массой от 30 г до 25 кг, которые выкладывали на поверхность почвы, либо небольшие трупные приманки помещали в почвенные ловушки. Исследование проводили в пяти лесных и трех открытых биоценозах. Для анализа разнообразия использовали индексы Шеннона − Уивера (H) и доминирования Бергера − Паркера (d) [3].

© Лябзина С. Н., Узенбаев С. Д., 2013

Таблица 1

Абсолютная численность и индексы разнообразия некрофильных жуков семейства Silphidae в исследуемых биотопах

Вид	Ельник-зеленомошник	Сосняк-зеленомошник	Сосняк лишайниковый	Березняк разнотравно-черничный	Лиственное мелколесье	Влажно-разнотравный луг	Суходольный луг	Агроценоз
	*n (12)	n (65)	n (19)	n (53)	n (24)	n (42)	n (14)	n (30)
1. Могильщик рыжебулавый *Nicrophorus. vespillo* (L., 1758)	2	45	25	40	12	75	20	15
2. Могильщик-исследователь *N. invetstigator* (Zett. 1824)	10	106	16	149	21	184	35	20
3. Могильщик чернобулавый *N. vespilloides* (Herb. 1783)	36	412	58	489	69	231	36	50
4. Трупоед черный *Necrodes littoralis* (L., 1758)	6	39	10	23	5	11	8	12
5. Мертвоед красногрудый *Oiceoptoma thoracica* (L., 1758)	21	126	32	213	89	–	–	–
6. Падальник морщинистый *Thanatophilus rugosus* (L., 1758)						38	14	25
7. Падальник остроплечий *Th. sinuatus* (F., 1775)						356	244	214
8. *Th. dispar* (Herb. 1793)	–	–	–	–	–	6	–	–
9. *Silpha carinata* (Herb., 1783)	–	–	–	–	–	8	3	–
10. *S. obscura* (L., 1758)	–	–	–	–	–	–	1	–
11. *S. tristis* (Ill., 1798)	–	–	–	–	–	2	–	–
Индекс разнообразия (Шеннона – Уивера)	1,3	1,2	1,0	1,1	1,0	1,4	1,1	1,1
Индекс доминирования (Бергера – Паркера)	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,7	0,7

Примечание. n – количество приманок, прочерк – вид не отмечен.

Мечение жуков и изучение годовой активности

В исследованиях оценки встречаемости в течение года и в последующие годы проводили мечение жуков на определенной территории. Для этого в весенне-осенние периоды 2004–2006 годов на экспериментальном участке площадью ~3 км² (открытые и лесные биоценозы) у отловленных жуков на надкрыльях ставили метки в виде небольших надрезов или проколов, варьируя их число и положение. Таким образом, каждой особи присваивали индивидуальную метку. В лаборатории снимали морфометрические показатели (измеряли вес на электронных весах ВЛТ-1500-П), определяли пол жука и в дальнейшем их отпускали обратно на приманку, с которой были отловлены. Жуки отсутствовали на трупе не более 2−4 ч.

Изучение поисковой активности жуков

Расстояние, с которого жуки способны находить приманки, изучали у четырех видов: *Oiceoptoma thoracica*, *Thanatophilus sinuatus* и могильщиков *N. vespilloides*, *N. investigator.* По литературным данным известно, что некрофильные насекомые могут обнаруживать трупы на расстоянии 90 м [2]. В наших исследованиях меченых жуков собирали с трупов и отпускали по ветру с расстояний 50, 100 и 150 м. Исследования проводили в тех биотопах, в которых были найдены жуки. Эксперименты выполняли до полудня и учитывали погодные условия (теплая, солнечная погода, скорость ветра не более 5 м/с). На экспериментальной площадке кроме приманок, с которых были собраны жуки, также размещались несколько трупов сходной навески.

Характеристика биотопов исследования

Биотопическое распределение изучали в пяти лесных и трех открытых биоценозах. Выбранные биотопы были типичны для средней подзоны тайги [1], [9]. *Сосняк-зеленомошник* (окрестности с. Кончезеро, о. Валаам) образован одним видом – сосной обыкновенной (*Pinus silvestris* L.).

В подлеске лиственные деревья (ольха, рябина, ива, можжевельник), в травяно-кустарничковом ярусе преобладают черника и брусника, моховой фон сплошной (плеуроций Шребера, гилокомий блестящий). *Сосняк лишайниковый* (с. Кончезеро) приурочен к песчаным буграм. Древостой в основном чистый и лишь редко присутствует примесь березы, в подлеске обычен можжевельник. В напочвенном покрове преобладают лишайники, редко брусника, вереск обыкновенный. Возраст древостоя – 80–100 лет. *Ельник-зеленомошник* (с. Лососинное) представлен елью обыкновенной (*Picea abies* (L.) Karst.). Возраст древостоя – 100–120 лет. Еловый подрост незначителен, подлесок редкий (береза, осина), травяно-кустарничковый ярус развит хорошо, моховой фон сплошной (плеуроций Шребера, гилокомий блестящий). *Березняк разнотравно-черничный* (с. Лососинное, с. Кончезеро) – возраст 50–60 лет. Спелые лиственные и смешанные леса представлены в основном березой пушистой (*Betula pubescens* Ehrk.). В березовом древостое значительная примесь других пород деревьев (осины, рябины, реже ели и сосны), травянистый покров развит хорошо, моховой покров представлен обычными видами зеленых мхов. *Лиственное мелколесье* (с. Лососинное, с. Кончезеро) занимает равнинные или несколько пониженные части рельефа. Возраст древостоя – 30–40 лет. В древостое преобладают ивы, ольха, часто встречаются черемуха, рябина. В травяном покрове в умеренном количестве сочетаются луговая и лесная растительность.

Луга и сельскохозяйственные угодья (с. Кончезеро, о. Валаам). На *влажно-разнотравном лугу* высота растительности достигает 35–40 см и представлена полевицей, щучкой, осоками. *Суходольные луга* занимают плакорные участки и склоны. Состав травостоя более или менее пестрый и представлен разнотравьем высотой 15–30 см. *Агроценозы* на территории республики представлены полями, занятыми монокультурами (картофель, столовые и кормовые корнеплоды, капуста). Вегетация растений начинается с середины мая и завершается к сентябрю. Почвы бедные (суглинистые, супесчаные).

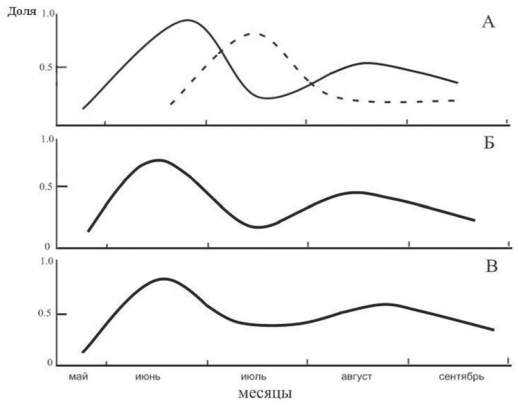
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Биотопическое распределение

Жуки-мертвоеды встречались во всех исследуемых районах и биоценозах. Близость значений индексов видового разнообразия (табл. 1) указывает на сходство структуры населения изученных выделов. Наибольшее число видов (10) было отмечено в открытых ландшафтах. Высокая приуроченность к этим биоценозам выявлена у падальников рода *Thanatophilus*. Из трех видов на трупах чаще встречался падальник остроплечий (*Th. sinuatus*) (табл. 1). Взрослые жуки и личинки этого вида являются основными утилизаторами трупных тканей небольших трупов животных на суходольном лугу и в агроценозах (табл. 1). Индекс доминирования в этих биотопах также имеет наибольшее значение за счет преобладания его над другими. Виды рода *Silpha* были отмечены только на открытых участках, и численность их на приманках незначительна. Напротив, в южных районах (Самара, Казахстан) они довольно обычны как на лугах, так и в лесных экосистемах [4], [7]. Во всех биотопах встречаются такие представители, как трупоед черный и жуки-могильщики рода *Nicrophorus*, однако их плотность на трупах в различных типах биоценозов неодинакова. Могильщик чернобулавый больше тяготеет к лесным биоценозам, рыжебулавый – к лугам, а исследователь – как к открытым пространствам, так и светлохвойным лесам (табл. 1). В сухих местах (сосняк лишайниковый, суходольный луг) жуки на приманках присутствуют в небольшом количестве. Высокая инсоляция приводит к прогреванию почвы и ее сухости, к пересыханию самого трупа, который быстро становится непригодным для питания и заселения.

Сезонная динамика

Жуки-мертвоеды встречаются в течение всего вегетационного периода. По типу активности в условиях умеренного климата могильщики рыжебулавый и чернобулавый, а также падальник остроплечий и мертвоед красногрудый относятся к весенне-осенним видам, а исследователь – к летним (см. рисунок). Первые жуки появляются в начале мае, сначала на открытых местах при дневной температуре воздуха выше 10 °С, в лесу позже на 1–1,5 недели, после полного схода снега.



Сезонная активность жуков-мертвоедов: А – сплошная линия – *N. vespilloides*, пунктир – *N. investigator*; Б – *O. thoracica* в лесных биоценозах; В – *Th. sinuatus* в открытых биоценозах

В течение всего вегетационного сезона могильщик чернобулавый имеет два пика активности: в середине июня и в первой декаде августа (см. рисунок). Жуки всегда многочисленны на трупах, а во второй половине лета они могут встречаться на других гниющих субстратах (пластинчатых грибах, помете животных). Освоение нового для них источника питания является следствием меж- и внутривидовой конкуренции. К концу лета на трупах редко можно заметить и их личинок. Например, М. Отронен установила,

что в Южной Финляндии в естественных условиях у могильщика чернобулавого размножение продолжается до середины августа [14].

Активность могильщика-исследователя приходится на более поздний период, чем у близкородственных видов, – с конца июня до сентября с пиком в середине июля (см. рисунок). Появление и увеличение численности этого вида совпадает со снижением активности чернобулавого могильщика. В экспериментах, если одновременно на падали встречались оба эти вида, то, как правило, исследователь вытеснял соперника, и на трупе оставался один, а чернобулавый обычно переходил в подстилку или покидал приманку.

Поверхностно-падальные виды (*O. thoracica*, *Th. sinuatus*) имеют сходную динамику сезонной активности. Жуки встречаются с мая по сентябрь, и на протяжении всего теплого периода наблюдаются два пика: первый – в июне, второй – в августе (см. рисунок).

Характер сезонной динамики мертвоедов в Карелии близок к таковому в Центральной Европе (Чехия), но там период их активности более продолжительный (начинается в апреле и длится до ноября) [13]. Также для мертвоедов установлена смена суточной активности. Могильщик-исследователь активен в вечерние и ночные часы, а поверхностно-падальные виды всегда встречаются днем. Для чернобулавого и рыжебулавого четкого предпочтения не выявлено, они активны как днем, так и ночью [12].

В результате мечения и повторного отлова было установлено, что в популяциях *N. investigator* и *N. vespilloides* некоторые особи встречались на второй год. Вторично отлавливалось около 1 % (например, из 393 особей, помеченных в 2004 году, 5 отловлены в 2005 году) (табл. 2). При этом жуки ни разу не были пойманы в местах первого года, а были зарегистрированы на расстоянии 1–2 км в других биотопах. Все вторично отловленные особи были самками. На третий год эксперимента эти меченые особи не попадались.

Таблица 2

Количество помеченных и повторно отловленных жуков за период (2004–2006 годы)

Вид	Помеченных особей			Повторно отловленных особей	
	Год			Год	
	2004	2005	2006	2005	2006
N. littoralis	17	26	5	–	–
N. vespilloides	304	261	191	3	2
N. investigator	89	65	36	2	2
N. vespillo	35	46	25	–	–
Th. sinuatus	79	86	106	–	–
O. thoracica	45	41	56	–	–
Всего	569	525	419	5	4

У отловленных на второй год жуков происходили изменения морфометрических показателей. Так, для всех было характерно увеличение массы (табл. 3). Это связано прежде всего с увеличением массы жирового тела [2]. Для многих могильщиков на втором году жизни отмечены выраженная потертость переднеспинки, тусклая окраска надкрыльев, могли быть разного рода повреждения (конечностей, сяжек и других частей).

Таблица 3

Изменение масса тела (мг) у вторично отловленных особей (минимальный и максимальный вес)

Вид	Масса в 1-й год	Масса во 2-й год	Среднее значение увеличения веса (мг) у вторично отловленных особей
N. vespilloides N = 4	155 (min 172; max 195)	247 (min 238; max 250)	92
N. invetstigator N = 3	313 (min 292; max 340)	446 (min 360; max 510)	133

Примечание. N – количество особей.

Меченые особи падальника остроплечего и мертвоеда красногрудого не встречались на следующий год, тем не менее имаго были зарегистрированы поздней осенью в почвенной подстилке леса и открытых пространств.

Изучение поисковой активности жуков

У жуков-мертвоедов чувство обоняния выражено очень сильно, так как им необходимо быстро обнаружить трупы для питания и откладки яиц. Антенны – это единственный сенсорный орган для ориентации, и при их удалении жуки теряют эту способность [11]. В работе экспериментальным путем выявлено перемещение четырех видов (табл. 4). Все исследуемые виды жуков (*N. vespilloides*, *N. investigator*, *O. thoracica*, *Th. sinuatus*) способны находить приманку, с которой были сняты, с расстояний 50 и 100 м. При увеличении расстояния до 150 м только падальник остроплечий был обнаружен на исходной приманке. В процессе экспериментов часть меченых жуков могла появляться в течение недели на других трупных приманках на расстоянии не менее 150 м.

Период времени, затрачиваемый на разыскивание приманок, у жуков разный. Так, падальник остроплечий обнаруживает приманку в течение суток, жуки-могильщики появлялись через два-три дня, выпущенные с расстояния 50 или 100 м в сосняке черничном. Дольше всех искал приманки, расположенные в березняке в 100 м, красногрудый мертвоед: меченых особей регистрировали через четыре дня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Карелии видовой состав жуков-мертвоедов (Silphidae), отмеченных на трупах, насчитывает 11 видов. Наибольшее число (10) встречается в открытых биоценозах. К эврибионтам относятся жуки-могильщики (р. *Nicrophorus*) и трупоед черный (р. *Nicrodes*). Поверхностно-падальные виды имеют строгое биотопическое разграничение. Падальники (р. *Thanatophilus*) приурочены исключительно к открытым биоценозам, а красногрудый мертвоед (р. *Oiceoptoma*) – к лесным.

Таблица 4

Количество выпущенных и вторично отловленных жуков-мертвоедов с исследуемых расстояний (м)

Вид	50		100		150	
	Выпущенных	Вторично отловленных	Выпущенных	Вторично отловленных	Выпущенных	Вторично отловленных
N. vespilloides	20	2	20	2	20	–
N. investigator	20	1	20	1	20	–
Th. sinuatus	20	4	20	1	20	1
O. thoracica	10	2	10	1	10	–

У разных видов жуков-могильщиков наблюдаются различия в ходе сезонной активности, что позволяет снизить конкуренцию. В то же время эти виды, периодически сменяя друг друга в течение всего вегетационного сезона, всегда остаются основными утилизаторами трупов. Результаты мечения и повторного отлова показывают, что определенная часть популяции у могильщиков *N. investigator* и *N. vespilloides* сохраняется на второй год. В биоценозах жуки активно перемещаются в поисках пищи и могут находить новые трупы или возвращаться на приманки с расстояния 150 м.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность за помощь в проведении экспериментов выпускникам эколого-биологического факультета Ирине Катеруше, Дарье Трофимовой, Ольге Тукачевой.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков А. Д. Типы леса Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 180 с.
2. Захваткин Ю. А. Курс общей энтомологии. М.: Либроком, 2009. 386 с.
3. Коросов А. В. Специальные методы биометрии. Петрозаводск, 2007. 364 с.
4. Крымкина Ю. В. Морфометрическая характеристика популяций двух видов жуков-мертвоедов (Insecta, Coleoptera, Silphidae) с территории Жигулевского заповедника // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. Самарская Лука, 2009. Т. 18. № 2. С. 185−188.
5. Кутенкова Н. Н. Насекомые (Insecta) лугов заповедника «Кивач» // Труды Государственного природного заповедника «Кивач». Вып. 4. Петрозаводск, 2008. С. 78−119.
6. Лябзина С. Н. Видовой состав и структура комплекса членистоногих-некробионтов Южной Карелии // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2011. № 4 (117). С. 10−19.
7. Николаев Г. В., Козьминых В. О. Жуки-мертвоеды (Coleoptera: Agyrtidae, Silphidae) Казахстана, России и ряда сопредельных стран. Определитель. Алматы: Казак университетi, 2002. 159 с.
8. Прогноз появления, распространения основных вредителей, болезней и сорняков в Республике Карелия на 2000 год и мероприятия по защите сельскохозяйственных культур. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2000. 112 с.
9. Раменская М. Л. Луговая растительность Карелии. Петрозаводск: Госиздат КАССР, 1958. 400 с.
10. Dekeirsschieter J., Verheggen F., Lognay G., Haubruge E. Large carrion beetles (Coleoptera, Silphidae) in Western Europe: a review // Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 2011. № 15 (3). P. 435−447.
11. Heinzel H., Böhm H. The wind-orientation of walking carrion beetles // J. Comparative Physiology A. 1989. Vol. 164. P. 775−786.
12. Kočàrek P. Diurnal activity rhythms and niche differential in a carrion beetles assemblage (Coleoptera: Silphidae) in Opava, the Czech Repablic // Biolog. rhythm resear. 2001. Vol. 32. (4). P. 431−438.
13. Kočàrek P., Benko K. The occurrence and seasonal activity of Silphidae in the Hluchin region (Silesia, Czech Republic) // Cas. Slez. Muz Opava (A). 1997. № 2. P. 173–179.
14. Otronen M. The effect of body size on the outcome of fights in burying beetles (Nicrophorus) // Ann. Zool. Fen. 1988. Vol. 25. № 2. P. 191−201.
15. Peck S. P. Review of the carrion beetles of Australia and New Guinea (Coleoptera: Silphidae) // Australian J. of Entomology. 2001. № 40. P. 93−101.
16. Ratcliffe B. C. The Carrion Beetles (Coleoptera: Silphidae) of Nebraska // Bulletin of the University of Nebraska State Museum. 1996. 100 p.
17. Silfverberg H. Enumeratio nova Coleopterorum Fennoscandiae, Daniae et Baltiae. Sahlbergia. Helsinki, 2004. Vol. 9. P. 1−111.

Lyabzina S. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Uzenbaev S. D., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

ECOLOGY OF CARRION BEETLES (COLEOPTERA, SILPHIDAE) IN KARELIA

There are 11 species of carrion beetles (Silphidae) on the territory of Karelia. The objective is to study environmental characteristics of carrion necrophilic beetles in Karelia (habitat distribution, seasonal dynamics, search activity). The largest number of species,

a total of 10 common bugs, was observed in the open types. Numerous types of carrion beetles have similar biotopical signs revealed in both northern (Karelia) and central Europe (Poland, Czech Republic). Gravedigger beetles demonstrate a change of seasonal activity, which helps to reduce competition for limited resources and at same time remain major tissue utilizers . A research on marking and recapture of beetles was carried out. For a period of three years, the beetles were caught and marked by cuts on shards. It was revealed that a part of the species population N. investigator and N. vespilloides (1 %) survives a year and remains living for the next one. Survived species demonstrated a change of morphometric parameters (increased weight). Carrion beetles move actively in search of food and find new carcass or return to baits from a distance of 150 m.

Key words: carrion, marking of beetles, capture-recapture, burying beetles, Silphidae, Karelia

REFERENCES

1. Volkov A. D. *Tipy lesa Karelii* [Types of forests in Karelia]. Petrozavodsk, Karelian Research Centre of RAS, 2008. 180 p.
2. Zahvatkin Yu. A. *Kurs obshchey entomologii* [The entomology]. Moscow, Librokom Publ., 2009. 386 p.
3. Korosov A. V. *Special'nye metody biometrii* [Special methods of biometrics]. Petrozavodsk, 2007. 364 p.
4. Krymkina Yu. V. Morphometric characteristics of the populations of two species of carrion beetles (Insecta, Coleoptera, Silphidae) from Zhigulevsky reserve area [Morfometricheskaya kharakteristika populyatsiy dvukh vidov zhukov-mertvoedov (Insecta, Coleoptera, Silphidae) s territorii Zhigulevskogo zapovednika]. *Samarskaya Luka: problemy regional'noy i global'noy ekologii* [Samara: problems of regional and global environmental]. 2009. Vol. 18 (2). P. 185–188.
5. Kutenkova N. N. Insects of reserve meadows "Kivach" [Nasekomye (Insecta) lugov zapovednika "Kivach"]. *Trudy Gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika "Kivach"* [Proceedings of the State Nature Reserve "Kivach"]. Vol. 4. Petrozavodsk, 2008. P. 78–119.
6. Lyabzina S. N. Arthropod community of necrobionts of southern Karelia [Vidovoy sostav i struktura kompleksa chlenistonogikh-nekrobiontov Yuzhnoy Karelii]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tehnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2011. № 4 (117). P. 10–19.
7. Nikolaev G. V., Koz'minykh V. O. *Zhuki-mertvoedy (Coleoptera: Agyrtidae, Silphidae) Kazahstana, Rossii i ryada sopredel'nyh stran* [Carrion beetles (Coleoptera: Agyrtidae, Silphidae) of Kazakhstan, Russia, and a number of neighbouring countries]. Determinant. Almaty, Kazak University, 2002. 159 p.
8. *Prognoz poyavlenija, rasprostraneniya osnovnykh vrediteley, bolezney i sornyakov v Respublike Kareliya na 2000 i meropriyatiya po zashchite sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Forecast of the major pests spread, diseases and weeds in the Republic of Karelia in 2000 and measures of crop protection]. Petrozavodsk, Petrozavodsk State University Publ., 2000. 112 p.
9. Ramenskaya M. L. *Lugovaya rastitel'nost' Karelii* [Meadow plants of Karelia]. Petrozavodsk, Gosizdat KASSR, 1958. 400 p.
10. Dekeirsschieter J., Verheggen F., Lognay G., Haubruge E. Large carrion beetles (Coleoptera, Silphidae) in Western Europe: a review // Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 2011. № 15 (3). P. 435–447.
11. Heinzel H., Böhm H. Wind-orientation of walking carrion beetles // J. Comparative Physiology A. 1989. Vol. 164. P. 775–786.
12. Kočàrek P. Diurnal activity rhythms and niche differential in a carrion beetles assemblage (Coleoptera: Silphidae) in Opava, the Czech Repablic // Biolog. rhythm resear. 2001. Vol. 32 (4). P. 431–438.
13. Kočàrek P., Benko K. The occurrence and seasonal activity of Silphidae in the Hluchin region (Silesia, Czech Republic) // Cas. Slez. Muz Opava (A). 1997. № 2. P. 173–179.
14. Otronen M. The effect of body size on the outcome of fights in burying beetles *(Nicrophorus*) // Ann. Zool. Fen. 1988. Vol. 25. № 2. P. 191–201.
15. Peck S. P. Review of the carrion beetles of Australia and New Guinea (Coleoptera: Silphidae) // Australian J. of Entomology. 2001. № 40. P. 93–101.
16. Ratcliffe B. C. The Carrion Beetles (Coleoptera: Silphidae) of Nebraska // Bulletin of the University of Nebraska State Museum. 1996. 100 p.
17. Silfverberg H. Enumeratio nova Coleopterorum Fennoscandiae, Daniae et Baltiae. Sahlbergia. Helsinki, 2004. Vol. 9. P. 1–111.

Поступила в редакцию 21.12.2012

Март, № 2 **Биология** **2013**

УДК 639.112

ЕВГЕНИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ХОЛОДОВ
аспирант кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
holodov@mcx.karelia.ru

ЛЕСНОЙ СЕВЕРНЫЙ ОЛЕНЬ В НАЦИОНАЛЬНОМ ПАРКЕ «ВОДЛОЗЕРСКИЙ»*

Лесной северный олень (*Rangifer tarandus fennicus* Lönnb.) – подвид дикого северного оленя, распространенный на северо-западе Европейской России и в Финляндии. Он занесен в Красные книги Республики Карелия и Архангельской области, в Красную книгу Фенноскандии. С начала XX века численность лесного северного оленя и ареал его распространения сильно сократились из-за незаконной охоты, повреждения и сокращения площадей ягельников, хищников. В настоящее время самое южное в Карелии место обитания северного оленя – территория национального парка «Водлозерский». Сохранению этой группировки северного оленя способствовал режим охраны особо охраняемой природной территории федерального значения, контролирующийся государственной инспекцией по охране территории национального парка. Учеты северного оленя на больших площадях проводятся методом зимнего маршрутного учета (ЗМУ), однако ошибки, получаемые при этом методе, не позволяют объективно оценить его численность. При использовании метода учета оленьих стад по следам и встречам удалось оценить численность северного оленя на территории Водлозерского парка, она составляет 80–120 экземпляров, из них порядка 100 особей – в архангельской части парка. Усиление охраны северных оленей, постоянный мониторинг их численности на территории всего ареала обитания позволят увеличить численность лесных северных оленей.

Ключевые слова: лесной северный олень, национальный парк «Водлозерский», Красная книга Республики Карелия, местообитание, численность

Лесной северный олень (*Rangifer tarandus fennicus* Lönnb.) занесен в Красные книги Республики Карелия и Архангельской области, а также в Красную книгу Фенноскандии и имеет статус 3-й категории (редкие), по классификации Международного союза охраны природы лесной северный олень относится к категории LC – вызывающие наименьшее опасение [3], [4], [8]. Его численность в Республике Карелия составляет 2,5–3 тыс. особей. В настоящее время ареал северного оленя сократился, он встречается в северной части республики: это Лоухский, Калевальский, Кемский, Беломорский, Муезерский, Сегежский, Пудожский районы и территория Костомукшского городского округа. В последние годы олени не отмечаются в Суоярвском и Медвежьегорском районах.

В начале XIX века, по информации П. Н. Рыбникова [7], северный олень встречался на всей территории Пудожского уезда, ежегодно оттуда привозилось на ярмарки 100–150 оленьих шкур. По данным И. С. Полякова [5], во второй половине XIX века в Водлозерье северный олень был более обычной добычей охотников, чем лось. В настоящее время на территории национального парка «Водлозерский» места постоянного обитания северных оленей расположены севернее линии р. Нижняя Охтома – залив Пиголахта, хотя в 1995 году был отмечен заход 3 северных оленей до оз. Чепшезеро. Карельская часть национального парка – самое южное постоянное место обитания северного оленя в Карелии в настоящее время.

По некоторым данным [8], западная (онежская) популяция лесного северного оленя в Архангельской области, примыкающая к Карелии, в 2002 году составляла не более 330 экземпляров, она охватывала территорию Водлозерского национального парка, бассейны рек Кожи и Подломки, а также современную территорию Кожозерского парка.

Расположение национального парка «Водлозерский» на границе Карелии и Архангельской области делает его резерватом для восстановления популяции северного оленя на территории восточных районов Средней и Южной Карелии – Медвежьегорского, Сегежского и Пудожского, а также Онежского района Архангельской области. С момента создания национального парка в 1991 году незаконная добыча оленей на его территории ежегодно составляет 1–5 особей, между тем стада нередко выходят за пределы особо охраняемой природной территории, где охрана животного мира осуществляется не на должном уровне. В последние годы пресс браконьерства стал главным фактором, сдерживающим рост популяции северного оленя и в Карелии, и в Архангельской области.

В карельской части национального парка площадь, пригодная для обитания северного оленя, составляет 58,5 тыс. га, из них на долю открытых болот приходится 17 тыс. га, архангельская часть полностью пригодна, ее площадь составляет 327,4 тыс. га, из них 153,3 тыс. га болот. Следует отметить, что в северной части Вод-

© Холодов Е. В., 2013

лозерского парка преобладают сосновые леса, преимущественно сосняки-беломошники, брусничники, черничники, сфагновые и вересковые. Кормовая база для зимнего питания северного оленя хорошая. Однако на отдельных участках в районах зимних пастбищ имеются явные признаки деструкции ягельников.

На рис. 1, 2 отражены расчеты численности и показатели учета северного оленя в Водлозерском национальном парке, однако следует отметить, что метод ЗМУ не дает возможности определить абсолютную численность северного оленя [8]. При определении численности по следам и встречам животных население оленей на территории парка в среднем в два раза ниже определенного методом зимнего маршрутного учета.

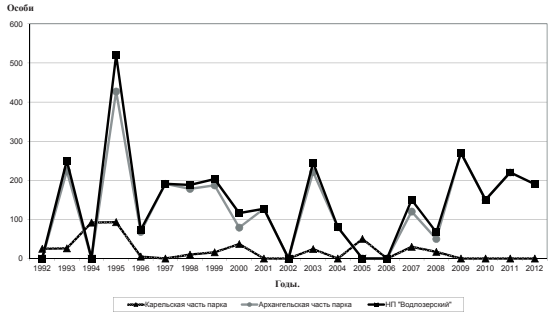


Рис. 1. Численность лесного северного оленя на территории национального парка «Водлозерский» по данным ЗМУ

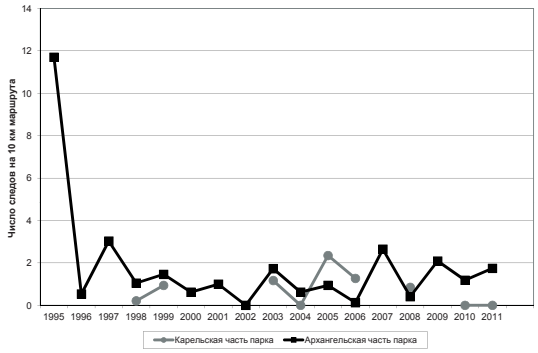


Рис. 2. Показатель учета лесного северного оленя на территории национального парка «Водлозерский» по годам

Всего в архангельской части обитают от 70 до 110 особей. В том числе на Калгачинском участке постоянно держится одно стадо из 6–12 особей, на Тунозерском – 2 стада по 10–15 особей, на Монастырском – 2 стада по 10–15 особей, на Нюхчезерском – одно стадо до 10 особей, на Лузском участке – 2 стада: одно – 6–10 особей, другое – 10–15 особей. Всего в архангельской части обитают от 70 до 110 особей. В карельской части в настоящее время обитают 2 стада по 6–10 особей. Таким образом, реальная плотность населения лесного северного оленя на территории парка составляет 0,21–0,34 особи на 1000 га. Расстояния между районами обитания стад составляют до 30 км, поэтому большую часть года стада существуют обособленно, не контактируя друг с другом. Восточнее национального парка северные олени практически уничтожены. Остались обособленные стада в Кожозерском парке и его окрестностях общей численностью до 50 особей [6]. На северо-западе группировка контактирует с оленями, обитающими в Сегежском и Беломорском районах Карелии.

За границами национального парка прошли сплошные рубки леса, поэтому там область обитания оленей сократилась. Рубки расстроили и повредили лишайниковый покров. (Составляющие его кладонии оленья и альпийская (*Cladonia rangiferina*, *C. alpestris*) наряду с лишайниками рода *Usnea* служат основными кормами оленей в зимнее время.)

Характерной особенностью северных оленей является сезонная смена стаций обитания. В зимнее время они держатся группами, передвигаясь по борам в поисках ягеля. Летом стада разбиваются, самки уходят в места отела, самцы держатся группами по 2–3 зверя, во время гона олени формируют гаремные группы, а позднее вновь объединяются в стада. Случается, что взрослые быки держатся отдельно по 2–5 зверей в течение всей зимы [2]. Несмотря на полное отсутствие пресса охоты на территории парка, невысокую численность волка, численность оленей в парке не увеличивается, по всей видимости, часть животных уходят за пределы охраняемой территории, подпитывая соседние группировки, и, возможно, гибнут от браконьеров.

Обычно самка лесного северного оленя (важенка) приносит одного теленка [1]. В период 2011–2012 годов из 10 встреченных самок с телятами 9 были с одним теленком, и только одна – с двумя. Сдерживающими рост численности факторами являются также бурый медведь и росомаха. Плотность населения последней на территории Водлозерского парка, по данным зимнего маршрутного учета, достигает 0,1 особи на 1000 га. Рысь, которая, по мнению К. Хейкура (цит. по [2]), в Финляндии является вторым хищником по масштабам ущерба популяции северного оленя [1], не оказывает заметного влияния на смертность телят, так как ее плотность в северной части парка очень низка (0,01 особи на 1000 га).

В целях сохранения субпопуляции лесного северного оленя в Водлозерском парке целесообразно принять следующие меры.

- Усилить охрану вида на прилегающих территориях (беспокойство вызывают в первую очередь районы оз. Чукозера, оз. Нельмозера, р. Нюхчи, активно осваиваемые рыбаками и охотниками как в летнее время, так и зимой).
- Запретить посетителям и работникам парка осуществлять активное наблюдение за оленями, преследуя их на снегоходах, так как при преследовании животных на скорости у оленей лопаются кровеносные сосуды легких, что приводит к их гибели или длительной болезни [1].

- Осуществлять мониторинг численности лесного северного оленя исключительно методом регистрации, картирования стад и слежения за их перемещением.
- Выявить места пребывания каждого стада в разные сезоны, места отела, для чего использовать авиаучет и метод радиотелеметрии, но использование этих методов требует значительного дополнительного финансирования.
- Изменить Правила охоты для пресечения возможности провозить оружие на снегоходной технике и маломерных судах.

Принятые меры позволят объединить разрозненные группировки северных оленей в единую субпопуляцию, включающую Водлозерский и Кожозерский парки, районы Валдая и Ветреного пояса.

БЛАГОДАРНОСТЬ

В заключение выражаю итскреннюю благодарность сотрудникам национального парка «Водлозерский», в особенности Р. В. Хохлову, поделившимися своими наблюдениями за северными оленями.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов П. И. Охотничьи звери Карелии: экология, ресурсы, управление, охрана. М.: Наука, 2005. 340 с.
2. Данилов П. И. Новые виды млекопитающих на Европейском Севере России. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2009. 308 с.
3. Красная книга Архангельской области. Архангельск: Администрация Архангельской обл., 2008. 351 с.
4. Красная книга Республики Карелия. Петрозаводск: Карелия, 2007. 368 с.
5. Поляков И. С. Три путешествия по Олонецкой губернии. Петрозаводск: Карелия, 1991. 215 с.
6. Природа и историко-культурное наследие Кожозерья. Архангельск: УрО РАН, 2006. 310 с.
7. Рыбников П. Н. Памятная книжка Олонецкой губернии. Петрозаводск, 1866. 329 с.
8. Северный олень в России, 1982–2002. М.: Триада-фарм, 2003. 400 с.
9. Red Data Book of East Fennoscandia. Helsinki: Ministry of the Environment, Finnish Environment Institute, Botanical Museum, Finnish Museum of Natural History, 1998. 351 с.

Kholodov E. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

WILD FOREST REINDEER IN VODLOZERO NATIONAL PARK

Wild forest reindeer (*Rangifer tarandus fennicus* Lönnb.) is a subspecies of wild reindeer widespread in Northwest European Russia and in Finland. They are included in the Red Data Books of the Republic of Karelia and the Arkhangelsk region as well as in the Red Data Book of Fennoscandia. Since the beginning of the XXth century the size of the wild forest reindeer population and their distribution area have greatly declined. The main reasons for the decline in the number of reindeer are illegal hunting, damage and reduction of reindeer lichen grounds, and a reduced number of predators. At present the southernmost reindeer habitat in Karelia is the territory of Vodlozero National Park. The preservation of this reindeer aggregation was facilitated by the protection regime of this specially protected nature conservation area of federal significance administered by the state inspectorate for the protection of the national park territory. The counts of forest reindeer on big areas are carried out using the method of winter route counting, but the errors obtained with the use of this method do not allow to objectively assess their number. The use of the method of counting reindeer herds by traces and encounters made it possible to assess the number of reindeer on the territory of Vodlozero Park, which amounts to 80–120 individuals, about 100 of them living in the Arhangelsk region part of the park. The strengthening of reindeer protection and continuous monitoring of their number all over the area of their habitat will allow to increase the size of wild forest reindeer population.

Key words: wild forest reindeer, Vodlozero National Park, Red Data Book of the Republic of Karelia, habitat, number

REFERENCES

1. Danilov P. I. *Ohotnich'i zveri Karelii: ekologiya, resursy, upravlenie, okhrana* [Hunting animals of Karelia: ecology, resources, management, protection]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 340 p.
2. Danilov P. I. *Novye vidy mlekopitayushchikh na Evropeyskom Severe Rossii* [New species of mammals in Russian European North]. Petrozavodsk, Karelian Recearch Center of RAS, 2009. 308 p.
3. *Krasnaya kniga Arkhangel'skoy oblasti* [Red Data Book of the Arhangelsk Region]. Arkhangelsk, Administration of the Arkhangelsk Region, 2008. 351 p.
4. *Krasnaya kniga Respubliki Kareliya* [Red Data Book of the Republic of Karelia]. Petrozavodsk, Karelia Publ., 2007. 368 p.
5. Polyakov I. S. *Tri puteshestviya po Olonetskoy gubernii* [Three travels around the Olonets province]. Petrozavodsk, Karelia Publ., 1991. 215 p.
6. *Priroda i istoriko-kul'turnoe nasledie Kozhozer'ya* [Nature and historical and cultural heritage of Kozhozerya]. Arkhangelsk, Ural office of the Russian Academy of Sciences, 2006. 310 p.
7. Rybnikov P. N. *Pamyatnaya knizhka Olonetskoy gubernii* [The Memorable book of the Olonets province]. Petrozavodsk, 1866. 329 p.
8. *Severnyy olen' v Rossii, 1982–2002* [Reindeer in Russia, 1982–2002]. Moscow, Triada-farm Publ., 2003. 400 p.
9. Red Data Book of East Fennoscandia. Helsinki, Ministry of the Environment, Finnish Environment Institute, Botanical Museum, Finnish Museum of Natural History, 1998. 351 p.

Поступила в редакцию 13.11.2012

Март, № 2 **Медицинские науки** **2013**

УДК 616

АННА НИКОЛАЕВНА ДЕЛИЕВА
аспирант кафедры госпитальной терапии им. М. В. Черноруцкого, Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. академика И. П. Павлова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
delanna2007@yandex.ru

ЛЮБОВЬ ЮРЬЕВНА ДОЛИНИНА
кандидат медицинских наук, докторант кафедры госпитальной терапии им. М. В. Черноруцкого, Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. академика И. П. Павлова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
liuba2612@mail.ru

ОЛЬГА ВЛАДИМИРОВНА ГАЛКИНА
кандидат биологических наук, заведующий лабораторией биохимического гомеостаза организма НИИ нефрологии, Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. академика И. П. Павлова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
ovgalkina@mail.ru

ВАСИЛИЙ ИВАНОВИЧ ТРОФИМОВ
доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой госпитальной терапии им. М. В. Черноруцкого, Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. академика И. П. Павлова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
trofvi@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ КЛЕТОЧНОГО И ГУМОРАЛЬНОГО МЕХАНИЗМОВ МЕСТНОГО ВОСПАЛЕНИЯ ПРИ ХОБЛ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ТЯЖЕСТИ

Обследовано 112 пациентов с хронической обструктивной болезнью легких (ХОБЛ) различной степени тяжести. Выявлено повышение макрофагов в бронхиальном секрете при легкой и средней степенях тяжести, что подтверждает значимую роль этих клеток на начальных этапах формирования ХОБЛ. Обнаружено значительное повышение уровня нейтрофилов при тяжелой и крайне тяжелой степенях ХОБЛ, что с учетом литературных данных может влиять на персистирование воспаления и формирование необратимой бронхообструкции. Показано повышение уровня лимфоцитов в мокроте, коррелирующее с активностью TNF-α мокроты. Уровни IL-8 и TNF-α сыворотки крови оказались повышенными при всех степенях тяжести ХОБЛ, что может свидетельствовать о сохранении высокой активности системного воспаления в фазе затихающего обострения. Подтверждено влияние ингаляционных ГКС на активность цитокинов у больных ХОБЛ.

Ключевые слова: ХОБЛ, воспаление, макрофаги, нейтрофилы, IL-8, TNF-α, IL-10

Хроническая обструктивная болезнь легких – одно из наиболее распространенных заболеваний современного общества. Особенностью ХОБЛ является неуклонно прогрессирующая обструкция дыхательных путей, связанная с патологическим воспалительным ответом на повреждающие частицы или газы. Основная локализация воспаления при ХОБЛ – малые дыхательные пути, но активное воспаление присутствует также в крупных бронхах, в легочной паренхиме и в легочных сосудах [6]. Одним из основных факторов, провоцирующих развитие ХОБЛ, является курение. Табачный дым активирует макрофаги, нейтрофилы, Т-лимфоциты и эпителиальные клетки дыхательных путей и альвеол, что приводит к мощному синтезу и выбросу провоспалительных медиаторов, прежде всего цитокинов.

Цель настоящего исследования состояла в изучении и анализе клеточных и гуморальных механизмов локального воспаления у больных с различными степенями тяжести ХОБЛ и определении возможного влияния глюкокортикостероидной терапии на активность воспалительного процесса.

Задачи исследования:

1. Изучить цитологический состав мокроты и смывов из бронхов у больных ХОБЛ различной степени тяжести.
2. Определить уровень цитокинов (TNFa, IL-8, IL-10) в мокроте и смывах из бронхов у больных ХОБЛ различной степени тяжести.
3. Проанализировать влияние ингаляционных глюкокортикостероидов (иГКС) на активность воспалительного процесса в бронхах у больных ХОБЛ.

© Делиева А. Н., Долинина Л. Ю., Галкина О. В., Трофимов В. И., 2013

4. Сравнить информативность мокроты и смывов из бронхов при изучении местного воспалительного процесса при ХОБЛ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В клинике госпитальной терапии СПбГМУ им. академика И. П. Павлова было обследовано 112 пациентов с ХОБЛ различной степени тяжести, из них 83 мужчины и 23 женщины. Диагноз ХОБЛ, степень тяжести и активность течения заболевания устанавливали в соответствии с критериями Глобальной инициативы по хронической обструктивной болезни легких, пересмотра 2011 года (GOLD, 2011). Исходя из руководства по степени тяжести выделено 4 группы пациентов. Первую группу (n = 27) составили пациенты с легкой степенью тяжести ХОБЛ, у которых регистрировалось только изменение индекса Тиффно менее 70 % от должного. Вторая группа – пациенты с ХОБЛ средней степени тяжести (n = 27), у них регистрировалось снижение ОФВ1 менее 80 % от должного, ОФВ1/ФЖЕЛ < 70 %. В третью группу (n = 33) вошли больные с ОФВ1 ≤ 50 %, но более 30 % от должного (тяжелая степень тяжести ХОБЛ). К четвертой группе (n = 25) отнесены пациенты с крайне тяжелым течением ХОБЛ (ОФВ1 < 30 %). Критериями исключения из исследования были дыхательные нарушения при рецидивирующих тромбоэмболиях легочной артерии, раке легкого, системных аутоиммунных заболеваниях, тяжелой эндокринной, печеночной и почечной патологии. Средний возраст обследованных составил 61,87 ± 10,7 года. 86 человек были курильщики со средним стажем курения 25,9 ± 1,8 пачка/лет. У 41 человека имел место контакт с профессиональными вредностями.

Все пациенты были обследованы после прохождения стационарного лечения по поводу обострения ХОБЛ в соответствии с тяжестью течения. После подписания информированного добровольного согласия на медицинское вмешательство проводилось комплексное клинико-инструментальное и лабораторное обследование по плану пульмонологического больного. Дополнительно в мокроте и смывах из бронхов методом иммуноферментного анализа с использованием наборов ООО «Цитокин» СПб определялся уровень TNF-α, IL-8, IL-10. Статистическую обработку данных проводили с помощью программы Статистика 6.0 (StatSoft Inc., США). Критической величиной уровня значимости (p) считали 0,050. Переменные представлены в виде «M ± m», где M – среднее арифметическое, m – среднеквадратичное отклонение (SD).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки персистирующего воспалительного процесса в бронхиальном дереве у пациентов ХОБЛ различной степени тяжести выполнялись цитологические исследования спонтанной мокроты и бронхоальвеолярных смывов (табл. 1); в данных биологических жидкостях также определялась концентрация провоспалительных (IL-8, TNF-α) и противовоспалительных (IL-10) цитокинов (табл. 2).

Таблица 1

Клеточный состав мокроты и смывов из бронхов больных ХОБЛ различной степени тяжести (%)

Степень тяжести ХОБЛ	Мокрота				Смывы из бронхов			
	Макрофаги	Нейтрофилы	Лимфоциты	Эозинофилы	Макрофаги	Нейтрофилы	Лимфоциты	Эозинофилы
Легкая (n = 27)	23,72* ± 2,54	40,56** ± 3,34	10,2 ± 0,73	14,56 ± 2,87	26,63** ±2 ,42	29,63** ± 2,83	7,25*** ± 0,81	8,0 ± 1,06
Средняя (n = 27)	24,17 ± 2,75	56,91 ± 3,93	10,48 ± 0,69	13,52 ± 1,29	27,3 ± 3,12	40,9 ± 5,40	10,6*** ± 1,18	7,3 ± 1,27
Тяжелая (n = 33)	17,25* ± 1,67	51,29 ± 2,98	8,11 ± 0,79	11,79 ± 2,02	21,53 ± 2,87	40,29* ± 3,90	6,76 ± 0,80	10,65 ± 1,05
Крайне тяжелая (n = 25)	17,16 ± 2,68	51,36** ± 3,30	7,64 ± 0,74	12,52 ± 2,94	17,2** ± 1,81	40,8** ± 4,58	8,2 ± 0,85	9,1 ± 1,4

Примечание. * – p < 0,005 между легкой и тяжелой степенями тяжести ХОБЛ; ** – p < 0,005 между легкой и крайне тяжелой степенями тяжести ХОБЛ; *** – p < 0,005 между легкой и средней степенями тяжести ХОБЛ.

Таблица 2

Уровень IL-8, TNF-α, IL-10 мокроты и смывов из бронхов больных ХОБЛ различной степени тяжести (пг/мл)

Степень тяжести ХОБЛ	Мокрота			Смывы из бронхов		
	IL-8	TNF-α	IL-10	IL-8	TNF-α	IL-10
Легкая (n = 27)	1806,39* ± 135,29	9,96 ± 1,55	26,72 ± 3,48	146,75 ± 16,22	4,33 ± 0,97	13,43 ± 0,17
Средняя (n = 27)	2114,36** ± 96,75	24,06 ± 9,9	22,07 ± 3,21	309,9 ± 31,14	35,7 ± 1,4	3,43 ± 0,62
Тяжелая (n = 33)	1075,13* ± 19,67	13,64 ± 3,41	17,48 ± 7,0	240,02 ± 19,59	15,92 ± 3,09	6,7 ± 0,13
Крайне тяжелая (n = 25)	1229,65** ± 27,68	15,5 ± 7,53	16,42 ± 6,06	269,4 ± 7,57	4,89 ± 0,3	0,38 ± 0,12

Примечание. * – p < 0,005 между легкой и тяжелой степенями тяжести ХОБЛ; ** – p < 0,005 между средней и крайне тяжелой степенями тяжести ХОБЛ.

По результатам данного исследования выявлено, что во всех биологических жидкостях при легком и среднетяжелом течении ХОБЛ отмечалась выраженная макрофагальная реакция. Уровень макрофагов в мокроте при ХОБЛ легкой степени тяжести (23,72 ± 2,54 %) был достоверно выше, чем при тяжелой степени тяжести (17,25 ± 1,67 %). В смывах из бронхов уровень макрофагов при легкой степени тяжести ХОБЛ также был достоверно выше (26,63 ± 2,42 %), чем при крайне тяжелой ХОБЛ (17,2 ± 1,81 %) (табл. 1).

Обратная динамика выявлена по уровню нейтрофилов. С утяжелением течения ХОБЛ нарастало количество нейтрофилов в мокроте и бронхиальном смыве. В мокроте уровень нейтрофилов при ХОБЛ легкой степени тяжести (40,56 ± 3,34 %) был достоверно ниже такового при крайне тяжелом течении ХОБЛ (51,36 ± 3,30 %). Аналогичная картина наблюдалась в смывах из бронхов с достоверно более высоким уровнем нейтрофилов у больных с крайне тяжелым течением ХОБЛ (40,8 ± 4,58 %) по сравнению с больными ХОБЛ легкой степени тяжести (29,63 ± 2,83 %).

Таким образом, на ранних стадиях течения ХОБЛ преобладает макрофагальная активность, что позволяет предположить ведущую роль этих клеток в развитии воспалительного процесса на начальных стадиях заболевания. В настоящее время альвеолярный макрофаг считается центральной клеткой воспаления и регулятором сложных межклеточных взаимодействий.

При тяжелом и крайне тяжелом течении ХОБЛ в бронхиальном секрете преобладали нейтрофилы. Именно их активность связывают с персистенцией воспаления, ремоделированием и формированием необратимой бронхообструкции [2], [4]. Полученные данные согласуются также с результатами исследований биопсии стенки бронхов при ХОБЛ. Исследование биоптатов бронхов и периферических дыхательных путей больных ХОБЛ показало, что инфильтрация одноядерными клетками, в основном Т-лимфоцитами и макрофагами, преобладает у пациентов с легкой формой заболевания, в то время как у пациентов с тяжелым течением заболевания преобладают нейтрофилы [7].

Кроме того, при изучении цитологического состава мокроты и смывов из бронхов больных ХОБЛ различной степени тяжести было выявлено повышение уровня лимфоцитов и эозинофилов во всех исследуемых группах (табл. 1).

По литературным данным, повышение уровня эозинофилов в мокроте при ХОБЛ регистрируется, как правило, при обострении заболевания. При проведении настоящего исследования пациенты обследовались в фазу затихающего обострения, в связи с чем полученные результаты могут подтверждать роль эозинофилов как фактора риска развития бронхообструкции именно на этапе обострения ХОБЛ [3], [6].

Значение лимфоцитов в патогенезе ХОБЛ в настоящее время активно обсуждается. По литературным данным, лимфоциты являются продуцентами интерферона-γ и могут быть ответственными за выделение TNF-α, который вызывает цитолиз и апоптоз клеток альвеолярного эпителия, что способствует персистенции воспаления [5]. Результаты нашего исследования это подтверждают, так как по данным статистического анализа выявлены достоверные положительные корреляционные связи между уровнем лимфоцитов и TNF-α мокроты ($r = 0,29$, $p = 0,043$). Также была выявлена положительная корреляционная связь между количеством лимфоцитов мокроты и десквамированными эпителиальными клетками мокроты ($r = 0,36$, $p = 0,005$). Эти данные согласуются с исследованиями А. В. Аверьянова и соавторов, которые обнаружили в мокроте и лаважной жидкости пациентов с ХОБЛ повышенное число CD8+ Т-лимфоцитов и деструктивно измененных бронхиальных эпителиоцитов [1]. Лимфоциты этого фенотипа могут быть источником цитокинов, провоцирующих бронхиальную деструкцию, или самостоятельно оказывать цитотоксическое действие на клетки дыхательных путей.

Анализ полученных данных обнаружил взаимосвязь уровня лимфоцитов и IL-10 мокроты ($r = 0,45$, $p = 0,034$). При тяжелой и крайне тяжелой степенях ХОБЛ уровень IL-10 в мокроте снижался (табл. 2) параллельно со снижением уровня лимфоцитов в сыворотке крови (лимфоциты крови при ХОБЛ легкой и крайне тяжелой степеней тяжести соответственно 22,27 ± 1,65 % и 16,5 ± 1,80 %, $p < 0,005$) и мокроте (табл. 1). IL-10 является противовоспалительным цитокином, который вырабатывается в ответ на продукцию провоспалительных цитокинов. Снижение уровня лимфоцитов и противовоспалительного цитокина IL-10 в мокроте и смывах из бронхов обследуемых пациентов с тяжелым и крайне тяжелым течением ХОБЛ (табл. 2), вероятно, является следствием проводимой противовоспалительной терапии, включающей ингаляционные и системные глюкокортикостероиды, на этапе обострения заболевания. Учитывая то, что в настоящее время лимфоцитам отводят большую роль в развитии аутоиммунного воспаления при тяжелых степенях ХОБЛ, противовоспалительная (глюкокортикостероидная) терапия принимает все более важное значение в терапии ХОБЛ, о чем свидетельствуют полученные результаты. При сравнении уровня IL-10 у пациентов, получавших и не получавших терапию иГКС, достоверных отличий не получено, то есть, можно предположить, что прием иГКС не влияет на уровень противовоспалительного цитокина IL-10 напрямую, но может оказывать опосредованный эффект через воздействие на провоспалительные цитокины (табл. 2). В то же время снижение уровня IL-10

при тяжелой и крайне тяжелой степенях ХОБЛ может быть связано и с угнетением иммунной противозащитной системы организма [8].

Кроме противовоспалительного цитокина IL-10 из гуморальных маркеров воспаления в мокроте и смывах из бронхов больных ХОБЛ различной степени тяжести оценивался уровень провоспалительных цитокинов IL-8 и TNF-α (табл. 2).

В результате анализа концентрации изучаемых цитокинов в мокроте и смывах из бронхов были выявлены более высокие значения уровня IL-8 в обеих биологических жидкостях при легкой и средней степенях тяжести ХОБЛ, при этом в мокроте концентрация IL-8 при легкой степени тяжести ХОБЛ (1806,36 ± 135,29 пг/мл) была достоверно выше, чем при тяжелом течении ХОБЛ (1075,13 ± 19,67 пг/мл), а уровень IL-8 при средней степени тяжести (2114,36 ± 96,75 пг/мл) был достоверно выше уровня IL-8 при крайне тяжелом течении ХОБЛ (1229,65 ± 27,68 пг/мл) (табл. 2).

При изучении уровня TNF-α в мокроте и смывах из бронхов также было выявлено повышение концентрации данного цитокина во всех исследуемых группах (табл. 2). Наибольшие значения были отмечены при средней степени тяжести ХОБЛ (24,06 ± 9,9 пг/мл для мокроты и 35,7 ± 1,4 пг/мл для смывов из бронхов), что, в свою очередь, соотносится с высокой макрофагальной реакцией при этой степени тяжести, выявленной в результате цитологического анализа мокроты и смывов из бронхов.

Таким образом, высокий уровень IL-8 и TNF-α в мокроте и смывах из бронхов подтверждает высокую активность воспалительного процесса в бронхиальном дереве при всех степенях тяжести ХОБЛ в фазу затихающего обострения. Патогенетическую взаимосвязь местного клеточного и гуморального механизмов воспаления доказывают выявленные корреляционные связи: в процессе статистического анализа обнаружены достоверные положительные корреляционные связи между уровнем нейтрофилов и IL-8 как мокроты ($r = 0,43$, $p = 0,05$), так и смывов из бронхов ($r = 0,38$, $p = 0,026$).

Анализ взаимосвязей уровня цитокинов с показателями функции внешнего дыхания (ФВД) выявил, что у пациентов с более высокими значениями TNF-α мокроты и IL-8 смывов из бронхов регистрируются более низкие показатели бронхообструкции (ОФВ1%, ПОСвыд.%), что может свидетельствовать об участии данных цитокинов в развитии бронхообструкции у больных ХОБЛ [8], [9].

Следует отметить, что при анализе медикаментозной терапии больных ХОБЛ среди пациентов, страдающих тяжелой и крайне тяжелой степенью тяжести заболевания, число больных, получавших иГКС в средней суточной дозе 1000 мкг в пересчете на бекламетазона дипропионат и тиотропиум бромид (18 мкг в сутки), было значительно больше по сравнению с пациентами легкой и средней степени тяжести ХОБЛ. Например, в группе больных с тяжелым течением заболевания иГКС использовали 78 % пациентов, системные ГКС – 76,8 %, тиотропиум бромид – 56 %, в то время как при средней степени тяжести – 11,5, 28,4 и 28,8 % соответственно. Это может объяснять снижение уровня провоспалительных цитокинов в мокроте и смывах из бронхов у больных с более тяжелым течением ХОБЛ.

Результаты нашего исследования, а также данные о патогенезе ХОБЛ подтверждают рекомендации глюкокортикостероидной терапии уже на этапе средней степени тяжести ХОБЛ, при которой выявлены максимальные значения изучаемых провоспалительных цитокинов и клеток воспаления в мокроте и смывах из бронхов, что в сочетании с бронхолитиками, возможно, позволило бы избежать нарастания необратимой бронхообструкции при тяжелом и крайне тяжелом течении ХОБЛ, а также уменьшить риск развития аутоиммунного процесса.

В результате исследования не получено достоверных различий между уровнем изучаемых цитокинов в мокроте и смывах из бронхов. Выявлены положительные корреляционные связи между уровнем TNF-α мокроты и TNF-α смывов из бронхов ($r = 0,85$, $p = 0,001$), IL-8 мокроты и IL-8 смывов из бронхов ($r = 0,86$, $p = 0,001$).

ВЫВОДЫ

1. У больных хронической обструктивной болезнью легких легкой и средней степеней тяжести преобладает макрофагальная реакция мокроты и смывов из бронхов, что позволяет предположить ведущую роль макрофага в развитии локального воспалительного процесса в начале развития ХОБЛ.

2. У пациентов с тяжелой и крайне тяжелой ХОБЛ в бронхиальном секрете преобладают нейтрофилы, что подтверждает роль данных клеток в поддержании местного персистирующего воспаления.

3. При всех степенях тяжести выявлен высокий уровень IL-8 и TNF-α, причем при легкой и средней степенях тяжести данные маркеры достоверно выше, чем при тяжелой и крайне тяжелой ХОБЛ, что может говорить о значимости базисной противовоспалительной терапии у данной категории пациентов.

4. Информативность анализа мокроты и смывов из бронхов сопоставима, что позволяет чаще использовать цитологическое исследование мокроты, не прибегая к инвазивным методикам, в том числе для оценки активности местного воспаления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверьянов А. В., Самсонова М. В., Черняев А. Л. и др. Аспекты патогенеза эмфиземы легких у больных ХОБЛ // Пульмонология. 2008. № 3. С. 48–52.
2. Дементьева Е. А. Цитобиохимические маркеры воспаления при обострении ХОБЛ на фоне противовоспалительной терапии: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. Томск, 2004. 17 с.
3. Соодаева С. К. Роль свободнорадикального окисления в патогенезе ХОБЛ // Пульмонология и аллергология. 2002. № 1. С. 34–35.
4. Федосеев Г. Б. Механизмы обструкции бронхов. М.: Мед. информ. агентство, 1995. 336 с.
5. Черняев А. Л., Самсонова М. В. Воспаление при хронической обструктивной болезни легких: молекулярные основы патогенеза // Consilium Medicum. 2008. Т. 10. С. 1–3.
6. Globale iniciative for Chronic Obstructive Lung Disease (GOLD). Globale strategy for diagnosis, management and prevention of chronic obstructive pulmonary disease (revised 2011). 2011. 78 p.
7. Stefano D., Caramori A., Ricciardolo G. et al. Cellular and molecular mechanisms in chronic obstructive pulmonary disease: an overview // Clin. Exp. Allergy. 2004. Vol. 34. P. 1156–1157.
8. Takabatake N., Nakamura H., Abe S. et al. Circulating leptin in patients with chronic obstructive pulmonary disease // J. Respir. Crit. Care Med. 1999. Vol. 159. P. 1215–1219.
9. Wilson R. Bacterial infection and chronic obstructive pulmonary infection // Eur. Respir. J. 1999. Vol. 13. № 2. P. 233–235.

Delieva A. N., Saint Petersburg State Medical University named after I. P. Pavlov (St. Petersburg, Russian Federation)
Dolinina L. Yu., Saint Petersburg State Medical University named after I. P. Pavlov (St. Petersburg, Russian Federation)
Galkina O. V., Saint Petersburg State Medical University named after I. P. Pavlov (St. Petersburg, Russian Federation)
Trofimov V. I., Saint Petersburg State Medical University named after I. P. Pavlov (St. Petersburg, Russian Federation)

SPECIFICS OF CELLULAR AND HUMORAL MECHANISMS OF LOCAL INFLAMMATION IN COPD OF VARYING SEVERITY

112 patients with chronic obstructive pulmonary disease of varying severity were examined. The level of macrophages in bronchial secretions were found to increase in mild to moderate severity, which confirms the significant role of these cells in the early stages of COPD. A significant increase in the level of neutrophils was detected in severe and very severe COPD, which in view of literature data can affect the persistence of inflammation and the formation of irreversible bronchial obstruction. The increase of lymphocytes in the sputum, which correlates with the activity of TNF-α, was shown. The levels of IL-8 and TNF-α serum increased in all degrees of severity of COPD, which gives evidence to the continued existence of high activity of systemic inflammation in the stage of abating exacerbation. The effect of inhaled corticosteroids on the activity of cytokines in patients with COPD was confirmed.

Keywords: COPD, inflammation, macrophages, neutrophils, IL-8, TNF-α, IL-10

REFERENCES

1. Averyanov A. V., Samsonova M. V., Chernyaev A. L. and others. Aspects of the pathogenesis of emphysema in patients with COPD [Aspekty patogeneza emfizemy legkikh u bol'nykh HOBL]. *Pulmonologiya.* 2008. № 3. P. 48–52.
2. Dement'ieva E. A. *Tsitobiokhimicheskie markery vospaleniya pri obostrenii HOBL na fone protivovospalitel'noy terapii. Avtoref. cand. med. nauk* [Cytobiochemical markers of inflammation during exacerbation of COPD in anti-inflammatory therapy. Dis. abstract cand. med. sci.]. Tomsk, 2004. 17 p.
3. Soodaeva S. K. The role of free radical oxidation in the pathogenesis of COPD [Rol' svobodnoradical'nogo okisleniya v patogeneze HOBL]. *Pulmonologiya i allergologiya.* 2002. № 1. P. 34–35.
4. Fedoseev G. B. *Mekhanizmy obstruktsii bronkhov* [Mechanisms of bronchial obstruction]. Moscow, Med. Inform. Agency Publ., 1995. 336 p.
5. Chernyaev A. L., Samsonova M. V. Inflammation in chronic obstructive pulmonary disease: molecular basis of pathogenesis [Vospalenie pri khronicheskoy obstruktivnoy bolezni legkikh: molekulyarnye osnovy patogeneza]. *Consilium Medicum.* 2008. Vol. 10. P. 1–3.
6. Globale iniciative for Chronic Obstructive Lung Disease (GOLD). Globale strategy for diagnosis, management and prevention of chronic obstructive pulmonary disease (revised 2011). 2011. 78 p.
7. Stefano D., Caramori A., Ricciardolo G. et al. Cellular and molecular mechanisms in chronic obstructive pulmonary disease: an overview // Clin. Exp. Allergy. 2004. Vol. 34. P. 1156–1157.
8. Takabatake N., Nakamura H., Abe S. et al. Circulating leptin in patients with chronic obstructive pulmonary disease // J. Respir. Crit. Care Med. 1999. Vol. 159. P. 1215–1219.
9. Wilson R. Bacterial infection and chronic obstructive pulmonary infection // Eur. Respir. J. 1999. Vol. 13. № 2. P. 233–235.

Поступила в редакцию 11.12.2012

Март, № 2 **Медицинские науки** **2013**

УДК 611.438:615.367

СВЕТЛАНА ВИКТОРОВНА МИЧУРИНА
доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник, Новосибирский научно-исследовательский институт клинической и экспериментальной лимфологии СО РАМН (Новосибирск, Российская Федерация)
s.michurina@ngs.ru

ДМИТРИЙ ВИКТОРОВИЧ ВАСЕНДИН
кандидат медицинских наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности Института кадастра и природопользования, Сибирская государственная геодезическая академия (Новосибирск, Российская Федерация)
vasendindv@gmail.com

ИРИНА ЮРЬЕВНА ИЩЕНКО
кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Новосибирский научно-исследовательский институт клинической и экспериментальной лимфологии СО РАМН (Новосибирск, Российская Федерация)
irenisch@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНЫХ И МИКРОСТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ТИМУСЕ В «КАТАБОЛИЧЕСКОЙ» ФАЗЕ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕРМИИ

Целью исследования явилось изучение клеточного состава тимуса 45 крыс Вистар после экспериментальной гипертермии. Животные нагревались однократно до стадии теплового удара. На разных сроках эксперимента (5 ч, 3 сут.) после экспериментальной гипертермии животных забивали под легким наркозом и забирали тимус для исследования. Гистологические препараты изготавливались по стандартным методикам. Во всех зонах тимуса дифференцировали иммунобласты, средние и малые лимфоциты, клетки с фигурами митозов, клетки с пикнотическими ядрами, эпителиальные клетки и макрофаги (увеличение 1000 раз, на стандартной площади 4500 мкм²). Установлено, что воздействие на организм крыс Вистар экспериментальной гипертермии приводит к формированию акцидентальной инволюции тимуса. Инволюция органа соответствовала «катаболической» фазе постгипертермического периода (5 ч, 3 сут. после экспериментальной гипертермии), что выражалось в снижении относительного веса органа (на 25 %), уменьшении относительной площади коркового вещества (на 15 %) и плотности лимфоцитов (на 12 %). На тканевом уровне выявлено усиление деструктивных процессов, признаки периваскулярного отека, миграция клеточных элементов в лимфатические пространства и капилляры.

Ключевые слова: тимус, гипертермия, крысы Вистар, инволюция

В последние годы был проведен ряд исследований, посвященных выяснению причин и механизмов нарушений функций органов иммунной, или лимфоидной [10], системы, в частности тимуса, при воздействии на организм общей экспериментальной гипертермии (ЭГ) [2], [3], [4], [11], [12], [13], [15]. В настоящее время отсутствуют систематические литературные сведения, касающиеся состояния тимуса при воздействии на организм высокой внешней температуры. Вопросы морфологических (и функциональных) сдвигов в тимусе обсуждаются фрагментарно, да и то лишь в отношении функциональных иммунологических сдвигов. Но, как отмечает исследователь В. М. Успенский, любая функция решительно невозможна без структуры и любое функциональное нарушение имеет в своей основе морфологические изменения различных уровней: органного, тканевого, клеточного, субклеточного или молекулярного [17].

Изучение биологических эффектов действия на живой организм высокой внешней температуры в эксперименте позволяет получить сведения о структурно-функциональных основах адаптации, дезадаптации и восстановления органов и их систем. Исследования биологических эффектов гипертермического воздействия, реализующихся через морфологическое и функциональное состояние структурно-клеточных элементов тимуса, не проводились, поэтому целью нашей работы явилось изучение особенностей структурных и микроструктурных изменений в тимусе в различные сроки после однократного воздействия высокой внешней температуры (ЭГ).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования были проведены на 45 самцах крыс Вистар в возрасте 2,5–3 мес. с исходной массой тела 200–230 г. В качестве объекта исследования выбран тимус крыс.

Разогревание экспериментальных животных производилось в утренние часы в соответствии со «Способом экспериментального моделирования общей гипертермии у мелких лаборатор-

© Мичурина С. В., Васендин Д. В., Ищенко И. Ю., 2013

ных животных» [5]. Животных разогревали в резервуаре стандартной термобани ТБ-110 при погружении в горячую воду до уровня шеи. Уровень гипертермии, при котором прекращали разогревание, определялся ректальной температурой 43,5 ºС (стадия теплового удара). Время разогревания каждой особи до уровня ректальной температуры 43,5 ºС было индивидуальным и составляло не более 17 мин. Темп повышения температуры тела животных составил более 1 ºС за 5 мин. Температурный режим нагрева горячей воды-теплоносителя подбирался экспериментально и составил 45 ºС. Данную температуру можно считать оптимальной при моделировании общей гипертермии, так как более высокие значения плохо переносятся животными и приводят в конечном итоге к возрастанию ректальной температуры до уровня гипертермии (40 ºС и выше), но медленнее, чем на 1 ºС за 5 мин. Измерение ректальной температуры проводилось на всех этапах эксперимента: до начала опыта, в течение всего периода разогревания и в постгипертермическом периоде в течение 30 мин.

Термометрия осуществлялась с помощью дифференциальной термопары (медь-константан), подключенной к высокочувствительному микровольтметру-микроамперметру постоянного тока типа Ф 116/2, что позволяло с высокой точностью измерять даже небольшие перепады температур. Непрерывное в ходе всего опыта и точное (до десятых долей градуса) измерение ректальной температуры позволяло извлекать животных из термобани в критический момент – на высоте развития теплового удара, что обеспечило их стопроцентную выживаемость. По данным термометрии, ректальная температура крыс возвращалась к исходному уровню уже через 20 мин после прекращения разогревания.

Все животные нагревались однократно в полном соответствии с описанной методикой до стадии теплового удара (ректальная температура 43,5 ºС). На разных сроках эксперимента животных забивали под легким эфирным наркозом путем декапитации, по 15 животных из группы в каждую временную точку, и забирали гистологический материал для морфологических исследований.

Для светооптического исследования тимус фиксировали в растворе по Телесницкому, обезвоживали в серии спиртов возрастающей концентрации и заливали в смесь парафина с добавлением 5–6 % чистого воска. Срезы изготавливали на ротационном микротоме, окрашенные препараты заключали в канадский бальзам. Определение относительных площадей коркового и мозгового вещества, капсулы и междольковых перегородок проводили на срезах толщиной 10 мкм, окрашенных гематоксилином Майера и эозином, используя метод наложения точечных морфометрических сеток [1]. Срезы морфометрировали при увеличении в 16 раз, морфометрию железистых образований проводили на тех же срезах при увеличении в 200 раз. Клеточный состав тимуса изучали на срезах толщиной 5 мкм, окрашенных азуром II и эозином. При увеличении в 1000 раз (объектив 100, окуляр 10) подсчитывали абсолютное количество разных видов клеток на стандартной площади 4500 мкм². Дифференцировали следующие клеточные элементы: иммунобласты, средние и малые лимфоциты, клетки с фигурами митозов, клетки с пикнотическими ядрами, эпителиальные клетки и макрофаги. Подсчет клеток проводили в субкапсулярной и внутренней зонах коркового вещества и в мозговом веществе. Для всех морфологических данных вычисляли абсолютные и относительные показатели.

Для электронно-микроскопического исследования материал (по 5 кусочков тимуса от каждого животного, по 5 животных из каждой экспериментальной группы) фиксировали в 4 % параформальдегидном изотоническом 0,1 М фиксаторе на фосфатном буфере Миллонига (ph = 7,4) в течение 2 ч при t = 4 °С. Дофиксацию проводили в 1 % осмиевом фиксаторе на 0,2 М какодилатном буфере (ph = 7,4). После дегидратации образцов в серии спиртов возрастающей концентрации они заключались в эпон-812. Ультратонкие срезы толщиной 35–45 нм получали на ультратоме LKB-8800, контрастировали насыщенным водным раствором уранилацетата при 40 ºС в течение 40 мин, а затем цитратом свинца в течение 20 мин. После напыления углеродом в вакууме контрастированные срезы изучались в электронном микроскопе JEM-1010.

Статистическую обработку данных проводили методом вариационной статистики с применением t-критерия Стьюдента [8], [14]. Полученные результаты обработаны при помощи пакета программ Statistica 6.0. Различия сравниваемых показателей принимались как достоверные при $p < 0,05$. Результаты представлены как $M \pm m$, где M – среднестатистическое значение, m – стандартная ошибка от среднего.

Все экспериментальные работы выполнены в Центральной научно-исследовательской лаборатории Новосибирского государственного медицинского университета (заведующий – доктор медицинских наук профессор С. В. Мичурина) с соблюдением правил биоэтики, утвержденных Европейской конвенцией о защите позвоночных животных, используемых для лабораторных или иных целей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нами было установлено, что воздействие на организм крыс ЭГ приводит к выраженным изменениям на тканевом, клеточном и субклеточном уровнях организации тимуса, которые характерны для «катаболической» фазы развития постстрессорной реакции, соответствующей в

нашем эксперименте острому (5 ч, 3 сут.) постгипертермическому периоду [13].

Воздействие на организм крыс высокой внешней температуры приводило к выраженным изменениям не только зонального [3], но и клеточного состава тимуса во всех его структурно-функциональных зонах.

Клеточный состав тимуса был изучен нами на светооптическом и электронно-микроскопическом уровнях. Субклеточное строение тех клеток, которые хорошо визуализировались на светооптическом уровне, мы сочли возможным не показывать, однако присутствие всех типов клеточных популяций подтверждено электронно-микроскопически. Некоторые типы клеток тимуса не идентифицировались при помощи светомикроскопического метода исследования, поэтому приводится подробное описание их ультраструктурной организации.

Цитологический профиль тимуса был представлен следующим образом. У контрольной группы животных (интактные крысы) в корковом веществе тимуса хорошо выражена субкапсулярная зона. Общая численность клеток на стандартной площади 4500 мкм^2 составила 172,83 ± 6,18. При этом количество малых лимфоцитов было 119,0 ± 5,99, иммунобластов – 25,5 ± 2,2, средних лимфоцитов – 14,0 ± 2,0. Количество клеток с фигурами митозов составило 3,3 ± 0,61, а численность клеток с пикнотическими ядрами – 2,67 ± 0,37. Кроме того, в субкапсулярной зоне коркового вещества тимуса были хорошо представлены макрофаги (2,33 ± 0,23) с фагоцитированными остатками ядер погибших лимфоцитов. В субкапсулярном слое коры тимуса группы контрольных животных количество эпителиальных клеток на стандартной площади равнялось 6,0 ± 1,06.

Во внутренней зоне коркового вещества плотность клеточных элементов оказалась большей, чем в субкапсулярном и мозговом слоях. На стандартной площади 4500 мкм^2 содержалось в среднем 216,17 ± 7,61 клетки. Количество малых лимфоцитов составило 179,17 ± 6,56, иммунобластов – 8,33 ± 1,12, средних лимфоцитов – 15,33 ± 1,54. Фигуры митозов отмечались у 3,67 ± 0,61 клетки. Численность же макрофагов была 1,83 ± 1,19. Во внутренней коре эпителиальные клетки встречались несколько реже, чем в субкапсулярной. Их количество на стандартной площади составило 5,67 ± 1,19.

В мозговом веществе регистрировалась наименьшая плотность клеточных элементов, чем во всех изученных нами зонах тимуса, она составила 127,67 ± 9,18. При этом доминировала популяция малых лимфоцитов, в среднем она составила 83,67 ± 9,53 клетки; иммунобластов – 3,83 ± 0,59, а средних лимфоцитов – 15,67 ± 2,65. Содержание клеток с фигурами митозов также в мозговом слое тимуса меньше, чем в структурно-функциональных зонах коркового вещества. Количество делящихся клеток на стандартной площади равнялось 0,17 ± 0,18. Численность макрофагов составила 2,0 ± 0,69. Обращает на себя внимание то, что в мозговом веществе органа значительно больше эпителиальных клеток, нежели в корковом слое. На стандартной площади среза их в среднем 21,0 ± 1,44.

В стромальном компартменте тимуса у интактных животных встречались различные типы клеточных популяций: лимфоциты, плазматические клетки, эозинофилы, макрофаги, обычно расположенные неправильно.

Распространенным типом клеточных элементов тимуса являются тучные клетки. Они расположены в основном в соединительнотканной строме, часто обнаруживаются рядом с кровеносными сосудами, а также диффузно разбросаны в капсуле и междольковых перегородках. Среди выявленных нами тучных клеток в строме тимуса встречались как дегранулирующие, так и недегранулирующие формы. Недегранулирующие клетки визуализировались как крупные, с высокой плотностью гранул, маскирующих ядро. Среди дегранулирующих тучных клеток преобладали клетки со слабой (I степень) степенью дегрануляции. Присутствие клеток с III степенью дегрануляции оказалось невелико.

У контрольной группы животных эпителиальный компонент тимуса был представлен диффузной сетью эпителиальных клеток, железистыми структурами и тельцами Гассаля. Место скопления телец Гассаля – мозговое вещество. У интактных животных они встречались редко и, как правило, в виде небольших одиночных образований. Мелкие тельца состояли из нескольких концентрически расположенных эпителиальных клеток, в более крупных тельцах эпителиальные клетки образовывали несколько слоев. Центральная часть таких телец была заполнена гомогенным блестящим ярко-розовым веществом.

Железистые структуры выглядели как тяжи и трубчатые образования. Стенка последних была сформирована одним слоем эпителиальных клеток, а в просвете обнаруживались лимфоциты и эпителиальные слущенные клетки.

Сосудистое русло в коре тимуса представлено кровеносными капиллярами. В зоне кортико-медуллярного соединения идентифицировались посткапиллярные венулы, имеющие более широкий просвет и хорошо выраженные периваскулярные пространства неравномерной ширины. В периваскулярных пространствах, окружающих артериолы и посткапиллярные венулы тимуса в зоне кортикомедуллярного соединения, мы встречали лимфатические капилляры. На светооптическом уровне лимфатические капилляры выглядели как слепо начинающиеся, неравномерно расширенные пространства, выстланные эндотелием и заполненные лимфоцитами.

«Катаболическая» фаза постгипертермического периода характеризовалась увеличением

периваскулярных пространств в тимусе, особенно в области корковомедуллярного соединения и мозговой зоны. На светооптическом уровне отмечалось появление плазматических клеток на фоне большого числа лимфоидных клеток, заполняющих периваскулярные пространства. Ультраструктурно выявлено, что плазматические клетки очень активны: профили их гранулярного эндоплазматического ретикулума расширены, заполнены электронносветлым материалом и образуют с митохондриями мито-ГЭР-комплексы (рис. 1).

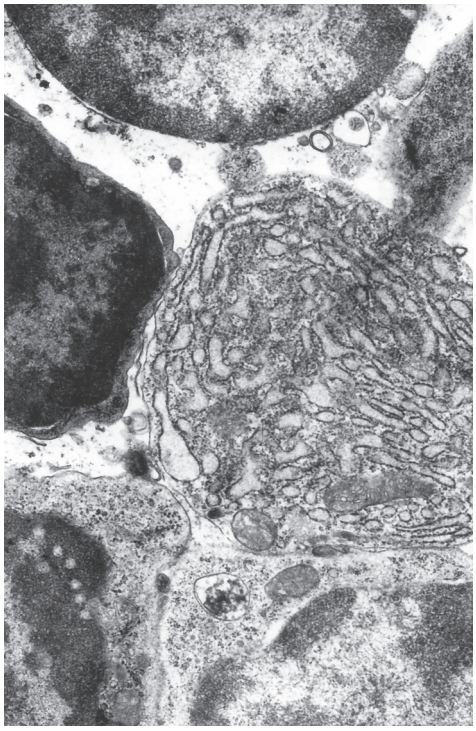


Рис. 1. Плазматическая клетка. Увеличение 8000

На ультраструктурном уровне обращало на себя внимание очень большое количество пиноцитозных везикул в эндотелиоцитах капилляров и венул, разволокнение базальных мембран, преимущественно со стороны периваскулярных эпителиальных клеток, наличие соединительнотканных фибрилл и детрита разрушенных эпителиальных клеток в периваскулярных пространствах (рис. 2).

Такие морфологические изменения свидетельствуют о нарушении гемато-тимического барьера и лимфодренажной функции, поскольку перивенулярные пространства рассматриваются исследователями в качестве прелимфатических структур [15]. Появление плазматических клеток может свидетельствовать о наличии антигена в паренхиме и строме тимуса [19]. На протяжении всей «катаболической» фазы после ЭГ на ультраструктурном уровне отмечалась дилатация и заполнение клеточным детритом интерстициальных пространств во всех зонах тимуса. Обнаружены значительные разрушения эпителиальных клеток (рис. 3).

Рис. 2. Фрагмент эпителиальной клетки с вакуолью. Фрагмент эндотелиальной клетки с большим количеством пиноцитозных пузырьков. Увеличение 10 000

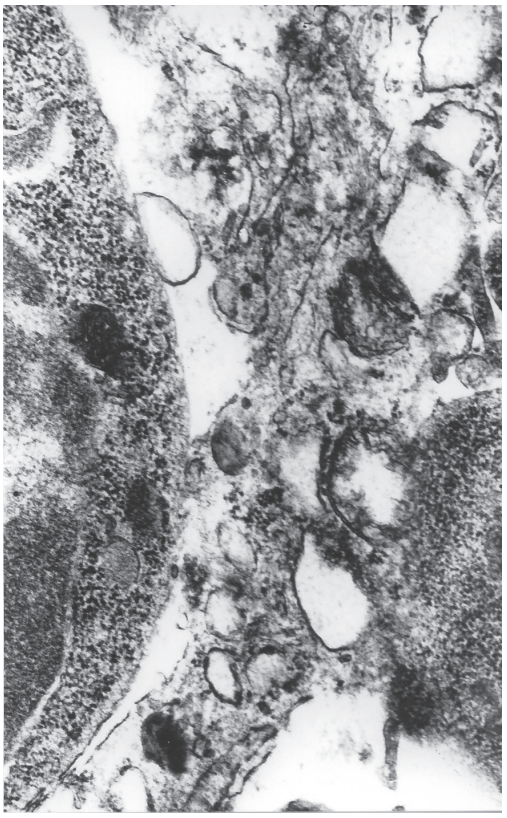


Рис. 3. Фрагмент разрушенной эпителиальной клетки. Увеличение 15 000

В них наблюдалось баллонообразное расширение профилей гранулярного эндоплазматического ретикулума, осыпание с его мембран рибосом, что, как известно, является признаком нарушения синтетических процессов. В митохондриях отмечено набухание митохондриального матрикса, дезорганизация и разрушение крист, что может свидетельствовать о нарушении энергообеспечения эпителиальных клеток тимуса [9]. Во многих случаях определялось разрушение цитоплазматической мембраны и выход остатков органелл в межклеточное пространство (рис. 4).

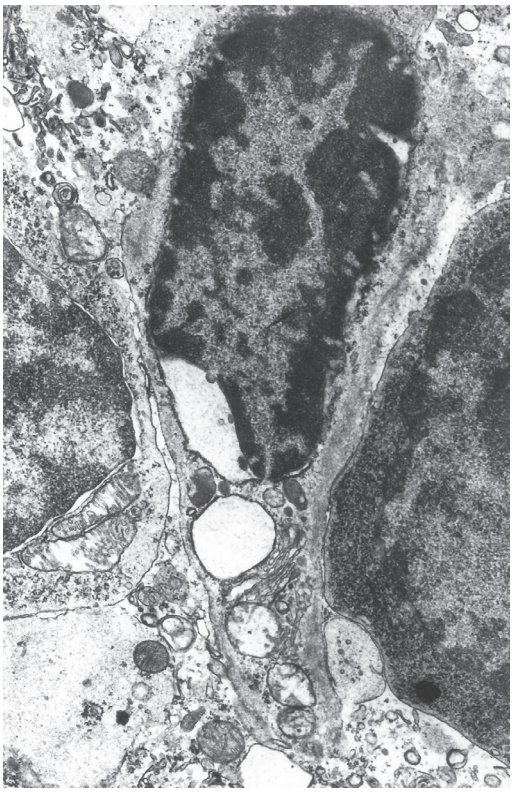


Рис. 4. Разрушающаяся эпителиальная клетка. Увеличение 10 000

На фоне выраженных деструктивных процессов в органе, затруднении дренажа интерстициальных пространств выявлены значительные изменения в лимфоидном компартменте тимуса. Общая плотность клеточных элементов, особенно во внутренней зоне коркового вещества тимуса, достоверно снижалась и через 5 ч после проведения ЭГ составила 177,8 ± 12,1 клетки. Основной вклад в эти изменения вносило уменьшение количества лимфоидных клеток, и в первую очередь в коре снижалось содержание именно малых лимфоцитов (для внутренней зоны коркового вещества – 120,4 ± 8,1). В мозговом веществе общая плотность клеточных элементов не менялась, но при этом обнаруживалось уменьшение числа зрелых лимфоцитов до 69,0 ± 6,41. По-видимому, значительный вклад в эти изменения вносит процесс миграции зрелых лимфоцитов из коры через венулы и лимфатические сосуды, что согласуется с данными ряда исследователей [7], [18]. Интересно, что при этом не снижалась интенсивность лимфопоэтической функции тимуса, так как неизменным оставалось количество иммунобластов и митотически делящихся клеток в субкапсулярной зоне, увеличивалось число иммунобластов во внутренней коре (16,0 ± 2,62) и росло содержание средних лимфоцитов в субкапсулярном слое и мозговом веществе (25,4 ± 1,52*; здесь и далее: * – отличия достоверны в сравнении с показателями интактных животных (контроль) при $p < 0,05$). По-видимому, эти данные свидетельствуют об усилении лимфоцитопоэтической функции и ускорении созревания имеющихся тимоцитов в соответствующих зонах, что рассматривается нами как компенсаторные процессы. Снижение количества зрелых лимфоцитов может объясняться и гибелью дифференцированных Т-лимфоцитов. В первые часы острого периода в тимусе отмечено усиление процесса гибели клеток. В субкапсулярной и внутренней зонах коры тимуса увеличивалось число клеток с пикнотическими ядрами (7,2 ± 1,75), была ярко выражена макрофагальная реакция (7,6 ± 1,04; количество макрофагов увеличилось более чем в 2 раза). Ультраструктурно в них отмечено содержание крупных вторичных лизосом разной электронной плотности, активный комплекс Гольджи, умеренное содержание митохондрий и профилей гранулярного эндоплазматического ретикулума. Следует отметить, что в условиях гипертермического стресса главная роль в усилении гибели лимфоидных клеток, причем осуществляющейся по типу апоптоза, отводится глюкокортикоидным гормонам надпочечников [7]. Определенный вклад в усиление процесса разрушения лимфоцитов в корковом веществе тимуса вносят тучные клетки. Появление в начале острого периода большого количества дегранулированных тучных клеток согласуется с имеющимися данными литературы о стереотипности ответной реакции этих клеток на внешние дестабилизирующие влияния [6]. Дегрануляция является обычной реакцией тучных клеток на повреждение тканей. Этот процесс сопровождается выбросом гепарина, гистамина, серотонина, ферментов в соединительную ткань, что ведет к повышению сосудистой проницаемости, изменению тонуса сосудов. К моменту окончания «катаболической» фазы постстрессорной реакции происходило восстановление долевых соотношений коркового и мозгового вещества органа до уровня контроля. Отмечалось дальнейшее снижение численной плотности всех клеточных элементов в исследованных зонах тимуса (155,0 ± 10,92; 167,0 ± 4,35*; 111,75 ± 5,57), а среди них – клеток лимфоидного ряда, особенно во внутренней коре (151,0 ± 3,83*). Во всех структурно-функциональных зонах выявлялся низкий уровень содержания зрелых лим-

фоцитов по сравнению с контролем (92,5 ± 9,22*; 113,75 ± 4,8*; 52,5 ± 8,7*), во внутренней зоне коркового слоя тимуса поддерживался возросший уровень числа иммунобластов (16,0 ± 2,87*), а в мозговом веществе – высокое содержание средних лимфоцитов (30,0 ± 5,83). На 3-и сутки после ЭГ в тимусе снижалась интенсивность процесса гибели клеток, что подтверждалось восстановлением до контрольного уровня числа клеток с пикнотическими ядрами (3,0 ± 1,56; 1,75 ± 0,55#; 2,0 ± 0,82; здесь и далее: # – отличия достоверны в сравнении с показателями группы «ЭГ + 5 ч») и макрофагов (2,0 ± 0,82#; 2,75 ± 0,87#; 2,25 ± 0,55), фагоцитирующих погибшие лимфоциты, возрастала относительная площадь железистых образований, а в обеих зонах коркового вещества увеличивалось количество эпителиальных клеток (6,75 ± 0,73#; 7,5 ± 1,11), что, по-видимому, объясняется острой необходимостью усиления секреции тимических гормонов при экстремальных воздействиях [7], [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изменения лимфоидной популяции тимуса в «катаболической» фазе после воздействия ЭГ характеризуются:

- значительным снижением содержания малых лимфоцитов, особенно во внутренней зоне коркового вещества органа, увеличением количества клеток с пикнотическими ядрами, а также числа макрофагов, фагоцитирующих деструктурированные лимфоциты, что рассматривается нами как усиление двух процессов – миграции малых лимфоцитов из тимуса и гибели дифференцированных Т-лимфоцитов;
- постепенным нарастанием числа средних лимфоцитов в субкапсулярной зоне коры, что может свидетельствовать об усилении лимфопоэтической функции и ускорении созревания имеющихся тимоцитов в соответствующих зонах и рассматривается нами как компенсаторные процессы.

2. К концу «катаболической» фазы постстрессорной реакции (3-и сутки) результаты массометрии (снижение относительного веса тимуса), а также изменения структуры и клеточного состава органа (уменьшение плотности клеточных элементов, что в первую очередь определяется снижением численности малых лимфоцитов) свидетельствуют о наличии акцидентальной инволюции тимуса.

3. Состояние микроциркуляторного русла в «катаболической» фазе характеризуется отечностью периваскулярных пространств, постепенным увеличением количества плазматических клеток к 3-м суткам постгипертермического периода, что объясняется массивным внедрением антигенов вследствие повышенной проницаемости гемато-тимусного и капсулярно-тимического барьеров.

4. К концу «катаболической» фазы постгипертермической реакции значительно возрастает относительная площадь железистых образований, что, по-видимому, свидетельствует об усилении секреции тимических гормонов при данном экстремальном воздействии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автандилов Г. Г. Медицинская морфометрия: Руководство. М.: Медицина, 1990. 384 с.
2. Быкова Е. В. Патогенетические и клинические аспекты безопасности общей управляемой гипертермии высокого уровня (42,5–44,0 °С): Автореф. дис. … д-ра мед. наук. Новосибирск, 2006. 32 с.
3. Васендин Д. В. Влияние высокой внешней температуры на микроанатомическую организацию тимуса крыс // Аспирантские и докторантские чтения. Дерзания нового времени – поиск инноваций: Материалы науч.-практ. конф. М., 2012. С. 44–46.
4. Васендин Д. В., Мичурина С. В., Ищенко И. Ю. Структурные изменения в тимусе крыс в остром периоде после воздействия экспериментальной гипертермии // Вестник Ивановской медицинской академии. 2012. Т. 17. № 1. С. 20–24.
5. Ефремов А. В., Пахомова Ю. В., Пахомов Е. А., Ибрагимов Р. Ш., Шорина Г. Н. Способ экспериментального моделирования общей гипертермии у мелких лабораторных животных. Патент РФ, № 2165105, 2001 // Изобретения. Полезные модели. 2001. № 10. С. 43–45.
6. Зерчанинова Е. И. О роли тучных клеток в регуляции кроветворения при действии на организм экстремальных факторов: Автореф. дис. … канд. мед. наук. Екатеринбург, 2000. 20 с.
7. Кветной И. М., Ярилин А. А., Полякова В. О., Князькин И. В. Нейроиммуноэндокринология тимуса. СПб.: ДЕАН, 2005. 160 с.
8. Лакин Г. Ф. Биометрия. М.: Высш. шк., 1990. 352 с.
9. Лукьянова Л. Д. Биоэнергетическая гипоксия: понятие, механизмы и способы коррекции // Бюллетень экспериментальной биологии. 1997. Т. 124. № 9. С. 244–254.
10. Международная анатомическая терминология. М., 2003.
11. Мичурина С. В., Васендин Д. В., Ищенко И. Ю., Жданов А. П. Структурные изменения в тимусе после воздействия экспериментальной гипертермии // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Биология, клиническая медицина. 2010. Т. 8. № 1. С. 51–56.
12. Пахомова Ю. В. Особенности гемолимфатических соотношений показателей белкового обмена при общей гипертермии: Автореф. дис. … канд. мед. наук. Новосибирск, 2000. 19 с.
13. Пахомова Ю. В. Системные механизмы метаболизма при общей управляемой гипертермии: Автореф. дис. … д-ра мед. наук. Новосибирск, 2006. 33 с.
14. Плохинский Н. А. Биометрия. М.: Изд-во МГУ, 1970. 356 с.
15. Селятицкая В. Г., Обухова Л. А. Эндокринно-лимфоидные отношения в динамике адаптивных процессов. Новосибирск: Изд-во СО РАМН, 2001. 168 с.
16. Симакова И. Ю. Особенности эндокринно-метаболического статуса у крыс в динамике общей искусственной гипертермии: Автореф. дис. … канд. мед. наук. Новосибирск, 2005. 20 с.
17. Успенский В. М. Функциональная морфология слизистой оболочки желудка. Л.: Наука, 1986. 291 с.

18. Я р и л и н А. А. Гомеостатические процессы в иммунной системе. Контроль численности лимфоцитов // Иммунология. 2004. № 5. С. 312–320.
19. S a i n t-M a r i e G., P e n g F.-S., M a r c o u x D. The stroma of the thymus of the rat: Morphologic and antigen diffusion, a reconsideration // Amer. J. Anat. 1996. Vol. 177. № 3. P. 333–352.

Michurina S. V., Novosibirsk Research Institute of Clinical and Experimental Lymphology, SD of RAMS (Novosibirsk, Russian Federation)
Vasendin D. V., Siberian State Academy of Geodesy, SD of RAMS (Novosibirsk, Russian Federation)
Ishchenko I. Yu., Novosibirsk Research Institute of Clinical and Experimental Lymphology, SD of RAMS (Novosibirsk, Russian Federation)

SPECIAL STRUCTURAL AND MICROSTRUCTURAL CHANGES IN THYMUS IN «CATABOLIC» PHASE AFTER EXPERIMENTAL HYPERTHERMIA

The aim of the research was to study thymus cellular composition in 45 Vistar rats after their exposure to a singular course of experimental hyperthermia (EH) leading to thermoplegia. At different stages of the experiment (5 hours, 3 days after EH) the trial rats were euthanized under light narcosis for the purpose of subsequent extraction of thymus for further research. Histolic specimens were produced according to standard methods. Immunoblasts were differentiated in all zone of thymus. Avarage and small-size lymphocytes, cells with mitosis shapes, cells with pyknotic nuclei, epithelial cells, and macrophages (1000 times expansion on the standart area 4500 mkmI) were indetified in all areas of thymus as well. It has been established that the influence of the EH on the rat's organism leads to the accidental involution of thymus. The Involution of thymus corresponds to the «catabolic» phase of the posthyperthermal period (5 hours, 3 days after EH), which was expressed in relative weight decrease of the organ (25 %), reduction of the relative cortex area (15 %) and decrease in lymphocyte density (12 %). Enhancement of destructive process on tissue levels was revealed. Manifistations of perivascular hypostasis, migration of cellular elements in lymphatic spaces and capillaries were noted.

Key words: thymus, hyperthermia, Vistar rats, involution

REFERENCES

1. A v t a n d i l o v G. G. *Meditsinskaya morfometriya* [Medical morphometry]. Moscow, 1990. 384 p.
2. B y k o v a E. V. *Patogeneticheskie i klinicheskie aspekty bezopasnosti obshhey upravlyaemoj gipertermii vysokogo urovnya (42,5–44,0 °C). Diss dokt. med. nauk* [Pathogenetic and clinical aspects of security in controlled hyperthermia of high level (42,5–44,0 °C). Dr. med. sci. diss.]. Novosibirsk, 2006. 32 p.
3. V a s e n d i n D.V. The impact of high external temperature on anatomical organization in rats' thymus [Vliyanie vytsokoe vneshney temperatury na mikroanatomicheskuyu organizaciyu timusa krys]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Aspirantskie i doktorantskie chteniya. Derzaniya novogo vremeni – poisk innovatsiy"* [Materials of the scientific-practical conference "Executive and doctorants reading. The audacity of the new era – the search for innovation". Moscow, 2012. P. 44–46.
4. V a s e n d i n D. V., M i c h u r i n a S. V., I s h c h e n k o I. Yu. Structural changes in rats' thymus in acute period after exposure to experimental hyperthermia [Strukturnye izmeneni'a v timuse krys v ostrom periode posle vozdeystviya eksperimental'noy gipertermii]. *Vestnik Ivanovskoy meditsinskoy akademii* [Journal of the Ivanovo medical Academy]. 2012. Vol. 17. № 1. P. 20–24.
5. E f r e m o v A. V. et. al. *Sposob eksperimental'nogo modelirovaniya obshchey gipertermii u melkikh laboratornykh zhivotnykh* [Method of experimental modelling of General hyperthermia in small laboratory animals]. Patent RF, № 2165105, 2001.
6. Z e r c h a n i n o v a E. I. *O roli tuchnykh kletok v regulyatsii krovetvoreniya pri deystvii na organizm ekstremal'nykh faktorov. Diss. kand. med. nauk* [The role of mast cells on blood circulation under the influence of extreme factors. Cand. med. sci. diss.]. Ekaterinburg, 2000. 20 p.
7. K v e t n o y I. M., Y a r i l i n A. A., P o l y a k o v a V. O., K n y a z ' k i n I. V. *Neyroimmunoendokrinolodiya timusa* [Neuroimmunoendocrinology thymus]. St. Petersburg, DEAN Publ., 2005. 160 p.
8. L a k i n G.F. *Biometriya* [Biometrics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 352 p.
9. L u k ' y a n o v a L. D. Bioenergy hypoxia: concept, mechanisms and methods of correction [Bioenergeticheskaya gipoksiya: ponyatie, mekhanizmy i sposoby korrektsii]. Byull. eksper. biol. [Bull. of exper. Biol.]. 1997. Vol. 124. № 9. P. 244–254.
10. Mezhdunarodnaja Anatomicheskaja terminologija [International Anatomical terminology]. Moscow, 2003.
11. M i c h u r i n a S. V., V a s e n d i n D. V., I s h c h e n k o I. Yu., Z h d a n o v A. P. Structural changes in thymus after experimental hyperthermia [Strukturnye izmenenija v timuse posle vozdeystviya jeksperimental'noy gipertermii]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Biologiya, klinicheskaya meditsina"* [Bulletin of the Novosibirsk state University. Series: Biology, clinical medicine]. Vol. 8. № 1. P. 51–56.
12. P a k h o m o v a Yu.V. *Osobennosti gemolimfaticheskikh sootnosheniy pokazateley belkovogo obmena pri obshchey gipertermi. Diss. kand. med. nauk* [Hemolimphatic features of metabolism in General hyperthermia. Cand. med. sci. diss.]. Novosibirsk, 2000. 19 p.
13. P a k h o m o v a Yu. V. *Sistemnye mekhanizmy metabolizma pri obshchej upravlyaemoy gipertermii. Diss. dokt. med. nauk* [Systemic mechanisms of metabolism in controlled hyperthermia. Dr. med. sci. diss.]. Novosibirsk, 2006. 33 p.
14. P l o k h i n s k i y N. A. *Biometriya* [Biometrics]. Moscow, MGU Publ., 1970. 356 p.
15. S e l y a t i t s k a y a V. G., O b u k h o v a L. A. *Endokrinno-limfoidnye otnosheniya v dinamike adaptivnykh protsessov* [Endocrine-lymphoid relations in dynamics of adaptive processes]. Novosibirsk, Publishing house of the SB RAMS, 2001. 168 p.
16. Simakova I. Yu. *Osobennosti jendokrinno-metabolicheskogo statusa u krys v dinamike obshhej iskusstvennoj gipertermii. Dis. kand. med. nauk* [Features of endocrine-metabolic status of rats in dynamics of total artificial hyperthermia. Cand. med. sci. diss.]. Novosibirsk, 2005. 20 p.
17. U s p e n s k i y V. M. *Funktsional'naja morfologija slizistoj obolochki zheludka* [Functional morphology of the mucous membrane of the stomach]. Leningrad, Nauka Publ., 1986. 291 p.
18. Y a r i l i n A. A. Homeostatic processes in the immune system. Control of the number of lymphocytes [Gomeostaticheskie protsessy v immunnoy sisteme. Kontrol' chislennosti limfotsitov]. *Immunologiya* [Immunology]. 2004. №. 5. P. 312–320.
19. S a i n t-M a r i e G., P e n g F.-S., M a r c o u x D. The stroma of the thymus of the rat: Morphologic and antigen diffusion, a reconsideration // Amer. J. Anat. 1996. Vol. 177. № 3. P. 333–352.

Поступила в редакцию 20.11.2012

Март, № 2 **Науки о Земле** **2013**

УДК 550.8+550.3:553.411(470.22)

МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ НИЛОВ
младший научный сотрудник, Институт геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
mnilov@rambler.ru

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ВЫДЕЛЕНИЯ Au-Cu-Mo-ПОРФИРОВЫХ ШТОКВЕРКОВЫХ ЗОН НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА КАДИЛАМПИ В ЗАПАДНОЙ КАРЕЛИИ

Объект исследования – гранитный массив Кадилампи, расположенный на российской части зеленокаменного пояса Ялонваара – Иломантси – Тулосс. В его пределах известно одноименное Au-Cu-Mo-порфировое рудопроявление. С целью выделения геофизических критериев поиска подобных объектов проведены опытные работы с использованием методик магнитометрии, электропрофилирования ВП, а также электротомографии сопротивления и ВП. Гранитный массив выделен среди вмещающих сланцев по характеру распределения геомагнитного поля и сопротивления. Окварцованная штокверковая зона с оруденением слабоконтрастна по параметру ВП, но создает аномалии повышенного сопротивления при электропрофилировании. Детальные исследования с использованием методики электротомографии встречными трехэлектродными установками позволили значительно уточнить морфологию штокверка и выделить наиболее перспективные области с малосульфидным оруденением. Интерпретация геофизических данных хорошо коррелирует с результатами бурения. Предложенный методический подход может быть использован на стадиях поиска рудовмещающих тел гранитов и выделения штокверковых зон с Au-содержащим Cu-Mo-порфировым оруденением.

Ключевые слова: Au-Cu-Mo-порфировое проявление, штокверк, геофизические методы, электротомография, критерии поисков, зеленокаменные пояса

МЕСТОРОЖДЕНИЯ/ПРОЯВЛЕНИЯ AU-CU-MO-ПОРФИРОВОГО ТИПА

Группа Au-содержащих Cu-Mo-порфировых и Au-полиметаллических проявлений в Карелии (AR_2) представлена примерно 20 объектами. В финской части зеленокаменного пояса (ЗП) Ялонваара – Иломантси – Тулосс с массивом Куйттила связано одноименное месторождение в тоналитах [3].

Cu-Mo-порфировые рудные объекты обычно локализуются в апикальной части многофазных интрузивов, представленных диоритами, гранодиоритами, гранит-порфирами, лейкогранитами и во вмещающих толщах. Штокверковые, вкрапленно-прожилковые или жильные типы руд представлены молибденитом, халькопиритом, пирротином, пиритом, галенитом, сфалеритом, иногда шеелитом, разнообразными висмутотеллуридами. Количество кварцевых прожилков в штокверке обычно не превышает 20 % от общего объема (площади) развития измененных пород. Золото на этих проявлениях обычно тяготеет к полиметаллической части руд [2].

Оконтуривание гранитных массивов в ЗП является легко решаемой с помощью магниторазведки задачей, а выделение кварцевых штокверковых зон и малосульфидного оруденения в них традиционным комплексом геофизических методов представляет большую сложность. Некоторый опыт в этом был приобретен в ходе совместных работ сотрудников ИГ КарНЦ РАН и Карельской ГЭ на участках Лобаш и Кадилампи [1; 4].

МАССИВ КАДИЛАМПИ СЕВЕРНОЙ ПРИГРАНИЧНОЙ ПЛОЩАДИ

Небольшой 2-фазный гранитный массив Кадилампи расположен северо-восточнее одноименного озера в пределах российской части ЗП Ялонваара – Иломантси – Тулосс. Массив имеет размер 300 х 700 м, он прорывает вулканогенно-осадочную толщу и амфиболиты по основным вулканитам (рис. 1). К центральной части интрузива приурочена Au-Cu-Mo-минерализация (рудопроявление Кадилампи-1), выявленная при шлиховом опробовании, проводимом Карельской ГЭ под руководством С. Н. Юдина. Массив представлен гранодиоритами и порфировидными гранитами. В нем и вмещающих толщах встречаются пегматитовые жилы. Центральная часть интрузива сложена преимущественно розово-серыми порфировидными гранитами, вскрытыми в канавах и нескольких скважинах. Массив Кадилампи по составу сравнивается и сопоставляется [4], [7] с массивами на территории восточной Финляндии (Куйтилла – в южной части ЗП Хатту, Валкеасуо – в северной части).

Толщи, вмещающие массив Кадилампи, юго-западнее участка представлены прокварцованными гнейсами и биотитизированными амфиболитами по базальтам. Северо-западнее массива развиты K-Na-полевошпатовые метасоматиты [4].

Задачей данной опытно-методической работы является установление геофизических критериев, по которым можно выделять малосульфидные штокверковые зоны в гранитах.

© Нилов М. Ю., 2013

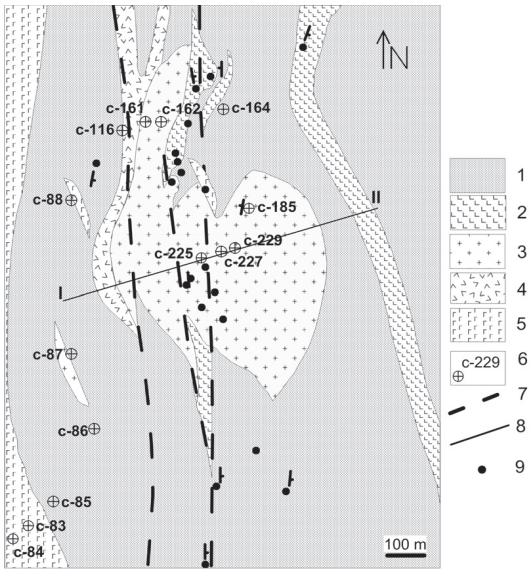


Рис. 1. Схема геологического строения участка Кадилампи-1 по [5] с дополнениями автора: 1 – туфы и сланцы основного состава; 2 – амфиболиты; 3 – граниты; 4 – метасоматиты; 5 – габбро; 6 – скважины и их номера; 7 – тектонические нарушения; 8 – опытно-методический профиль; 9 – обнажения

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА УЧАСТКЕ КАДИЛАМПИ-1

Геофизические работы на участке Кадилампи-1 проводились в 2004 году сотрудниками Карельской ГЭ и ИГ КарНЦ РАН с целью картирования гранитного массива и оконтуривания в нем кварцевого штокверка с пирит-молибденитовым оруденением. Проводились электроразведочные работы методом вызванной поляризации (ВП) установкой серединного градиента по сети (50 х 20 м) и магнитометрия с шагом по профилям 10 м [4]. Результаты этих исследований представлены на рис. 2а, б. Характер магнитного поля (рис. 2а) в восточной и центральной частях участка спокойный, без существенных градиентов. Интенсивность приведенных значений составляет от -150 до -200 нТл, что характерно для гранитного тела, зафиксированного в обнажениях. Оси положительных магнитных аномалий в западной части с интенсивностью до 300–500 нТл можно сопоставить с зонами повышенного (до 9500 Ом*м) кажущегося удельного сопротивления (аномалии № 1 и 2) и существенного отклонения сдвига фазы ВП порядка -1,2°. Вероятно, это связано с развитием в краевой части интрузива метасоматитов по вмещающим породам, с повышенным содержанием магнетита и сульфидов, выявленных также и севернее массива.

В центральной части гранитного массива зафиксированы две линейные системы зон повышенного (до 10000–12000 Ом*м) кажущегося удельного сопротивления, не находящие отражения в магнитном поле. Оси аномалий № 4–7 имеют ССВ (субмеридиональное) простирание, а № 2 – азимут 340°. Зоны № 4, 5 и 6 прослежены на 50–150 м и имеют мощность от 50 до 100 м. Наиболее протяженной является зона № 7, по всей видимости, выходящая за область проведения геофизических работ, ее мощность на некоторых профилях превышает 100 м. Четкого сопоставления со значениями угла сдвига фазы ВП не выявлено, лишь на ПР 5 ПК 280 зафиксировано существенное отклонение -1,26°, смещенное на 25 м к востоку от оси зоны № 4.

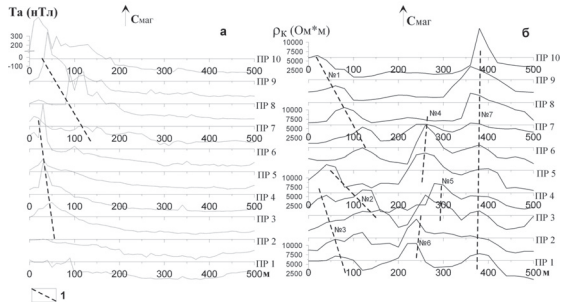


Рис. 2. Графики аномального магнитного поля (а) и кажущегося удельного сопротивления (б) на участке Кадилампи-1: 1 – оси аномалий

Опираясь на результаты геологического изучения обнажений, канав и скважин детального участка, для объяснения выявленных аномалий сделано предположение о штокверковом окварцевании интрузива и развитии прожилков по системе зон с доминирующим субмеридиональным и менее выраженным северо-западным направлением. Области наиболее интенсивного окварцевания обусловили повышение удельного сопротивления пород. Присутствующие в кварцевых жилах включения вкрапленно-прожилковой минерализации молибденита и других сульфидов, отмеченные в скважинах и канавах, не нашли отражения в результатах электропрофилирования и магнитометрии из-за совокупности неблагоприятных факторов: неравномерного распределения проводящих включений, крайне низких процентных содержаний и редкой сети наблюдений. Увеличение поляризуемости зафиксировано лишь на ПР 5 ПК 280, что, по-видимому, приурочено к локальному повышению концентрации рудных минералов.

Малая информативность полученных результатов на участке Кадилампи-1 поставила вопрос о поиске методического подхода к выделению слабоконтрастных зон с бедной минерализацией и разработке геофизических критериев поиска. Для этого в 2011 году автором совместно с сотрудниками лаборатории геофизики ИГ КарНЦ РАН были проведены опытно-методические работы. В качестве опорного был выбран буровой профиль, проходящий через центральную часть ПР 5 (по работам Карельской ГЭ в 2004 году), длиной до 850 м (рис. 3). По всей его длине выполнена магнитометрия с шагом 2 м и электропрофилирование ВП установкой серединного градиента шагом MN 5 м. По форме аномалий $\rho_к$ и Та осуществлена привязка к предыдущим исследованиям.

В результате удалось выделить зону метасоматитов в западном экзоконтакте (ПК -220 – ПК -280), по аномалии геомагнитного поля до 500 нТл обрамленной повышенными до 2,5 % значениями поляризуемости, и восточный контакт (ПК 335) гранитного массива с вмещающими сланцами, отчетливо проявленный в смене характера кривых Та и $\rho_к$, а также интрузию габбро-амфиболитов (рис. 3). Граниты массива Кадилампи характеризуются неравномерным распределением кажущегося удельного сопротивления и поляризуемости в области спокойного геомагнитного поля.

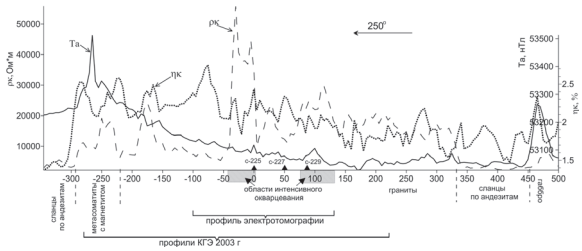


Рис. 3. Графики геофизических параметров по профилю I–II на участке Кадилампи-1

Помимо уменьшения шага измерений в ходе опытных работ предпринята попытка увеличения плотности тока и времени зарядки с целью фиксации слабых эффектов ВП над зонами бедной сульфидной вкрапленности. Имеющиеся аппаратурные возможности и тщательное обустройство заземлений питающей линии позволили пропускать импульсы амплитудой до 1 А через весьма высокоомный разрез. Суммарно методические манипуляции позволили зафиксировать ряд аномалий ВП амплитудой до 2,5 % при времени зарядки 820 мс. Эксперименты с различной длительностью импульсов показали нецелесообразность ее дальнейшего увеличения ввиду существенного повышения затрат времени при отсутствии качественных изменений получаемых данных. На представленных графиках (рис. 3) прослеживается закономерность распределения пиков вызванной поляризации, как правило, они тяготеют к аномалиям $\rho_к$ либо их краевым частям. Подобную корреляцию можно считать картировочным геофизическим признаком для слабоминерализованных зон.

Электротомография. Для получения детальной информации о характере распределения окварцевания и сульфидной минерализации в массиве применена методика электротомографии сопротивления и ВП аппаратным комплексом «Скала 48», разработанным в Сибирском отделении РАН, используя две двадцатичетырехэлектродные косы с шагом между электродами 5 м. Измерения сопротивления и заряжаемости (одной из характеристик эффекта ВП) выполнены встречными трехэлектродными (pole-dipole) установками A-MN и MN-B, что обеспечило наибольшую глубину исследования при необходимой детальности и точности замеров [6]. По результатам математической обработки массива полученных замеров построен непрерывный геоэлектрический разрез кажущегося удельного сопротивления (рис. 4а) и заряжаемости (рис. 4б).

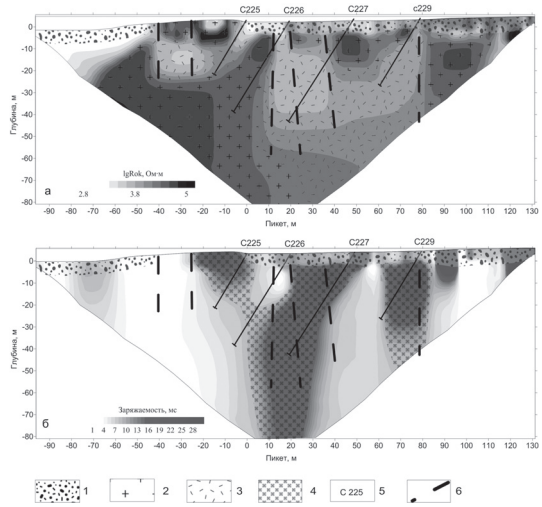


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы сопротивления (а) и заряжаемости (б) на участке Кадилампи-1: 1 – четвертичные отложения; 2 – монолитные, окварцованные граниты; 3 – зоны катаклаза и рассланцевания, биотитизации и пиритизации; 4 – области с сульфидной минерализацией; 5 – номера скважин; 6 – тектонические нарушения

Основными факторами, влияющими на распределение сопротивления в пределах одного литотипа, являются степень трещиноватости либо брекчирования пород, наличие и характер окварцевания. При этом присутствие убогой сульфидной минерализации может отразиться лишь на увеличении вызванной поляризации (заряжаемости). При сопоставлении полученного геоэлектрического разреза с имеющейся геологической информацией удалось оконтурить зону дислоцированных пород в центральной части гранитного массива и наиболее крупные тектонические нарушения. Повышенная степень трещиноватости в указанной области обусловила понижение кажущегося удельного сопротивления относительно более монолитных, окварцованных и менее измененных гранитов в краевых частях разреза (рис. 4а). Наличие сульфидной вкрапленности отмечено повышением заряжаемости до 20–30 мс (рис. 4б). Пространственное распределение по разрезу областей с различными электрическими свойствами имеет сложный характер, но в целом максимальный эффект ВП наблюдается в градиентных зонах кажущегося удельного сопротивления при переходе от максимальных значений к минимальным, что приводит к выводу о нахождении наибольших концентраций сульфидов на контакте между монолитными, интенсивно прокварцованными гранитами и зонами их дислокации.

Выполненные опытно-методические работы показали возможность стадийного наращивания

информативности результатов геофизических исследований от профильных работ на этапе картирования перспективных зон до использования методики электротомографии при детальном исследовании разреза с целью наиболее оптимального планирования буровых работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявление малосульфидных объектов на закрытых площадях в гранитах оказалось наиболее сложной задачей. Малосульфидный кварцевый штокверк в гранитах был установлен на небольшой обнаженной площади и прослежен геофизическими методами. Установлено, что детальное расчленение слабоконтрастных областей, перспективных на Au-содержащее Cu-Mo-порфировое оруденение, возможно с помощью методики электротомографии сопротивления и ВП. Методы электротомографии позволили выделить наиболее перспективные участки штокверка размером до 100 м, повышенные значения заряжаемости и вариации кажущегося удельного сопротивления могут быть отнесены к поисковым признакам в слабоконтрастных полях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородулин Ю. Д., Кулешевич Л. В. Анализ геофизических полей участка Лобаш (Центральная Карелия) // Геология и геохимия докембрийских образований Карелии. Петрозаводск, 1986. С. 42–49.
2. Лавров О. Б., Кулешевич Л. В. Минералогия золотосодержащих медно-молибден-порфировых руд в архейских зеленокаменных поясах Карелии // Материалы Всероссийской конференции «Самородное золото». М., 2010. Т. I. С. 313–315.
3. Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Петрозаводск: Карелия, 2005. 280 с.
4. Нилов М. Ю., Юдин С. Н., Кулешевич Л. В. Геологическое строение и геофизические исследования Северной Приграничной площади зеленокаменного пояса Ялонвара-Хатту-Тулос // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 9. 2006. С. 100–120.
5. Юдин С. Н. Информационный отчет о результатах поисков месторождений золота и МПГ на участке Приграничный Северный в пределах гранит-зеленокаменной области Ялонвара – Иломантси за 2004 г. Петрозаводск: ТГФ, 2004.
6. Dahlin T., Zhou B. A Numerical Comparison of 2D Resistivity Imaging with Ten Electrode Arrays // Geophysical Prospecting. 2004. № 52. P. 379–398.
7. Geological development, gold mineralization and exploration methos in the Cate Archean Hattu Shist belt, Ilomantsi, eastern Finland / Ed. by Pekka A. Nurmi and P. Sorjonen-Ward // Geological Survey of Finland. Sp. paper 17. Espoo, 1993.

Nilov M. Yu., Institute of Geology of Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

GEOPHYSICAL CRITERIA FOR PROSPECTING Au-Cu-Mo-PORPHYRY STOCKWORK DEPOSITS: CASE STUDY OF KADILAMPI SITE IN WESTERN KARELIA

The goal of the project is to study the Kadilampi granite massif located in the Russian extension of Yalonvaara-Ilomantsi-Tuulos greenstone belt. It is known to host a cognominal Au-Cu-Mo-porphyry ore occurrence. To select geophysical criteria for prospecting similar massifs, experiments with the use of magnetometry, IP electrical profiling, resistance, and IP electrotomography methods were conducted. The granite massif was identified in host schist by the distribution patterns of the geomagnetic field and its resistance. The silicified stockwork zone with mineralization is faint negative according to IP parameter, but it creates elevated resistance anomalies upon electrical profiling. Based on the detailed study, using electrical tomography with reverse three-electrode set-ups, stockwork morphology was determined much more accurately. The most promising prospects with low-sulphide mineralization were delineated. The interpretation of the obtained geophysical data correlates well with drilling records. The proposed approach can be used for prospecting ore-bearing granite bodies and for identification of stockwork zones with Au-bearing Cu-Mo-porphyry mineralization.

Key words: Au-Cu-Mo-porphyry occurrence, stockwork, geophysical methods, electrotomography, searching criteria, greenstone belts

REFERENCES

1. Borodulin Yu. D., Kuleshevich L.V. The analysis of geophysical fields of Lobash site [Analiz geophizicheskikh poley uchastka Lobash]. *Geologiya i geokhimiya dokembriyskikh obrazovaniy Karelii*. Petrozavodsk, 1986. P. 42–49.
2. Lavrov O. B., Kuleshevich L. V. Mineralogy of auriferous copper-molybdenum porphyry ores in Archaean greenstone belts of Karelia [Mineralogiya zolotosoderzhashchikh medno-molibden-porfirovykh rud v arkheyskikh zelenokamennykh poyasakh Karelii]. *Materialy Vserossiyskoy konferentsii "Samorodnoe zoloto"* [Materials of the Russian Conference "Native gold"]. Vol. 1. Moscow, 2010. P. 313–315.
3. *Mineral'no-syr'evaya baza Respubliki Kareliya* [Mineral resources of the Republic of Karelia]. Petrozavodsk, Karelia Publ., 2005. 280 p.
4. Nilov M. Yu., Yudin S. N., Kuleshevich L. V. Geology and geophysical exploration of Northern Border area of Yalonvaara-Khattu-Tulos greenstone belt [Geologicheskoe stroenie i geofizicheskie issledovaniya Severnoy Prigranichnoy ploshchadi zelenokamennogo poyasa Yalonvara-Khattu-Tulos]. *Gelologiya i poleznye iskopaemye Karelii*. Issue 9. 2006. P. 100–120.
5. Yudin S. N. *Informatsionnyy otchet o rezul'tatakh poiskov mestorozhdeniy zolota i MPG na uchastke Prigranichnyy Severnyy v predelakh granit-zelenokamennoy oblasti Yalonvara – Ilomantsi za 2004 g.* [Information report on the results of exploration of gold and PGM in the area within the northern boundaries of the granite-greenstone-Yalonvara Ilomantsi for 2004 y.]. Petrozavodsk, TGF. Publ., 2004.
6. Dahlin T., Zhou B. A Numerical Comparison of 2D Resistivity Imaging with Ten Electrode Arrays // Geophysical Prospecting. 2004. № 52. P. 379–398.
7. Geological development, gold mineralization and exploration methods in the Late Archean Hattu Schist belt, Ilomantsi, eastern Finland / Ed. by Pekka A. Nurmi and P. Sorjonen-Ward // Geological Survey of Finland. Sp. paper 17. Espoo, 1993. 386 p.

Поступила в редакцию 24.01.2013

Март, № 2 **Сельскохозяйственные науки** **2013**

УДК 636.237.21:591.411

АННА СЕРГЕЕВНА ЕМЕЛЬЯНОВА
доктор биологических наук, профессор кафедры технологии производства и переработки продукции животноводства технологического факультета, Рязанский государственный агротехнологический университет им. П. А. Костычева (Рязань, Российская Федерация)
disert@rgatu.ru

ЕКАТЕРИНА ИВАНОВНА ЛУПОВА
соискатель кафедры технологии производства и переработки продукции животноводства технологического факультета, Рязанский государственный агротехнологический университет им. П. А. Костычева (Рязань, Российская Федерация)
katya.lilu@mail.ru

ИЗМЕНЕНИЕ ЧИСЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАРИАЦИОННЫХ ПУЛЬСОГРАММ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПЕРЕНЕСЕННОГО ОСТРОГО СТРЕССА У КОРОВ-ПЕРВОТЕЛОК

Целью работы явилось повышение адаптационных возможностей коров-первотелок к острому стрессу. В ходе опыта животные были разделены на контрольную и опытную группы по показателю индекса напряжения и исходного вегетативного тонуса (нормотония). Опытной группе давался метаболит янтарной кислоты. Анализ влияния стресса на сердечно-сосудистую систему животных был проведен по Р. М. Баевскому, регистрировался синусовый сердечный ритм с последующим анализом его структуры. Проведен сравнительный анализ числовых характеристик вариационных пульсограмм в результате перенесенного острого стресса у коров с применением и без применения метаболита янтарной кислоты. Применение метаболита янтарной кислоты позволило у коров опытной группы уменьшить частоту сердечных сокращений, что привело к уменьшению расходования рабочих функциональных резервов. У коров контрольной группы после перенесенного стресса увеличение показателя числа кардиоинтервалов свидетельствует об усилении недыхательного компонента синусовой аритмии как следствие включения в процесс управления сердечным ритмом центрального контура регуляции. Снижение показателя вариационного размаха у коров контрольной группы после перенесенного стресса свидетельствует о преобладании недыхательного компонента сердечного ритма, обусловленного активностью подкорковых центров. Снижение данного показателя у коров опытной группы после стресса говорит о некотором тонусе парасимпатической нервной системы и преобладании дыхательных изменений сердечного ритма. Таким образом, применение метаболита янтарной кислоты способствует сохранению оптимального уровня функционирования вегетативной нервной системы. При его применении наблюдаются тенденции к улучшению адаптативных способностей организма коров-первотелок на фоне перенесенного острого стресса.

Ключевые слова: сердечно-сосудистая система, вариабельность сердечного ритма, янтарная кислота, стресс

В настоящее время в России и по всему миру идет активное развитие сельского хозяйства. Актуальным является направление животноводства, в связи с этим осуществляется закупка-продажа скота, что сопровождается длительной транспортировкой животных, которая вызывает у них острый стресс. В результате этого снижается продуктивность животных, теряется резистентность к заболеваниям, что ведет к снижению экономических показателей эффективности производства. Транспортный технологический стресс в условиях широкого использования межхозяйственной кооперации приобрел особое значение. Для уменьшения его отрицательных последствий возникает потребность исследований, направленных на физиологическую подготовку к перевозке, создание оптимальных условий транспортировки, повышение адаптационных способностей организма к острому стрессу. Целью нашей работы явилось повышение адаптационных возможностей коров-первотелок к острому стрессу.

Объектами исследования явились коровы-первотелки черно-пестрой породы в хозяйстве ООО «Имени Пряхина» Кораблинского района Рязанской области, сопоставленные по возрасту (3 года, 2–3-й месяц лактации) и живой массе (490 кг). В период проведения исследований животные находились в одинаковых зоогигиенических условиях, в соответствии с требованиями.

В ходе опыта животные были разделены на группы, которые формировались по методу аналитической группировки (метод сбалансированных групп-аналогов). По показателю индекса напряжения ИН 100–200 у. е. и исходного вегетативного тонуса (ИВТ) – нормотония – были отобраны две группы: контрольная (группа 1) и опытная (группа 2), по 10 животных в каждой.

© Емельянова А. С., Лупова Е. И., 2013

Опытной группе давался метаболит янтарной кислоты в количестве 1 грамм 2 раза в день вместе с кормом в течение 20 дней перед острым стрессом. Острый стресс животным создавался посредством их перевозки на специализированном транспортном средстве (МАЗ 5232 с универсальным полуприцепом для перевозки скота в один ярус ТОНАР – 98261) в течение 1 часа.

В работе использовался метод вариабельности сердечного ритма, который является общепринятым методом оценки функционального состояния регуляторных систем, а также врожденных функциональных резервов организма [1]. Анализ был проведен по Р. М. Баевскому, регистрировался синусовый сердечный ритм с последующим анализом его структуры.

Регистрация кардиоинтервалограмм проводилась в системе фронтальных отведений. ЭКГ снималась два раза, до и после перенесенного стресса, в период между кормлениями, за 2–3 часа до приема корма. Оценка функциональных резервов организма осуществлялась на основе сопоставления двух измеряемых показателей – уровня функционирования доминирующей системы и степени напряжения регуляторных систем [1].

Проведен сравнительный анализ числовых характеристик вариационных пульсограмм в результате перенесенного острого стресса у коров с применением и без применения метаболита янтарной кислоты (см. таблицу).

Сравнительный анализ диапазона значений наиболее часто встречающихся R-R интервалов, то есть моды (Мо), указывает на разный уровень функционирования системы кровообращения у коров до и после стресса с применением и без применения янтарной кислоты.

Числовые характеристики вариационных пульсограмм коров-первотелок до и после перенесенного острого стресса с применением и без применения метаболита янтарной кислоты

№ группы	До стресса			После стресса		
	Мо, с	АМо, %	ΔX	Мо, с	АМо, %	ΔX
1 (n = 10)	0,79 ± 0,07	47,50 ± 8,30	0,17 ± 0,03	0,74 ± 0,06	63,00 ± 6,40	0,10 ± 0,02
2 (n = 10)	0,78 ± 0,06	49,50 ± 10,60	0,18 ± 0,04	0,80 ± 0,07	58,90 ± 9,70	0,14 ± 0,03

У коров контрольной группы после перенесенного стресса показатель Мо уменьшился на 0,05 с. Это объясняется симпатоадреналиновым влиянием на деятельность сердца, что свидетельствует об увеличении влияния центрального контура регуляции. Функцию водителя ритма в этом случае берут на себя клетки, расположенные в верхней части синусового узла [3]. Эти клетки обладают высокой возбудимостью. В результате время между отдельными кардиоциклами уменьшается, а частота сердечных сокращений, соответственно, увеличивается.

Увеличение данного показателя у коров опытной группы свидетельствует о преобладании автономного контура регуляции на деятельность сердца. Функцию водителей ритма берут на себя клетки, расположенные в нижней части синусового узла, которые обладают меньшей возбудимостью [2]. Таким образом, применение метаболита янтарной кислоты позволило у коров опытной группы уменьшить частоту сердечных сокращений, что привело к уменьшению расходования рабочих функциональных резервов.

Проводя сравнительный анализ амплитуды моды, отражающей стабилизирующий (мобилизирующий) эффект централизации управления ритмом сердца, у коров до и после стресса контрольной и опытной групп, выявили, что больше всего показатель АМо увеличился у коров контрольной группы после перенесенного стресса – на 15 % (у опытной группы – на 9,4 %).

У коров контрольной группы после перенесенного стресса увеличение показателя числа кардиоинтервалов, соответствующих диапазону моды, свидетельствует об усилении недыхательного компонента синусовой аритмии, обусловленной влиянием симпатической вегетативной нервной системы, как следствие включения в процесс управления сердечным ритмом центрального контура регуляции. Для коров опытной группы после перенесенного стресса АМо увеличивается на 9,4 %. Данный факт указывает на высокую степень вариативности, что свидетельствует о слабой централизации управления сердечным ритмом и преобладании автономного контура регуляции.

Сравнение степени вариативности значений кардиоинтервалов показало, что вариационный размах, указывающий на максимальную амплитуду колебаний значений R-R интервалов и в данном массиве кардиоциклов и отражающий уровень активности парасимпатического звена вегетативной нервной системы, неодинаков у коров контрольной и опытной групп после стресса.

Показатель вариационного размаха у коров контрольной группы после перенесенного стресса снижается на 0,07, что свидетельствует о преобладании недыхательного компонента сердечного ритма, обусловленного активностью подкорковых центров.

Показатель вариационного размаха у коров опытной группы после стресса снизился на 0,04. Это говорит о некотором тонусе парасимпатической нервной системы и преобладании дыхательных изменений сердечного ритма.

Проведя сравнительный анализ числовых характеристик вариационных пульсограмм в результате перенесенного острого стресса у коров с применением и без применения метаболита янтарной кислоты, установили, что его применение

способствует сохранению оптимального уровня функционирования вегетативной нервной системы. При применении янтарной кислоты наблюдаются тенденции к улучшению адаптативных способностей организма коров-первотелок на фоне перенесенного острого стресса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баевский Р. М. Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем // Вестник аритмологии. 2001. № 24. С. 65–87.
2. Емельянова А. С. Анализ вариабельности сердечного ритма с целью оценки адаптационных возможностей сердечно-сосудистой системы коров-первотелок к нагрузке, обеспечиваемой лактационным процессом // Естественные и технические науки. 2009. № 6. С. 145–147.
3. Емельянова А. С. Анализ характеристик вариационных пульсограмм у первотелок с разной молочной продуктивностью // Молочное и мясное скотоводство. 2010. № 2. С. 31–32.

Yemel'yanova A. S., Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (Ryazan, Russian Federation)
Lupova E. I., Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (Ryazan, Russian Federation)

CHANGES IN NUMERIC CHARACTERISTICS OF VARIABLE PULSE DIAGRAMS RESULTING FROM ACUTE STRESS IN COW-HEIFERS

The aim of the work is to study the increase of adaptive capabilities in cow-heifers under acute stress. We divided the test animals into 2 groups (control and experimental) according to the strain index readings and initial vegetative tonus – normotony. The experimental group was treated with the amber acid metabolite. The stress effect on the cardio vascular system of the test cows was analyzed with the use of R. M. Bayevskiy method. The sinus cardiac rhythm with later analysis of its structure was registered. A comparative analysis of numeric characteristics of variable pulse diagrams reflecting conditions of stressed cows treated with the amber acid metabolite and cows that were not given the substance was carried out. The use of the amber acid metabolite in the experimental group of cows reduced their pulse rate frequency and led to the decrease of functional backup. The control group cows revealed an increase in the number of cardio intervals, which speaks of the enhancement of non-respiratory component of sinus arrhythmia. A decrease of the index readings in the cows from control group is a manifestation of the non-respiratory component domination in the cardiac rhythm, which in tern is determined by the activity of subcortical centers. This index decrease in the experimental group of cows speaks about a potential tonus of the parasympathetic nervous system and domination of respiratory changes in the cardiac rhythm. Thus, the amber acid metabolite usage helps to preserve the optimal functioning level of the vegetative nervous system. The use of the substance is instrumental in the improvement of adaptive capabilities in cows under acute stress.

Key words: cardiovascular system, heart rate variability, succinic acid, stress.

REFERENCES

1. Baevskiy R. M. Analysis of the heart rate variability with the use of various digital ECG systems [Analiz variabel'nosti serdechnogo ritma pri ispol'zovanii razlichnykh elektrokardiograficheskikh sistem]. *Vestnik aritmologii* [Journal of Arhythmology]. 2001. № 24. P. 65–87.
2. Yemel'yanova A. S. Analysis of characteristics of various pulse diagrams in heifers with different milk yield [Analiz variabel'nosti serdechnogo ritma s tsel'yu otsenki adaptatsionnykh vozmozhnostey serdechno-sosudistoy sistemy korov-pervotelok k nagruzke, obespechivaemoy laktatsionnym protsessom]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and Technical Sciences]. 2009. № 6. P. 145–147.
3. Yemel'yanova A. S. Analysis of the heart rate variability with the purpose to assess adaptive abilities of the cardio-vascular system of the first lactation cows to the load provided by the dairy process [Analiz kharakteristik variatsionnykh pul'sogramm u pervotelok s raznoy molochnoy produktivnost'yu]. *Molochnoe i myasnoe skotovodstvo* [Milk and meat cattle breeding]. 2010. № 2. P. 31–32.

Поступила в редакцию 21.01.2013

Март, № 2 **Сельскохозяйственные науки** **2013**

УДК 630*228.7:630*385:(470.22)

ВИКТОР НИКОЛАЕВИЧ ГАВРИЛОВ
кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории лесоведения и лесоводства, Институт леса Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
gavrilov@krc.karelia.ru

ВЫРАЩИВАНИЕ ЕЛИ ЕВРОПЕЙСКОЙ (*PICEA ABIES* (*L.*) *KARST.*) ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ОСУШАЕМОГО БЕРЕЗНЯКА ОСОКОВО-СФАГНОВОГО

Во второй половине XX века в Карелии стал намечаться дефицит еловой древесины для обеспечения сырьем бумажного производства. В связи с этим в 1982 году в южной части Карелии (61°50′ с. ш., 33°30′ в. д.) заложен экспериментальный участок по культивированию ели европейской при реконструкции малоценного березового древостоя, осушенного в 1970 году. Почва болотная переходная торфяно-глеевая глубиной 0,4–0,5 м. Пятилетние саженцы ели высажены в коридоры шириной 7 и 3 м. Изучение роста культур ели проводилось путем повторных периодических измерений по вариантам опыта с использованием практики лесной таксации. Результаты исследований свидетельствуют о высокой эффективности проведенного мероприятия. Продуктивность культур соответствует II классу бонитета, повреждения заморозками не превышают 10 % от числа растущих деревьев. С возраста 15 лет темпы роста ели в «узких» коридорах замедляются вследствие снижения освещенности. Это послужило поводом для проведения осветления культур. Данное мероприятие дало положительный эффект. Дополнительный годичный прирост по запасу достигает 3 м^3/га в год. Измерение диаметров стволов на высоте груди при перечетах с точностью до 0,1 см позволило осуществить статистическую обработку. Выяснилось, что, несмотря на специфичность условий произрастания, распределение деревьев по толщине в молодняках близко к нормальному. Коэффициент вариации диаметров к тридцатилетнему возрасту не превышает 30 %.

Ключевые слова: ель европейская, гидролесомелиорация, реконструкция, продуктивность, распределение стволов по диаметру

В 1970-е годы на Северо-Западе России сложилась напряженная обстановка с обеспечением сырьем предприятий целлюлозно-бумажной промышленности. В Карелии в первую очередь данная проблема возникла у Кондопожского ЦБК, который использовал в основном еловую древесину. Вопрос рассматривался на уровне различных министерств, и была утверждена целевая программа по созданию постоянной лесосырьевой базы на основе различных способов воспроизводства лесных ресурсов [3].

Выращивание ели характеризуется рядом особенностей, обусловленных биологией данной породы. Она имеет поверхностную корневую систему, довольно требовательна к минеральному питанию и увлажнению. В молодом возрасте на открытых площадях ель нередко повреждается поздневесенними и раннеосенними заморозками. При этом обмерзание редко приводит к гибели растений, но снижается качество стволовой древесины, образуются кустистые формы из-за повреждения верхушечного побега и активизации роста нескольких боковых.

Во второй половине XX столетия на северо-западе СССР широкое распространение получила гидролесомелиорация, так как почти 37 % площади лесного фонда было представлено заболоченными лесами и болотами. В Карелии для нужд лесного хозяйства было осушено около 600 тыс. гектаров лесных земель, из них треть – открытые болота. В дальнейшем была выявлена высокая лесоводственная эффективность данного мероприятия в южной части республики, относящейся к среднетаежной подзоне. Однако, по данным лесоустройства, через 10 лет после проведения гидролесомелиоративных работ среди площадей молодняков, переведенных в покрытую лесом площадь, до 40 % представляли собой насаждения с преобладанием мелколиственных пород (хвойных пород в составе менее четырех единиц), главным образом березы пушистой. Кроме этого в осушенном фонде имелось немало березняков более старших возрастов. Березовые древостои занимают наиболее плодородные участки болотных массивов. Выращивание березы пушистой нецелесообразно с хозяйственной точки зрения. Качество древесины низкое, она часто повреждается стволовыми гнилями и имеет искривленную форму ствола. На осушаемых болотных почвах такие насаждения относятся к категории малоценных независимо от возраста [2], [4]. Так как березняки формируются в более богатых почвенных условиях, в том числе и на осушаемых площадях, в различных регионах бывшего СССР предпринимались попытки выращивания ели путем реконструкции малоценных лиственных древостоев. В Карелии информации о результатах этих мероприятий крайне мало.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальный объект площадью 6,5 га заложен в 1981 году в окрайковой зоне осуша-

© Гаврилов В. Н., 2013

емого болотного массива на территории Киндасовского лесничества Пряжинского лесхоза (61˚50´ с. ш., 33˚30´ в. д.), расположенного на равнинном левобережье р. Шуя (зона темнохвойной тайги, подзона европейско-западносибирских среднетаежных сосновых лесов в сочетании со сфагновыми болотами). Климат равнины прохладный. Среднегодовая температура воздуха +1,2 ºС. Период со среднесуточной температурой воздуха выше +5 ºС составляет 145–155 дней, с первой декады мая по первую декаду октября. Годовая норма осадков 565 мм. Большая их доля (64 %) приходится на период с апреля по октябрь. Испарение составляет в среднем 318 мм в год, коэффициент увлажнения колеблется в разные годы от 1,3 до 2,0, что способствовало процессу заболачивания территории. Общая характеристика объекта исследования представлена в табл. 1. На участке применен коридорный способ реконструкции. В спелом 60-летнем березняке осоково-сфагновом в 1981 году были прорублены коридоры шириной, равной средней высоте реконструируемого древостоя (7 м) и ее половине (3,5 м), где на следующий год высажены пятилетние саженцы ели европейской по два ряда в «узких» (3,5 м) и по три в «широких» (7 м). Между коридорами оставлялись полосы (кулисы) реконструируемого древостоя такой же ширины. Использование крупномерного посадочного материала позволило обойтись без трудоемкой обработки почвы и проведения лишь одного агротехнического ухода в конце первого года жизни растений. Дополнение культур не проводилось. Несмотря на относительно невысокую первоначальную густоту посадки, в целом по участку шаг посадки составляет около 1 м при расстоянии между рядами 1,5 м (табл. 1). Если брать в расчет только площадь коридоров с культурами, первоначальная густота будет выше почти в два раза (около 4000 экземпляров на гектаре).

Таблица 1

Общая характеристика экспериментального участка

Древостой на момент закладки культур				Год осушения	Расстояние между осушителями, м	Ширина коридоров и кулис, м	Направление коридоров
Тип леса	Возраст, лет	Запас, м³/га					
		Всего	Деловой				
Березняк осоково-сфагновый осушаемый	80	80	24	1969	150	3,5 м 7,0 м	Север – юг
Свойства торфяной залежи				Культуры ели			
Тип почвы	Глубина торфа, м	Зольность, %	Обменная кислотность	Год создания	Способ создания	Первоначальная густота, тыс. экз./га	Посадочный материал
Болотная переходная тофяно-глеевая	0,4–0,6	7–9	4,3	1982	Вручную, без обработки почвы	2150	Саженцы, 5 лет

В результате проведенных мероприятий через 20 лет после создания культур сформировалось сложное двухъярусное насаждение, в котором полосы березняка состава 8,7Б1,3С(80)едЕ чередуются с посадками ели, которые образуют второй ярус с составом 10Е.

Первоначально в 1982 году заложено 3 варианта эксперимента: весенняя (вариант 1) и осенняя (вариант 2) посадка в широких (7,0 м) коридорах; весенняя посадка в узких (вариант 3) коридорах. Периодические измерения показали, что различия по темпам роста ели весенней и осенней посадки несущественны. В этой связи вариант 2 был исключен из дальнейших исследований. В 1998 году в части участка было проведено осветление культур (рубка деревьев в прилегающих кулисах). В итоге в настоящий момент исследования ведутся в четырех вариантах. Вариант 1 – посадки ели в широком (7,0 м) коридоре без осветления; вариант 3 – то же в узких (3,5 м) коридорах; вариант 4 – посадки в широком коридоре с осветлением; вариант 5 – контрольный к варианту 4, без осветления.

Исследования роста и состояния культур ели проводились на постоянных пробных площадях путем повторных периодических измерений. Измерялся точный диаметр с группировкой при камеральной обработке по двухсантиметровым ступеням толщины, что позволяло в дальнейшем осуществлять статистическую обработку. На начальном этапе исследований высота деревьев измерялась мерным шестом, с увеличением высот – высотомером с определением средних показателей по графикам высот, как принято в практике лесной таксации. При учетах фиксировались все деревья ели, имеющие следы обмерзания хвои, боковых и главного побегов, поврежденных энтомовредителями и болезнями.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В последние годы в разных регионах страны повысился интерес к проблеме реконструкции малоценных насаждений методами лесных культур, в том числе и на осушаемых болотных почвах. Это объясняется увеличением возраста культур и появившейся благодаря этому возможностью оценки лесоводственной эффективности проведенных мероприятий. В Ленинградской области [6], в Уральском регионе [5] отмечается, что коридорный способ реконструкции позволяет выращивать ценные в хозяйственном отношении насаждения, особенно на участках

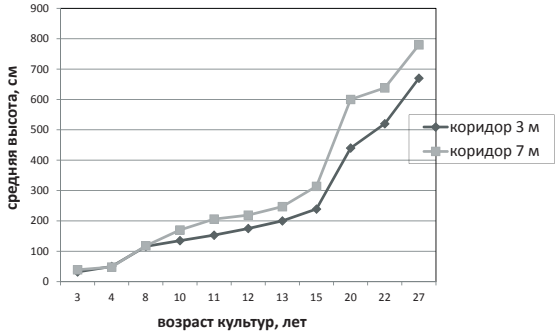
с неглубокой торфяной залежью (глубиной до 0,5–1,0 м). Как показали многолетние исследования в Карелии, проведенные мероприятия по выращиванию ели в коридорах оказались высокоэффективными для условий южной части республики. Культуры, как видно из табл. 2, имеют высокую сохранность независимо от ширины коридоров. Ежегодный отпад составляет всего 1–2 % от числа растущих деревьев. Повреждение заморозками годичных побегов имело место на начальных этапах роста, до достижения деревьями высоты 2–3 м. Однако доля поврежденных деревьев менее 10 % от числа растущих. При выращивании данной древесной породы на открытых болотах этот показатель может достигать 90 %. Продуктивность культур соответствует росту ели по II классу бонитета. Следует отметить, что при расстоянии между осушителями 150 метров темпы роста деревьев отличаются незначительно по всей межканальной полосе.

Таблица 2

Лесоводственная характеристика 27-летних культур ели европейской

Показатель	Вариант			
	1	3	4	5
Количество стволов, экз./га	1685	1530	1739	1838
Сохранность, %	80	70	–	–
Полнота абсолютная, м^2/га	11,3	6,64	14,28	10,07
Средний диаметр, см	9,2	7,4	10,2	8,4
Средняя высота, м	7,8	6,7	9,1	7,2
Запас, м^3/га	52,9	29,4	70,9	45,8
Полнота относительная	0,59	0,37	0,62	0,51
Бонитет	II,2	II,7	I,9	II,4

До 15-летнего возраста и, соответственно, достижения высоты 2–2,5 м различия в темпах роста в высоту у ели в коридорах разной ширины недостоверны. В дальнейшем культуры в узких коридорах начинают отставать в росте. К этому моменту кроны берез из прилегающих кулис разрастаются и над узкими коридорами начинают смыкаться. Снижается освещенность, происходит замедление темпов роста ели (см. рисунок), у которой, несмотря на ее теневыносливость, максимальная продуктивность проявляется при полной освещенности [1]. В коридорах 7-метровой ширины при такой же средней высоте березы в прилегающих кулисах подобной тенденции не проявляется.



Ход роста культур ели в высоту

В то же время раздельные измерения здесь по рядам культур (центральный и крайние, расположенные в 2 м от края кулис) в возрасте 15 лет показали, что ель в крайних рядах также испытывает конкуренцию за свет и, возможно, корневое питание со стороны березы реконструируемого древостоя. Об этом свидетельствует превышение в средних высотах деревьев в центральном ряду по сравнению с крайними на 6–7 %, и эти различия статистически достоверны по первому уровню значимости.

Подтверждением усиливающейся с возрастом конкуренции является проведение осветления в части участка, где культуры были заложены в широких коридорах. За последние 7 лет дополнительное накопление запаса стволовой древесины за счет осветления составляет около 3 м^3/га в год, а годовой текущий среднепериодический прирост в осветленном варианте достигает 7,5 м^3. Это почти в два раза выше, чем в контрольном. Запас стволовой древесины в 27-летних культурах, где проведен уход, достигает 70 м^3/га.

Существенно отличаются темпы накопления запаса еловых древостоев в широких и узких коридорах, где осветления не проводилось (варианты 1 и 3). В первом варианте запас достигает 53 м^3/га, что в 1,7 раза выше, чем в узких коридорах. Накопление запаса стволовой древесины является важным показателем продуктивности насаждений. Однако при сравнении данного параметра по различным вариантам необходимо учитывать разницу в густоте древостоев. Для лесных культур это связано с отклонениями в первоначальной густоте, их сохранности. Чтобы исключить данное влияние, был рассчитан запас, приходящийся на одно дерево («объем» среднего дерева). По этому показателю, как и при общем накоплении запаса, величины выше в широких коридорах: в варианте с осветлением – 41, в вариантах 1 и 5 – 25–30, в узких коридорах – 20 дм^3.

Одним из важных показателей древостоя элемента леса является ряд распределения деревьев по толщине. При статистической обработке данных измерений диаметров выявилось, что положение среднего дерева (ранг среднего дерева) во всех вариантах еловых культур относительно стабильно и составляет 60–65 %, и эта величина довольно тесно коррелирует с величиной среднего диаметра древостоя (коэффициент корреляции – 0,78). Подтверждением приближения распределения по толщине культур ели к нормальному является также уменьшение величины коэффициента вариации с 40 % в возрасте 15–20 лет до 30 % к 30 годам. Все больше деревьев «располагается» вблизи среднего дерева, что обусловлено одновозрастностью молодняков. Около 50 % деревьев по количеству стволов сосредоточено в ряду распределения в интервале ранговых коэффициентов 0,8–1,2 относительно среднего диаметра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый способ выращивания ели европейской путем реконструкции малоценных древостоев на осушаемых землях с посадкой культур в вырубленные коридоры оказался для условий южной части Карелии весьма эффективным. Повреждаемость годичных побегов заморозками, часто наблюдаемая в данном регионе на открытых пространствах в возрасте ели до 10–15 лет, в коридорах – менее 10 % от числа растущих деревьев. Сохранность культур к 30-летнему возрасту – 70–80 %. Продуктивность соответствует росту по второму классу бонитета для еловых молодняков на минеральных почвах. Лучшие условия для роста ели складываются в коридорах, ширина которых (7 м) близка к величине средней высоты реконструируемого древостоя. В 3-метровых коридорах при данной высоте уже к 15-летнему возрасту культур кроны берез, оставленных в кулисах, практически смыкаются над посадками ели, снижая освещенность последних и тем самым замедляя темпы ее роста.

Значительный лесоводственный эффект дало проведение осветления культур ели, осуществленное в экспериментальном порядке на небольшой части участка. Сплошная выборка березы в прилегающих к коридорам кулисах дала дополнительный прирост по запасу за счет осветления за 10 лет после рубки – 3 м^3/га в год. Изучение ряда распределения культур ели по диаметру показало, что, несмотря на специфичность условий произрастания на осушаемых болотных почвах, древостои развиваются нормально в отношении распределения по толщине. Вариабельность диаметров стволов с возрастом деревьев снижается и к 30-летнему возрасту составляет около 30 %. Около 50 % деревьев по количеству стволов сосредоточено в ряду распределения в интервале ранговых коэффициентов 0,8–1,2 относительно среднего диаметра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казимиров Н. И. Ель. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 80 с.
2. Лесохозяйственные мероприятия на осушенных землях: Метод. указания. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1983. 26 с.
3. Плантационное лесоводство / Под общ. ред. И. В. Шутова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 366 с.
4. Разработка комплекса мероприятий по реконструкции насаждений, обеспечивающих восстановление и повышение продуктивности, устойчивости и биоразнообразия лесов (Проект 1.03.02. Краткий отчет за 1999 г.) / Программа ВНИИЛМ «Российский лес». М., 2000. С. 20–23.
5. Чиндяев А. С., Матвеева М. А., Александров В. В. Влияние осушения и лесохозяйственных мероприятий на лесоболотные биогеоценозы в условиях Среднего Урала. Екатеринбург: УГЛТУ, 2004. 151 с.
6. Чмыр А. Ф. Плавная смена поколений еловых лесов бореальной зоны. СПб.: Изд-во СПбНИИЛХ, 2001. 127 с.

Gavrilov V. N., Forest Research Institute, Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

NORWAY SPRUCE CULTIVATION IN CONDITIONS OF DRAINED SEDGE-SPHAGNUM BIRCH STANDS' RECONSTRUCTION

Significant shortage of spruce timber for Karelian pulp industry manifested itself in the second half of the XX century. Considering the above mentioned an experimental plot for Norway spruce cultivation was established in southern Karelia (61˚50′ N, 33˚30′ E) in 1982. The experimental plot was developed during restoration of a low-value sedge-sphagnum birch stands formed on a peatland drained in 1970. The soil of the site was rich with mesotrophic peat-gley with deposits lying 0,4–0,6 m deep. Five-year-old spruce saplings were planted in strips of 3 and 7 meters wide. The growth of spruce crops was studied by repeated regular measurements using forest management survey practices. Obtained results of the study proved that the actions have been very effective. Productivity of the crops corresponds to the quality class II. No more than 10 % of growing spruce trees have been frost-damaged. After 15 years of growth and onwards the rate of spruce growth in the narrow strips has decreased due to light deficit. Release treatments have yielded a positive effect. The resultant surplus annual volume increment has amounted up to 3 m^3/ha. Statistical treatment of the data shows that in spite of specific site conditions the diameter distribution in the young stands was nearly normal. The coefficient of diameter variation in 30 years old trees was within 30 %.

Key words: Norway spruce, forest drainage, productivity, stands' restoration, diameter distribution

REFERENCES

1. Kazimirov N. I. *El'* [Spruce]. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ., 1983. 80 p.
2. *Lesokhozyaystvennye meropriyatiya na osushennykh zemlyakh: Methodicheskiye ukazaniya* [Forestry Practices on Drained Lands: Methodical instruction]. Petrozavodsk, 1983. 26 p.
3. *Plantansionnoe lesovodstvo* [Plantational Sylviculture]. St. Petrsburg, 2007. 366 p.
4. *Razrabotka kompleksa meropriyatiy po rekonstruktsii nasazhdeniy, obespechivayushchikh vosstanovlenie i povyshenie produktivnosti, ustoychivosti i bioraznoobraziya lesov (Proect 1.03.02)* [Working out of Complex of Measures on Stand Reconstruction, Provision of Renewal and Increase of Forests Productivity, Stability and Biodiversity (Project 1.03.02)]. Programma VNIILM "Rossyskiy les" (Kratkiy otchet za 1999 god). Moscow, 2000. P. 20–23.
5. Chindyaev A. S., Matveeva M. A., Aleksandrov V. V. *Vliyanie osusheniya i lesokhozyaystvennykh meropriyatiy na lesobolotnye biogeotsenozy v usloviyakh Srednego Urala* [The Effect of Drainage and Forestry Measures on Forest-mire Phytocoenosis in Middle Ural Conditions]. Ekaterinburg, UGLTY Publ., 2004. 151 p.
6. Chmyr A. F. *Plavnaya smena pokoleniy elovykh lesov boreal'noy zony* [Smooth Replacement of Generations of Spruce Forests in the Boreal Zone]. St. Petersburg, 2001. 127 p.

Поступила в редакцию 24.01.2013

Март, № 2 **Технические науки** **2013**

УДК 630.2

АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ ПИТУХИН
доктор технических наук, профессор кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
pitukhin@psu.karelia.ru

ИГОРЬ ГЕННАДЬЕВИЧ СКОБЦОВ
кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
iskobtsov@mail.ru

НИКОЛАЙ ИВАНОВИЧ СЕРЕБРЯНСКИЙ
кандидат технических наук, профессор кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
tmir@petrsu.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА ПОСТОВ В ЗОНЕ РЕМОНТА ПРЕДПРИЯТИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СЕРВИСА*

Деятельность предприятия технического сервиса сопряжена с неравномерным потоком заявок на обслуживание и ремонт техники, в связи с этим при проектировании предприятий данной сферы могут быть применены законы системы массового обслуживания. Приводится методика определения показателей производственной мощности предприятия технического сервиса вероятностно-статистическими методами в условиях рыночной экономики. Целью работы является решение оптимизационной задачи по определению оптимального количества ремонтных постов. В качестве целевой функции принимается чистый доход предприятия от эксплуатации постов. Приводится пример анализа работы предприятия с заданным параметром загрузки зоны ремонта *U*. Производится расчет показателей функционирования предприятия (общего дохода, издержек на содержание простаивающих постов, чистого дохода предприятия, удельной выработки на один пост) в зависимости от числа ремонтных постов.

Ключевые слова: техническое обслуживание, ремонт автотранспорта, система массового обслуживания, параметр потока заявок, очередность ремонта

Деятельность предприятий технического сервиса (ПТС) лесной отрасли вследствие неравномерного поступления заявок на техническое обслуживание и ремонт машин и разного времени выполнения заявок имеет случайный характер [1], [2], [3], [5]. Поэтому определение технологических параметров ПТС при анализе действующих или проектировании новых предприятий такого типа следует проводить вероятностными методами [4]. Технологические параметры ПТС при этом рассчитываются по вероятностям состояний системы массового обслуживания (СМО), черты которой имеет деятельность рассматриваемого предприятия. В данном случае для открытой СМО без очереди имеем

$$P_k = \frac{U^k}{k!} \cdot P_0, \qquad (1)$$

где P_k – вероятность нахождения в зоне ремонта одновременно k машин.

U – параметр загрузки зоны ремонта,

$$U = \lambda \cdot T_{ср}, \qquad (2)$$

где λ – параметр потока заявок, при установившемся режиме работы λ представляет собой среднее количество заявок в единицу времени; $T_{ср}$ – среднее время выполнения одной заявки.

P_0 – вероятность полного простоя зоны ремонта,

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^{N} \frac{U^k}{k!}}. \qquad (3)$$

Здесь N – число постов в зоне.

По схеме открытой СМО, заявка, без очереди поступившая в момент, когда все посты заняты, получает отказ и покидает систему. Вероятность отказа заявке $P_{отк} = P_N$, или можно записать

$$P_{отк} = \frac{U^N}{N!} \cdot P_0. \qquad (4)$$

Вероятность немедленного обслуживания заявки q, или относительная пропускная способность зоны ремонта, есть величина, обратная $P_{отк}$, следовательно,

$$q = 1 - P_{отк}. \qquad (5)$$

Абсолютная пропускная способность зоны Q определяется по формуле

$$Q = U \cdot q. \qquad (6)$$

© Питухин А. В., Скобцов И. Г., Серебрянский Н. И., 2013

Математическое ожидание количества простаивающих постов $M(P)$ рассчитывается по формуле

$$M(P) = \sum_{k=0}^{N-1} P_k \cdot (N-k). \quad (7)$$

Абсолютная пропускная способность зоны ремонта Q определяет выполненную долю загрузки U предприятия. В стоимостном выражении это есть максимальный доход от эксплуатации постов зоны. С увеличением количества постов доход Q растет. Но при этом увеличивается количество простаивающих постов, что вызывает непроизводительные расходы на их содержание. Если принять, что в стоимостном выражении доход от эксплуатации одного поста и издержки на его содержание при вынужденном простое равны, чистый доход предприятия W определится выражением

$$W = Q - M(P). \quad (8)$$

По принятой математической модели доход предприятия имеет предел в виде загрузки U. Количество простаивающих постов $M(P)$ увеличивается с ростом N без ограничения. Данное соотношение определяет наличие в зоне ремонта количества постов N^*, при котором чистый доход W имеет максимальное значение. Следовательно, имеется возможность оптимизации количества рабочих мест в зоне по условию получения максимального чистого дохода от их эксплуатации. Условие выбора запишется выражением

$$W(N^*) = max\ W(N). \quad (9)$$

Функция оптимизации числа постов в зоне, учитывающая количественно слагаемые чистого дохода предприятия, имеет вид

$$W(N) = C_1 \cdot Q - C_2 \cdot M(P), \quad (10)$$

где C_1 – доход предприятия от эксплуатации одного поста; C_2 – расходы на содержание одного простаивающего поста. При условии $C_1 = C_2 = 1$ выражение (10) примет вид (8).

Пример. Анализируется работа предприятия технического сервиса с параметром загрузки $U = 6$. Расчет выполнен по количеству постов в зоне N от 1 до 10.

Порядок решения. По выражению (3) определяем вероятность полного простоя зоны ремонта P_0

$$P_0 = \frac{1}{\frac{6^0}{0!} + \frac{6^1}{1!}} = \frac{1}{7} = 0{,}143.$$

По формуле (1) рассчитываем вероятность нахождения в зоне ремонта одной машины

$$P_1 = \frac{6^1}{1!} \cdot 0{,}143 = 0{,}858.$$

По формулам (4–7) определяем вероятность отказа заявке

$$P_{отк} = P_1 = 0{,}858,$$

вероятность немедленного обслуживания заявки

$$q = 1 - 0{,}858 = 0{,}142,$$

абсолютную пропускную способность зоны ремонта

$$Q = 0{,}142 \cdot 6 = 0{,}852,$$

математическое ожидание количества простаивающих постов

$$M(P) = 1 \cdot 0{,}143 = 0{,}143.$$

По (8) определяем показатель дохода предприятия

$$W(N) = 0{,}852 - 0{,}143 = 0{,}709.$$

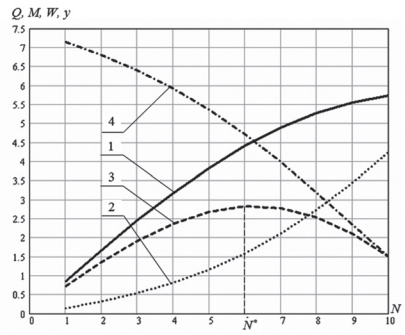
Показатели производственной деятельности ПТС

N	$\frac{U_k}{k!}$	$\sum \frac{U_k}{k!}$	P_0	$P_{отк}$	q	Q	$M(P)$	$W(N)$	$\frac{W(N)}{N}$
1	6	7	0,143	0,858	0,142	0,852	0,143	0,709	0,709
2	18	25	0,040	0,720	0,280	1,680	0,320	1,360	0,680
3	36	61	0,017	0,587	0,413	2,480	0,550	1,930	0,640
4	54	115	0,009	0,470	0,530	3,180	0,817	2,363	0,590
5	65	180	0,0056	0,358	0,642	3,852	1,150	2,702	0,540
6	65	245	0,004	0,260	0,740	4,440	1,556	2,884	0,460
7	56	301	0,0033	0,185	0,815	4,890	2,100	2,790	0,400
8	42	343	0,0029	0,122	0,878	5,268	2,717	2,551	0,320
9	28	371	0,0026	0,073	0,927	5,563	3,310	2,253	0,250
10	17	388	0,0025	0,044	0,957	5,742	4,240	1,502	0,150

По приведенному алгоритму рассчитаны показатели производственной деятельности ПТС с количеством постов в зоне ремонта от 1 до 10 (см. таблицу). По расчетным данным построен график зависимости технико-экономических показателей деятельности ПТС от количества постов в зоне ремонта. На графике (см. рисунок) изображены зависимости следующих параметров:

1. Общий доход предприятия;
2. Издержки на содержание вынужденно простаивающих постов;
3. Чистый доход предприятия от эксплуатации постов в зоне;
4. Удельная выработка на один пост в стоимостном выражении

$$y(N) = \frac{W(N)}{N}.$$



Технико-экономические показатели деятельности ПТС: 1 – общий доход предприятия Q; 2 – издержки на содержание простаивающих постов $M(P)$; 3 – чистый доход $W(N)$; 4 – удельная выработка на один пост, $y(N) = W(N)/N \times 10$; $N^* = 6$ – оптимальное решение

Из результатов расчетов следует, что для данного примера чистый доход предприятия, как сформулировано в математической модели, имеет максимальное значение при наличии $N^* = 6$ постов в зоне ремонта.

В основу приведенной методики оценки положены законы системы массового обслуживания, поскольку при существующей организации технического обслуживания и ремонта техники на предприятие поступает неравномерный поток заявок на обслуживание машин. Решена оптимизационная задача по определению оптимальной величины числа постов в ремонтной зоне, которая определена исходя из условия максимума чистого дохода предприятия на примере анализа ПТС с известным параметром загрузки зоны ремонта.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быков В. В. Концептуальные и технологические основы системы технического сервиса транспортных и технологических машин лесного комплекса. М.: МГУЛ, 2004. 312 с.
2. Быков В. В., Назаренко А. С., Юрков Н. К. Моделирование системы технического сервиса. М.: МГУЛ, 2004. 86 с.
3. Питухин А. В., Серебрянский Н. И., Эгипти А. Э., Скобцов И. Г. Теоретические основы технологического проектирования предприятий технического сервиса лесной отрасли // Фундаментальные исследования. 2012. № 6. С. 158–161.
4. Чернецкий В. И. Моделирование стохастических систем / Петрозаводский государственный университет. Петрозаводск, 1994. 488 с.
5. Шиловский В. Н., Гольштейн Г. Ю., Кяльвияйнен В. А. Экспериментальная оценка организации технического обслуживания и ремонта лесозаготовительных машин // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2012. № 4 (125). С. 93–95.

Pitukhin A. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Skobtsov I. G., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Serebryanskiy N. I., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

DETERMINATION OF OPTIMAL REPAIR POSTS' NUMBER AT TECHNICAL SERVICE ENTERPRISE

Activity of the technical service industry is associated with an irregular flow of maintenance and repair work orders; therefore, the principles of the mass service system can be used when designing a net of motor transport repair enterprises. Capacity indicators of a technical service enterprise operating under market economy conditions are defined by probabilistic and statistical methods. The main goal of this work is to solve an optimization problem by calculating the optimal number of repair posts. Enterprise net income is adopted as a criterion function. The paper provides an example of an enterprise operation analysis when the maintenance zone load ratio U is preset. The following indicators (total gain, expenses for off-line post keeping, net effective income, and specific output per one post) are estimated depending on the number of repair posts.

Key words: maintenance, motor transport repair, mass service system, orders' parameter, repair priority

REFERENCES

1. Bykov V. V. *Kontseptual'nye i tekhnologicheskie osnovy sistemy tekhnicheskogo servisa transportnykh i tekhnologicheskikh mashin lesnogo kompleksa* [Conceptual and technological basis of forest machine maintenance system]. Moscow, MSFU Publ., 2004. 312 p.
2. Bykov V. V., Nazarenko A. S., Yurkov N. K. *Modelirovanie sistemy tekhnicheskogo servisa* [Modeling of maintenance system]. Moscow, MSFU Publ., 2004. 86 p.
3. Pitukhin A. V., Serebryanskiy N. I., Egipti A. E., Skobtsov I. G. Theoretical foundations of technological planning of enterprises in forest sector [Teoreticheskie osnovy tekhnologicheskogo proektirovaniya predpriyatiy tekhnicheskogo servisa lesnoy otrasli]. *Fundamental research* [Fundamental'nye issledovaniya]. 2012. № 6. P. 158–161.
4. Chernetskiy V. I. *Modelirovanie stokhasticheskikh system* [Stochastic systems' modeling]. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 1994. 488 p.
5. Shilovskiy V. N., Golshteyn G. Yu., Kyal'viyaynen V. A. Experimental assessment of logging mashine maintenance and repair [Eksperimental'naya otsenka organizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta lesozagotovitel'nykh mashin]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2012. № 4 (125). P. 93–95.

Поступила в редакцию 23.11.2012

Март, № 2 **Технические науки** **2013**

УДК 004657

ВЛАДИМИР БОРИСОВИЧ ЕФЛОВ
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры механики строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
veflov@gmail.com

ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ПИТУХИН
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
eugene@petrsu.ru

ФЕДОР ВЛАДИМИРОВИЧ СТАФЕЕВ
аспирант кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
fedor.stafeev@gmail.com

АНАЛИЗ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАПРОСОВ В СУБД H2*

Проведено исследование работы модулей выполнения запросов реляционных СУБД в зависимости от параметров запросов. Исследовалась реляционная СУБД H2 Database. Был использован свободно распространяемый продукт компании Oracle, реализующий виртуализацию аппаратного окружения. В экспериментальной БД было создано множество таблиц с одинаковой структурой, но с разным числом записей в таблице. В ходе основного эксперимента произведено измерение времени выполнения запросов в зависимости от относительного номера записи в таблицах и значений системной памяти. Для аппроксимации экспериментальных данных была выбрана кривая в виде обратной функции. Было отмечено существенное снижение времени выполнения после обработки первого запроса, а также скачкообразное снижение времени выполнения запросов при увеличении размера системной памяти в случае первого обращения к таблице. Для выяснения влияния объема кэша на производительность СУБД были проведены дополнительные измерения. Для определенных запросов при фиксированном значении системной памяти варьировался размер кэша от нулевого значения до дальнейших значений с шагом 512 Кб. При увеличении размера кэша был отмечен качественный скачок: уменьшение времени запроса до 25 раз. Данный факт свидетельствовал об использовании только системной памяти в ходе выполнения запросов. Учитывая ярко выраженную зависимость производительности H2 Database от технологии кэширования, увеличение объема данных, размещаемых в системной памяти, способно качественно уменьшить время выполнения запросов.

Ключевые слова: реляционная СУБД, выполнение запросов, СУБД H2

ВВЕДЕНИЕ

В условиях длительной эксплуатации информационных систем на основе реляционных СУБД, сопровождающейся накоплением пользовательских данных, актуальна проблема доступа и обработки хранимой информации. Разработке методик уменьшения времени доступа к данным, в частности оптимизации запросов, уделено особое место в публикациях последних десятилетий [2], [6], [7]. Нами проведено исследование работы модулей выполнения запросов реляционных СУБД в зависимости от их параметров. Объектом исследования была выбрана реляционная СУБД H2 Database, созданная и поддерживаемая сообществом разработчиков. СУБД выпускается под модифицированной лицензией MPL 1.1 (Mozilla Public License).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для того чтобы обеспечить возможность варьировать параметры аппаратной платформы, был использован свободно распространяемый проприетарный вариант реализации технологии виртуализации компании Oracle. H2 Database реализована посредством технологии Java. В качестве ОС для гостевой системы и системы хоста использовался релиз FreeBSD 8.2. В экспериментальной БД было создано множество таблиц с одинаковой структурой с идентификаторами вида BOOKS_NNN, где NNN – число записей в таблице [3]. Структура таблиц имеет следующее описание согласно стандарту ANSI SQL [1]:

CREATE TABLE BOOKS_NNN (BOOKS_ID INTEGER DEFAULT NOT NULL, TITLE VARCHAR(500) DEFAULT NULL, AUTHOR VARCHAR(300) DEFAULT NULL, PRODUCERS VARCHAR(300) DEFAULT NULL, YEAR INTEGER DEFAULT NULL, ISBN BIGINT DEFAULT NULL, NUM_PAGES INTEGER DEFAULT NULL, PRICE DOUBLE DEFAULT NULL, PUBL_ID INTEGER DEFAULT NULL, SHOP_ID INTEGER DEFAULT NULL, PRIMARY KEY (BOOKS_ID));

© Ефлов В. Б., Питухин Е. А., Стафеев Ф. В., 2013

В первой серии экспериментов использовались запросы типа SELECT по шаблону:

SELECT * FROM **tablename**
WHERE **field_name** = **value**,

где **tablename** – идентификатор таблиц вида BOOKS_NNN, **field_name** – идентификатор поля, **value** – варьируемое значение поля согласно его типу.

В качестве типов полей использовались: первичный ключ, целочисленный тип INT; целочисленный, тип INT; вещественные числа, тип DOUBLE; символьный, тип VARCHAR. Кроме того, использовались запросы с предикатом типа LIKE для символьного типа.

В таблицах BOOKS_NNN были созданы специальные записи с полями всех означенных типов со значениями первичного ключа из множества {0,05L; 0,1L…0,95L; L}, где L – число записей в таблице.

Всего в ходе эксперимента были проведены измерения для 10 значений системной памяти, 20 значений первичного ключа таблицы, 5 типов предикатов, по 10 измерений на каждую комбинацию параметров – всего 10 000 значений для каждой из таблиц. В эксперименте использовался персональный компьютер с архитектурой процессора x86 (AMD Sempron 2200+, 1500 MHz) и системной памятью в 512 Мб.

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

В ходе основного эксперимента произведено измерение времени выполнения запросов в зависимости от относительного номера записи в таблицах и значений системной памяти. Диапазон значений системной памяти виртуальной машины подбирался в ходе предварительных измерений и варьировался в диапазоне 112–240 Мб. В ходе основного эксперимента не изменялись параметры СУБД, выставленные по умолчанию разработчиками. В результате наблюдений был установлен ряд фактов.

Экспериментальная зависимость времени выполнения запросов типа SELECT с предикатом по полю первичного ключа от номера запроса имеет выраженный постоянный характер, хорошо описываемый средним значением.

Выполнение запросов проводилось пакетно при помощи предлагаемой разработчиками утилиты и разработанного для эксперимента скрипта. Пакет содержал полный список запросов. В данном случае, как следует из дальнейшего анализа, место конкретного запроса в общем списке имеет немаловажное значение.

В начале списка располагались запросы с предикатом по полю типа VARCHAR. По всем таблицам было отмечено существенное снижение времени выполнения после обработки первого запроса (начало графика на рис. 1). Результатом выполнений этих запросов является запись с минимальным номером кортежа.

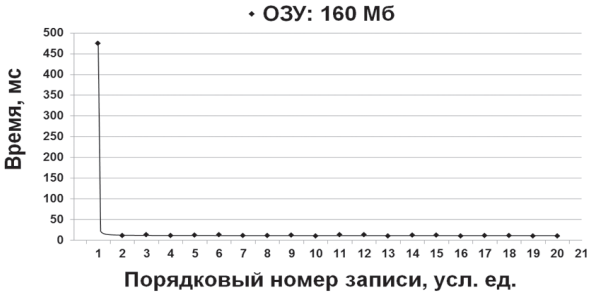


Рис. 1. Выполнение запросов вида «Select * FROM BOOKS_100000 WHERE BOOKS_10000.ISBN = …»

Объяснением этих наблюдений может служить следующее. H2, как и большинство современных СУБД [4], хранит часто используемые данные в системной памяти, обращение к которым занимает существенно меньшее время.

Также было отмечено скачкообразное снижение времени выполнения запросов при увеличении размера системной памяти в случае первого обращения к таблице данных (рис. 2), когда влияние механизма кэширования исключается.

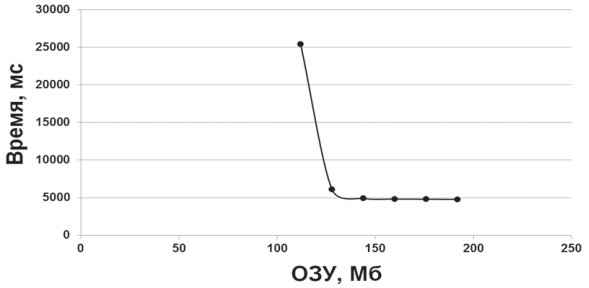


Рис. 2. Время выполнения запросов при первом обращении к таблице

Для аппроксимации экспериментальных данных была выбрана форма кривой (рис. 1–2) в виде обратной функции

$$T(s) = \frac{\gamma_1}{s - \gamma_2} + \gamma_3,$$

где $T(s)$ – время выполнения запроса, γ_1 – коэффициент пропорциональности, γ_2, γ_3 – вертикальная и горизонтальная оси гиперболы соответственно.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЭША

Для выяснения влияния объема кэша на производительность СУБД проведены дополнительные измерения. При фиксированном значении системной памяти и запросов к определенной таблице варьировался размер кэша, задаваемого в настройках подключения к СУБД. На рис. 3 представлены графики экспериментальных зависимостей. Производился скачкообразный рост кэша от нулевого размера до дальнейших значений с шагом 512 Кб. Из списка пакета запросов первый запрос выполнялся медленнее последующих. Качественный скачок – уменьшение времени запроса до 25 раз – отмечался при значении кэша в 28 160 Кб (рис. 4).

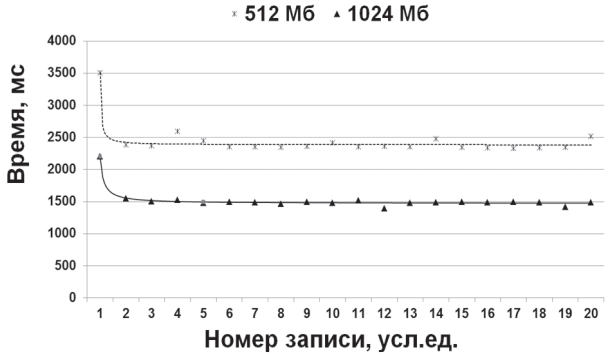


Рис. 3. Зависимость времени выполнения запросов при различных значениях размера кэшируемых данных

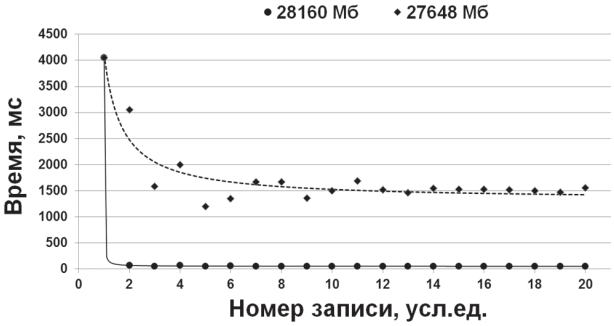


Рис. 4. Изменение зависимости времени выполнения запросов при увеличении размера кэшируемых данных

Среднее время выполнения запросов, следовавших в списке скрипта после первичного обращения к таблице, составляет, по оценке, всего около 1,5 % от среднего времени выполнения первичного запроса. Зависимость установившегося времени выполнения запросов от объема кэшируемых данных представлена на рис. 5.

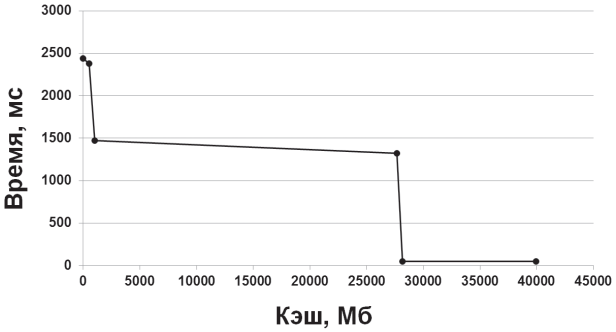


Рис. 5. Выполнение запросов при изменении размера кэша

Очевидно, СУБД не использовало вторичную память в этом случае. Все необходимые данные кэшировались в системной памяти. Необходимо отметить, что размер экспортированных в формат CSV файла данных запрашиваемой таблицы составил 5054 Кб.

ВЫВОДЫ

Учитывая ярко выраженную зависимость производительности H2 Database от технологии кэширования, увеличение объема данных, размещаемых в системной памяти, способно качественно уменьшить время выполнения запросов. Неслучайно в этой связи на протяжении последних двух десятилетий [5] активно происходит развитие направления в разработке СУБД – In-memory database, реляционная база данных, оптимизированная для работы с оперативной памятью и целиком размещаемая в ней.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грабер М. SQL. Справочное руководство. СПб.: Лори, 2006. 368 с.
2. Кузнецов С. Д. Методы оптимизации выполнения запросов в реляционных СУБД // Итоги науки и техники. Вычислительные науки. Т. 1. М.: ВИНИТИ, 1989. С. 76–153.
3. Стафеев Ф. В. Способы оценки эффективности оптимизаторов запросов в реляционных СУБД // Роль науки в устойчивом развитии общества: Сборник материалов 2-й междунар. науч.-практ. конф., 24–25 декабря 2010 г., г. Тамбов. Тамбов: Тамбовпринт, 2010. С. 150–151.
4. Ailamaki A., DeWitt D. J., Hill M. D., Wood D. A. and etc. DBMSs on a Modern Processor: Where Does Time Go?// VLDB'99, Proceedings of 25th International Conference on Very Large Data Bases. Edinburgh, 1999. P. 266–277.
5. Deshmukh P. A. Review on Main Memory Database // International Journal of Computer & Communication Technology (IJCCT). 2011. Vol. 2 . №. 7. P. 54–58.
6. Ioannidis Y. E. Query optimization // ACM Computing Surveys (CSUR) Surveys Homepage archive. 1996. Vol. 28. Issue 1. P. 121–123.
7. Ouzzani M. Query Processing and Optimization on the Web // Distributed and Parallel Databases archive. 2004. Vol. 15. Issue 3. P. 187–218.

Yeflov V. B., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Pitukhin E. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Stafeev F. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

REVIEW OF QUERY EXECUTION IN DBMS H2

Research of query execution engines was carried out depending on the changes of query parameters. The relational DBMS H2 Database was investigated. Oracle Corporation's freeware was used to realize virtualization of hardware environment. We have cre-

ated experimental database consisting of many tables that have the same structure and different number of rows. In the course of the main experiment measurements of the query execution time depending on the relative row number in tables and values of the main memory were made. We decided on the use of the inverse function for approximation of measurement data. A significant decrease of the query execution time after first query execution was observed. A step like decrease of the query execution time under the increase of the main memory size was also noted. To determine the influence of cache value on the DBMS performance we have conducted an additional experiment. For certain queries with fixed values of main memories the cache memory was varied from null to further values with 512 Kb. A sharp decrease in the query execution time (up to 25 times) was registered in the case of cache memory increase. This observation testifies to the fact that the only memory used during query execution was the main memory. Considering strong marked dependence of the H2 Database performance from cache technology, the raise of the value of data in the main memory it is possible to reduce the query execution time qualitatively.

Key words: RDBMS, query execution, H2 Database

REFERENCES

1. G r a b e r M. *SQL. Spravochnoe rukovodstvo* [SQL. Reference Guide]. St. Petersburg, Lori Publ., 2006. 368 p.
2. K u z n e t s o v S. D. Methods of query execution optimization in relational DBMS [Metody optimizatsii vypolneniya zaprosov v relyatsionnykh SUBD]. *Itogi nauki i tekhniki. Vychislitel'nye nauki* [Results of science and techniques. Computational science]. Moscow, VINITI Publ., 1989. Vol. 1. P. 76–153.
3. S t a f e e v F. V. Estimation method of query optimizer performance in Relational DBMS [Sposoby otsenki effektivnosti optimizatorov zaprosov v relyatsionnykh SUBD]. *Sbornik materialov 2-y mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Rol' nauki v ustoychivom razvitii obshchestva"* [Proc. 2nd Int. Research and Practice "The Role of Science in Society Sustainable Development"]. Tambov, Tambovprint Publ., 2010. P. 150–151.
4. A i l a m a k i A., DeWitt D. J., Hill M. D., Wood D. A. and etc. DBMSs on a Modern Processor: Where Does Time Go?// VLDB'99, Proceedings of 25th International Conference on Very Large Data Bases. Edinburgh, 1999. P. 266–277.
5. D e s h m u k h P. A. Review on Main Memory Database // International Journal of Computer & Communication Technology (IJCCT). 2011. Vol. 2 . №. 7. P. 54–58.
6. I o a n n i d i s Y. E. Query optimization // ACM Computing Surveys (CSUR) Surveys Homepage archive. 1996. Vol. 28. Issue 1. P. 121–123.
7. O u z z a n i M. Query Processing and Optimization on the Web // Distributed and Parallel Databases archive. 2004. Vol. 15. Issue 3. P. 187–218.

Поступила в редакцию 04.12.2012

Март, № 2 **Технические науки** **2013**

УДК 630*306

ВЛАДИМИР ЮРЬЕВИЧ ЛИСОВ
аспирант кафедры технологии лесозаготовительных производств лесоинженерного факультета, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
lisov-vladimir@yandex.ru

ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ ЯЗОВ
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры сухопутного транспорта лесоинженерного факультета, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
YazovVN@yandex.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЧВЫ СДВИГУ

Цель данного исследования – определить предельное сопротивление почвы сдвигу под влиянием приложенных к ней касательных (сдвигающих) усилий. Изучение сопротивления почвы сдвигающим усилиям, возникающим в результате воздействия лесозаготовительных машин, имеет большое значение для правильного расчета устойчивости трелевочного волока. Исследования по определению сопротивления почвы сдвигу проводились в октябре 2012 года в лабораторных условиях на сдвиговом приборе. Величина касательных напряжений при сдвиге в одной плоскости определялась на основании закона Кулона. В результате экспериментов были получены зависимости, позволяющие прогнозировать несущую способность почвы и планировать календарный график освоения лесосек.

Ключевые слова: сдвиг почвы, глубина колеи, трелевочный волок

Машинная заготовка древесины оказывает значительную экологическую нагрузку на лесную среду. Серьезное изучение воздействия лесозаготовительных машин на лесную почву началось относительно недавно, с внедрением агрегатной техники [6]. Теорией взаимодействия лесосечных машин и трелевочных систем с почвой занимаются как механики с технологами, так и лесоводы с почвоведами. Отрицательные последствия воздействия лесосечных машин на лесные почвогрунты в ближайшей перспективе могут превратиться в сложную научно-техническую проблему экологического характера.

Особенность взаимодействия ходовых систем лесозаготовительных машин с почвогрунтом заключается в том, что опорная поверхность является сложной биологической средой, обладающей бесценным свойством – плодородием. Физико-механические свойства лесных почвогрунтов и их биологическое назначение во многом схожи со свойствами почв сельскохозяйственных угодий. Лесная почва [3], в отличие от сельхозугодий, в своей структуре содержит развитую корневую систему.

Степень негативного воздействия гусеничного движителя мобильных лесных машин на почву характеризуется интенсивностью колееобразования и величиной ее уплотнения, а также уровнем механической повреждаемости поверхностных корневых систем. В свою очередь, степень уплотнения почвы [2] зависит от числа проходов машины по своему следу, максимального давления движителя на почву, ее исходной пористости, влажности и структуры.

Движение лесных машин по волокам лесосеки сопровождается процессом накопления деформаций, в результате чего растет глубина колеи. С увеличением числа проходов машин по своему следу в зависимости от максимального давления движителя, типа и состояния почвы происходит либо затухание темпов увеличения глубины колеи, либо ее прогрессивный рост. В первом случае в опорном массиве преобладают деформации уплотнения, а во втором – деформации сдвига [4].

Сдвигом почвы называется смещение одной части почвы по отношению к другой в результате бокового (тангенциального) давления [5]. Изучение сопротивления почвы сдвигающим усилиям, возникающим в результате воздействия лесозаготовительных машин, имеет большое значение для правильного расчета устойчивости трелевочного волока. Ухудшение несущей способности трелевочного волока влияет на проходимость, сопровождается возрастанием потерь энергии на буксование движителя, увеличением расхода топлива и разрушением структуры почвы [1].

Сопротивление почвы сдвигу вызывают силы трения, возникающие между соседними частицами, и силы сцепления, обусловленные молекулярным притяжением, поверхностным натяжением тонких водяных пленок, капиллярным давлением и склеиванием частиц естественными вяжущими материалами. Сила трения зависит от зернового состава, влажности, плотности и величины внешней нагрузки [7]. Силы трения в почве удерживают частицы почвы относительно друг друга [8].

© Лисов В. Ю., Язов В. Н., 2013

Величина касательных напряжений при сдвиге в одной плоскости может быть определена на основании закона Кулона из выражения:

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi,$$

где c – внутреннее сцепление частиц почвы, не зависящее от вертикальной нагрузки, МПа; σ – нормальное напряжение, действующее в плоскости сдвига, МПа; φ – угол внутреннего трения, зависящий от вида почвы и ее консистенции, °.

Исследования по определению сопротивления почвы сдвигу проводились в октябре 2012 года в лабораторных условиях. Были взяты 6 образцов почвы с лесосеки, находящейся в квартале № 95 Морозовского Военного лесничества во Всеволожском районе Ленинградской области.

С помощью зернового анализа образцов почвы было установлено:

1. Почва армирована корневой системой подстилающего слоя.
2. Доля крупных корней (диаметром от 2 до 5 мм) составляет 14 %, мелких корней (диаметром до 2 мм) – 30 %. Остальную массу составляет почва.
3. Нижним слоем почвогрунта является песок.

Образец почвы помещался в сушильный шкаф, высушивался до постоянной массы при температуре 105 °С. Для получения необходимой влажности в образец почвы добавлялась вода.

Сопротивление почвы сдвигу определялось в соответствии с требованиями ГОСТ 12248-78 на сдвиговом приборе.

Характерные результаты эксперимента приведены в табл. 1. Результаты обработки эксперимента представлены в табл. 2.

Таблица 1

Результаты эксперимента

№ образца почвы	Влажность почвы, %	Вертикальная нагрузка, 10^{-2} МПа	Сдвигающая нагрузка, 10^{-2} МПа
1	0	5	7
		10	10
		15	13
2	30	5	6
		10	10
		15	12
3	40	5	6
		10	9
		15	12
4	50	5	6
		10	7
		15	11
5	65	5	5
		10	7
		15	10
6	75	5	4
		10	6
		15	9

Результаты испытаний почвы на сопротивление сдвигу показаны в виде графика (рис. 1), по вертикальной оси отложено максимальное (предельное) сопротивление сдвигу (τ), а по горизонтальной – величина вертикальной нагрузки (σ).

Зависимость внутреннего сцепления частиц почвы от ее влажности показана на рис. 2. На рис. 3 представлен график зависимости угла внутреннего трения частиц от влажности почвы.

Таблица 2

Результаты обработки эксперимента

№ образца почвы	Влажность почвы, %	Величина			
		R^2	Вид уравнения	φ, °	c, 10^{-2} МПа
1	0	1	τ = 0,6x + 4	31	4
2	30	0,9643	τ = 0,6x + 3,3333	31	3,3333
3	40	1	τ = 0,6x + 3	31	3
4	50	0,8929	τ = 0,5x + 3	26,6	3
5	65	0,9868	τ = 0,5x + 2,3333	26,6	2,3333
6	75	0,9868	τ = 0,5x + 1,3333	26,6	1,3333

Примечание. R^2 – величина достоверности аппроксимации.

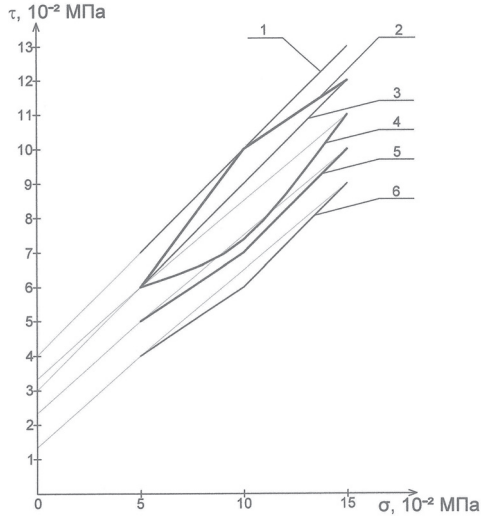


Рис. 1. График зависимости сопротивления почвы сдвигу: 1–6 – номера образцов

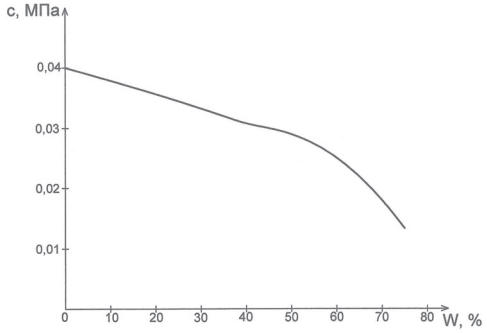


Рис. 2. График зависимости внутреннего сцепления частиц почвы от влажности почвы

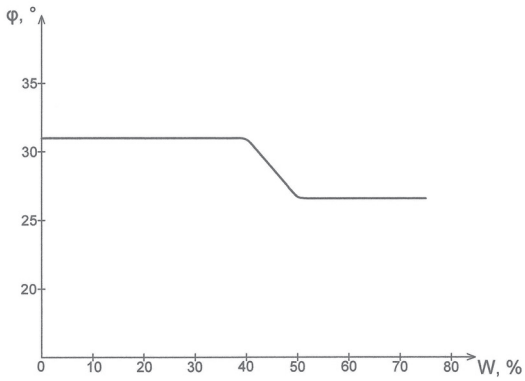


Рис. 3. График зависимости угла внутреннего трения частиц от влажности почвы

На основании полученных экспериментальных данных были сделаны следующие выводы.

1. Чем меньше влажность почвы, тем большие нагрузки она способна выдерживать.

2. Почва выдерживает значительно меньшие нагрузки, чем грунт.

3. Из графика, представленного на рис. 2, видно, что значения величины внутреннего сцепления частиц почвы (с) колеблются в диапазоне от (1–4) 10^{-2} МПа и обусловливаются корневым армированием почвы. С увеличением влажности сила сцепления частиц уменьшается.

4. Из графика, представленного на рис. 3, видно, что при увеличении влажности угол внутреннего трения (φ) уменьшается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов Г. М., Кочнев А. М. Лесотранспортные машины: Учеб. пособие / Под ред. Г. М. Анисимова. СПб.: Издательский дом «Лань», 2009. 448 с.
2. Беккер М. Г. Введение в теорию систем местность-машина. М.: Машиностроение, 1973. 520 с.
3. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высш. шк., 1979. 448 с.
4. Герасимов Ю. Ю., Сюнев В. С. Экологическая оптимизация технологических процессов и машин для лесозаготовок. Йоэнсуу: Изд-во ун-та Йоэнсуу, 1998. 178 с.
5. Невзоров А. Л. Инженерная геология и механика грунтов: Учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Архангельск: Изд-во ЛГТУ, 1998. 116 с.
6. Рогожин Л. Н., Григорьев М. Н. Лесоводственная оценка машины ВТМ-4 // Лесная промышленность. 1972. № 6. С. 17–18.
7. Тюрин Н. А., Бессараб Г. А., Язов В. Н. Дорожно-строительные материалы и машины: Учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2009. 304 с.
8. Цыпович Н. А. Механика грунтов: Учебник для вузов. М.: Высш. шк., 1979. 272 с.

Lisov V. Yu., Saint Petersburg Forest Engineering University (St. Petersburg, Russian Federation)
Yazov V. N., Saint Petersburg Forest Engineering University (St. Petersburg, Russian Federation)

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF SOIL SHEAR RESISTANCE

The purpose of the study is to determine the ultimate shear resistance of the soil under the influence of (shear) force applied to it. The study of the soil resistance to shear forces resulting from the impact of harvesting machines is meaningful for correct calculations of the skidding trail stability. Studies determining shear resistance of the soil were held in laboratory conditions in October of 2012. The value of the tangential stress under shear in a singular plane was defined with the help of Coulomb law. Correlations obtained in the course of the experiment are facilitative in the soil's bearing capacity forecasting and calendar scheduling of cutting areas' development.

Key words: the shift of the soil, the depth gauge, skid trail

REFERENCES

1. Anisimov G. M., Kochnev A. M. *Lesotransportnye mashiny* [Timber-hauling machinery]. St. Petersburg, Publishing house "Lan'", 2009. 448 p.
2. Bekker M. G. *Vvedenie v teoriyu sistem mestnost'-mashina* [Introduction to terrain-vehicle systems]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ.,1973. 520 p.
3. Vyalov S. S. *Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov* [Rheological fundamentals of soil mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1979. 448 p.
4. Gerasimov Yu. Yu., Syunev V. S. *Ekologicheskaya optimizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i mashin dlya lesozagotovok* [Ecological optimization of processes and machines for harvesting]. Joensuu, The University of Joensuu Publ., 1998. 178 p.
5. Nevzorov A. L. *Inzhenernaya geologiya i mekhanika gruntov* [Engineering geology and soil mechanics]. Arkhangelsk, LGTU Publ., 1998. 116 p.
6. Rogozhin L. N., Grigor'ev M. N. Silvicultural evaluation of machine VTM-4 [Lesovodstvennaya otsenka mashiny VTM-4]. *Lesnaya promyshlennost'* [Timber industry]. 1972. № 6. P. 17–19.
7. Tyurin N. A., Bessarab G. A., Yazov V. N. *Dorozhno-stroitel'nye materialy i mashiny* [Road construction materials and machinery]. Moscow, Publishing center "Academy", 2009. 304 p.
8. Tsypovich N. A. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1979. 272 p.

Поступила в редакцию 12.11.2012

Март, № 2 **Технические науки** **2013**

УДК 624.014.074:539.4

АНАТОЛИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ РОЧЕВ
кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры, строительных конструкций и геотехники строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
metalll@bk.ru

К РАСЧЕТУ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ СОСТАВНЫХ СТЕРЖНЕЙ*

Исследуются пространственные составные стержни переменного сечения по длине, включающие в себя ветви тонкостенного открытого профиля, имеющие криволинейное или ломаное очертание контура. Ветви стержня соединены между собой многопанельными структурными связями. Использованы основные положения общей теории упругих пространственно работающих составных стержней, разработанной А. Р. Ржаницыным. Крутящий момент считается передающимся по длине панелей стержня за счет собственной крутильной жесткости ветвей и жесткости структурных связей. Осуществлена замена системы дифференциальных уравнений системой уравнений в конечных разностях, в которую введены параметры, учитывающие физическую и геометрическую нелинейность решаемой задачи. Использованы полученные нами выражения для определения эквивалентных модулей деформаций, учитывающих неупругую работу ветвей и связей между ними, а также выражение для определения податливости составного стержня на кручение. Приведенное решение позволяет выполнить пространственный деформационный расчет неупругого составного стержня при конкретных граничных условиях.

Ключевые слова: пространственные стержни, эквивалентные модули деформаций, податливость на кручение

Рассматриваются пространственный изгиб и осевая деформация упругопластического составного стержня. Используются основные положения общей теории пространственно работающих составных стержней, разработанной А. Р. Ржаницыным [3]. Крутящий же момент считается передающимся по длине панелей стержня за счет собственной крутильной жесткости ветвей и жесткости структурных связей.

Используется система дифференциальных уравнений, описывающая напряженно-деформированное состояние упругого пространственно работающего составного стержня постоянного сечения по длине с упругоподатливыми связями сдвига, имеющими постоянную жесткость по длине стержня, и абсолютно жесткими поперечными связями. Эта система уравнений предназначена для определения усилий в $\overline{n}$ продольных связях сдвига составного стержня. В данной работе осуществлена замена указанной системы дифференциальных уравнений системой уравнений в конечных разностях, в которую введены параметры, учитывающие физическую и геометрическую нелинейность решаемой задачи. Продольная ось составного стержня, включающего в себя n ветвей, делится по длине на m равных частей с образованием участков между смежными сечениями j и $(j + 1)$ длиной c. Контур поперечного j-го сечения d-й ветви длиной s_{dj} делится на p, в общем случае, неравных частей с расстоянием между смежными узлами разбиения υ и $\upsilon + 1$, равным $s_{dj\upsilon}$. Применяется метод шагового нагружения стержней [1].

Данная работа выполнена в развитие исследований, опубликованных нами в [6]. В соответствии с перечисленными выше расчетными предпосылками полная система уравнений, включающая в себя уравнения приращения сдвигов в швах составного стержня, уравнения изгиба в конечно-разностной форме и уравнение кручения составного стержня в целом на k-м шаге нагружения будут иметь вид

$$\Delta^2 T_{igj}^{(k)} / (c^2 \xi_{igj}^{(k)}) = T_{igj}^{(k)} \delta_{igj,igj}^{(k)} + \sum_{l=1}^{a_{ig}} T_{ilj}^{(k)} \delta_{igj,ilj}^{(k)} +$$

$$+ \sum_{r=1}^{b_{ig}} T_{grj}^{(k)} \delta_{igj,grj}^{(k)} + \sum_{l,u=1}^{c_{ig}} T_{luj}^{(k)} \delta_{igj,luj}^{(k)} + \delta_{igj,0}^{(k)},$$

$$\sum_{d=1}^{n} E_{1dj}^{equ(k)} J_{xdj} \cdot \Delta^2 \zeta_j^{k)} / c^2 + \sum_{ig=1}^{\overline{n}} T_{ig}^{(k)} \Delta y_{igj}^{(k)} + \widehat{M}_{xj}^{(k)} = 0, \quad (1)$$

$$\sum_{d=1}^{n} E_{2dj}^{equ(k)} J_{ydj} \cdot \Delta^2 \eta_j^{k)} / c^2 + \sum_{ig=1}^{\overline{n}} T_{ig}^{(k)} \Delta x_{igj}^{(k)} + \widehat{M}_{yj}^{(k)} = 0,$$

$$\theta_j^{(k)} = \gamma_{1rj}^{(k-1)} M_{rj}^{(k)},$$

где $\theta_j^{(k)}$ – угол поворота j-го поперечного сечения составного стержня на k-м шаге нагружения; $\xi_{igj}^{(k)}$ – коэффициент жесткости связей сдвига ig-го шва, соединяющего между собой i-ю и g-ю ветви составного стержня, на k-м шаге нагружения; $T_{igj}^{(k)}$ – суммарное сдвигающее усилие в ig-м шве, накапливаемое по длине составного стержня от его начала до j-го поперечного сечения;

$$T_{igj}^{(k)} = \int_0^{z_j} \tau_{ig}^{(k)} dz, \quad (2)$$

© Рочев А. А., 2013

здесь $\tau_{ig}^{(k)}$ – сдвигающие усилия, действующие в ig-м шве составного стержня на k-м шаге нагружения;

$$\Delta^2 T_{igj}^{(k)} = T_{ig,j+1}^{(k)} - 2T_{igj}^{(k)} + T_{ig,j-1}^{(k)}, \qquad (3)$$

a_{ig} – число связей сдвига, соединяющих i-й стержень с другими стержнями (не считая g-го стержня); b_{ig} – число связей сдвига, соединяющих g-й стержень с другими стержнями (не считая i-го стержня); c_{ig} – число связей сдвига, не примыкающих ни к i-му, ни к g-му стержням; $\zeta_j^{(k)}$ и $\eta_j^{(k)}$ – перемещения составного стержня в плоскостях y0z и x0z; $M_{rj}^{(k)}$– крутящий момент в j-м сечении; $\widehat{M}_{xj}^{(k)}$и $\widehat{M}_{yj}^{(k)}$ – выражения для определения изгибающих моментов в главных плоскостях инерции j-го поперечного сечения стержня, составленные с учетом влияния перемещений $\zeta_j^{(k)}$, $\eta_j^{(k)}$ и $\theta_j^{(k)}$

$$\Delta^2 \zeta_j^{(k)} = \zeta_{j+1}^{(k)} - 2\zeta_j^{(k)} + \zeta_{j-1}^{(k)}, \qquad (4)$$

$$\Delta^2 \eta_j^{(k)} = \eta_{j+1}^{(k)} - 2\eta_j^{(k)} + \eta_{j-1}^{(k)}. \qquad (5)$$

Коэффициенты при неизвестных и нагрузочный член в (1) определяются из выражений

$$\delta_{igj,igj}^{(k)} = \frac{(\Delta\omega_{igj}^{(k)})^2}{C_{\omega ji}^{(k)}} + \frac{(\Delta y_{igj}^{(k)})^2}{\sum_{d=1}^{n} E_{1dj}^{equ(k)} J_{xdj}} + \frac{(\Delta x_{igj}^{(k)})^2}{\sum_{d=1}^{n} E_{2dj}^{equ(k)} J_{ydj}} + \frac{1}{E_{cija}^{(k)} A_{ij}} - \frac{1}{E_{cgja}^{(k)} A_{gj}},$$

$$\delta_{igj,ilj}^{(k)} = \frac{\Delta\omega_{igj}^{(k)} \Delta\omega_{ilj}^{(k)}}{C_{\omega ji}^{(k)}} + \frac{\Delta y_{igj}^{(k)} \Delta y_{ilj}^{(k)}}{\sum_{d=1}^{n} E_{1dj}^{equ(k)} J_{xdj}} + \frac{\Delta x_{igj}^{(k)} \Delta x_{ilj}^{(k)}}{\sum_{d=1}^{n} E_{2dj}^{equ(k)} J_{ydj}} + \frac{1}{E_{cija}^{(k)} A_{ij}},$$

$$\delta_{igj,grj}^{(k)} = \frac{\Delta\omega_{igj}^{(k)} \Delta\omega_{grj}^{(k)}}{C_{\omega ji}^{(k)}} + \frac{\Delta y_{igj}^{(k)} \Delta y_{grj}^{(k)}}{\sum_{d=1}^{n} E_{1dj}^{equ(k)} J_{xdj}} + \frac{\Delta x_{igj}^{(k)} \Delta x_{grj}^{(k)}}{\sum_{d=1}^{n} E_{2dj}^{equ(k)} J_{ydj}} - \frac{1}{E_{cgja}^{(k)} A_{gj}},$$

$$\delta_{igj,luj}^{(k)} = \frac{\Delta\omega_{igj}^{(k)} \Delta\omega_{luj}^{(k)}}{C_{\omega ji}^{(k)}} + \frac{\Delta y_{igj}^{(k)} \Delta y_{luj}^{(k)}}{\sum_{d=1}^{n} E_{1dj}^{equ(k)} J_{xdj}} + \frac{\Delta x_{igj}^{(k)} \Delta x_{luj}^{(k)}}{\sum_{d=1}^{n} E_{2dj}^{equ(k)} J_{ydj}}, \qquad (6)$$

$$\delta_{igj,0}^{(k)} = \frac{\Delta^2\theta_j^{(k)}}{c^2} \cdot \Delta\omega_{igj}^{(k)} + \frac{M_{xj}^{(k)} \Delta y_{igj}}{\sum_{d=1}^{n} E_{1dj}^{equ(k)} J_{xdj}} + \frac{M_{yj}^{(k)} \Delta x_{igj}}{\sum_{d=1}^{n} E_{2dj}^{equ(k)} J_{ydj}} + \frac{N_{ij}^{(k)}}{E_{cija}^{(k)} A_{ij}} - \frac{N_{gj}^{(k)}}{E_{cgja}^{(k)} A_{gj}},$$

$$\Delta^2\theta_j^{(k)} = \theta_{j+1}^{(k)} - 2\theta_j^{(k)} + \theta_{j-1}^{(k)},$$

где $\Delta\omega_{igj}^{(k)}$, $\Delta\omega_{ilj}^{(k)}$, $\Delta\omega_{grj}^{(k)}$ и $\Delta\omega_{luj}^{(k)}$– разности секториальных координат положения швов в j-м поперечном сечении, отнесенные к стержням i и g, i и l, g и r, l и u соответственно при k-м шаге нагружения (ветви l и u не являются ни i-ми, ни g-ми ветвями); Δx_{igj} и Δy_{igj}, Δx_{ilj} и Δy_{ilj}, Δx_{grj} и Δy_{grj}, Δx_{luj} и Δy_{luj} – разности координат центров тяжести j-х поперечных сечений ветвей i и g, i и l, g и r, l и u, составляющих стержень; $E_{cija}^{(k)}$ и $E_{cgja}^{(k)}$ – секущие модули деформаций для осевых волокон j-х поперечных сечений соответственно i-й и g-й ветвей стержня при k-м шаге нагружения; A_{ij} и A_{gi} – площади j-го поперечного сечения ветвей i и g соответственно; $M_{xj}^{(k)}$ и $M_{yj}^{(k)}$ – изгибающие моменты в j-м поперечном сечении составного стержня от внешней нагрузки при изгибе в плоскостях y0z и x0z на k-м шаге нагружения соответственно; $N_{ij}^{(k)}$ и $N_{gj}^{(k)}$ – продольные силы в j-м поперечном сечении ветвей i и g составного стержня от внешней нагрузки на k-м шаге нагружения; $E_{1dj}^{equ(k)}$ и $E_{2dj}^{equ(k)}$– эквивалентные модули деформаций для j-го поперечного сечения d-й ветви составного стержня, учитывающие сжимаемость оси ветвей стержня, влияние деформаций сдвига материала ветвей и развитие пластических деформаций при их изгибе в плоскостях y0z и x0z соответственно при k-м шаге нагружения; выражения для определения $E_{1dj}^{equ(k)}$ и $E_{2dj}^{equ(k)}$ в (1) были получены и опубликованы автором данной статьи ранее в [4], [5].

В (1) угол $\gamma_{1rj}^{(k-1)}$– угол поворота вокруг центра жесткости $c_j^{(k-1)}$ j-го узлового поперечного сечения пространственной панели на (k-1)-м шаге нагружения от действия единичного крутящего момента M_{1rj}. При действии этого момента смежные основания пространственной панели составного стержня повернутся относительно друг друга. Под действием силы $F_{rji}^{(k-1)}$, приходящейся на i-ю плоскую грань пространственной панели, произойдет смещение этой грани на величину $\Delta_{ji}^{(k-1)} = \gamma_{1rj}^{(k-1)} \cdot r_{ji}^{(k-1)}$, где $r_{ji}^{(k-1)}$ – длина перпендикуляра, опущенного из точки $c_j^{(k-1)}$ на контур i-й грани. С учетом сказанного уравнение равновесия крутящих моментов в j-м сечении будет иметь вид

$$\sum_{i=1}^{n} (F_{rji}^{(k-1)} r_{ji}^{(k-1)} + M_{1rji}^{(k-1)}) - M_{1rj} = 0, \qquad (7)$$

где $F_{rji}^{(k-1)} = \Delta_{ji}^{(k-1)} \cdot k_{sji}^{(k-1)}$, здесь $k_{sji}^{(k-1)} = \sin\alpha_{ji}^2 \cos\alpha_{ji} E_{sji}^{(k-1)} A_{sji} / l_{oji}$; $M_{1rji}^{(k-1)}$ – крутящий момент по торцам i-й ветви пространственной панели составного стержня, определяемый по [2]:

$$M_{1rji}^{(k-1)} = \gamma_{1rj}^{(k-1)} C_{\omega ji}^{(k-1)} \lambda_{ji}^{(k-1)} / l_{oji}^3, \qquad (8)$$

где $\lambda_{ji}^{(k-1)} = \dfrac{k_{cji}^{3(k-1)} l_{oji}^3 sh(k_{cji}^{(k-1)} l_{oji})}{k_{cji}^{(k-1)} l_{oji} sh(k_{cji}^{(k-1)} l_{oji}) - 2ch(k_{cji}^{(k-1)} l_{oji}) + 2}$;

$k_{cji}^{(k-1)} == \sqrt{C_{tji}^{(k-1)} / C_{\omega ji}^{(k-1)}}$.

В (7) и (8) приняты следующие обозначения: α_{ji} – угол наклона оси раскоса к проекции оси стержня на плоскость i-й грани панели; $E_{sji}^{(k-1)}$ и A_{sji} – модуль деформаций осевых волокон и площадь поперечного сечения раскоса i-й грани пространственной панели; l_{oji} – длина пространственной панели; $C_{\omega ji}^{(k-1)}$ и $C_{tji}^{(k-1)}$ – жесткости соответственно при стесненном и чистом круче-

нии i-й ветви в j-м поперечном сечении составного стержня при $(k-1)$-м шаге нагружения, определяемые из выражений

$$C_{\omega ji}^{(k-1)} = \sum_{\upsilon=1}^{p} \int_{s_{dj\upsilon}} \widehat{E}_{cdj\upsilon}^{(k-1)}(s_{dj}) \bar{J}_{\omega dj}^{(k-1)}(s_{dj}) ds_{dj\upsilon}, \quad (9)$$

$$C_{tji}^{(k-1)} = \sum_{\upsilon=1}^{p} \int_{s_{dj\upsilon}} \widehat{G}_{dj\upsilon}^{(k-1)}(s_{dj}) \bar{J}_{tdj}(s_{dj}) ds_{dj\upsilon}, \quad (10)$$

где $\widehat{E}_{cdj}^{(k-1)}(s)$ – линейная функция, аппроксимирующая функцию секущего модуля $E_{cdj\upsilon}^{(k-1)}$ по его значениям в узловых точках υ и $(\upsilon+1)$ контура s_{dj} j-го поперечного сечения d-й ветви при $(k-1)$-м шаге нагружения; $\bar{J}_{\omega dj}^{(k-1)}(s_{dj})$ – момент инерции при стесненном кручении единицы длины линии профиля s_{dj} j-го поперечного сечения d-й ветви при $(k-1)$-м шаге нагружения; $\widehat{G}_{dj\upsilon}^{(k-1)}(s_{dj})$ – линейная функция, аппроксимирующая функцию модуля сдвига $G_{dj\upsilon}^{(k-1)}$ по его значениям в узловых точках υ и $(\upsilon+1)$ контура s_{dj} j-го поперечного сечения d-й ветви при $(k-1)$-м шаге нагружения; $\bar{J}_{tdj}^{(k-1)}(s_{dj})$ – момент инерции при чистом кручении единицы длины линии профиля s_{dj} j-го поперечного сечения d-й ветви при $(k-1)$-м шаге нагружения.

Модули $G_{dj\upsilon}^{(k-1)}$ и $E_{cdj\upsilon}^{(k-1)}$ связаны между собой зависимостью

$$G_{dj\upsilon}^{(k-1)} = \frac{E_{cdj\upsilon}^{(k-1)}}{2(1+\mu_{dj\upsilon}^{(k-1)})}, \quad (11)$$

где $\mu_{dj\upsilon}^{(k-1)}$ – коэффициент Пуассона, определяемый по формуле:

$$\mu_{dj\upsilon}^{(k-1)} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{E_{cdj\upsilon}^{(k-1)}(1-2\mu_o)}{E_o}, \quad (12)$$

здесь E_o и μ_o – модуль деформаций Юнга и коэффициент Пуассона в начальной точке диаграммы деформирования материала.

Из (7) получаем выражение для определения $\gamma_{1rj}^{(i-1)}$ в виде

$$\gamma_{1rj}^{(k-1)} = [\sum_{i=1}^{n} (r_{ji}^{2(k-1)} k_{sji}^{(k-1)} + C_{\omega ji}^{(k-1)} \lambda_{ji}^{(k-1)} / l_{oji}^{3})]^{-1}. \quad (13)$$

Для определения положения $c_j^{(k-1)}$ используется подход, предложенный в [8]. Назначается произвольно расположенная декартова система координат x_j и y_j. Далее определяется направление главных взаимно перпендикулярных осей x_{jo} и y_{jo}. Угол наклона оси x_{jo} к оси x_j определится из выражения

$$tg2\alpha_{oj}^{(k-1)} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sin 2\alpha_{ji} \cdot k_{sji}^{(k-1)}}{\sum_{i=1}^{n} \cos 2\alpha_{ji} \cdot k_{sji}^{(k-1)}}. \quad (14)$$

Координаты положения центра жесткости $c_j^{(k-1)}$ j-го узлового поперечного сечения относительно главных осей определятся по формулам

$$x_{cj}^{(k-1)} = \frac{\sum_{i=1}^{p} r_{oji}^{(k-1)} \sin\alpha_{ji} \cdot k_{sji}^{(k-1)}}{\sum_{i=1}^{p} r_{oji}^{(k-1)} \sin\alpha_{ji}^{2} \cdot k_{sji}^{(k-1)}}, \quad (15)$$

$$y_{cj}^{(k-1)} = \frac{\sum_{i=1}^{p} r_{oji}^{(k-1)} \cos\alpha_{ji} \cdot k_{sji}^{(k-1)}}{\sum_{i=1}^{p} r_{oji}^{(k-1)} \cos\alpha_{ji}^{2} \cdot k_{sji}^{(k-1)}}, \quad (16)$$

где $r_{oji}^{(k-1)}$ – длина отрезка, перпендикулярного к контуру i-й грани, проведенного от произвольно назначенного полюса.

За пределом упругости коэффициенты жесткости связей сдвига $\xi_{igj}^{(k)}$ определяются по формулам, приведенным в [3], но с использованием эквивалентного модуля деформаций, если элементы связей работают на изгиб (по аналогии с $E_{1dj}^{equ(k)}$ или $E_{2dj}^{equ(k)}$), и секущим модулем деформаций, если элементы связей работают на осевую силу (по аналогии с $E_{cija}^{(k)}$ или $E_{cgja}^{(k)}$).

Полученные выше выражения позволяют выполнить пространственный деформационный расчет упругопластического составного стержня при конкретных граничных условиях. Результаты деформационного расчета могут в дальнейшем быть использованы для проверки устойчивости составного стержня методом [8].

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер И. А. Общие алгоритмы решения задач теории упругости, пластичности и ползучести // Успехи механики деформируемых сред. М.: Наука, 1975. С. 61–73.
2. Бычков А. А. Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций. М.: Госстройиздат, 1962. 475 с.
3. Ржаницын А. Р. Составные стержни и пластинки. М.: Стройиздат, 1986. 314 с.
4. Рочев А. А. Нелинейная теория расчета сквозных упругопластических статически неопределимых рамных систем // Доклады 58-й конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета: В 3 ч. Ч. 1. СПб.: СПбГАСУ, 2001. С. 93–94.
5. Рочев А. А. Алгоритм нелинейного расчета круговой составной арки // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. № 2 (107). С. 25–29.

6. Р о ч е в А. А. Пространственный расчет упругопластических составных стержней // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2011. № 2 (115). С. 72–75.
7. С а н ж а р о в с к и й Р. С. Устойчивость элементов строительных конструкций при ползучести. Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. 280 с.
8. У м а н с к и й А. А., В о л ь м и р А. С., К о д а н о в А. И. Курс сопротивления материалов. Ч. 1 / Под ред. А. А. Уманского. М.: Изд-во ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1954. 552 с.

Rochev A. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

ON ANALYSIS OF SPATIAL ELASTOPLASTIC COMPOSITE BARS

We studied spatial composite rods with lengthwise variable cross sections inclusive of open profile thin-walled branches with curved shapes or broken circuits. The branches are connected by multiple-panel structural relationships. We used the basic provisions of the general theory of elastic spatial working composite bars designed by A.R. Rzhanitsina. The torque is transmitted along the length of the rod panels through its own torsion rigidity and stiffness of structural connections. A replacement of the system of differential equations by the system of finite difference equations is conducted. The system contains parameters considering physical and geometric nonlinear features of the problem to be solved. We used an expression obtained by the author to determine the modulus of the strain-sensitive inelastic behaviour of the branches and connections between them. The expression was also used to determine compliance of the composite rod in torsion. The above mentioned solution allows spatial deformation calculation of an inelastic composite rod with specific boundary conditions.

Key words: spatial rods, equivalent modules deformations, yielding in torsion

REFERENCES

1. B i r g e r L. A. Obshchie algoritmy resheniya zadach teorii uprugosti, plastichnosti i polzuchesti [Common algorithms for solving problems in the theory of elasticity, plasticity and creep]. *Uspekhi mechaniki deformiruemykh sred*. Moscow, Nauka Publ., 1975. P. 61–73.
2. B y c h k o v A. A. *Stroitel'naya mekhanika sterzhnevykh tonkostennykh konstruktsiy* [Structural mechanics of thin-walled rod]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1962. 475 p.
3. R z h a n i t z i n A. R. *Sostavnye sterzhni i plastinki* [Composite rods and plates]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986. 314 p.
4. R o c h e v A. A. Nonlinear theory of elastic-plastic calculation through statically indeterminate frame system [Nelineynaya teoriya rascheta skvoznih uprugoplasticheskih staticheski neopredelimykh ramnykh system]. *Dokladi 58 konf. professorov, prepodavateley, nauchnikh rabotnikov, inzhenerov i aspirantov universiteta*: V 3 chastyakh. Ch. 1. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2001. P. 93–94.
5. R o c h e v A. A. Algoritm for non-linear analysis of circular composite arch [Algoritm rascheta uprugoplasticheckih sostavnih aroc]. *Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and engineering sciences*. 2010. № 2 (107). P. 25–29.
6. R o c h e v A. A. Spatial elastoplastic calculation of composite rods [Prosnpanstvenyi raschet uprugoplasticheskikh sostavnikh sterzhney]. *Proceedings of Petrozavodsk State University*. *Natural and engineering sciences*. 2011. № 2 (115). P. 72–75.
7. S a n z h a r o v s k i y R. S. *Ustoychivost' elementov stroitel'nykh konstruktsiy pri polzuchesti* [Stability of structural elements under creep]. Leningrad, LGU Publ., 1984. 280 p.
8. U m a n s k i y A. A., V o l ' m i r A. S., K o d a n o v A. I. Kurs soprotivleniya materialov [Strength of materials]. Ch. 1 / Ed. A. A. Umanskiy. Moscow, WWIA im. N. E. Zhukovskogo Publ., 1954. 552 p.

Поступила в редакцию 17.01.2013

Март, № 2 **Физико-математические науки** **2013**

УДК 621.318.134, 537.622.6

SERGEY KHARTSEV
Ph.D, chair of Condensed Matter Physics, senior researcher, The Royal Institute of Technology (Kungliga Tekniska högskolan, KTH) (Stockholm-Kista, Sweden)
serg@kth.se

ALEX GRISHIN
Doctor of Science, chair of Condensed Matter Physics, head of chair, professor in condensed matter physics, The Royal Institute of Technology (Kungliga Tekniska högskolan, KTH) (Stockholm-Kista, Sweden)
grishin@kth.se

SERGEY MANUILOV
Ph.D, chair of Condensed Matter Physics, senior researcher, The Royal Institute of Technology (Kungliga Tekniska högskolan, KTH) (Stockholm-Kista, Sweden)
smanuilov@list.ru

MAGNETOSTATIC WAVES IN $Y_3Fe_50_{12}$ FILMS ON SILICON*

Using pulsed laser deposition (PLD) and post-annealing we fabricated polycrystalline yttrium iron garnet films (YIG) on silicon Si(001) substrates. A temperature of 1000 °C and an annealing time of 10 min result the films with low coercivity Hc = 14 Oe and magnetic losses ΔH = 17 Oe accompanied by effective saturation magnetization $4\pi M_{eff}$ = 1800 Gs. High quality of the YIG films synthesized on Si substrates allowed simple observation of the magnetostatic waves (MSWs) using MSW filter. MSWs spectrums cover 2–5 GHz frequency range and represent magnetostatic surface waves (MSSW) and magnetostatic forward volume waves (MSFVW) geometries. Observations were found to be in the reasonable agreement with qualitative theoretical predictions.

Key words: yttrium-iron-garnet films, magnetostatic waves

INTRODUCTION

Development of the liquid phase epitaxy (LPE) of ferrites opened a new era of planar microwave devises [9]. LPE offered high quality epitaxial films of different thickness and composition. Especially, it provided low loss yttrium iron garnet (YIG) films that found enormous application in microwave electronics [4], [12], [14]. However, high temperature budget of LPE process strongly limits its possible integration with semiconductor platforms such as monolithic microwave integrated circuits (MMICs).

The great development in YIG-semiconductor integration has been done using technique of epitaxial liftoff [2], [11]. Here LPE grown epitaxial YIG film of several μm is cut from the $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG) substrate using ion implantation and subsequently bonded to the semiconductor substrate. This approach allows fabrication of YIG-semiconductor structures with magnetic losses very close to the YIG films on GGG [11]. However, this approach is rather expensive and for some microwave devices (circulators, phase shifters) the polycrystalline YIGs are still very attractive.

During past two decades the techniques of physical vapor deposition has been developed to allow synthesis of epitaxial YIGs at reduced growth temperatures with near LPE films quality [3]. Eventually these methods were also used to probe their potential capability for YIG-semiconductor integration [1], [6], [7], [10], [16].

Considering possible application of YIGs in MMICs we are limited to GaAs and Si. Both of them have strong lattice mismatch with GGG substrates used for epitaxial YIG growth. In contrast to Si, GaAs has better microwave performance but it is expensive and more sensitive to the high temperature budget [12]. Therefore, most of research efforts are focused on the non-epitaxial YIGs synthesis on Si substrates.

Pulse laser deposited YIGs oriented to the microwave applications were firstly reported Karim and Buhay [7], [16]. In work [16] 100 μm thick YIG films were grown on Si substrates. These films had magnetic losses ΔH = 84 Oe and saturation magnetization $4\pi M_s$ = 1680 Gs and were supposed to be used in high frequency circulators. The further progress in the growth process was made in [10] where lower losses $\Delta H_{||}$ = 73 Oe and higher saturation magnetization $4\pi M_s$ = 1730 Gs have been achieved. Only recently authors [6] prepared YIG films with just slightly improved $\Delta H_{||}$ = 70 Oe.

Our excessive attempts to grow YIG films onto Si substrates passed through the searching of buffer YIG-Si sublayers (like in [1]) to the direct deposition of YIG onto silicon substrates what yielded surprisingly better quality assessed by ferromagnetic resonance spectroscopy (FMR) and vibrating sample magnetometry (VSM). Taking advantages of the growth technique our integrated YIG-Si samples were found to be very attractive for studying magnetostatic waves (MSWs) guided by YIG semiconductor structures.

© Khartsev S., Grishin A., Manuilov S., 2013

FILMS PROCESSING AND PROPERTIES

Yttrium iron garnet films were grown directly onto Si(001) substrates with the resistivity of 3 kΩ × cm. The KrF 248-nm excimer laser was used to ablate overstoichiometric $Y_3Fe_5O_{12}$ + 122 % wt. Fe target. The YIG deposition rate was 0,14 Å/pulse at room temperature, 2 mTorr oxygen pressure, laser energy density of 2,5–3 J/cm^2, 20 Hz repetition rate, and substrate-to-target distance of 6 cm. Films were post-annealed at 1000 °C in air for 10 min. The main requirement used to optimize processing parameters (oxygen pressure, target-to-substrate distance, and post-annealing conditions) was the achievement of narrow FMR linewidth ΔH.

Synthesized YIGs reveal single $Y_3Fe_5O_{12}$ phase polycrystalline films structure without any preferential orientation of crystallites that was verified by X-ray diffraction. The estimated lattice parameter of YIG crystallites a = 12,38 ± 0,02 Å was found using Nelson-Riley function. Within an error its value is coincident with a lattice parameter of bulk $Y_3Fe_5O_{12}$ single crystal (12,376 Å).

Differential FMR spectra were recorded in a cavity at the resonance frequency $\omega_{exp}/2\pi$ = 9,1 GHz (TE106 mode). Angular rotation of magnetic field H in the film plane $\theta_H = 90°$ and at the fixed out of plane angle $\theta_H = 40°$ do not reveal any noticeable magnetic anisotropy that agrees to the polycrystalline film structure disclosed by XRD. Fitting of experimental polar angular dependence of the resonance field $H_{res}(\theta_H)$ yields gyromagnetic ratio γ = (1,76 ± 0,01) × 107 rad Gs-1s-1 and effective magnetization $4\pi M_{eff}$ = 1800 ± 20 Gs.

The saturation magnetization $4\pi M_s$ = 1630 Gs and coercive field H_c = 14 Oe were measured by VSM for in-plane geometry of external magnetic field H. An observed difference in $4\pi M_{eff}$ and $4\pi M_s$ values is on the order of 10 % error for the VSM measurement, but it can be also induced by growth anisotropy on the order of 170 Oe.

For better comparison with other available works on YIG/Si all im-portant data are collected in Table. Here one can see the main advantages and disadvantages of our YIG/Si(001) films.

MAGNETOSTATIC WAVES

To study propagation of magnetostatic waves in the frequency range 2–5 GHz we used 2-port MSW band-pass-filters thoroughly described elsewhere [15]. The filters consist of antennae with 2 mm^2 and 0,4 mm^2 active areas where MSW excitation transducers widths are w = 240 μm and w = 80 μm, respectively. The MSW travailing distance is also different, it is $s \approx$ 160 μm for 2 mm2 and $s \approx$ 60 μm for 0,4 mm^2 antennae.

Circular shaped YIG/Si(001) samples entirely cover active area of the filters. The microwave signal at the level of -10 dBm was derived from a HP8722D model vector network analyzer and fed to the microwave cell through the 50 Ω coaxial transmission lines. Network calibration was performed with a samples assembled measurement cell at zero magnetic fields. In 2–5 GHz frequency range this corresponds to the rejection level of 40–31 dB for 2 mm^2 and 33–39 dB for 0,4 mm^2 antennae. Scattering parameters were recorded averaging 16 consecutive frequency spans.

Progress in the developing of YIG/Si structures. ΔH defines peak-to-peak FMR linewidth

Ref.	Deposition method	Film thickness, μm	Growth temperature, °C	Post-annealing temperature, °C	
[2]	rf-magnetron sputtering	1,2	RT	900	
[7]	PLD	100	750	850	
[8]	rf-magnetron sputtering	1,2	RT	900	
[9]	rf-magnetron sputtering	0,98	500	750	
[10]	PLD	0,5	850	–	
our	PLD	0,96	RT	1000	
	Annealing time, min	$4\pi M_s$, Gs	H_c, Oe	$\Delta H_{\parallel}$, Oe	ΔH_y, Oe
[8]	120	1730	23	70	–
[9]	1/3	1680	–	–	84
[10]	120	1730	9	73	–
[11]	5	1600÷1710	32÷40	–	–
[12]	–	1514	37	180	190
our	10	1630 (1800 – $4\pi M_{eff}$ measured with FMR)	14	56	17

Figs. 1 and 2 show S_{21} and S_{11} parameters for YIG(0,96μm)/Si film arranged in MSSW geometry for both antennae types. MSFVW geometry is presented in Fig. 3 for 2 mm2 antenna only. All figures demonstrate common trends, the S_{11} parameter increase with frequency that is a result of better coupling of MSW with rf-field of antenna transducers. This is also a main reason of S_{21} increase, especially for 2 mm^2 antenna.

An important evidence of MSSW propagation is a moderate decay of the frequency difference $\delta\omega$ with increasing magnetic field H (insets to Figs. 1 and 2). Here $\delta\omega$ is calculated as difference in experimental maxima/minima of resonant transmission/reflection (S_{21}/S_{11}) and uniform FMR frequency that is given for two different geometries as follows:

$$\omega_{\text{res}} = \gamma\sqrt{H\left(H + 4\pi M_{\text{eff}}\right)} \quad \textit{in-plane H,}$$

$$\omega_{\text{res}} = \gamma\left(H - 4\pi M_{\text{eff}}\right) \quad \textit{perpendicular H.}$$

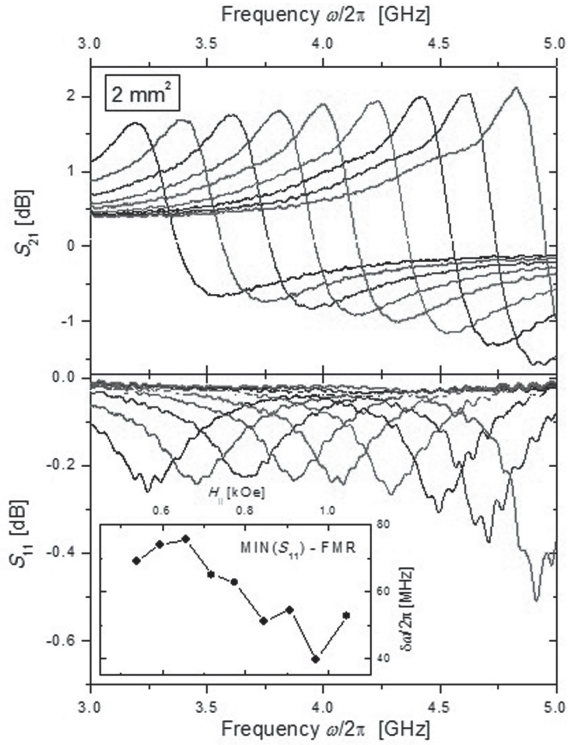


Fig. 1. Transmission characteristics of magnetostatic surface waves (MSSWs) in YIG(0,96μm)/Si(001) film recoded for filter with 2 mm² antenna. Magnetic field H is swept from 538 to 1044 Oe. Inset shows H-dependence of the frequency difference $\delta\omega$ between uniform FMR mode and minimum of S_{11} parameter

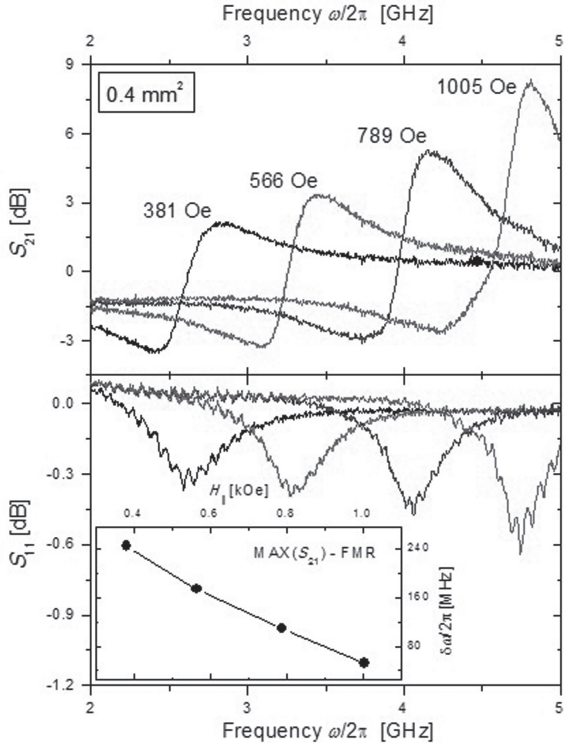


Fig. 2. Transmission characteristics of magnetostatic surface waves (MSSWs) in YIG(0,96μm)/Si(001) film recoded for filter with 0,4 mm² antenna. Inset shows H-dependence of the frequency difference $\delta\omega$ between uniform FMR mode and maximum of S_{21} parameter

It is also worse to mention that for both geometries (MSSW and MSFVW) $\delta\omega$ is computed taking into account experimental errors $\Delta\gamma$ and $\Delta 4\pi M_{eff}$, and represents the possible lowest value.

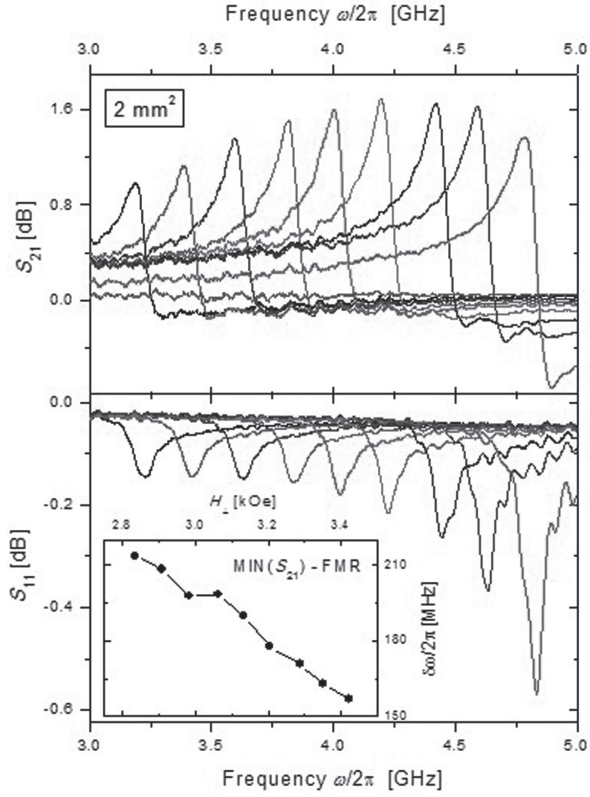


Fig. 3. Transmission characteristics of magnetostatic surface waves (MSFVWs) in YIG(0,96μm)/Si(001) film recoded using filter with 2 mm² antenna. Magnetic field H is swept from 2835 to 3422 Oe. Inset shows dependence of S_{21} minimum on external magnetic field H. Solid lines are uniform FMR modes calculated for perpendicular geometry taking into account $\Delta\gamma$ and $\Delta 4\pi M_{eff}$ errors

As one can see, our observations qualitatively coincide with theory. Fig. 4 shows MSSW and MSFWV dispersion relations calculated for our lossy 0,96 μm-thick YIG film. The calculations have been done using simplified equations for wave vector k from [14]

$$k = \frac{1}{2d}\ln\left[\frac{\mu_1^2 - \mu_2^2 + \mu_1 + \mu_2}{\mu_1^2 - \mu_2^2 - \mu_1 + \mu_2}\right] - \text{MSSW}$$

$$k = \frac{1}{\beta d}\tan^{-1}\left[\frac{-\beta}{\mu_1}\right] - \text{MSFVW}$$

where $\mu_1 = 1 + \frac{\omega_0\omega_M}{\omega_0^2 - \omega^2}$, $\mu_2 = \frac{\omega\omega_M}{\omega_0^2 - \omega^2}$, $\beta = \sqrt{-\mu_1}$ with $\omega_0 = \gamma H$, $\omega_M = \gamma 4\pi M_{eff}$ and d as a film thickness. The magnetic losses were introduced in dispersion relations by substituting $\omega_0 \to \omega_0 + i\alpha\omega$ [5]. The damping parameter α we roughly estimated from FMR line widths for parallel and perpendicular geometries $\alpha = \gamma\Delta H_{(||,\perp)}\omega/2\omega_{exp}$ [5], $\omega_{exp}/2\pi = 9{,}1$ GHz.

MSSW dispersion curves clearly demonstrate shrinking of MSSW propagation band what we ob-

serve in Figs. 1 and 2 (insets) through the reduction of $\delta\omega$ while increasing magnetic field H. The strong deviations of $\delta\omega$ in Fig. 1 result from lower signal to noise ratio for S_{11} parameter. Also, mention that higher values of $\delta\omega$ for 0,4 mm^2 antenna (inset to Fig. 2) nicely correlate with calculations in Fig. 4(a), see variation of MSSW bandwidth at $k = 131$ cm^{-1} and $k = 393$ cm^{-1}, correspondingly for 2 mm^2 and 0,4 mm^2 antennae. The vivid difference in the structure of MSSW spectrums (Figs. 1 and 2) we rely on the different coupling of MSSWs with rf-field of microstripe transducers for 2 mm^2 and 0,4 mm^2 antennae.

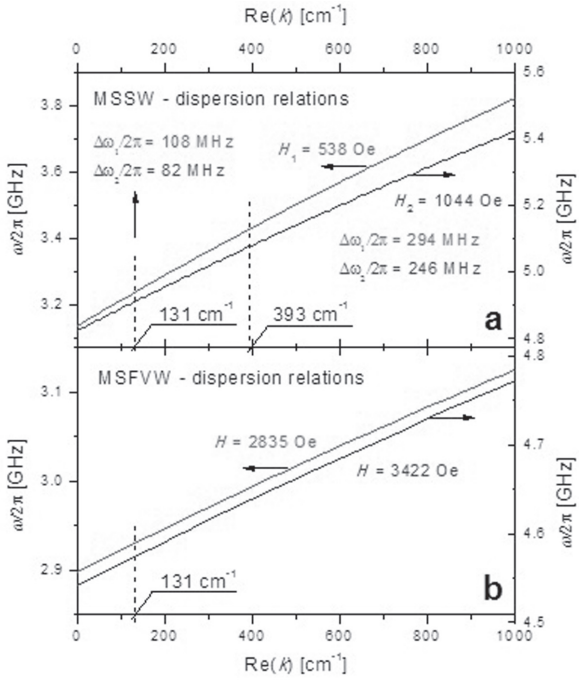


Fig. 4. Computed MSSW and MSFVW dispersion curves

In the case of MSFVW geometry, calculations have resulted in almost constant "bandwidth" $\delta\omega$ of MSFVWs propagation for the studied range of magnetic fields H, that is shown in Fig. 4(b). Taking wave vector $k = 131$ cm^{-1} we get $\delta\omega = 31$ MHz. However, we observe clear contradiction with experimental data given in Fig. 3 (inset), where $\delta\omega$ constantly decays starting from 214 MHz at $H = 2835$ Oe down to 157 MHz at $H = 3422$ Oe. This strong dependence of $\delta\omega$ on magnetic field H we mostly rely on approximately 5° misalignment of magnetic field vector H with the film normal during MSFVWs measurements.

Qualitatively good correlation with theory appears in the observed difference of MSWs bands for MSFVW and MSSW geometries. Calculations in Fig. 4 predict lower frequency band for MSFVW what we easily see in S_{11} and S_{21} spectrums of Figs. 1 and 2. Moreover, Figs. 1 and 2 demonstrate increase of the frequency bands of MSSWs while changing from 2 mm^2 to 0,4 mm^2 antenna. This is a result of the higher range of exited wave vectors k for 0,4 mm^2 antenna (see Fig. 4 (b)).

We also estimated MSWs propagation losses using simple equation $L_p(\text{dB}) = 20 \log[\exp(\text{Im}(k)s)]$ where imaginary part of the k-vector is computed using dispersion relations for MSSW and MSFVW. In the case of MSSW, when magnetic field H is swept from 538 Oe to 1044 Oe we found the losses ranged as follow: $L_p = 12 \div 18$ dB at $k = 131$ cm^{-1} and $L_p = 5 \div 8$ dB at $k = 393$ cm^{-1}. For MSFVW geometry H is swept from 2835 Oe to 3422 Oe what yields to $L_p = 8 \div 12$ dB at $k = 131$ cm^{-1}. And the total losses can be approximated as $L_t = \left| -L_p + \log[1 - 10^{(S_{11}/10)}] \right|$ Taking experimental values for reflection S_{11} parameter of MSSWs we get $L_t = 42$ dB at $H = 538$ Oe and $L_t = 41$ dB at $H = 1044$ Oe for 2 mm^2 antenna, while for 0,4 mm^2 antenna we have $L_t = 31$ dB at $H = 538$ Oe and $L_t = 29$ dB at $H = 1044$ Oe. The total losses for MSFVW geometry are $L_t = 42$ dB at $H = 2835$ Oe and $L_t = 33$ dB at $H = 1044$ Oe. As one can see, our YIG-Si based filters represent good agreement between total losses L_t and transmission losses defined by filter rejection levels (given earlier) and measured S_{21} parameters of MSW assisted propagation (Figs. 1–3).

CONCLUSIONS

We grew polycrystalline YIG/Si(001) films with remarkable properties. The films possess better magnetic losses ΔH, high effective magnetization $4\pi M_{eff}$, and have reasonably lowered coercivity H_c.

Neglecting certain achievements in the growth process, ΔH values are still too high for application in the traditional YIG-oriented spinwave electronics. However, current work demonstrates an ability of the YIG-semiconductor structures to conduct MSWs.

* This work was supported by the Vetenskapsrådet (Swedish Research Council), Strategic Development Program of Petrozavodsk State University (2012–2016), Ministry of Education and Science of Russian Federation "Scientific and Educational Community of Innovation Russia (2009–2013)" Program through contracts № 14.740.11.0895, № 14.740.11.0137, № 14.740.11.1157, № 16.740.11.0562, №14.B37.21.0755, № 14.B37.21.0747, № 14.B37.21.1066 and "Development of Scientific Potential of High School" Program № 2.3282.2011 and № 2.2774.2011.

REFERENCES

1. Effect of CeO_2 buffer layer on the microstructure and magnetic properties of yttrium iron garnet film on Si substrate / Q.-H. Yang, H.-W. Zhang, Q.-Y. Wen et al. // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105. P. 07A507-1–07A507-3.
2. Epitaxial liftoff of thin oxide layers: Yttrium iron garnets onto GaAs / M. Levy, R. M. Osgood, A. Kumar et al. // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 71. P. 2617–2619.
3. Epitaxial yttrium iron garnet films grown by pulsed laser deposition / P. C. Dorsey, S. E. Bushnell, R. G. Seed et al. // J. Appl. Phys. 1993. Vol. 74. P. 1242–1246.

4. Ferrite devices and materials / J. D. Adam, L. E. Davis, G. E. Dionne et al. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2002. Vol. 50. Is. 3. P. 721–737.
5. G u r e v i c h A. G. Magnetization Oscillations and Waves / A. G. Gurevich, G. A. Melkov. Boca Raton: CRC Press, 1996. 445 P.
6. K a n g Y.-M. FMR linewidths of YIG films fabricated by *ex situ* post-annealing of amor-phous films deposited by rf magnetron sputtering / Y.-M. Kang, A. N. Ulyanov, S.-I. Yoo // Phys. Stat. Sol. A. 2007. Vol. 204. Is. 3. P. 763–767.
7. K a r i m R. Laser ablation deposition of YIG films on semiconductor and amorphous substrates / R. Karim, S. A. Oliver, C. Vittoria // IEEE Trans. Magn. 1995. Vol. 31. Is. 6, part 2. P. 3485–3487.
8. K a w a s a k i K. The Interaction of Surface Magnetostatic Waves with Drifting Carriers in Semiconductors / K. Kawasaki, H. Takagi, M. Umeno // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1974. Vol. 22. Is. 22. P. 918–924.
9. L i n a r e s R. C. Epitaxial growth of narrow linewidth Yttrium Iron garnet films // J. Cryst. Growth. 1968. Vol. 3. P. 443–446.
10. Magnetic properties of YIG ($Y_3Fe_5O_{12}$) thin films prepared by the post-annealing of amorphous films deposited by rf-magnetron sputtering / Y.-M. Kang, S.-H. Wee, S.-I. Baik, S.-G. Min et al. // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 97. P. 10A319-1–10A319-3.
11. Magnetization and FMR studies of crystal-ion-sliced narrow linewidth gallium-doped yttrium iron garnet / F. J. Rachford, M. Levy, R. M. Osgood, A. Kumar et al. // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 87. P. 6253–6255.
12. Microwave magnetic film devices / D. B. Chrisey, P. C. Dorsey, J. D. Adam et al. // Thin Film. 2001. Vol. 28. P. 319–374.
13. P a r e k h J. P. Propagation characteristics of magnetostatic waves / J. P. Parekh, K. W. Chang, H. S. Tuan // Circuits Systems Signal Process. 1985. Vol. 4. P. 9–39.
14. Recent advances in processing and applications of microwave ferrites / V. G. Harris, A. Geiler, Y. Chen et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2009. Vol. 321. Is. 14. P. 2035–2047.
15. Submicron $Y_3Fe_5O_{12}$ Film Magnetostatic Wave Band Pass Filters / S. A. Manuilov, R. Fors, S. I. Khartsev et al. // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105. P. 033917-1–033917-9.
16. Thick yttrium-iron-garnet (YIG) films produced by pulsed laser deposition (PLD) for integration applications / H. Buhay, J. D. Adam, M. R. Daniel et al. // IEEE Trans. Magn. 1995. Vol. 31. Is. 6, part 2. P. 3832–3834.

Khartsev S., The Royal Institute of Technology (Stockholm-Kista, Sweden)
Grishin A., The Royal Institute of Technology (Stockholm-Kista, Sweden)
Manuilov S., The Royal Institute of Technology (Stockholm-Kista, Sweden)

MAGNETOSTATIC WAVES IN $Y_3Fe_50_{12}$ FILMS ON SILICON

Using pulsed laser deposition (PLD) and post-annealing we fabricated polycrystalline yttrium iron garnet films (YIG) on silicon Si(001) substrates. A temperature of 1000 °C and an annealing time of 10 min result the films with low coercivity H_c = 14 Oe and magnetic losses ΔH = 17 Oe accompanied by effective saturation magnetization $4\pi M_{eff}$ = 1800 Gs. High quality of the YIG films synthesized on Si substrates allowed simple observation of the magnetostatic waves (MSWs) using MSW filter. MSWs spectrums cover 2–5 GHz frequency range and represent magnetostatic surface waves (MSSW) and magnetostatic forward volume waves (MSFVW) geometries. Observations were found to be in the reasonable agreement with qualitative theoretical predictions.

Key words: yttrium-iron-garnet films, magnetostatic waves

REFERENCES

1. Effect of CeO_2 buffer layer on the microstructure and magnetic properties of yttrium iron garnet film on Si substrate / Q.-H. Yang, H.-W. Zhang, Q.-Y. Wen et al. // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105. P. 07A507-1–07A507-3.
2. Epitaxial liftoff of thin oxide layers: Yttrium iron garnets onto GaAs / M. Levy, R. M. Osgood, A. Kumar et al. // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 71. P. 2617–2619.
3. Epitaxial yttrium iron garnet films grown by pulsed laser deposition / P. C. Dorsey, S. E. Bushnell, R. G. Seed et al. // J. Appl. Phys. 1993. Vol. 74. P. 1242–1246.
4. Ferrite devices and materials / J. D. Adam, L. E. Davis, G. E. Dionne et al. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2002. Vol. 50. Is. 3. P. 721–737.
5. G u r e v i c h A. G. Magnetization Oscillations and Waves / A. G. Gurevich, G. A. Melkov. Boca Raton: CRC Press, 1996. 445 P.
6. K a n g Y.-M. FMR linewidths of YIG films fabricated by *ex situ* post-annealing of amor-phous films deposited by rf magnetron sputtering / Y.-M. Kang, A. N. Ulyanov, S.-I. Yoo // Phys. Stat. Sol. A. 2007. Vol. 204. Is. 3. P. 763–767.
7. K a r i m R. Laser ablation deposition of YIG films on semiconductor and amorphous substrates / R. Karim, S. A. Oliver, C. Vittoria // IEEE Trans. Magn. 1995. Vol. 31. Is. 6, part 2. P. 3485–3487.
8. K a w a s a k i K. The Interaction of Surface Magnetostatic Waves with Drifting Carriers in Semiconductors / K. Kawasaki, H. Takagi, M. Umeno // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1974. Vol. 22. Is. 22. P. 918–924.
9. L i n a r e s R. C. Epitaxial growth of narrow linewidth Yttrium Iron garnet films // J. Cryst. Growth. 1968. Vol. 3. P. 443–446.
10. Magnetic properties of YIG ($Y_3Fe_5O_{12}$) thin films prepared by the post-annealing of amorphous films deposited by rf-magnetron sputtering / Y.-M. Kang, S.-H. Wee, S.-I. Baik, S.-G. Min et al. // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 97. P. 10A319-1–10A319-3.
11. Magnetization and FMR studies of crystal-ion-sliced narrow linewidth gallium-doped yttrium iron garnet / F. J. Rachford, M. Levy, R. M. Osgood, A. Kumar et al. // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 87. P. 6253–6255.
12. Microwave magnetic film devices / D. B. Chrisey, P. C. Dorsey, J. D. Adam et al. // Thin Film. 2001. Vol. 28. P. 319–374.
13. P a r e k h J. P. Propagation characteristics of magnetostatic waves / J. P. Parekh, K. W. Chang, H. S. Tuan // Circuits Systems Signal Process. 1985. Vol. 4. P. 9–39.
14. Recent advances in processing and applications of microwave ferrites / V. G. Harris, A. Geiler, Y. Chen et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2009. Vol. 321. Is. 14. P. 2035–2047.
15. Submicron $Y_3Fe_5O_{12}$ Film Magnetostatic Wave Band Pass Filters / S. A. Manuilov, R. Fors, S. I. Khartsev et al. // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105. P. 033917-1–033917-9.
16. Thick yttrium-iron-garnet (YIG) films produced by pulsed laser deposition (PLD) for integration applications / H. Buhay, J. D. Adam, M. R. Daniel et al. // IEEE Trans. Magn. 1995. Vol. 31. Is. 6, part 2. P. 3832–3834.

Поступила в редакцию 14.11.2012

Март, № 2 **Физико-математические науки** **2013**

УДК 537.52;538.9;539.26

ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ ПОДГОРНЫЙ
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники и электроэнергетики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
podgvlad@psu.karelia.ru

БОРИС ЗАЛМАНОВИЧ БЕЛАШЕВ
доктор технических наук, старший научный сотрудник, 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

РОМАН НИКОЛАЕВИЧ ОСАУЛЕНКО
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
oroman@psu.karelia.ru

АНАТОЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ ТЕРНОВОЙ
главный физик, Институт геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
ternovoi@krc.karelia.ru

СИНТЕЗ КАРБИДОВ В ПЛАЗМЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА И ИХ ИДЕНТИФИКАЦИЯ*

Карбиды металлов находят широкое применение во многих областях. Их синтез при высоких температурах в вакууме или в инертном газе является одним из самых чистых методов получения. В настоящей работе карбиды получают в условиях дугового разряда с графитовыми электродами в среде аргона. При этом испаряемые металлы (или кремний) размещаются внутри анодной полости. Рентгеноструктурные исследования показали, что в этих условиях в разрядной камере образуются порошкообразные вещества, содержащие карбиды: Fe_3C с концентрацией $c = 23$ %, SiC – $c = 75$ %, TiC – $c = 40$ %, WC – $c = 3$ %, остальное – в основном графит гексагональной структуры. Исключением являются продукты испарения с анодом (C-Fe), в которых обнаруживается до 55 % чистого железа. Предполагается, что частицы железа образуют металлические ядра, покрытые углеродной оболочкой. Действительно, на микрофотографии этих продуктов видны сфероидальные частицы размером около 1–2 мкм, в состав которых, по данным микроанализатора, входят 37 ат. % Fe и 63 ат. % C. Спектры комбинационного рассеяния (КР) некоторых из исследованных порошков показали наличие в них полос фононных колебаний решеток карбидов металлов (и кремния) и D- и G-линий графита. В спектре КР продуктов испарения с анода (C-Fe) видны два узких максимума при 126 и 139 $см^{-1}$, которые связываются с радиальными колебаниями атомов в одностенных углеродных нанотрубках, синтезированных в этих условиях. Таким образом, в дуговом разряде с графитовыми электродами по разработанной методике могут быть синтезированы карбиды таких разных по свойствам элементов, как железо, титан, кремний и вольфрам.

Ключевые слова: графит, дифрактограмма, микрофотография, спектр комбинационного рассеяния света, рентгеновский микроанализатор

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря широкому спектру физико-химических и физико-механических свойств карбиды металлов находят широкое применение во многих областях промышленности. Кроме известных прежде показателей высокой прочности, коррозионной и радиационной стойкости некоторые карбиды являются перспективными высокотемпературными полупроводниками и характеризуются интересными оптическими и даже биологическими характеристиками. Сегодня разработаны многочисленные методы их получения, отличающиеся структурой и размерами кристаллов конечного продукта, сортом и количеством примесей [8]. В этом отношении синтез карбидов из химических элементов при высоких температурах в вакууме является одним из самых чистых. Одной из разновидностей этого метода является их получение в условиях дугового разряда с графитовыми электродами [9]. Как известно, в этих условиях частицы металлов могут выступать также в качестве катализаторов формирования в дуге одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) [7]. С этих позиций представляется интересным оценить возможность одновременного получения этих объектов в процессе синтеза карбидов.

Целью работы является исследование особенностей метода, состава образцов, структуры и морфологии различных карбидов, синтезиро-

© Подгорный В. И., Белашев Б. З., Осауленко Р. Н., Терновой А. Н., 2013

ванных в одинаковых условиях дугового разряда с графитовыми электродами в среде аргона.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальная установка состояла из вакуумного колпака, водоохлаждаемой разрядной камеры цилиндрической формы диаметром 80 мм, системы напуска газа и источника выпрямленного напряжения 60 В [4]. Катодом служила графитовая пластинка размером 30 х 15 х 5 мм. В качестве распыляемого анода использовались графитовые стержни диаметром 6 мм, в центре которых высверливалась цилиндрическая полость диаметром 2,5 мм и высотой 50 мм. Эта полость заполнялась одним из элементов синтезируемого карбида в виде либо порошка (в случае Si), либо набора отрезков проволоки (в случае W и Fe), либо фольги (в случае Ti). Электроды размещались в горизонтальном положении с торцов разрядной камеры. Анод имел возможность перемещения вдоль своей оси. Камера размещалась внутри вакуумного колпака. Через смотровые окна, имеющиеся на колпаке, можно было визуально контролировать процессы поджога и горения дуги. С помощью форвакуумного насоса колпак откачивался до давления остаточных газов $p \cong 1$ Па. После этого рабочий объем заполнялся аргоном марки ВЧ.

Поджог дуги осуществлялся путем разогрева электродов при их кратковременном замыкании. Межэлектродный зазор в рабочем режиме регулировался в пределах 0,1…1 мм. Ток дуги варьировался в диапазоне от 60 до 75 А, а давление аргона – от $1 \cdot 10^4$ до $4 \cdot 10^4$ Па. Время горения дугового разряда составляло 20…30 мин.

Объектами исследования служили продукты распыления, образующиеся на стенках разрядной камеры и на катоде. Морфология этих веществ исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа РЭМ-200 и оптических микроскопов. Элементный анализ производился с помощью электронного растрового микроанализатора Vega-Teskan. Рентгеноструктурные исследования производились на рентгеновском дифрактометре ДРОН-4 с использованием Cu-K_α-излучения. Спектры комбинационного рассеяния образцов исследовались с помощью спектрометра Nicolet Almega XP Dispersive Raman с использованием лазерного излучения с длиной волны 532 нм и мощностью 15…500 мВт.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Особенностью плазмы аргонно-дугового разряда в режиме синтеза карбидов является наличие в ней ионов и атомов не двух разновидностей (аргона и углерода), как в случае формирования фуллеренов в аргоновой дуге [5], [6], а трех: аргона, углерода и металла (или кремния). В данном случае аргон выполняет, очевидно, ту же роль буферного газа, что и при формировании фуллеренов, а именно обеспечивает стабильность горения дуги и осуществляет отбор избытка теплоты (энергии) от кластеров, молекул и атомов и перенос этого избытка на водоохлаждаемые стенки разрядной камеры. При этом давление аргона в разрядной камере практически совпадает с соответствующим значением в режиме получения фуллеренов, а параметры дуги в режиме синтеза карбидов несколько отличаются от соответствующих значений при получении фуллеренов. Кроме того, в отличие от режима дуги с термокатодом в [5], в нашем случае практически при всех использованных анодах дуга преимущественно горела в режиме с катодным пятном, что визуально фиксировалось по перемещению светящегося пятна по поверхности катода или катодного депозита.

В таблице производится сравнение значений напряжения горения дуги U_b и тока разряда I_d дуг в режиме получения фуллеренов (C – C) с их значениями в режимах синтеза карбидов.

Напряжение горения U_b и ток разряда I_d дуг с различными электродами

Электроды	C – C	C – C(Fe)	C – C(Ti)	C – C(Si)	C – C(W)
U_b, В	22	18–20	18	20–21	23-24
I_d, А	75	60	75	60	75

Как видно, введение атомов железа, титана и кремния в межэлектродный зазор приводит к некоторому уменьшению напряжения горения дуги, то есть в этих условиях электропроводность плазмы увеличивается, а введение малоподвижных атомов вольфрама, наоборот, увеличивает U_b. Мощность дуги также достаточно сильно зависит от сорта добавки. Отсюда следует, что температуры и концентрации электронов, ионов и атомов аргона и углерода в дуге в режиме синтеза карбидов могут несколько отличаться от их значений в режиме получения фуллеренов. В этих условиях концентрации атомов и ионов металла в дуге, как и степень их ионизации, в значительной мере будут зависеть от сорта этих частиц. Так, в случае синтеза карбида железа в плазме могут существовать, по-видимому, ионы Fe^{+1}, Fe^{+2} и даже Fe^{+3}. Во всех случаях синтеза после прекращения горения дуги на стенках камеры визуально наблюдался порошок черного цвета, а в случае анода с Si образовывался порошок желто-зеленого цвета. При этом на катоде всегда формировался достаточно хрупкий квазицилиндрической формы осадок (депозит) из испаряемого вещества анода.

На рис. 1 представлены фрагменты рентгеновских дифрактограмм этих порошков. На всех дифрактограммах 1–4 наблюдаются достаточно четкие и узкие рефлексы. На кривой 1 эти рефлексы идентифицируются с линиями Fe_3C ромбической сингонии (пространственная группа (п. г.) Pbnm) (пики B, C, D, E, F, G, I, K, M, N, O, Q) и линиями α – Fe объемоцентрированной

кубической (ОЦК) структуры (пики H, P) [10]. Рефлексы A, R на этой дифрактограмме соответствуют гексагональному графиту. Тот факт, что графит представлен на кривой 1 только двумя отражениями, связан со значительным перекрытием остальных его линий с максимумами рефлексов карбида железа и железа. На кривой 2 рефлексы B, D, I, J, K соотносятся с линиями гранецентрированной кубической решетки карбида кремния SiC (п. г. F-43m), рефлексы A, E, F, G, H, L – с линиями гексагонального графита [10]. На кривой 3 рефлексы B, C, G, J, K совпадают с линиями, соответствующими карбиду вольфрама WC (п. г. P-6m2), и рефлексы A, E, F, H, I, L – с линиями графита. На дифрактограмме 4 рефлексы B, C, H, I, J относятся к линиям карбида TiC кубической структуры (п. г. Fm3n), рефлексы A, D, E, F, G, K – к линиям графита.

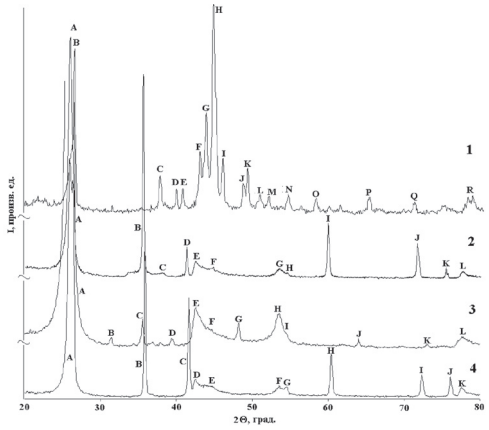


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы порошков, полученных в дуговом разряде с различными веществами в аноде: 1 – железо, 2 – титан, 3 – вольфрам, 4 – кремний

По соотношению интенсивностей рефлексов на дифрактограммах 1–4, соответствующих максимумам интенсивностей (I = 100 %) каждой фазы, можно оценить относительную концентрацию фаз в исследуемых порошках. Такая оценка дает для Fe_3C концентрацию c = 23 %, для карбида кремния – c = 75 %, карбида вольфрама – c = 3 % и карбида титана – c = 40 %.

Как видно из приведенной оценки (и вообще из соотношения интенсивностей на дифрактограмме 3), выход карбида вольфрама в дуге был наименьшим из всех используемых добавок в аноде. Этот факт можно связать с достаточно низкой концентрацией атомов и ионов вольфрама в дуге, обусловленной его достаточно высокой температурой плавления (≈3400 °C). Визуальный осмотр нескольких анодов (C-W) после их использования как электродов дугового разряда показал, что выходное отверстие анодной полости на глубину около 3 мм целиком заполняется веществом серо-стального цвета, образующимся, очевидно, вследствие частичного расплавления вольфрамовой проволоки на границе с плазмой дуги.

Как показали рентгеноструктурные измерения и исследования элементного состава, это вещество состоит только из карбидов вольфрама (60 % WC и 40 % W_2C). Очевидно, эти карбиды (являющиеся, вообще говоря, фазами внедрения атомов углерода в решетку кристаллитов вольфрама) образуют своеобразную пробку, препятствующую выходу атомов вольфрама из глубины полости в межэлектродный зазор. С этих же позиций можно объяснить тот факт, что второй наибольшей составляющей продукта синтеза были частицы гексагонального графита (свыше 90 %). Следует заметить, что у всех прочих испытанных анодов в дуговом разряде происходило полное испарение заложенных в них веществ (кремния, титана или железа) и никаких пробок не наблюдалось. В случае анодов с титаном и кремнием второй компонентой формируемого в дуге порошкообразного вещества также были частицы гексагонального графита (60 и 25 % соответственно). Однако в дуге с анодом (C-Fe) кроме 22 % частиц графита присутствовало большое количество чистого железа (около 55 %). Этот результат не вписывается в предполагаемую картину синтеза и требует дополнительных исследований, в частности, он может быть связан с формированием в дуге микро- и наночастиц железа, покрытых сферической углеродной оболочкой [3]. Основанием для подобного предположения является тот факт, что линия (002) графита на кривой 1 (рис. 1) (как и в работе [3], где такие частицы были синтезированы) является асимметричной с «плечом» в направлении меньших углов 2θ. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведен фрагмент указанной дифрактограммы.

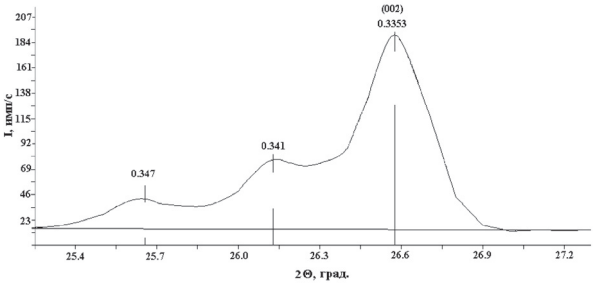


Рис 2. Фрагмент дифрактограммы порошка, полученного в дуге с анодом из (C-Fe)

Как видно, на этой кривой, помимо основного дифракционного максимума при 2θ = 26,57° (отвечающего межплоскостному расстоянию d = 0,3353 нм), наблюдаются дифракционные максимумы меньшей интенсивности при 2θ = 26,13° и 25,66°, соответствующие увеличенному межплоскостному расстоянию d = 0,341 нм и d = 0,347 нм соответственно. Сферически искаженные графитовые плоскости с увеличенным межплоскостным расстоянием могут быть ответственными за появление «плеча» на рис. 2.

Заметим, что в обычных условиях аргонно-дугового разряда с графитовыми электродами (например, при получении фуллеренов [5], [6]) в тех же условиях графитоподобные частицы

составляют едва ли не 95 % состава продуктов испарения. Этот факт позволяет нам предположить, что образование молекул карбида железа в наших условиях лимитируется, по меньшей мере частично, поступлением в плазму дуги атомов углерода из графита, имеющего намного более высокую температуру плавления (3700 °С) по сравнению с железом (1500 °С).

В случае анода с железом в процессе горения дуги на катоде вырастал депозит высотой до 30 мм. Дифрактограмма этого вещества показана на рис. 3.

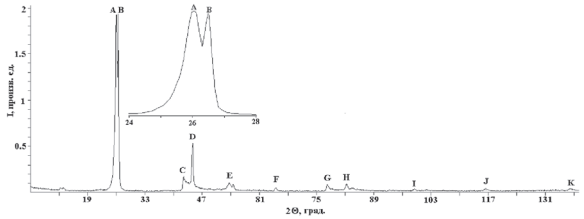


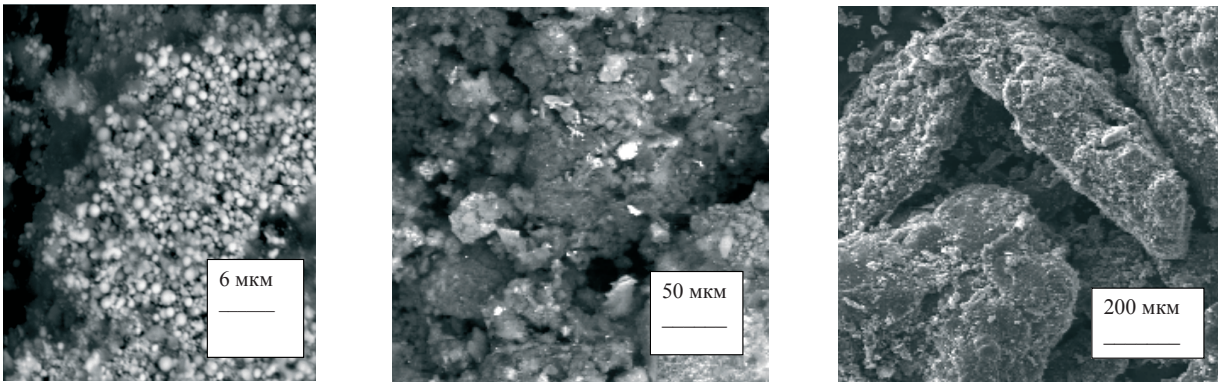
Рис. 3. Дифрактограмма катодного депозита, полученного в дуге с анодом из (C-Fe). На врезке представлены пики A, B в увеличенном масштабе

Здесь максимумы A, B, D, F, H, I соответствуют рефлексам графита, а максимумы C, E, G, J, K – рефлексам α – Fe. Рефлексов карбидов на этой дифрактограмме не наблюдается. Следует заметить, что основной рефлекс (002) графита на рис. 3 состоит из двух четко разрешающихся максимумов (см. врезку): более узкий максимум B при 2θ = 26,49° (d = 0,336 нм), характеризуемый полушириной Δ = 0,3°, и более широкий максимум A при 2θ = 26,02° (d = 0,342 нм), характеризуемый в 2 раза большей полушириной Δ. Этот факт свидетельствует о наличии в депозите двух разновидностей кристаллитов графита, различающихся размерами, межплоскостным расстоянием и степенью совершенства кристаллической решетки. Причем пик B отвечает более крупным кристаллитам с поперечным размером около 500 нм, а пик A – более мелким кристаллитам графита, характеризующимся сильно дефектной структурой.

Таким образом, из вышеизложенного следует, что синтез молекул карбида железа может происходить только на периферии плазмы дуги, имеющей существенно более низкую температуру по сравнению с ее центральной областью. Кроме того, полученные результаты указывают на то, что в условиях аргонового дугового разряда можно синтезировать частицы, состоящие из металлического ядра и сфероидальной углеродной оболочки. После образования отдельных молекул карбидов в плазме в процессе их движения к водоохлаждаемой стенке происходит объединение их в конденсированную фазу – микрокристаллы. Исходя из формулы Шерера, связывающего полуширину рефлексов веществ на дифрактограмме с их размерами, можно оценить примерный размер образовавшихся кристаллитов. Такая оценка для всех полученных карбидов дает верхний предел их размеров на уровне 0,5 микрона.

На рис. 4 приведены микрофотографии некоторых синтезированных порошков. Как видно, в дуге с анодом (C-Fe) происходит формирование частиц сфероидальной формы диаметром от 1 до 2 мкм (рис. 4а). По данным микроанализатора, их элементный состав следующий: Fe – 37 ат. %, C – 63 ат. %. Эти данные существенным образом подтверждают высказанное ранее предположение о формировании в нашем случае углеродных частиц с металлическим ядром. Из рис. 4 (а, б, в) видно, что морфология образцов самая разнообразная. Наиболее крупные частицы наблюдаются в случае карбида TiC (что, в частности, подтверждается сравнительно малой полушириной рефлексов карбида на дифрактограмме 4 (рис. 1)), самые мелкие – в случае Fe_3C.

Исследования элементного состава в локальных областях синтезированных порошков с помощью рентгеновского микроанализатора показало, что соотношение атомов углерода и металла (или кремния) значительно (в пределах 30 ат. %) изменяется от одной точки съемки к другой. Этот факт свидетельствует о неравномерном распределении микрокристаллов карбидов и графита по объему образцов. При этом более темные области на микрофотографиях рис. 4 соответствуют более высокому содержанию атомов углерода.



а б в

Рис. 4. Микрофотографии порошков, синтезированных в дугах с анодами: а – (C-Fe), б – (C-Si), в – (C-Ti)

Основной примесью исследованных образцов являются атомы кислорода в количестве от 1 до 6 ат. %, которые оказались там, по-видимому, в результате адсорбции после хранения синтезированных материалов в условиях атмосферного воздуха.

На рис. 5 представлены результаты исследований некоторых синтезированных порошков методом спектроскопии комбинационного рассеяния света. На всех спектрах хорошо заметны две полосы в высокочастотной области: вблизи 1345 и 1585 см$^{-1}$. Эти полосы соответствуют D- и G-линиям графита [1], [2]. G-полоса соответствует тангенциальным колебаниям атомов углерода на графитовой плоскости, а D-полоса характеризует наличие дефектов в графитовых плоскостях. Полуширина этих полос и отношение интенсивностей I_G/I_D (I_G – максимум интенсивности G-линии, I_D – максимум интенсивности D-линии) характеризуют степень графитизации микрочастиц углерода. С этих позиций малая полуширина этих линий на кривой 2 рис. 5 и высокое отношение $I_G/I_D = 4$ указывают на то, что образующиеся в дуге с анодом (C-Si) микрокристаллы графита обладают наиболее совершенной кристаллической структурой. С другой стороны, широкие полосы G, D на кривой 3 и отношение $I_G/I_D = 1$ свидетельствуют о значительном искажении кристаллической структуры микрокристаллов графита, образующихся в дуге с анодом (C-Ti). Асимметричная D-полоса и $I_G/I_D = 1$ на кривой 1 также указывают на наличие искажений структуры микрокристаллитов графита, образующихся в дуге с анодом (C-Fe).

Колебаниям решеток α – Fe и карбида Fe_3C на кривой 1 рис. 5 соответствуют узкие полосы 220, 280 см$^{-1}$ и намного более слабые и широкие полосы 394 и 605 см$^{-1}$. Помимо этого, два небольших узких максимума, наблюдаемые вблизи полосы 220 см$^{-1}$ (при 126 и 139 см$^{-1}$), можно приписать радиальным дыхательным модам однослойных углеродных нанотрубок [7]. Учитывая их связь с диаметром d нанотрубок соотношение: $d = K/\omega$, где постоянная $K = 234$ нм·см$^{-1}$, ω – Рамановский сдвиг частоты, см$^{-1}$, получаем $d_1 = 1{,}9$ нм и $d_2 = 1{,}7$ нм. Таким образом, в продуктах распыления могут находиться ОУНТ указанного диаметра.

На кривой 2 колебаниям решетки карбида SiC следует приписать узкую полосу 492 см$^{-1}$ и слабо заметные полосы 290, 800 и 907 см$^{-1}$. Две последние полосы, как правило, связывают с поперечной TO и продольной LO оптическими модами колебаний SiC [1]. И наконец, к колебаниям решетки карбида TiC можно отнести слабые полосы 545 и 674 см$^{-1}$ на кривой 3. Итак, измеренные спектры КР подтверждают наличие графита в синтезированных веществах, дают информацию, по меньшей мере частично, о фононном спектре синтезированных веществ и указывают на наличие ОУНТ только в продуктах распылении анода (C-Fe).

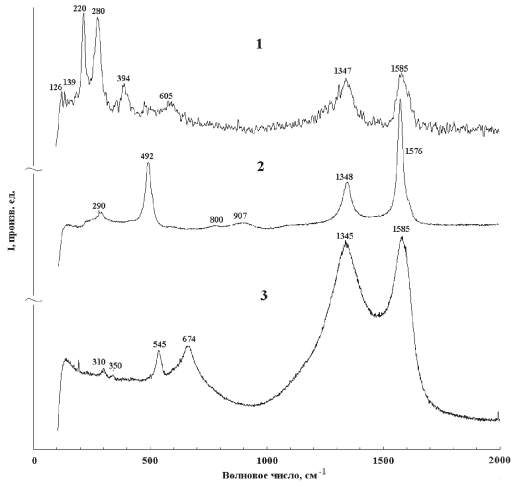


Рис. 5. Спектры КР синтезированных порошкообразных веществ в дуге с анодами: 1 – (C-Fe), 2 – (C-Si), 3 – (C-Ti)

Следует заметить, что все исследованные порошкообразные вещества с целью экстрагирования возможных фуллеренов выдерживались в о-ксилоле по обычной процедуре [6]. Однако никакой заметной окраски этого растворителя не было обнаружено. Таким образом, можно утверждать, что синтез фуллеренов (по крайней мере C_{60}, C_{70}) в наших условиях дугового разряда не происходит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью разработанной методики дугового разряда с графитовыми электродами можно синтезировать карбиды таких разных по свойствам элементов, как железо, кремний, титан и вольфрам. Причем данный элемент может быть использован как в форме изделия, так и в порошкообразном виде. Исследованный способ синтеза, по-видимому, легко масштабируется и может быть применен в производстве. Анализ показывает, что наибольший выход продукта в дуге может быть получен для элементов с температурой плавления, близкой к температуре плавления железа. С целью его эффективного применения для более тугоплавких веществ необходимо изменение режима работы дуги.

* 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. Аксянов И. Г., Компак М. Е., Кулькова И. В. Комбинационное рассеяние света в мозаичных пленках карбида кремния // ФТТ. 2010. Т. 52. Вып. 9. С. 1724–1728.

2. Данилевский А. М., Сморгонская Э. А., Гордеев С. К., Гречинская А. В. Комбинационное рассеяние света в нанопористом углероде, получаемом из карбидов кремния и титана // ФТТ. 2001. Т. 43. Вып. 1. С. 132–139.
3. Осипова И. В., Глущенко Г. А., Исакова В. Г. и др. Исследования наночастиц со структурой металлическое ядро – углеродная оболочка, образующихся при плазмохимическом синтезе в высокочастотном дуговом разряде // Journal of Siberian Federal University. Chemistry. 2010. Vol. 3. № 4. P. 294–300.
4. Подгорный В. И. Некоторые результаты исследования распыления шунгита и графита в дуговом разряде // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2008. № 4 (99). С. 37–44.
5. Подгорный В. И., Кущ С. Д., Яковлев А. Н., Белашев Б. З. О некоторых результатах исследования синтеза фуллеренов и нанотрубок в условиях аргонового дугового разряда // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. № 4 (109). С. 88–105.
6. Подгорный В. И., Кущ С. Д., Яковлев А. Н., Блинова Л. Н. Исследование конденсированных продуктов электродугового испарения графита в среде аргона и гелия // Журнал общей химии. 2011. Т. 81. Вып. 2. С. 201–206.
7. Раков Э. Г. Нанотрубки и фуллерены. М.: Логос, 2006. 376 с.
8. Стормс Э. Тугоплавкие карбиды. М.: Атомиздат, 1970. 340 с.
9. Li J., Lio C., Zhao B., Lin Y., Deng Z. Structures and properties of Fe-C fine particles prepared by AC arc discharge // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1999. Vol. 195. № 3. P. 470–475.
10. X-ray Diffraction Date Cards. ASTM. Philadelphia.

Podgorniyy V. I., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Belashev B. Z., Institute of Geology, Karelian Research Centre of RAS, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Osaulenko R. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Ternovoy A. N., Institute of Geology, Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

SYNTHESIS OF CARBIDES IN ARC DISCHARGE PLASMA AND THEIR IDENTIFICATION

Metal carbides have broad application in many fields. Their synthesis at high temperatures in a vacuum or inert gas is one of the best methods of their production. In this work, we report on the carbide formation in the argon arc discharge with graphite electrodes. The evaporated metal (or silicon) is placed inside the anode hole. The X-ray diffractions showed that under these conditions the following carbide substances are formed: Fe_3C with a concentration c of c = 23 %, SiC – c = 75 %, TiC – c = 40 %, WC – c = 3 %. The rest of the substances are predominantly structures of hexagonal graphite. The evaporating product of (C-Fe) anode is an exception to this rule. This substance contains pure iron, the volume of which amounts to 55 %. It is assumed that iron particles form a metal core covered by a carbon shell. In fact electron micrographs show some spherical objects about 1–2 mkm in diameter. The chemical composition of the objects investigated by the electron X-ray spectroscopy is about to 37 at.% Fe and 63 at.% C. Raman Spectra (RS) of some investigated powders show some strips of phonon oscillations of some carbides and D- and G-lines of the graphite. There are two narrow maximums at 126 cm^{-1} and 139 cm^{-1} in the RS spectrum of anode (C-Fe) evaporated products. These maximums are attributed to an atom radial vibration in single-walled carbon nanotubes. Thus, based on this method carbides of some metals such as iron, titan, silicon, and tungsten can be synthesized in argon arc discharge with graphite electrodes

Key words: arc discharge, graphite, carbides, X-ray diffraction, electron micrograph, Raman spectrum, electron X-ray spectroscopy

REFERENCES

1. Aksyanov I. G., Kompak M. E., Kul'kova I. V. Raman Spectra of Silicon Carbide Mosaic Films [Kombinatsionnoe rasseyanie sveta v mozaichnykh plenkakh karbida kremniya]. *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State]. 2010. Vol. 52. № 9. P. 1724–1728.
2. Danilevskiy A. M., Smorgonskaya E. A., Gordeev C. K., Grechinskaya A. V. Raman Spectra of a Nanoporous Carbon Fabricated with Silicon and Titanium Carbides [Kombinatsionnoe rasseyanie sveta v nanoporistom uglerode, poluchaemom iz karbidov kremniya i titana]. *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State]. 2001. Vol. 43. № 1. P. 132–139.
3. Osipova I. V., Glushchenko G. A., Isakova V. G. et al. Investigation of Nanoparticles with Metallic Core-Carbon Shell Structure Created at Plasma-Chemical Synthesis in High Frequency Arc Discharge [Issledovaniya nanochastits so structuroy metallicheskoe yadro – uglerodnaya obolochka, obrazuyushchikhsya pri plazmokhimicheskom sinteze v vysokochastotnom dugovom razryade]. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry.* 2010. Vol. 3. № 4. P. 294–300.
4. Podgornyy V. I. Some results of investigation of schungite and graphite dispersion by the arc discharge [Nekotorye rezul'taty issledovaniya raspyleniya shungita i grafita v dugovom razryade]. *Uchenye Zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2008. № 4 (99). P. 37–44.
5. Podgornyy V. I., Kushch C. D., Yakovlev A. N., Belashev B. Z. On some Results of Investigation of Carbon Fullerenes and Nanotubes Synthesis by the Argon Arc Discharge [O nekotorykh rezul'tatakh issledovaniya sinteza fullerenov i nanotrubok v usloviyakh argonovogo dugovogo razryada]. *Uchenye Zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2010. № 4 (109). P. 88–105.
6. Podgornyy V. I., Kushch C. D., Yakovlev A. N., Blinova L. N. Investigation of Condensed Products of Graphite to be evaporated by an Argon and Helium Arc Discharge [Issledovanie kondensirovannykh produktov elektrodugovogo ispareniya grafita v srede argona i geliya]. *Zhurnal obshchey khimii* [Journal of General Chemistry]. 2011. Vol. 81. № 2. P. 201–206.
7. Rakov E. G. *Nanotrubki i fullereny* [Nanotubes and Fullerenes]. Moscow, Logos Publ., 2006. 376 p.
8. Storms E. *Tugoplavkie karbidy* [Refractory Carbides]. Moskow, Atomizdat Publ., 1970. 340 p.
9. Li J., Lio C., Zhao B., Lin Y., Deng Z. Structures and properties of Fe-C fine particles prepared by AC arc discharge // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1999. Vol. 195. № 3. P. 470–475.
10. X-ray Diffraction Date Cards. ASTM. Philadelphia.

Поступила в редакцию 16.11.2012

Март, № 2 **Физико-математические науки** **2013**

УДК 004.021:004.94:519.683:519.684:544.223

ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ КРУПЯНСКИЙ
аспирант кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
krupjanski@rambler.ru

ДЕНИС ВЛАДИМИРОВИЧ ЛОБОВ
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
ldenis@petrsu.karelia.ru

РОМАН НИКОЛАЕВИЧ ОСАУЛЕНКО
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
oroman@psu.karelia.ru

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ ПОСРЕДСТВОМ ТЕХНОЛОГИИ NVIDIA CUDA*

В последнее время значительно возрос интерес к моделированию систем с большим количеством частиц. Также растет и время проведения расчета, вследствие чего время моделирования на центральном процессоре становится недопустимо большим. Нами проведен поиск возможностей снижения времени проведения расчета методом молекулярной динамики (МД). Представлены результаты МД-моделирования с использованием графического процессора (ГП) NVIDIA GF 114. Расчет межмолекулярных взаимодействий реализован с помощью технологии NVIDIA CUDA, позволяющей значительно ускорить вычисления. Для определения прироста производительности был произведен ряд расчетов различных систем, содержащих от 1000 до 18 000 атомов. Обнаружено существенное влияние способа параллельной организации расчета на время его проведения. Максимальный прирост производительности дает оптимизация доступа к латентной глобальной памяти ГП. Показано, что применение недорогих ГП для проведения МД-эксперимента позволяет ускорить вычисления с двойной точностью в 60 раз. Разработанная схема параллельного расчета универсальна и может быть использована для решения схожих задач.

Ключевые слова: графические процессоры, технология NVIDIA CUDA, параллельные вычисления, молекулярная динамика

ВВЕДЕНИЕ

Современный ГП является мощным вычислительным устройством для расчетов общего назначения. Технология NVIDIA CUDA [7] предоставляет простую и удобную модель реализации таких расчетов, в ней ГП рассматривается как специализированное устройство, которое является сопроцессором к центральному процессору (ЦП), обладает собственной памятью и возможностью параллельного выполнения огромного количества потоков (нитей). Доступность этой технологии способствует широкому применению ГП в различных расчетах, в том числе и методом МД. В некоторых работах [1] мера производительности определялась в Gflops. В других работах [2], [3] использовалась более объективная оценка – отношение времени расчета на одном процессоре ко времени расчета на нескольких вычислительных устройствах. Цель настоящей работы – поиск возможностей снижения времени проведения МД-расчета.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Распараллеливание алгоритма является фактически единственным способом увеличить скорость расчета, не меняя самой модели. Поэтому основная задача данной работы – разработка реализации МД для ГП на основе существующей программы. Для этого было решено использовать наиболее доступную и удобную технологию – NVIDIA CUDA. Нами рассматривалась динамика системы частиц, в которой каждая частица взаимодействует со всеми остальными согласно определенным законам, а результирующие силы – это суперпозиция N(N – 1) независимых парных взаимодействий. Наибольший вклад в прирост производительности вносит распараллеливание блока исходной программы, отвечающего за расчет парных взаимодействий, который представляет собой треугольный цикл:

```
for(i=0;i<n-1;i++){
        for(j=i+1;j<n;j++){
                \\ учет периодических граничных условий,
                   определение параметров
                \\ потенциала взаимодействия, расчет
                   потенциала и сил
                \\ взаимодействия i-й и j-й частиц
        }
}
```

где n – общее количество частиц.

© Крупянский Д. С., Лобов Д. В., Осауленко Р. Н., 2013

Время выполнения этого блока пропорционально квадрату n и при больших значениях n становится недопустимо большим. Таким образом, параллельное исполнение этой части алгоритма может дать наиболее весомый вклад в прирост производительности. Тестирование проводилось на следующей системе:

ЦП:	AMD Phenom II x4 B65 @3.6ГГц
Видеокарта:	Nvidia GeForce GTX 560 Ti (GF114)
Компилятор:	++ 4.4.3, CUDA Toolkit 4.2 g

Наша реализация метода МД позволяет проводить моделирование систем произвольного количества частиц разных типов с двойной точностью вычислений. Параллельный расчет с использованием CUDA предполагает определенную организацию нитей, детально описанную в [7]. Нити группируются в линейные, плоские или трехмерные блоки, которые, в свою очередь, группируются в линейную или плоскую сетку. Для данной задачи оптимальной оказалась линейная структура блоков и сетки, в которой каждая нить соответствует расчету парных взаимодействий одной частицы со всеми остальными. Каждый блок включает в себя BS нитей, взаимодействующих между собой через механизм разделяемой памяти. Оптимальный размер блока нитей BS (64) определен с помощью инструмента «CUDA GPU Occupancy Calculator» из NVIDIA CUDA SDK. Конфигурация и запуск ядра производятся следующим образом:

```
threads = dim3(64, 1);
blocks = dim3(ceil(n/64),1);          // n – количество частиц
compute_forces<<<blocks, threads>>>(...)
                                      // расчет взаимодействий
```

Если n не кратно размеру блока, то количество нитей в сетке превосходит необходимое значение. Неиспользуемые нити отбрасываются.

АЛГОРИТМ ДЛЯ GPU

1. Вычисление индекса нити: $i = blockIdx.x * blockDim.x + threadIdx.x$, где $blockIdx.x$ – номер блока; $blockDim.x$ – размер блока; $threadIdx.x$ – индекс нити в блоке. Этот индекс необходим для доступа к соответствующим элементам массивов данных.

2. Описание локальных переменных и массивов данных в разделяемой памяти. В ядре (функции для GPU) для расчета парных взаимодействий используются 5 массивов в разделяемой памяти. Размер массивов соответствует количеству нитей в блоке. Один массив используется для хранения потенциала взаимодействия, другой – для типов частиц, а три остальных – для их координат. Использование разделяемой памяти критически влияет на производительность программы.

```
__shared__ double upot[BS];      // Потенциал
__shared__ int type[BS];         // Тип частицы
__shared__ double pos_x[BS];     // Координаты: x
__shared__ double pos_y[BS];     // y
__shared__ double pos_z[BS];     // z
```

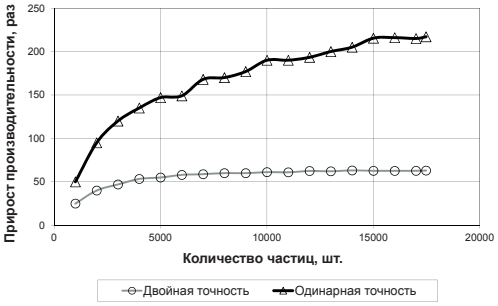
где BS – размер блока нитей.

3. Расчет взаимодействия i-й частицы со всеми остальными частицами системы. Цикл по всем частицам разбивается на два вложенных цикла:

```
for(int k=0;k<n;k=k+BS){
        pos_x[threadIdx.x]=g_posx[k+threadIdx.x];
        pos_y[threadIdx.x]=g_posy[k+threadIdx.x];
        pos_z[threadIdx.x]=g_posz[k+threadIdx.x];
        type[threadIdx.x]=g_type[k+threadIdx.x];
        __syncthreads();
        for(int j=k;j<k+BS;j++)
                if(i!=j){
                \\расчет взаимодействия i-й и j-й частиц
                \\(вклад j-й частицы в потенциальную
                  энергию
                \\и ускорение i-й частицы)
                }
}
```

В цикле по *k* происходит параллельное чтение данных всеми нитями блока из медленной глобальной памяти в быструю разделяемую. В цикле по *j* – учет периодических граничных условий, расчет взаимодействия *i*-й и *j*-й частиц, причем координаты и тип *j*-й частицы берутся из переменных *pos_x[j-k]*, *pos_y[j-k]*, *pos_z[j-k]* и *type[j-k]*, объявленных в разделяемой памяти. Таким образом можно уменьшить необходимое количество чтений из медленной памяти в *BS* раз, а объем необходимой разделяемой памяти регулировать путем изменения размера блока нитей.

4. Запись результатов в глобальную память.



Прирост производительности, одинарная и двойная точность

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для определения прироста производительности был произведен ряд тестовых запусков программы с различными конфигурациями. Усредненные результаты приведены на рисунке. Прирост производительности определяется как отношение времени моделирования 100 временных шагов на ЦП ко времени выполнения той же задачи на ГП. Анализируя график, можно сделать следующие выводы:

- Показана высокая эффективность применения видеоадаптеров в качестве устройства для расчетов общего назначения.
- Найдена достаточно эффективная организация параллельного расчета для задач, содержащих вложенные циклы, несмотря на высокую связанность обрабатываемых данных.

- Данная организация с минимальными изменениями может быть эффективно использована для задач, содержащих вложенные циклы.
- На всех современных видеоадаптерах есть возможность расчетов с двойной точностью, но с потерей производительности.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боярченков А. С., Поташников С. И. Использование графических процессоров и технологии CUDA для задач молекулярной динамики // Вычислительные методы и программирование. 2009. Т. 10. С. 9–23.
2. Янилкин А. В., Жиляев П. А., Куксин А. Ю., Норман Г. Э., Писарев В. В., Стегайлов В. В. Применение суперкомпьютеров для молекулярно-динамического моделирования процессов в конденсированных средах // Вычислительные методы и программирование. 2010. Т. 11. С. 111–116.
3. Anderson J. A., Lorenz C. D., Travesset A. General purpose molecular dynamics simulations fully implemented on graphics processing units // Journal of Computational Physics 227. 2008. P. 5342–5359.
4. Belleman R. G., Bedorf J., Zwart S. P. NewAstron.12: High performance direct gravitational N-body simulations on graphics processing units-II: An implementation in CUDA. 2007. P. 641–650.
5. Davis J. E., Ozsoy A., Patel S., Taufer M. Towards Large-Scale Molecular Dynamics Simulations on Graphics Processors // Proceedings of the 1st international conference on bioinformatics and computational biology. Heidelberg, 2009. P. 176–186.
6. Liu W., Schmidt B., Voss G., Muller-Wittig W. Molecular Dynamics Simulations on Commodity GPUs with CUDA // Berlin, Lecture Notes in Computer Science 4873, 2007. P. 185–196.
7. NVIDIA Corporation. NVIDIA CUDA C Programming Guide. Santa Clara, CA, 2012.
8. Walters J. P., Balu V., Chaudhary V., Kofke D., Shultz A. Accelerating Molecular Dynamics Simulations with GPUs // ISCA PDCS. 2008. P. 44–49.

Krupyanskiy D. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Lobov D. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Osaulenko R. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

IMPLEMENTATION OF MOLECULAR DYNAMICS METHOD USING NVIDIA CUDA TECHNOLOGY

Simulation of systems represented by a large number of atoms poses an exceptional interest. However, the simulation time grows proportionally to the square of the atoms' number. Accordingly, the time needed for the calculation of a large system on a Central Processing Unit(CPU) becomes unacceptably high. We studied the possibilities that can provide acceleration of molecular dynamics simulations. Since the use of the parallel program model is the best way to increase computing performance we used the most convenient and accessible technology – NVIDIA CUDA. This technology allows speeding up calculation with the use of NVIDIA Graphics Processing Unit (GPU). We present the results of molecular dynamics simulations using NVIDIA GF114 GPU. The study tested GPU and CPU implementations of the molecular dynamics method. We ran series simulations with a different number of atoms (up to 18000 atoms) to determine the performance gains. The study showed that there is a significant fluency of parallel organization of calculations on its execution time. Moreover, performance reaches its maximum in case of the well-optimized data access to high latency global memory of a GPU. Due to the use of a relatively cheap graphics' card for a molecular dynamics simulation the computing performance can be improved up to 60 times for double precision and more than 200 times for single precision. The designed scheme of parallel computation is quite efficient and can be easily applied for similar problems.

Key words: GPU, NVIDIA CUDA, parallel computing, molecular dynamics

REFERENCES

1. Boyarchenkov A. S., Potashnikov S. I. The use of GPUs and CUDA technology for molecular dynamics applications [Ispol'zovanie graficheskikh protsessorov i tekhnologii CUDA dlya zadach molekulyarnoy dinamiki]. *Vychislitel'nye metody i programmirovanie*. 2009. Vol. 10. P. 9–23.
2. Yanilkin A. V., Zhilyaev P. A., Kuksin A. Yu., Norman G. E., Pisarev V. V., Stegailov V. V. The use of supercomputers for molecular dynamics simulation of condensed matter processes [Primenenie superkomp'yuterov dlya molekulayrno-dinamicheskogo modelirovaniya protsessov v kondensirovannykh sredakh]. *Vychislitelnye metody i programmirovanie*. 2010. Vol. 11. P. 111–116.
3. Anderson J. A., Lorenz C. D., Travesset A. General purpose molecular dynamics simulations fully implemented on graphics processing units // Journal of Computational Physics 227. 2008. P. 5342–5359.
4. Belleman R. G., Bedorf J., Zwart S. P. NewAstron.12: High performance direct gravitational N-body simulations on graphics processing units-II: An implementation in CUDA. 2007. P. 641–650.
5. Davis J. E., Ozsoy A., Patel S., Taufer M. Towards Large-Scale Molecular Dynamics Simulations on Graphics Processors // Proceedings of the 1st international conference on bioinformatics and computational biology. Heidelberg, 2009. P. 176–186.
6. Liu W., Schmidt B., Voss G., Muller-Wittig W. Molecular Dynamics Simulations on Commodity GPUs with CUDA // Berlin, Lecture Notes in Computer Science 4873, 2007. P. 185–196.
7. NVIDIA Corporation. NVIDIA CUDA C Programming Guide. Santa Clara, CA, 2012.
8. Walters J. P., Balu V., Chaudhary V., Kofke D., Shultz A. Accelerating Molecular Dynamics Simulations with GPUs // ISCA PDCS. 2008. P. 44–49.

Поступила в редакцию 29.12.2012

Март, № 2 **Физико-математические науки** **2013**

УДК 533.9

ВАЛЕРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ ГОСТЕВ
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники и электроэнергетики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
vgostev@psu.karelia.ru

ЭРИК ГЕННАДЬЕВИЧ ЛЕХТО
аспирант кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
eriklekhto@yahoo.com

ГАЗОРАЗРЯДНЫЙ ГЕНЕРАТОР АКТИВНОГО КИСЛОРОДА*

Плазма представляет собой уникальную комплексную среду, содержащую заряженные частицы, активные радикалы, фотоны и т. д. Для многих применений биологии и медицины интерес представляют источники холодной плазмы. Холодная плазма позволяет осуществлять «мягкое» неразрушающее воздействие на биологические ткани и жидкости при одновременно сильных бактерицидном и стимулирующем эффектах. Целью данной работы была разработка газоразрядного генератора активного кислорода. В качестве рабочего вещества для получения активного кислорода используется воздух. Анализ показал, что наиболее приспособленным для медицинских целей является газоразрядный способ получения активного кислорода. В ходе работы был создан газоразрядный генератор активного кислорода. Конструктивно прибор выполнен в виде миниатюрного устройства. Были проведены эксперименты по исследованию распределения среднемассовой температуры вдоль плазменного потока, вольт-амперной характеристики, спектра оптического излучения потока. Можно заключить, что данный генератор позволяет получать плазменный поток, с благоприятными для биологических объектов параметрами, который служит источником активных форм кислорода.

Ключевые слова: генератор плазмы, холодная плазма, активный кислород

ВВЕДЕНИЕ

Плазма является уникальной комплексной средой, содержащей заряженные частицы, активные радикалы, фотоны и т. д. Для применения в биологии и медицине интерес представляют источники холодной плазмы. Холодная плазма позволяет осуществлять «мягкое», неразрушающее воздействие на биологические ткани и жидкости при одновременно сильных бактерицидном и стимулирующем эффектах. В некоторых областях, связанных с обработкой легко воспламеняемых и легко разрушаемых веществ, также необходимо иметь плазменные потоки низких температур.

Бактерицидная обработка и консервирование могут быть осуществлены при использовании в качестве бактерицидного агента холодной плазмы. Метод отличается простотой применения, дешевизной оборудования, малой энергоемкостью.

Известно, что плазма обладает сильным бактерицидным эффектом [1], [3]. Одним из физико-химических свойств холодной плазмы является присутствие в ней в значительных концентрациях активного кислорода. Целью данной работы была разработка плазменного генератора активного кислорода. Внешний вид газоразрядного генератора показан на рис. 1.

Конструктивно генератор воздушно-плазменного потока выполнен в виде миниатюрного устройства.

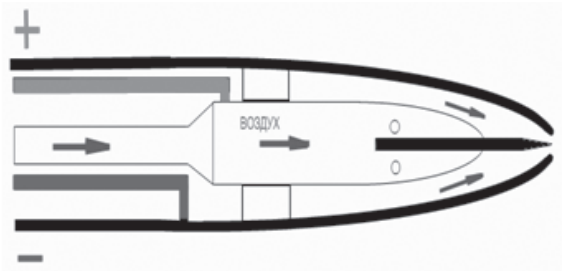


Рис. 1. Устройство газоразрядного генератора активного кислорода

Принцип действия генератора активного кислорода (рис. 1) заключается в следующем. Плазмообразующий газ, в качестве которого выступает атмосферный воздух, от внешнего источника компрессора под давлением до 1,5 атм. через входной штуцер вводится в газоразрядный генератор. Пройдя через канал внутри устройства, он поступает в разрядную камеру генератора.

Принципиальная схема генератора представлена на рис. 2. Внешний высоковольтный источник (7) питания постоянного тока создает электрический потенциал в разрядном промежутке игла – сопло генератора, необходимый для возникновения его пробоя. Прошедший через возникший разрядный канал воздух ионизируется, и таким образом на выходе генератора образуется плазменный поток.

© Гостев В. А., Лехто Э. Г., 2013

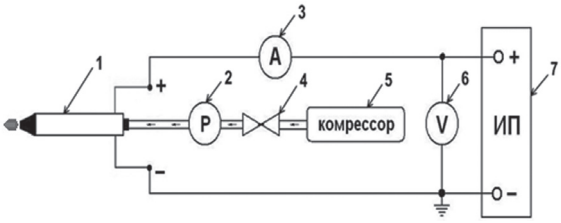


Рис. 2. Принципиальная схема генератора активного кислорода

Генератор активного кислорода включает головку (1); манометр (2) для измерения избыточного давления воздуха в разрядной камере генератора; вентиль (3), предназначенный для регулирования давления воздуха в разрядной камере; компрессор (4) для создания избыточного давления плазмообразующего воздуха; вольтметр (5) для измерения напряжения разряда; высоковольтный источник электропитания (6).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Вольт-амперная характеристика приведена на рис. 3. Пробой разрядного промежутка происходит при напряжении 2600 В. Рабочее напряжение горения разряда 1200–1400 В при силе тока 10–15 мА.

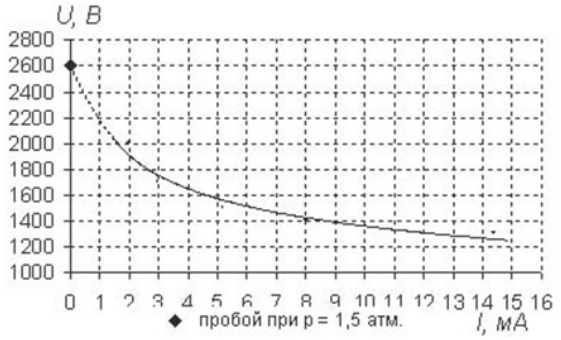


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика генератора активного кислорода

Были проведены эксперименты по исследованию распределения среднемассовой температуры вдоль плазменного потока. Измерение производилось зондовым методом, в качестве зонда использовался микродатчик температуры, которым служило полупроводниковое микротермосопротивление МТ-54. Размер микротермосопротивления составляет 0,9 х 1,0 мм.

График распределения среднемассовой температуры по длине плазменного потока приведен на рис. 4. Начало отсчета расстояния велось от выхода сопла газоразрядного генератора. Эксперимент проводился при температуре окружающей среды Ткомн. = 22 °С, напряжении горения разряда U = 1400 В и давлении в разрядной камере p = 1,5 атм.

Как показали результаты исследования, среднемассовая температура плазменного факела равна 43 °С в центре и 34 °С на границе факела.

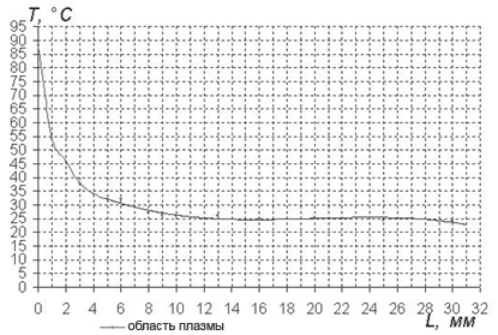


Рис. 4. Распределение температуры воздушно-плазменного потока

Измерение плотности потока энергии излучения микроплазменной струи в УФ-диапазоне производилось с помощью УФ-радиометра «ТКА-ПКМ»/12. Конструктивно данный прибор состоит из двух функциональных блоков: фотометрической головки и блока обработки сигнала, связанных между собой гибким многожильным кабелем. В фотометрической головке расположены три фотоприемных устройства на различные спектральные диапазоны УФ (А, В, С). Измерение плотности потока энергии излучения проводилось в продольном направлении на расстоянии 3 см от выходного сопла газоразрядного генератора при напряжении разряда U = 1400 В и давлении воздуха в разрядной камере p = 1,5 атм. Результаты проведенных измерений представлены в таблице.

Плотность потока энергии излучения

Спектральный диапазон, нм	Плотность потока энергии излучения, Вт/м^2
315–400 (А-область)	1,6 ± 0,2
280–315 (В-область)	3,1 ± 0,2
200–280 (С-область)	4,6 ± 0,6

Исследование спектра оптического излучения потока производилось с помощью многоканального высокоскоростного триггерного спектрометра AvaSpec-2048FT.

Регистрация производилась как в видимой области спектра, так и в УФ-диапазоне в продольном направлении по отношению к плазменному факелу с использованием в качестве плазмообразующего газа воздуха. Зарегистрированный в эксперименте спектр излучения приведен на рис. 5.

Рис. 5. Спектр излучения плазмы генератора активного кислорода

В случае использования воздуха в качестве плазмообразующего газа в зарегистрированных спектрах были обнаружены интенсивные линии O, O+, N, N+, полосы молекул O2, O2+, O3, N2, NO, а также атомарные линии элементов материала электродов [3], [4], [7], [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно заключить, что газоразрядный генератор позволяет получать плазменный поток с благоприятными для биологических объектов параметрами, который служит источником активных форм кислорода.

* 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.B37.21.0755, № 14.B37.21.0747, № 14. B37.21.1066, а также в соответствии с государственным заданием Минобрнауки России и заказом Департамента научных и научно-педагогических кадров университету на оказание услуг № 2.3282.2011 и №. 2.2774.2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зейдель А. Н., Прокофьев В. К., Райский С. М. Таблицы спектральных линий. М.: Наука, 1977. 800 с.
2. Ильясова Н. В. Атлас пламенных, дуговых и искровых спектров элементов. М.: Госгеолтехиздат, 1958. 120 с.
3. Козлов Н. П., Пекшев А. В., Камруков А. С. Плазменные аппараты для медицины // NO-терапия: теоретические аспекты, клинический опыт и проблемы применения экзогенного оксида азота в медицине. М., 2001. С. 57–60.
4. Мисюн Ф. А., Гостев В. А. Первый опыт и перспективы применения низкотемпературной плазмы в офтальмологии / Материалы II Евроазиатской конференции по офтальмохирургии. Ч. 2. Екатеринбург, 2001. С. 333–334.
5. Пирс Р., Гейдон А. Отождествление молекулярных спектров / Под ред. С. Л. Мандельштама, М. Н. Аленцева. М.: ИЛ, 1949. 240 с.
6. Стриганов А. Н., Свентицкий Н. С. Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов. М.: Атомиздат, 1966. 900 с.
7. Baughman J. M., Mootha V. K. Buffering mitochondrial DNA variation // Nature genetics 2006. 38. 11, 1232–1233.
8. Moreno-Loshuertos R. et al. 2006 Differences in reactive oxygen species production explain the phenotypes associated with common mouse mitochondrial DNA variants // Nature genetics. 38, 11, 1261–1268.

Gostev V. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Lekhto E. G., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

GAS-DISCHARGE ACTIVE OXYGEN GENERATOR

Plasma is a unique complex medium containing charged particles, active radicals, photons etc. The sources of cold plasma constitute a particular pragmatic interest for such sciences as biology and medicine. Cold plasma allows realization of “soft” non-destructive applicatons on biological tissues and liquids. They also have strong bactericidal and stimulating effects. The aim of this study was to develop a gas-discharge generator of active oxygen. The working medium for the active oxygen generator is air. The analysis showed that the most adapted method for comprehensive medical use is a gas-discharge method of active oxygen provision. A gas-discharge active oxygen generator was created. Structurally, the generator is designed as a miniature device. Experiments, described in this paper, were conducted to study the distribution of bulk temperature along the plasma flow, the current-voltage characteristics, and the optical spectrum of the flow. It was concluded that the generator produces a flow of plasma with favourable parameters for biological objects. The plasma flow of the generator serves as a source of active oxygen forms.

Key words: plasma generator, cold plasma, active oxygen

REFERENCES

1. Zeydel’A. N., Prokof’ev V. K., Rayskiy S. M. *Tablitsy spektral'nykh liniy* [Tables of Spectral Lines]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 800 p.
2. Il’yasova N. V. *Atlas plamennykh, dugovykh i iskrovykh spektrov elementov* [Atlas of the flame, arc and spark spectra of the elements]. M., Gosgeoltehizdat Publ., 1958. 120 p.
3. Kozlov N. P., Pekshev A. V., Kamrukov A. S. Plasma devices for medicine [Plazmennye apparaty dlya meditsiny]. *NO-terapiya: teoreticheskie aspekty, klinicheskiy opyt i problemy primeneniya ekzogennogo oksida azota v meditsine* [NO-therapy: theoretical aspects, clinical experience, and problems of exogenous nitric oxide application in medicine]. Moscow, 2001. P. 57–60.
4. Misyun F. A., Gostev V. A. First experience and perspectives of low-temperature plasma in ophthalmology [Pervyy opyt i perspekpivy primeneniya nizkotemperaturnoy plazmy v oftal’mologii]. *Materialy II Evroaziatskoy konferentsii po oftal’mokhirurgii. Ch. 2* [Materials of the II Eurasian Conference on ophthalmology. P. 2]. Ekaterinburg, 2001. P. 333–334.
5. Pirs R., Gejdon A. *Otozhdestvlenie molekulyarnykh spektrov* [The identification of molecular spectra]. Moscow, IL Publ., 1949. 240 p.
6. Striganov A. N., Sventitskiy N. S. *Tablitsy spektral’nykh liniy neytral’nykh i ionizovannykh atomov* [Tables of spectral lines of neutral and ionized atoms]. Moscow, Atomizdat Publ., 1966. 900 p.
7. Baughman J. M., Mootha V. K. 2006. Buffering mitochondrial DNA variation // Nature genetics 38. 11, 1232–1233.
8. Moreno-Loshuertos R. et al. 2006 Differences in reactive oxygen species production explain the phenotypes associated with common mouse mitochondrial DNA variants // Nature genetics. 38, 11, 1261–1268.

Поступила в редакцию 26.11.2012

Март, № 2 **Физико-математические науки** **2013**

УДК 539.264

СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ДАНИЛОВ
инженер кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
sdanilov@psu.karelia.ru

АНАТОЛИЙ ДМИТРИЕВИЧ ФОФАНОВ
доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
afofanov@psu.karelia.ru

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК*

Изучение углеродных материалов в некристаллическом состоянии и их идентификация в экспериментальных образцах дифракционными методами исследования является весьма сложной задачей, так как данные материалы обладают рентгеноаморфной картиной рассеяния и существует большое число полиморфных модификаций углерода. Основой решения данной проблемы является построение теоретических моделей различных конфигураций атомов, расчет, анализ, сравнение модельных рентгенограмм и сопоставление их с экспериментальными результатами. В работе произведена попытка применения данного подхода при исследовании углеродных нанотрубок (УНТ). Авторами построен ряд моделей УНТ различных конфигураций (по типу, длине, внутреннему радиусу, хиральности, числу слоев). Для всех смоделированных объектов рассчитаны теоретические дифракционные картины рассеяния (с использованием методики Дебая), произведен их анализ, сравнение; выявлены идентификационные признаки, позволяющие оценить ряд структурных параметров (тип, хиральность, число слоев и т. д.) УНТ в экспериментальных образцах. Дополнительно приведены результаты рентгенографических исследований образца углеродного материала, содержащего нанотрубки. Для него построена модель атомной структуры, картина рассеяния которой близка к экспериментально полученной рентгенограмме. В работе дополнительно выявлено, что при теоретических расчетах целесообразно формирование моделей смесей УНТ, различных по геометрическим характеристикам, и расчет соответствующих «усредненных» картин рассеяния. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования рентгеноструктурного анализа совместно с компьютерным моделированием при исследовании УНТ.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, компьютерное моделирование, построение атомных конфигураций, рентгенографический эксперимент, дифракционные картины

ВВЕДЕНИЕ

Задача исследования углеродных материалов в некристаллическом состоянии рентгенографическими методами далеко не тривиальна [9]. Причина в том, что из-за большого разнообразия типов связи атомов углерода и его полиморфных модификаций [10] эти материалы в некристаллическом состоянии трудно идентифицировать и тем более определить особенности структурного состояния отдельных составляющих.

Тем не менее существует принципиальная возможность идентификации различных полиморфных модификаций углерода дифракционными методами исследования [8]. Один из подходов к решению данной задачи лежит в области компьютерного моделирования атомной структуры. Он заключается в построении ряда моделей различных углеродных материалов и расчете теоретических дифракционных картин рассеяния для них [7], [9]. Выявленные на полученных картинах особенности максимумов интенсивности (форма, размытие, асимметрия, в ряде случаев смещение) дают информацию, позволяющую проводить определение различных структурных состояний углерода в экспериментальном образце [2].

Основная цель данной работы – попытка применения данного метода к идентификации углеродных нанотрубок, а также к оценке их характеристик [2], [16] (типа, числа слоев, степени хиральности, радиуса, длины) по имеющимся рентгенограммам образцов углеродсодержащих материалов.

В данной статье:

1. Разработаны алгоритмы [3], [5] и построены модели однослойных (ОУНТ) и многослойных (МУНТ) углеродных нанотрубок различных конфигураций;
2. Проанализированы теоретические дифракционные картины рассеяния, рассчитанные для сформированных моделей;
3. Произведено сравнение рассчитанных картин рассеяния с экспериментом, выполненным для образца углеродного материала, содержащего УНТ.

© Данилов С. В., Фофанов А. Д., 2013

Основной параметр, используемый при построении моделей УНТ, – индексы хиральности [1], [2], [3], [5], [16]. Они определяют все основные характеристики нанотрубок, а также дискретность их изменения. Заметим, что невозможно существование УНТ абсолютно произвольных конфигураций [2].

В работе были построены модельные ОУНТ, а также МУНТ двух основных наблюдаемых в эксперименте типов: «русская матрешка» и «свиток» [5], [12], [15]. Известно, что в МУНТ величина межслоевого расстояния должна находиться в допустимых для углеродных материалов (с sp^2-гибридизацией валентных орбиталей [10]) пределах (3,354–3,600 Å). Кроме того, расстояние между двумя соседними слоями остается постоянным в пределах всей трубки лишь для пяти степеней хиральности: 0 («зиг-заг»), 0,2, 0,3, 0,4 и 0,5 («кресло») [1], [5]. Соответственно, особенностями МУНТ «свиток» являются незамкнутость структуры [12], а также допустимость для него лишь пяти степеней хиральности (характеризующихся постоянством межслоевого расстояния) [1], [5]. Следует отметить, что при одинаковых внешних и внутренних радиусах число слоев у «русской матрешки» на один больше, чем у «свитка» [5].

В основе вычисления теоретических дифракционных картин рассеяния лежит известная методика Дебая по расчету порошковых дифрактограмм [6], [12]. В результате рассчитываются интенсивность рассеяния I(S), S-взвешенная интерференционная функция рассеяния H(S), где $S = 4\pi\sin\theta/\lambda$ – длина дифракционного вектора, а также функция парного взаимодействия D(R) [2], [7], [8]. При анализе полученных рентгенограмм в качестве критерия достоверности была использована функция H(S), как более информативная по сравнению с распределением интенсивности [2], [5].

ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ И ТИПА УНТ НА КАРТИНУ РАССЕЯНИЯ

В работе [2] было установлено, что характер изменения расстояния между соседними слоями МУНТ (постоянство, переменчивость) не оказывает какого-либо существенного качественного влияния на картину рассеяния, которое можно было бы идентифицировать по характеру пиков на H(S). Поэтому для упрощения расчетов в дальнейшем производилось моделирование МУНТ с постоянным межслоевым расстоянием.

С целью анализа изменений картин рассеяния для УНТ различной длины были сформированы модели:

a) ОУНТ с индексами хиральности (20, 10) (радиус ~6,78 Å), длиной от 5 до 500 Å;
b) МУНТ («русская матрешка» и «свиток»), образованные из 4 слоев, с индексами хиральности внутреннего слоя (20, 10) (внутренний радиус ~6,78 Å), длиной от 5 до 500 Å.

Анализ рассчитанных дифракционных картин показал, что при изменении длины УНТ характер и положения пиков на H(S) сохраняются, но интерференционный максимум при длине дифракционного вектора S ~5,2 $Å^{-1}$ (соответствует отражению графита 110) становится высоким и узким. Это, очевидно, связано с периодичностью в расположении атомов в направлениях, параллельных оси формируемой модели.

Для выявления характерных особенностей на рентгенограммах УНТ различных типов были сформированы следующие модели:

a) ОУНТ типа «кресло», радиус ~13,56 Å (индексы хиральности (40, 20)), длина ~75 Å;
b) МУНТ «русская матрешка» типа «кресло» с числом слоев, равным 4, внутренний радиус ~13,56 Å (индексы хиральности (40, 20)), длина ~75 Å;
c) МУНТ «свиток» типа «кресло», внутренний радиус ~13,56 Å (индексы хиральности (40, 20)), внешний радиус ≈23,73 Å (3 витка), длина ~75 Å.

Результаты расчета H(S) для данных моделей (рис. 1) показывают, что по дифракционным картинам имеется возможность идентифицировать УНТ различного типа. Так, на рентгенограмме для модели ОУНТ (рис. 1a) отсутствуют максимумы, соответствующие отражениям графита типа (00l) [13], наблюдаемые на дифракционных картинах для моделей МУНТ (рис. 1b и 1c).

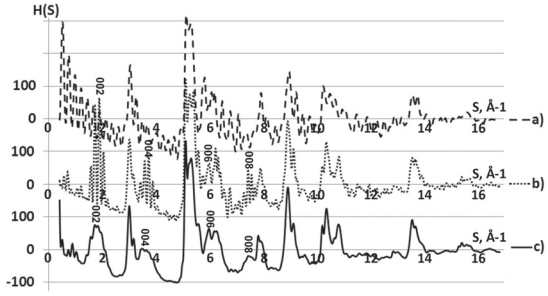


Рис. 1. Сравнение s-взвешенных интерференционных функций H(S) для моделей ОУНТ (a), МУНТ «русская матрешка» (b) и МУНТ «свиток» (c)

Обратим внимание также на то, что на H(S) для ОУНТ (рис. 1a) наблюдаются осцилляции с малым периодом. Причиной возникновения данных осцилляций является замкнутость структуры.

Кривая H(S) для модели «русской матрешки» (рис. 1b) отличается от H(S) для модели «свитка» (рис. 1c) лишь осциллирующим характером H(S) [4]. Здесь возникновение осцилляций связано не только с замкнутостью структуры, но и с дискретностью изменения радиусов кривизны цилиндрических поверхностей различных слоев, что приводит к небольшому различию в расстояниях между атомами, принадлежащими разным поверхностям МУНТ «русская матрешка». Именно поэтому в МУНТ осцилляции более «упорядочены» по положению на H(S).

Видно (рис. 1), что наблюдаемые на рентгенограммах осцилляции возникают лишь в замкнутых УНТ (ОУНТ и МУНТ «русская матрешка»), в то время как в незамкнутом «свитке» нет резких изменений радиуса, что приводит к отсутствию соответствующих «шумов». При этом оказалось, что чем больше радиус трубки, тем меньший период имеют осцилляции, как в ОУНТ, так и в МУНТ.

Устранить наблюдаемые на H(S) осцилляции можно путем усреднения картин рассеяния [4], рассчитанных для моделей УНТ различного внутреннего радиуса. Так, были построены УНТ типа «кресло» длиной 75–100 Å в диапазоне изменения радиуса внутреннего слоя 5–15 Å: a) ОУНТ; b) МУНТ «русская матрешка», 4 слоя; c) МУНТ «свиток», 3 витка. Соответствующие «усредненные» H(S) приведены на рис. 2.

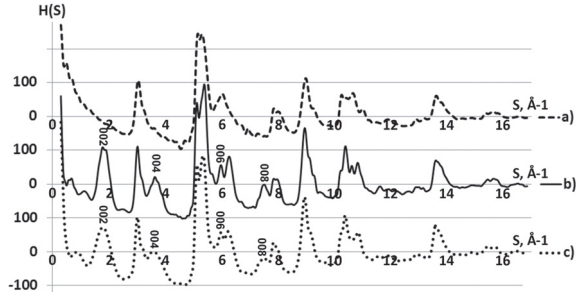


Рис. 2. Сравнение «усредненных» s-взвешенных интерференционных функций H(S) для моделей ОУНТ (a), МУНТ «русская матрешка» (b), МУНТ «свиток» (c)

В результате выполненного «усреднения» (рис. 2) основные осцилляции и «шумы» уходят и можно четко определить характер и положения интерференционных максимумов. Заметим, что введенное «усреднение» влияет лишь на осцилляции и «шумы», не затрагивая характер рентгенограмм и пиков интенсивности (рис. 1).

Это позволяет однозначно отличить ОУНТ и МУНТ. Разница на «усредненных» кривых H(S), рассчитанных для трубок типа «русская матрешка» и «свиток», заключается лишь в отличиях ширины пиков, соответствующих отражениям типа (00l). Моделирование трубок с большим числом слоев (6 и более) и расчет картин рассеяния показал, что данная разница становится несущественна и отличить «усредненные» H(S) для моделей смеси МУНТ различных типов по полученной рентгенограмме представляется затруднительным.

Как правило, в реальном эксперименте в облучаемом объеме образца присутствует очень много различных по характеристикам нанотрубок, что приводит к сглаживанию картин рассеяния и отсутствию наблюдаемых на модельных рентгенограммах осцилляций. Поэтому при усреднении H(S) для различных по геометрическим характеристикам модельных нанотрубок получаются картины рассеяния, соответствующие возможным экспериментальным рентгенограммам от ОУНТ и МУНТ, которые могут быть использованы при их идентификации.

ВЛИЯНИЕ ХИРАЛЬНОСТИ, ВНУТРЕННЕГО РАДИУСА, ЧИСЛА СЛОЕВ УНТ НА КАРТИНУ РАССЕЯНИЯ

Для выявления идентификационных признаков на картинах рассеяния УНТ различной степени хиральности были смоделированы два граничных типа трубок: «зиг-заг» и «кресло» [1], [2], [3], [5], [16].

Для МУНТ было произведено усреднение H(S) для моделей длины 100–120 Å, состоящих из 4 слоев, в диапазоне изменения радиуса внутреннего слоя 5–50 Å. Результат сравнения H(S), рассчитанных для МУНТ типа «кресло» и «зиг-заг», представлен на рис. 3.

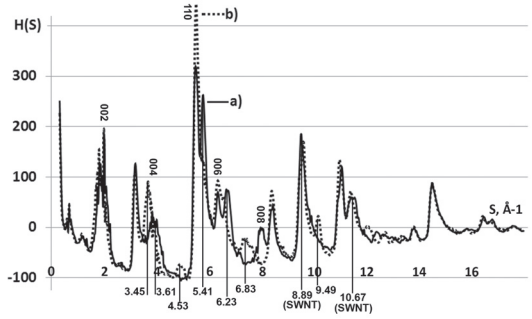


Рис. 3. Сравнение «усредненных» s-взвешенных интерференционных функций H(S) для моделей МУНТ типа «зиг-заг» (a) и «кресло» (b)

На «усредненных» зависимостях H(S) для МУНТ различной степени хиральности виден ряд существенных отличий (рис. 3):

1. На кривой H(S), рассчитанной для УНТ типа «кресло», максимум (004) имеет меньшую величину и смещен по S вправо на ≈0,15 Å^{-1} по сравнению с аналогичным максимумом на кривой H(S), рассчитанной для УНТ типа «зиг-заг»;
2. Максимум (110) на H(S), рассчитанной для трубок типа «зиг-заг», существенно выше, нежели на H(S), рассчитанной для трубок типа «кресло»;
3. На кривой H(S), рассчитанной для УНТ типа «кресло», максимумы (110), (006) более широкие и имеют существенное расщепление на два: возникают максимумы при S ~5,41 Å^{-1}, S ~6,23 Å^{-1} соответственно;
4. На кривой H(S) для трубок типа «зиг-заг» не наблюдается максимум (008);
5. На кривой H(S), рассчитанной для УНТ типа «зиг-заг», имеются небольшие максимумы в положениях S ~4,53 Å^{-1}, S ~6,83 Å^{-1}, S ~9,49 Å^{-1}.

При построении моделей ОУНТ радиуса 5–15 Å различной степени хиральности оказалось, что на характере H(S) степень хиральности проявляется:

1. Наличием на рентгенограмме от трубок типа «кресло» расщепления пика интенсивности

(110) (рис. 3), отсутствующего на кривой H(S), рассчитанной для УНТ типа «зиг-заг».

2. Отсутствием на рентгенограмме от трубок типа «кресло» расщепления пика интенсивности при S ~ 8,89 Å^{-1} (рис. 3), имеющегося на кривой H(S), рассчитанной для УНТ типа «зиг-заг».
3. Более существенным расщеплением пика при S ~10,67 Å^{-1} (рис. 3) на кривой H(S), рассчитанной для ОУНТ типа «зиг-заг», нежели на H(S) для ОУНТ типа «кресло».

При расчете рентгенограмм для хиральных нанотрубок получаемые картины будут тем ближе к H(S), рассчитанной для трубок типа «зиг-заг» (рис. 3a), или к H(S), рассчитанной для трубок типа «кресло» (рис. 3b), чем степень хиральности моделируемых трубок будет ближе к 0 или к 0,5 соответственно [4].

Для определения влияния внутреннего радиуса УНТ на характер H(S) были смоделированы УНТ (как однослойные, так и многослойные) типа «кресло» длины ~100 Å в диапазоне изменения внутреннего радиуса от 5 до 15 Å (для ОУНТ) и от 5 до 50 Å (для МУНТ). Выбранные диапазоны изменения внутреннего радиуса соответствуют параметрам экспериментально получаемых образцов УНТ [12]. Анализ рассчитанных для данных моделей рентгенограмм показал, что изменение внутреннего радиуса в таких диапазонах не может быть однозначно идентифицировано на зависимостях H(S) по характеру или величине интерференционных максимумов. Единственное значимое изменение – уменьшение периода осцилляций на H(S) (как для ОУНТ, так и для МУНТ «русская матрешка»).

Для выявления характерных особенностей на рентгенограммах УНТ, содержащих различное число слоев, были построены модельные МУНТ типа «кресло» степени хиральности 0,3, внутреннего радиуса ~25 Å, длины ~100–120 Å с числом слоев от 2 до 30. В результате анализа полученных картин рассеяния было установлено, что с увеличением числа слоев, существенно возрастают интерференционные максимумы, соответствующие отражениям графита типа (00l) (рис. 4b), то есть в тех областях H(S), где раньше наблюдались осцилляции (рис. 4a).

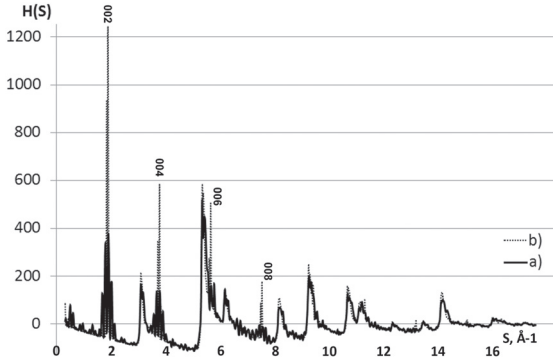


Рис. 4. Интерференционные функции H(S) для МУНТ «кресло»: Rвнутр ~25 Å, длина ~100 Å, число слоев равно 5 (a) и 20 (b)

При большом числе слоев (16 и более) пики интенсивности в положениях отражений 00l представлены в виде узких линий [4] (рис. 4b). При этом наибольшее возрастание интенсивности наблюдается у пиков, соответствующих отражениям (002) и (004) (рис. 4b).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ УНТ

Для иллюстрации возможности применения описанной методики и построения моделей атомных конфигураций при анализе экспериментальных образцов углеродных материалов, были проведены рентгенографические исследования образцов углеродных материалов, полученных от «*Arry Nano Inc.*» [12], предположительно содержащие многослойные углеродные нанотрубки длиной 1–2 мкм и внешнего радиуса 50–100 Å. Рентгенографирование выполнено в MoKα излучении в геометрии на просвет в интервале углов 2–145°, кристалл-монохроматор был установлен в первичных лучах.

Наиболее близкой к эксперименту была H(S) для модели смеси из 4-слойных МУНТ типа «кресло» длины ~50–200 Å, внешнего радиуса ~50–100 Å. На рис. 5 приведены интерференционные функции H(S) экспериментального образца и модели смеси МУНТ.

Наличие на экспериментальной кривой (рис. 5) интерференционных максимумов (002) и (004) говорит о присутствии в образце слоистых углеродных структур с межслоевым расстоянием 3,354–3,600 Å [1], [4], [14]. Однако на экспериментальной и модельной кривых (рис. 5) имеется ряд областей, в которых видно различие.

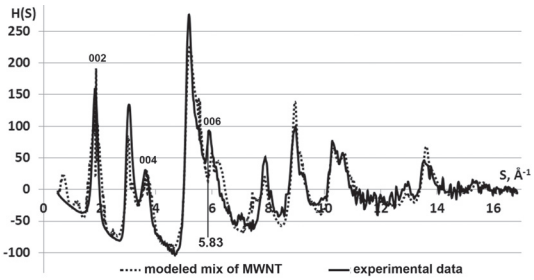


Рис. 5. Интерференционные функции H(S) экспериментального образца и подобранной возможной теоретической модели

Так, при длине дифракционного вектора S ~5,83 Å^{-1} (рис. 5) наблюдается расщепление максимума (006) на модельной кривой, отсутствующее на экспериментальной зависимости. Очевидно, это связано с тем, что выбранная модель содержит лишь МУНТ «кресло», в то время как экспериментальный образец может содержать МУНТ различной степени хиральности (рис. 3). То же самое относится и к другим максимумам интенсивности на протяжении всей длины дифракционного вектора S.

Для оценки количественного соответствия полученной экспериментальной и модельной

картин рассеяния воспользуемся следующим фактором недостоверности (R-фактором) [14]:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N_т} \left| I_{эксп_i} - I_{мод_i} \right|}{\sum_{i=1}^{N_т} \left| I_{эксп_i} \right|},$$

где Nт – число точек на кривой функции распределения интенсивности I(S).

Зависимость I(S) была взята вполне закономерно, так как на ее основе рассчитывается кривая H(S), используемая для качественного сравнения дифракционных картин рассеяния.

Для подобранной модели R-фактор равен ~0,2. Для получения меньшего значения R (более достоверной кривой H(S)) необходимо произвести варьирование параметров модельных УНТ в смеси в более широком диапазоне, а также учесть возможное наличие примесей в исследованном образце.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе построены модельные УНТ различных конфигураций и рассчитаны теоретические дифракционные картины для них. Показано, что модельные рентгенограммы для УНТ различного типа имеют ряд особенностей на кривых H(S), по которым данные нанотрубки можно идентифицировать, а в ряде случаев также приближенно оценить их характеристики. Проведенные рентгенографические исследования образца углеродного материала и построенная модель атомной структуры, картина рассеяния для которой оказалась близка к экспериментальной рентгенограмме, показали, что задача идентификации УНТ в исследуемом образце в ряде случаев может быть решена применением рентгеноструктурного анализа и компьютерного моделирования атомной структуры. На нынешнем уровне производства и очистки нанотрубок получаемые образцы недостаточно «чистые», то есть содержат нанотрубки, различные по типу и размерам. Поэтому для достижения более надежных результатов идентификации необходимо комбинирование различных модельных УНТ (и их совокупностей) и расчет «усредненных» картин рассеяния от данных «смесей», а также введение искажения атомной структуры (тепловых колебаний, деформаций и т. д.).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность старшему преподавателю кафедры ФТТ ПетрГУ, к. ф.-м. н. Д. В. Логинову и профессору кафедры ФТТ ПетрГУ, к. ф.-м. н. Л. А. Алешиной за помощь при подготовке статьи.

* Исследования проведены в рамках Программы стратегического развития на 2012–2016 годы «Университетский комплекс ПетрГУ в научно-образовательном пространстве Европейского Севера: стратегия инновационного развития».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беленков Е. А. Закономерности структурного упорядочения многослойных углеродных нанотрубок // Известия Челябинского научного центра. 2001. Вып. 1. С. 25–30.
2. Данилов С. В., Фофанов А. Д. Анализ возможности идентификации многослойных углеродных нанотрубок по рентгенодифракционным данным // Теоретические и практические аспекты развития современной науки: Материалы II междунар. науч.-практ. конф., 30–31 декабря 2011 г., Москва. М.: Спецкнига, 2011. С. 25–35.
3. Данилов С. В., Фофанов А. Д., Построение моделей однослойных углеродных нанотрубок и расчет координат атомов в них // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2011. № 6 (119). С. 109–114.
4. Данилов С. В., Фофанов А. Д. Моделирование картин рассеяния рентгеновских лучей углеродными материалами в некристаллическом состоянии // Нанотехнологии функциональных материалов (НФМ’12): Труды междунар. науч.-техн. конф. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 624–630.
5. Данилов С. В., Фофанов А. Д. Моделирование многослойных углеродных нанотрубок // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2012. № 4 (125). С. 107–111.
6. Джеймс Р. Оптические принципы дифракции рентгеновских лучей: Пер. с анг. М.: ИЛ, 1950. 572 с.
7. Кучер Е. В., Фофанов А. Д., Никитина Е. А. Компьютерное моделирование атомной структуры углеродной составляющей шунгита различных месторождений // Электронный журнал «Исследовано в России». 2002. С. 1113–1121 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/102.pdf
8. Неверов В. С., Кукушкин А. Б., Марусов Н. Л. и др. Моделирование рентгеновской дифракции на углеродных наноструктурах и определение их возможного топологического состава в осажденных пленках из ТОКАМАКА Т-10 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Термоядерный синтез». 2010. Вып. 1. С. 7–21.
9. Фофанов А. Д., Лобов Д. В., Логинов Д. В. Диагностика порошковых материалов методами рентгенографии // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. № 4 (109). С. 106–115.
10. Шумилова Т. Г. Алмаз, графит, карбин, фуллерен и другие модификации углерода. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 88 с.
11. ARRY. Nanomaterials and Technology [Electronic resource]. Access mode: http://www.arry-nano.com/
12. Pleshakov V. F. Geometry and X-Ray Diffraction Characteristic of Carbon Nanotubes // Crystallography Reports. 2009. Vol. 54. № 7. P. 1230–1241.
13. Reznik D., Olk C. H., Neumann D. A., etc. X-RAY powder diffraction from carbon nanotubes and nanoparticles // Physical review B. Vol. 52. № 1. 1995. P. 116–124
14. Rietveld H. M. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures // Journal of Applied Crystallography. 1969. Vol. 2. № 1. P. 65–71.
15. Ruland W., Schaper A. K., Hou H. Multi-wall carbon nanotubes with uniform chirality: evidence for scroll structures // Carbon. 2003. № 41. P. 423–427.

16. S a i t o R., D r e s s e l h a u s G., D r e s s e l h a u s M. S. Physical properties of carbon nanotubes. London: Imperial College Press, 1995 274 p.

Danilov S. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Fofanov A. D., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

COMPUTER MODELING AND X-RAY DIFFRACTION ANALYSIS OF CARBON NANOTUBES

The study of carbon materials in non-crystalline state and their identification in the experimental samples by diffraction methods of research is a complicated enough task because: 1) these materials have amorphous scattering patterns; 2) there are many polymorphs of carbon. The solution of this problem is a construction of theoretical models of different atom configurations, calculation, analysis, and comparison of the model's diffraction patterns and matching them with the experimental radiographs. The aim of the work is to find whether we can use this approach to research carbon nanotubes (CNTs). So, a series of nanotube models of different configurations (by type, length, inner radius, chirality, the number of layers) were constructed in the work. For all simulated objects, we calculated theoretical diffraction patterns (using the Debye method). Then we made their analysis and comparison. As a result, we obtained identification information for the definition of some CNT's structural characteristics (type, chirality, the number of layers, etc.) in the experimental samples. Moreover, the authors carried out X-ray research of the carbon material sample, which, hypothetically, contains CNTs. Then we constructed a corresponding model of the atomic structure, which scattering pattern is similar to the experimentally obtained radiograph. We noted in the article that in theoretical calculations of the models it is better to form various mixes of CNTs with different (in a small range) geometric characteristics and calculate the corresponding "average" scattering patterns. The obtained results give us evidences of the possibility to use X-ray analysis combined with the computer modelling in the study of carbon nanotubes.

Keywords: carbon nanotubes, computer modelling, construction of atomic configurations, x-ray diffraction, diffraction patterns

REFERENCES

1. B e l e n k o v E. A. Regularities of structural ordering of multi-walled carbon nanotubes [Zakonomernosti strukturnogo uporyadocheniya mnogosloynykh uglerodnykh nanotrubok]. *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra* [Proceedings of the Chelyabinsk Scientific Center]. 2001. Is. 1. P. 25–30.
2. D a n i l o v S. V., F o f a n o v A. D. The ability analysis of multi-walled carbon nanotubes identification by X-RAY data [Analiz vozmozhnosti identifikatsii mnogosloynykh uglerodnykh nanotrubok po rentgenodifraktsionnym dannym]. *Materialy II mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Teoreticheskie i prakticheskie aspekty razvitiya sovremennoy nauki"* [Proceedings of the II International Scientific Conference "Theoretical and practical aspects of modern science"]. Moscow, 30–31 December 2011. Moscow, Spetskniga Publ., 2011. P. 25–35.
3. D a n i l o v S. V., F o f a n o v A. D. Single-walled carbon nanotubes models' construction and their atom coordinates calculation [Postroenie modeley odnosloynykh uglerodnykh nanotrubok i raschet koordinat atomov v nikh]. *Proceedings of Petrozavodsk State University.* 2011. № 6 (119). P. 109–114.
4. D a n i l o v S. V., F o f a n o v A. D. Modeling of X-ray diffraction patterns of carbon materials in non-crystalline state [Modelirovanie kartin rasseyaniya rentgenovskikh luchey uglerodnymi materialami v nekristallicheskom sostoyanii]. *Nanotehnologii funktsional'nykh materialov (NFM'12): Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Nanotechnologies of Functional Materials (NFM'2012)"]. St. Petersburg, Izdatel'stvo Politehnicheskogo Universiteta, 2012. P. 624–630.
5. D a n i l o v S. V., F o f a n o v A. D. Multi-walled carbon nanotubes modeling [Modelirovanie mnogosloynyh uglerodnyh nanotrubok]. *Proceedings of Petrozavodsk State University.* 2012. № 4 (125). P. 107–111.
6. J a m e s R. *Opticheskie printsipy difraktsii rentgenovskikh luchey* [Optical Principles of Diffraction of X-Rays]. Moscow, IL Publ., 1950. 572 p.
7. K u c h e r E. V., F o f a n o v A. D., N i k i t i n a E. A. Computer modeling of the atomic structure of shungite carbon component of various fields [Komp'yuternoe modelirovanie atomnoy struktury uglerodnoy sostavlyayushchey shungita razlichnykh mestorozhdeniy]. *Elektronnyj zhurnal "Issledovano v Rossii"* [Electronic Journal "Investigated in Russia"]. 2002. P. 1113–1121. Available at: http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/102.pdf
8. N e v e r o v V. S., K u k u s h k i n A. B., M a r u s o v N. L. et al. Modelling of x-ray diffraction by carbon nanostructures and determination of their possible topological contents in the deposited films from tokamak T-10 [Modelirovanie rentgenovskoy difraktsii na uglerodnykh nanostrukturakh i opredelenie ikh vozmozhnogo topologicheskogo sostava v osazhdennykh plenkakh iz TOKAMAKA T-10]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya Termoyadernyy sintez [The problems of atomic science and technology]*. 2010. № 1. P. 7–21.
9. F o f a n o v A. D., L o b o v D. V., L o g i n o v D. V. The X-ray powder materials diagnostics [Diagnostika poroshkovykh materialov metodami rentgenografii]. *Proceedings of Petrozavodsk State University*. 2010. № 4 (109). P. 106–115.
10. S h u m i l o v a T. G. *Almaz, grafit, karbin, fulleren i drugie modifikatsii ugleroda* [Diamond, graphite, carbine, fullerenes, and other carbon modifications]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2002. 88 p.
11. ARRY. Nanomaterials and Technology. Available at: http://www.arry-nano.com/
12. P l e s h a k o v V. F. Geometry and X-Ray Diffraction Characteristic of Carbon Nanotubes. Crystallography Reports. 2009. Vol. 54. № 7. P. 1230–1241.
13. R e z n i k D., O l k C. H., N e u m a n n D. A. et al. X-RAY powder diffraction from carbon nanotubes and nanoparticles // Physical review B. 1995. Vol. 52. № 1. P. 116–124.
14. R i e t v e l d H. M. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures // Journal of Applied Crystallography. 1969. Vol. 2. № 1. P. 65–71.
15. R u l a n d W., S c h a p e r A. K., H o u H. Multi-wall carbon nanotubes with uniform chirality: evidence for scroll structures // Carbon. 2003. № 41. P. 423–427.
16. S a i t o R., D r e s s e l h a u s G., D r e s s e l h a u s M. S. Physical properties of carbon nanotubes. London, Imperial College Press, 1995. 274 p.

Поступила в редакцию 18.12.2012

Март, № 2 **Физико-математические науки** **2013**

УДК 519.2

МАРИНА МУКСУМОВНА ЛЕРИ
кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории теории вероятностей и компьютерной статистики, Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН, преподаватель кафедры теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
leri@krc.karelia.ru

ЮРИЙ ЛЕОНИДОВИЧ ПАВЛОВ
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией теории вероятностей и компьютерной статистики, Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН, профессор кафедры теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
pavlov@krc.karelia.ru

ЛЕСНОЙ ПОЖАР НА СЛУЧАЙНОМ ГРАФЕ СО СГОРАЕМЫМИ РЕБРАМИ*

Рассматриваются случайные графы, степени вершин которых имеют степенное распределение. С помощью методов имитационного моделирования решается задача оптимизации топологии графа с точки зрения сохранности наибольшего числа вершин при начинающемся с одной вершины распространении огня по ребрам.

Ключевые слова: случайный граф со степенным распределением, модель лесного пожара, имитационное моделирование

Моделирование лесных пожаров в последнее десятилетие приобрело новое направление и новый смысл. Вопросы ставятся не только о том, какой должна быть стратегия тушения пожара, чтобы сохранить как можно больше лесных насаждений, но и о том, какой должна быть оптимальная топология их расположения. Кроме того, эти модели и полученные с их помощью результаты (см., например, [3], [4], [5], [6]) могут быть использованы и в других областях науки и практики, как, например, они применимы для изучения дефолтов банковских систем [1].

В настоящей работе для рассмотрения одного из аспектов распространения лесного пожара используются модели случайных графов, распределение степеней вершин которых является дискретным аналогом распределения Парето [7], [8], [10]. Естественным образом возникает задача оптимизации числа деревьев и топологии их расположения на определенной (ограниченной) территории, обеспечивающих максимизацию числа несгоревших деревьев в случае возникновения пожара.

Рассматриваются случайные графы с N вершинами, степени которых $\xi_1, \xi_2, \ldots, \xi_N$ являются независимыми одинаково распределенными случайными величинами, общее распределение которых имеет следующий вид:

$$\mathbf{P}\{\xi \geq k\} = k^{-\tau},\ k = 1, 2, \ldots, \qquad (1)$$

где $\tau > 1$ – параметр распределения. При $\tau \in (1, 2]$ распределение (1) имеет конечное математическое ожидание и бесконечную дисперсию, при $\tau > 2$ дисперсия становится конечной. Для построения графа сначала задаются степени его вершин 1, 2, …, N как реализации случайной величины ξ. Они определяют различимые полуребра графа (полуребром считается ребро, инцидентное некоторой вершине, для которой смежная вершина еще не определена [10]). Ребра образуются посредством равновероятного соединения всех полуребер графа. Сумма степеней вершин может оказаться нечетной, и тогда одно из полуребер графа останется без пары. В этом случае равновероятно выбирается вершина, степень которой увеличивается на 1, тем самым образовав еще одно ребро. Полученный таким образом граф может иметь как петли, так и кратные ребра. Известно, что при $N \to \infty$ в графах, распределение степеней вершин которых имеет параметр $\tau \in (1, 2)$, асимтотически достоверно образуется гигантская компонента (см. [7], [10]) – связное подмножество вершин графа, математическое ожидание числа вершин которого пропорционально $c \cdot N$, где $0 < c < 1$ – некоторая положительная постоянная. В том случае, когда параметр распределения (1) больше 2, гигантская компонента в графе может отсутствовать.

Пусть вершинам графа соответствуют реальные деревья, и, если между вершинами существует ребро, то в случае возгорания одной из вершин по этому ребру огонь распространяется на смежную вершину. Определим зависимость числа деревьев, растущих на некотором ограниченном пространстве, от параметра τ. Пусть деревья на этой области расположены упорядо-

© Лери М. М., Павлов Ю. Л., 2013

ченно в виде квадратной решетки размерности 100 × 100. Средняя степень вершины i при полном заполнении будет равна 8, в этом случае при возникновении пожара сгорят все деревья. При значениях $i < 8$ (рис. 1) часть вершин и ребер графа будет отсутствовать, поэтому некоторые деревья не сгорят.

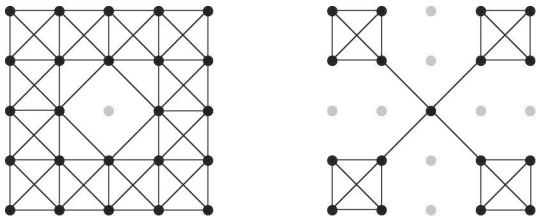


Рис. 1. Топология заполнения решетки при средних степенях вершин графа: $i = 7$ и $i = 4$ соответственно

На рис. 1 отсутствующие вершины обозначены серым цветом.

Исходя из приведенных в таблице данных была получена следующая регрессионная зависимость объема графа N от параметра распределения степеней вершин τ (рис. 2):

$$N = 9256 \cdot \tau^{-1,05}, \qquad (2)$$

с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,97$.

Начальные данные для нахождения зависимости N от τ

i	τ	N
1,01	6,75	3350
1,21	2,96	3600
1,33	2,53	3750
1,42	2,32	3900
1,5	2,19	4000
1,6	2,05	4200
2	1,73	5000
2,66	1,49	4780
3	1,42	4489
4	1,29	5578
5	1,23	6700
5,33	1,21	7500
6	1,18	8350
7	1,16	8911
8	1,13	10000

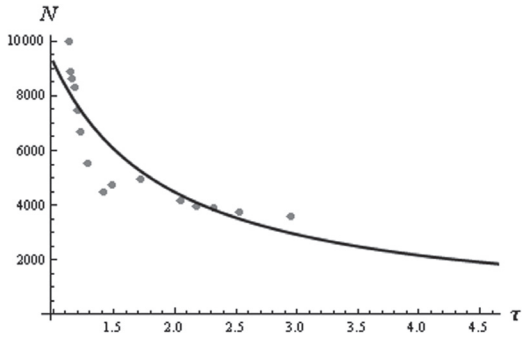


Рис. 2. Регрессионная зависимость N от τ

Применение методов имитационного моделирования в исследованиях случайных графов помогает продвинуться в понимании тех аспектов, которые теоретически еще не были изучены. В данной работе была использована имитационная модель случайного графа [2], построенная на основе алгоритма, предложенного в [11], с использованием генератора псевдослучайных чисел «вихрь Мерсенна» [9]. Ранее [2] на этой модели (для $\tau \in (1, 2)$) была исследована зависимость структуры таких графов от параметра распределения степеней вершин τ, а также был проведен анализ устойчивости таких графов внешним воздействиям, таким как направленное и равновероятное удаление вершин.

В данной работе рассматривались два типа возникновения пожара. Во-первых, это «случайное возгорание», когда пожар начинается с равновероятно выбранной вершины, во-вторых, «направленный поджог», при котором первой загорается вершина, имеющая наибольшую степень. Цель работы состояла в том, чтобы определить, при каком значении параметра τ распределения степеней вершин графа достигается максимум числа оставшихся после пожара вершин (деревьев). Моделирование графов и вычислительные эксперименты проводились на вычислительном кластере КарНЦ РАН.

Имитационное моделирование проводилось для значений параметра τ из интервала (1, 3,5) с шагом 0,01. Объемы графов N вычислялись из уравнения (2). Для каждой пары значений N и τ генерировалось по 100 случайных графов. После «возгорания» первой вершины все вершины, связанные с ней, считались сгоревшими, и вычислялось число оставшихся (несгоревших) вершин g графа.

При «случайном возгорании» была получена следующая оценка (график зависимости показан на рис. 3):

$$g = -1476,3 \cdot \tau^2 + 7247,7 \cdot \tau - 5313,4,$$

где коэффициент детерминации модели равен 0,86.

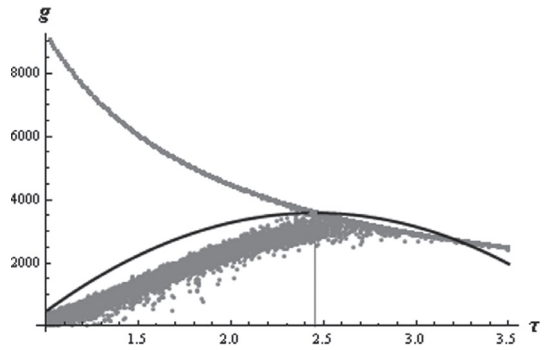


Рис. 3. Регрессионная зависимость числа несгоревших вершин g от параметра τ при «случайном возгорании»

На рис. 3 видно, что при некоторых значениях параметра облако регрессии распадается на 2 части. Это означает, что при одних и тех же значениях τ существует некоторая доля графов, которые

почти не сгорают, то есть после пожара в них остается более 98 % вершин. Такая ситуация возникает тогда, когда возгорание начинается с вершины, являющейся частью очень маленькой компоненты связности (не более 5 вершин), и, следовательно, в графе сгорает только эта компонента.

Таким образом, максимум функции при «случайном возгорании» достигается при значении $\tau = 2{,}45$ (пример структуры такого графа показан на рис. 4). Начальное число вершин графа N в этом случае в среднем составит около 3600 вершин, из которых примерно 3580 выживут после пожара. Средняя степень вершины такого графа i равна 1,36.

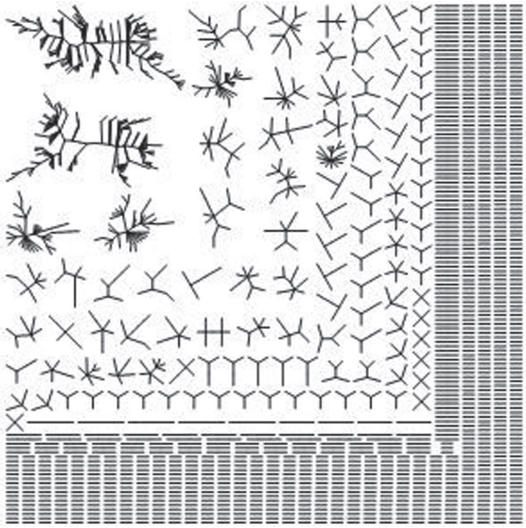


Рис. 4. Пример структуры степенного графа при $\tau = 2{,}45$

В случае «направленного поджога» была получена следующая зависимость числа несгоревших вершин от параметра τ (рис. 5):

$$g = -1296\cdot\tau^2 + 7025\cdot\tau - 6431,$$

коэффициент детерминации модели $R^2 = 0{,}997$.

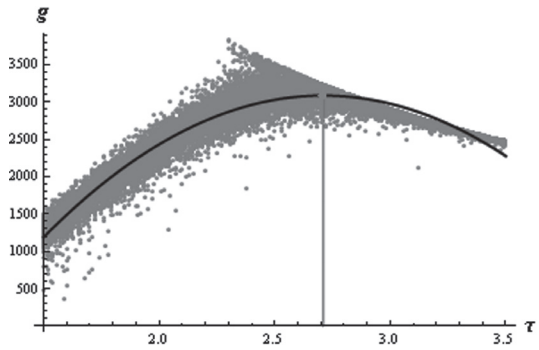


Рис. 5. Регрессионная зависимость числа несгоревших вершин g от параметра τ при «направленном поджоге»

В этих условиях полученная функция достигнет своего максимального значения при $\tau = 2{,}71$. Тогда N в среднем будет равно 3260 вершин, 3089 из которых останутся после пожара, а средняя степень вершины графа будет равна 1,27.

Таким образом, для того чтобы в случае пожара (как «случайного», так и «направленного») на некоторой заданной территории осталось как можно больше несгоревших деревьев, необходимо, чтобы топология их расположения соответствовала топологии случайного графа с параметром τ распределения степеней вершин (1) от 2,4 до 2,7. Такой граф будет представлять собой многокомпонентную структуру с отсутствием гигантской компоненты связности, средняя степень вершин которой будет колебаться в пределах от 1,2 до 1,4.

Понятно, что предложенный подход к моделированию лесных пожаров не в полной мере адекватен реальности, поскольку распространение огня на соседние деревья зависит от многих факторов и носит случайный характер. Поэтому в следующих наших работах будут рассматриваться ситуации, когда вероятность возгорания ребра меньше единицы.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития Петрозаводского государственного университета на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аннаков Б. Б. Банковский кризис и пожары в лесу – Что общего? 2008 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.empatika.com/blog/agent_modeling_forest_fire#more-403
2. Лери М. М. Моделирование случайных графов Интернет-типа // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2009. Т. 16. Вып. 5. С. 737–744.
3. Павлов Ю. Л., Хворостянская Е. В. Сгорит ли дерево при пожаре в случайном лесе? // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. Сер. «Математическое моделирование и информационные технологии». 2012. Вып. 3. № 5. С. 89–93.
4. Bertoin J. Burning cars in a parking lot // Commun. Math. Phys. 2011. Vol. 306. P. 261–290.
5. Bertoin J. Fires on trees // Annales de l'Institut Henri Poincare Probabilites et Statistiques. 2012. Vol. 48 (4). P. 909–921.
6. Drossel B., Schwabl F. Self-organized critical forest-fire model // Phys. Rev. Lett. 1992. Vol. 69. P. 1629–1632.
7. Durrett R. Random Graph Dynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 212 p.
8. Faloutsos C., Faloutsos P., Faloutsos M. On power-law relationships of the internet topology // Computer Communications Rev. 1999. Vol. 29. P. 251–262.
9. Matsumoto M., Nishimura T. Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator // ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation. 1998. Vol. 8. № 1. P. 3–30.
10. Reittu H., Norros I. On the power-law random graph model of massive data networks // Performance Evaluation. 2004. Vol. 55. P. 3–23.
11. Tangmunarunkit H., Govindan R., Jamin S. et al. Network topology generators: degree-based vs. structural // Proceedings of the SIGCOMM'02. Pittsburgh, USA. 2002. P. 147–159.

Leri M. M., Karelian Research Centre of RAS, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Pavlov Yu. L., Karelian Research Centre of RAS, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

FOREST FIRE ON RANDOM GRAPH WITH INFLAMMABLE EDGES

Random graphs with vertex degrees drawn independently from a power-law distribution are considered. Using computer simulations, we found an optimal graph topology instrumental in preservation of the maximum number of vertices in case the fire starts from one vertex and spreads along the edges of the graph.

Key words: power-law random graph, forest fire model, simulation modelling

REFERENCES

1. Annakov B. B. *Bankovskiy krisis i pozhary v lesu – Chto obshchego?* 2008 [Bank crisis and forest fires – What's in common? 2008]. Available at: http://www.empatika.com/blog/agent_modeling_forest_fire#more-403
2. Leri M. M. Modelling of random graphs of Internet-type [Modelirovanie sluchainykh grafov Internet-tipa]. *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki* [Surveys in Applied and Industrial Mathematics]. 2009. Vol. 16. Iss. 5. P. 737–744.
3. Pavlov Yu. L., Khvorostyanskaya E. V. Will a tree will burn in fire in a random forest? [Sgorit li derevo pri pozhare v sluchainom lese?]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. Ser. "Matematicheskoye modelirovanie i informatsionnye tekhnologii"* [Proc. of the Karelian Research Centre of the RAS. Ser. "Mathematical modelling and information technologies"]. 2012. Iss. 3. № 5. P. 89–93.
4. Bertoin J. Burning cars in a parking lot // Commun. Math. Phys. 2011. Vol. 306. P. 261–290.
5. Bertoin J. Fires on trees // Annales de l'Institut Henri Poincare Probabilites et Statistiques. 2012. Vol. 48 (4). P. 909–921.
6. Drossel B., Schwabl F. Self-organized critical forest-fire model // Phys. Rev. Lett. 1992. Vol. 69. P. 1629–1632.
7. Durrett R. Random Graph Dynamics. Cambridge, Cambridge University Press, 2007. 212 p.
8. Faloutsos C., Faloutsos P., Faloutsos M. On power-law relationships of the internet topology // Computer Communications Rev. 1999. Vol. 29. P. 251–262.
9. Matsumoto M., Nishimura T. Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator // ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation. 1998. Vol. 8. № 1. P. 3–30.
10. Reittu H., Norros I. On the power-law random graph model of massive data networks // Performance Evaluation. 2004. Vol. 55. P. 3–23.
11. Tangmunarunkit H., Govindan R., Jamin S. et al. Network topology generators: degree-based vs. structural // Proceedings of the SIGCOMM'02. Pittsburgh, USA. 2002. P. 147–159.

Поступила в редакцию 20.02.2013

Март, № 2 **Физико-математические науки** **2013**

УДК 004.738.5

АНДРЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ ПЕЧНИКОВ
доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории телекоммуникационных систем, Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
pechnikov@krc.karelia.ru

ОЛЬГА ЮРЬЕВНА ДЕРБЕНЕВА
начальник управления по инновационно-производственной деятельности, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
oder@petrsu.ru,

АНАЛИЗ ГИПЕРССЫЛОК ВЕБ-ПРОСТРАНСТВА ПЕТРОЗАВОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА*

На примере сайта Петрозаводского государственного университета исследуются исходящие гиперссылки, сделанные с сайтов его информационного веб-пространства. Показана низкая связность сайтов, входящих в веб-пространство университета, и незначительное количество встречных ссылок, сделанных с университетских и научных сайтов России, Великобритании, США и Финляндии. Результаты исследования позволяют сделать ряд рекомендаций, направленных на улучшение присутствия сайтов университета в Вебе. Описанные методы, подходы и результаты могут быть полезны разработчикам веб-ресурсов российских вузов и научных учреждений.

Ключевые слова: веб-пространство, университетские и научные сайты, гиперссылка, связность сайтов

ВВЕДЕНИЕ

Веб-ресурсы вузов (по крайней мере, их официальные сайты) относятся к так называемым «регламентируемым веб-ресурсам» [3]. Это означает, что существует (или должен существовать) официальный документ, в котором изложены цели и задачи веб-ресурса, основные структурные составляющие, правила изменения информации и т. д. Под управляемостью процессами в Вебе понимается реализация управленческих решений в виде пунктов регламента, определяющих их исполнение. В этом случае для сайтов информационного веб-пространства организации могут быть выработаны управленческие решения, направленные на улучшение их присутствия в Вебе. Однако прежде чем реализовывать управленческие решения, необходимо пройти путь от сбора информации о присутствии и взаимосвязях веб-сайтов до построения и анализа формальных моделей и разработки рекомендаций, сделанных на их основе.

Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ) имеет организационную структуру, присущую большинству российских вузов и соответствующую Типовому положению о высшем учебном заведении [6], и является типичным вузом с иерархической организацией [2]. Деятельность ПетрГУ в области информационных технологий хорошо известна, официальный сайт университета создан в 1995 году; к настоящему времени около 100 сайтов составляют веб-пространство ПетрГУ. Поэтому методы исследования веб-ресурсов ПетрГУ, направленные на улучшение их присутствия в Вебе, и полученные результаты могут оказаться полезными для разработчиков веб-ресурсов не только ПетрГУ, но и других вузов России.

На различных страницах одного сайта могут встречаться гиперссылки на один и тот же внешний адрес, имеющие одинаковый контекст (в частном случае – анкор). Распространенный пример – ссылка на сайт вышестоящей организации или организации – разработчика официального сайта. Количество таких «одинаковых» гиперссылок может быть равно количеству страниц на сайте. Из множества всех гиперссылок с одинаковым адресом-приемником и контекстом в нашем исследовании мы будем рассматривать только одну – ту, которая находится на странице, имеющей максимальный уровень (наивысшим считается уровень начальной страницы сайта). Такие гиперссылки называются «уникальными внешними гиперссылками» [3], но, поскольку далее рассматриваются только они, мы будем называть их просто гиперссылками (или ссылками).

Сканирование сайтов веб-пространства ПетрГУ и ряда других сайтов с целью сбора и анализа исходящих гиперссылок производилось программой BeeCrawler [4], [7]. Для анализа гиперссылок также использовались такие возможности расширенного поиска Google, как поиск гиперссылок на заданный сайт, сделанных с определенного домена или сайта.

ВЕБ-ПРОСТРАНСТВО ПетрГУ

Веб-пространство университета – это множество университетских веб-сайтов, связанных

© Печников А. А., Дербенева О. Ю., 2013

посредством гиперссылок. Как правило, хорошо известен официальный сайт университета (будем его также называть головным сайтом), несложно на нем обнаружить ссылки на сайты основных подразделений вуза и/или определить сайты веб-пространства университета, если их доменные имена являются поддоменами домена головного сайта. Гораздо сложнее, когда ссылка на сайт, потенциально входящий в состав веб-пространства, отсутствует на головном сайте и/или не ассоциируется с головным доменом. В худшем случае упоминание о сайте из веб-пространства отсутствует в этом веб-пространстве.

Для случая ПетрГУ многие сайты обнаруживаются на таких страницах головного сайта, как «Структура» и «Web-ресурсы». Однако для поиска ряда сайтов пришлось применить более тонкие методы, визуальный анализ результатов сканирования сайтов, ранее уже отнесенных к веб-пространству ПетрГУ. Используемые программные средства предоставляют такую возможность, как фильтрация найденных гиперссылок по фрагменту доменного имени и/или контексту, содержащемуся в анкоре гиперссылки, что значительно облегчает поиск ссылок на сайты, потенциально относящиеся к университетским.

Сайты, составляющие веб-пространство ПетрГУ, можно разбить на следующие группы:

1. Официальный сайт университета;
2. Сайты факультетов;
3. Сайты кафедр;
4. Сайты Научной библиотеки, Ботанического сада, институтов, центров;
5. Сайты филиалов университета и Университетского лицея;
6. Сайты издательства, научных журналов, медиа-ресурсов;
7. Сайты структурных подразделений университета, не вошедшие в группы 2–6;
8. Сайты научных конференций, организуемых университетом;
9. Сайты программ и проектов, выполняемых сотрудниками университета;
10. Сайты учебных ресурсов, разработанные сотрудниками университета;
11. Сайты информационно-справочных систем и ресурсов университета;
12. Персональные сайты сотрудников университета;
13. Другие сайты: творческих организаций, профкома и сайты, не вошедшие в группы 1–12.

В предварительный список веб-сайтов ПетрГУ было включено 112 сайтов. Официальный сайт ПетрГУ имеет уникальное доменное имя www.petrsu.ru (еще одно известное имя petrsu.karelia.ru относится к зеркалу официального сайта; термины «зеркало» и «главное зеркало» понимаются, как у Яндекса [1]). Из 14 факультетов ПетрГУ только 3 имеют собственные сайты: лесоинженерный (forest.petrsu.ru), математический (mf.petrsu.ru) и юридический (urfak.petrsu.ru). Из более чем 80 кафедр ПетрГУ только 8 имеют собственные сайты. В четвертую группу входят сайты Научной библиотеки (library.petrsu.ru), Ботанического сада (hortus.karelia.ru) и др. Можно сказать, что первые пять групп веб-сайтов университета соответствуют его структурно-административной организации.

В шестую группу объединены веб-ресурсы издательства, журналов и медиаресурсов ПетрГУ, и уже здесь замечаются отличия в организации веб-пространства по сравнению с административной структурой. Например, сайт «Ученые записки ПетрГУ» (uchzap.petrsu.ru) является сайтом собственно журнала, но не редакции журнала как структурного подразделения.

В группу «Другие подразделения» вошли сайты как структурных подразделений, не вошедших в предыдущие группы (например, Web-лаборатория ПетрГУ, weblab.petrsu.ru), так и Координационного центра программы «Шаг в будущее» (stf.karelia.ru). Все сайты группы конференций относятся к конференциям по информационным технологиям. Группа «Проекты» включает сайты «Филолог.ру» (philolog.petrsu.ru), «Британцы в Карелии» (britons.karelia.ru), «Открытые платформы для мобильных устройств» (oss.fruct.org), «Бюджет и межбюджетные отношения. Регионы России» (openbudget.karelia.ru) и ряд других.

Группа учебных ресурсов включает сайты Академии информационных технологий (webct.karelia.ru), Виртуальной педпрактики (praktika.karelia.ru), Учебно-методические ресурсы кафедры физики твердого тела ПетрГУ (dssplab.karelia.ru).

В группу информационно-справочных ресурсов входят сайты «Аспирантура ПетрГУ» (aspirant.petrsu.ru), ИПС «Наука» (nauka.petrsu.ru), «Система качества в ПетрГУ» (quality.petrsu.ru), «Трудоустройство. Биржа труда» (job.petrsu.ru), «Information for International students» (schools.karelia.ru) и др.

В группу персональных сайтов ПетрГУ входят всего четыре сайта: А. А. Мезенцев (amez.petrsu.ru), Е. Жиганов (zed.karelia.ru), О. В. Гусев (gusev.eleset.ru) и А. М. Караваев (www.karavaev.me).

В последнюю группу вошли сайты Ансамбля народной музыки «Toive» (toive.karelia.ru), Туристического клуба ПетрГУ «Сампо» (sampo-club.ru), Профкома студентов ПетрГУ (мой-профком.рф), Дискуссионного клуба ПетрГУ (discuss.petrsu.ru), а также ряд неклассифицированных ранее сайтов, например сайт Всероссийской ассоциации вузов – пользователей Oracle (oracle.karelia.ru).

Отметим ряд спорных моментов по ряду конкретных сайтов, входящих в предварительный список сайтов веб-пространства ПетрГУ.

1. Не все сайты, входящие в группу «Другие подразделения», представляют подразделения, формально входящие в структуру университета. Например, веб-сайт www.lab127.ru принадлежит коллективу разработчиков, сформировавшемуся на базе кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники (КИИСФЭ) ПетрГУ. Можно ли считать этот веб-ресурс (и ему подобные) университетским?

2. Можно ли считать сайт Международной конференции «Развитие вычислительной техники в России и странах бывшего СССР» (sorucom.karelia.ru), прошедшей на базе ПетрГУ, веб-ресурсом ПетрГУ?

3. Можно ли считать сайты проектов, выполненных и/или сопровождаемых сотрудниками ПетрГУ по заказу других организаций (или профинансированных на грантовой основе), веб-ресурсами ПетрГУ? Положительный ответ может быть дан, например, для сайта проекта «Петроглифы Северной Фенноскандии» (petroglyphs.ru), поддержанного грантом РГНФ. В то же время для сайта «Результаты НИОКР» (budget-niokr.ru), выполненного по заказу Федерального агентства по образованию, ответ представляется отрицательным. То же самое можно сказать о сайте «Единый государственный экзамен в Республике Карелия» (ege.karelia.ru), обозначенному в списке ресурсов ПетрГУ (petrsu.ru/resource.html) как веб-ресурс ПетрГУ.

На момент подготовки публикации (август 2012 года) авторы оставили в списке 81 сайт, составляющий веб-пространство ПетрГУ. С полным списком сайтов и исходящих с них гиперссылок можно ознакомиться, используя в гостевом режиме доступ к базе данных внешних гиперссылок на сайте «Вебометрический рейтинг научных учреждений России» в разделе «Инструменты», http://webometrics-net.ru/section.php?id=27.

Из 81 сайта 39 имеют доменные имена как поддомены домена головного сайта petrsu.ru, 33 являются поддоменами домена karelia.ru, 2 сайта расположены на домене narod.ru, 5 – в зоне ru, по одному в зонах org и me.

Всего на 81 сайте веб-пространства ПетрГУ было найдено 37 406 исходящих ссылок на 22 464 сайта, что, казалось бы, свидетельствует о высокой активности владельцев сайтов ПетрГУ. Однако при этом 28 938 ссылок на 19 897 сайтов сделаны с одного-единственного сайта ансамбля народной музыки ПетрГУ «Toive» (toive.karelia.ru). Этот сайт является сайтом-блогом, с чем и связано гигантское количество исходящих гиперссылок, среди них имеются и ссылки на порносайты, но отсутствуют ссылки на сайты ПетрГУ и всего две ссылки сделаны на карельские сайты. Поскольку сайт «Toive» показан в структуре ПетрГУ и на него имеется ссылка с такого всероссийского ресурса, как «Единое окно доступа к образовательным ресурсам» (http://window.edu.ru/resource/334/52334), мы ограничились тем, что оставили его в списке сайтов веб-пространства ПетрГУ, исключив все исходящие с него ссылки из дальнейшего рассмотрения.

Таким образом, далее анализируются 8468 ссылок, сделанных с сайтов веб-пространства ПетрГУ на 2567 сайтов (среди этих сайтов, разумеется, есть и сайты самого веб-пространства ПетрГУ). Эти ссылки, в свою очередь, можно разделить на две группы:

- «внутренние» – 1163 гиперссылки, связывающие сайты веб-пространства ПетрГУ,
- «внешние» – 7306 гиперссылок, сделанных с сайтов веб-пространства ПетрГУ на сайты, не входящие в него.

«ВНУТРЕННИЕ» ГИПЕРССЫЛКИ ВЕБ-ПРОСТРАНСТВА ПетрГУ

Наибольшее количество сайтов веб-пространства ПетрГУ ссылаются на головной сайт www.petrsu.ru: 47 сайтов с общим количеством ссылок, равным 176. В свою очередь, головной сайт ссылается на 59 сайтов ПетрГУ с общим количеством ссылок, равным 218. Но наибольшее количество ссылок сделано с сайта «Филолог.ру» (philolog.petrsu.ru) на сайт информационной системы «Статистические методы анализа литературного текста» (smalt.karelia.ru) – 422 ссылки, гораздо больше трети всех ссылок, связывающих сайты ПетрГУ. Отметим, что обратных ссылок с сайта информационной системы «Статистические методы анализа литературного текста» на сайт «Филолог.ру» нет совсем, как, впрочем, и на другие сайты веб-пространства ПетрГУ.

Таким образом, вычитая из общего количества «внутренних» гиперссылок ссылки, сделанные с головного сайта и сайта «Филолог.ру», получим, что на другие 79 сайтов остается 523 исходящие «внутренние» гиперссылки, что в среднем, казалось бы, свидетельствует о достаточно сильных «внутренних» коммуникациях в веб-пространстве ПетрГУ.

Дальнейший анализ показывает, что из 81 сайта веб-пространства ПетрГУ 57 сайтов имеют как входящие ссылки с других сайтов ПетрГУ, так и исходящие ссылки на другие сайты ПетрГУ, 18 сайтов имеют только входящие ссылки с других сайтов ПетрГУ, 2 сайта имеют только исходящие ссылки на другие сайты ПетрГУ, а 4 сайта являются изолированными в структуре веб-пространства ПетрГУ.

На рис. 1 в левом верхнем углу изображен веб-граф G_{PetrSU} веб-пространства ПетрГУ (изолированные вершины исключены). Дуга в графе существует тогда, когда существует хотя бы одна гиперссылка, связывающая соответствующую пару сайтов.

Компонента сильной связности веб-графа G_{PetrSU} содержит 52 сайта, что свидетельствует о

достаточно сильной связности веб-пространства ПетрГУ. Это объясняется большим количеством гиперссылок, связывающих головной сайт с другими сайтами ПетрГУ. Если в графе G_{PetrSU} удалить вершину www.petrsu.ru вместе со всеми инцидентными ей дугами, то полученный граф $G_{PetrSU*}$ содержит только 60 неизолированных вершин и распадается на 5 компонент сильной связности, содержащих в сумме 27 вершин (рис. 2).

Первые три компоненты имеют четко выраженного «хозяина», в первом случае это сайт Web-лаборатории ПетрГУ, во втором – сайт кафедры прикладной математики и кибернетики, в третьем – сайт кафедры ИМО.

Четвертая компонента объединяет сайты шести конференций «Информационная среда вуза XXI века» и сайт Всероссийской ассоциации вузов – пользователей Oracle. Здесь можно говорить о «скрытом хозяине» в виде сайта РЦНИТ ПетрГУ, являющегося организатором конференций и активным участником ассоциации.

Пятая компонента сложилась естественным образом, и даже ссылка с сайта юридического факультета (urfak.petrsu.ru) на сайт «Каталог ресурсов кафедры физики твердого тела» (solidstate.karelia.ru) имеет содержательное объяснение: она указывает на страницу мониторинга серверов и устройств юридического факультета ПетрГУ на сайте solidstate.karelia.ru.

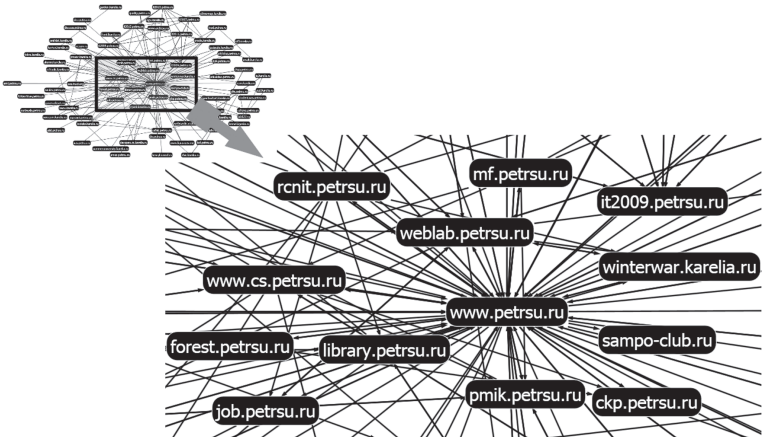


Рис. 1. Веб-граф G_{PetrSU}

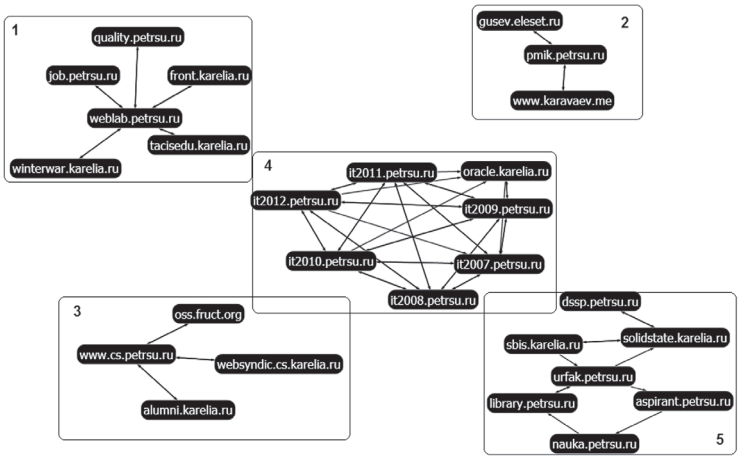


Рис. 2. Компоненты сильной связности веб-графа $G_{PetrSU*}$

«ВНЕШНИЕ» ГИПЕРССЫЛКИ ВЕБ-ПРОСТРАНСТВА ПетрГУ

Почти половина гиперссылок за пределы веб-пространства ПетрГУ (3843) сделаны всего с двух сайтов: с головного сайта (1202 ссылки) и сайта «ИПС «Наука» (nauka.petrsu.ru, 2641 ссылка). Вместе с тем на более чем 3400 «внешних» сайтов сделано лишь по одной ссылке с сайтов веб-пространства ПетрГУ.

Наибольшее количество «внешних» ссылок, а именно 577, сделано на сайт ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» (www.fcpir.ru), и все они сделаны с сайта «ИПС “Наука”». Обратных ссылок с сайта ФЦП на сайты веб-пространства ПетрГУ не обнаружено. Далее следуют сайты РФФИ (www.rfbr.ru: 174 ссылки, из них 168 с сайта «ИПС «Наука»; обратных ссылок нет) и газеты «Поиск» (www.poisknews.ru: 149 ссылок, из них 143 с сайта «ИПС “Наука”»; обратных ссылок нет).

Более 35 % «внешних» ссылок сделаны с сайта «ИПС «Наука», но в содержательном плане эти гиперссылки являются информационными, а не коммуникационными, они не представляют собой отражение в Вебе, например, совместной деятельности университетов в обучении, проведении конференций или реализации совместных проектов. С этой точки зрения более интересными представляются ссылки, связывающие сайты информационного пространства ПетрГУ с сайтами других университетов и научных учреждений – как российских, так и зарубежных.

Рассмотрим результаты, полученные для российских университетов и учреждений Российской академии наук (РАН). Наибольшей популярностью среди сайтов ПетрГУ пользуются сайты МГУ (головной сайт www.msu.ru). На 14 сайтов веб-пространства МГУ сделано 26 «внешних» ссылок с 11 сайтов ПетрГУ. Эти ссылки, в основном, носят коммуникационный характер, например, 11 ссылок с сайта кафедры ИМО ПетрГУ сделаны на сайт Научного семинара «Проблемы современных информационно-вычислительных систем» (seminar.s2s.msu.ru), где размещены материалы выступлений сотрудников кафедры ИМО. К сожалению, с сайтов МГУ обнаружена лишь одна ссылка на сайты ПетрГУ, хотя, казалось бы, в сведениях о докладчиках на указанном семинаре можно указать и сайт кафедры ИМО. Похожая ситуация наблюдается и с сайтами МГТУ им. Н. Э. Баумана (головной сайт www.bmstu.ru). На 6 сайтов МГТУ сделано 54 гиперссылки с 6 сайтов ПетрГУ. При этом 42 ссылки сделаны с сайта Регионального центра содействия трудоустройству и адаптации к рынку труда выпускников учреждений высшего профессионального образования (aist.petrsu.ru) на сайт Автоматизированной информационной системы содействия трудоустройству выпускников учреждений профессионального образования (aist.bmstu.ru). С сайтов МГТУ не обнаружено ни одной ссылки на сайты ПетрГУ.

Из 8 ссылок, сделанных на сайты СПбГУ, половина принадлежит сайту кафедры ИМО, две – сайту кафедры общей физики ПетрГУ, еще две – головному сайту. Обратных ссылок с сайтов СПбГУ не найдено.

Обнаружены внешние ссылки на сайты еще около 20 российских высших учебных заведений, причем большинство ссылок сделано с сайта Всероссийской ассоциации вузов – пользователей Oracle (oracle.karelia.ru). Обратные ссылки на сайты ПетрГУ (от 1 до 3) найдены лишь на сайтах Кемеровского (www.kemsu.ru), Томского политехнического (www.tpu.ru), Воронежского (www.vsu.ru) и Южного федерального (www.sfedu.ru) университетов (в скобках – адреса головных сайтов).

Анализ гиперссылок, связывающих сайты веб-пространства ПетрГУ и РАН, был проведен для 65 организаций РАН, таких как собственно РАН (www.ras.ru), научные отделения, научные центры, крупнейшие институты, библиотеки. На головном сайте ПетрГУ обнаружена одна гиперссылка на сайт Института проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН. На 8 сайтах веб-пространства ПетрГУ найдено 45 ссылок на 19 различных сайтов РАН, среди которых официальный сайт РАН, сайты физических институтов РАН, Библиотека РАН (www.benran.ru). Из обратных ссылок с сайтов РАН найдена лишь ссылка с Отделения физических наук РАН (www.gpad.ac.ru) на страницу физического факультета на головном сайте ПетрГУ.

Рассмотрим гиперссылочное взаимодействие между сайтами веб-пространства ПетрГУ и сайтами веб-пространств Карельского научного центра РАН (КарНЦ РАН, www.krc.karelia.ru) и Карельской государственной педагогической академии (КГПА, kspu.karelia.ru).

Веб-пространство КарНЦ РАН включает 38 сайтов, с 8 сайтов ПетрГУ сделано 18 гиперссылок на 8 сайтов КарНЦ РАН. Здесь значительно лучше обстоят дела с обратными гиперссылками: с 15 сайтов КарНЦ РАН сделано 96 гиперссылок на сайты ПетрГУ. Наибольшей популярностью пользуется головной сайт ПетрГУ, на который сделано 39 ссылок с 10 сайтов КарНЦ РАН, далее следует сайт Ученых записок ПетрГУ (uchzap.petrsu.ru): 27 ссылок с 6 сайтов КарНЦ РАН.

О связях с сайтом КГПА, состоящим из 12 сайтов, с 4 сайтов ПетрГУ сделано 10 гиперссылок, и все на головной сайт веб-пространства КГПА, с 3 сайтов КГПА сделано 16 ссылок на 2 сайта ПетрГУ.

Коротко остановимся на гиперссылках, связывающих веб-пространство ПетрГУ с зарубежными университетскими сайтами.

На 14 сайтов университетов Великобритании сделано 15 ссылок, из них 2 на University of Warwick (www2.warwick.ac.uk). С помощью Google найдена одна ссылка с сайта университета Великобритании, но этот сайт не входит в указанные 14, на которые есть ссылки с сайтов ПетрГУ.

На 32 сайта с доменными именами в зоне edu, предназначенной для сайтов аккредитованных высших учебных заведений США, сделано 64 ссылки с 12 сайтов ПетрГУ. С головного сайта сделано 7 ссылок, столько же с сайта «Открытые платформы для мобильных устройств». Наибольшее количество ссылок, а именно 3, сделано на сайт Vermont Law School (www.vermontlaw.edu). С помощью Google не найдено ни одной ссылки с сайтов университетов США на сайты ПетрГУ.

На 33 сайта университетов, фондов, библиотек и научных проектов Финляндии сделано 75 ссылок с сайтов ПетрГУ (с головного сайта ПетрГУ сделано 32 ссылки). Наибольшее количество ссылок, а именно 10, сделано на сайт Department

of Computer Science University of Helsinki (www.cs.helsinki.fi) с сайта кафедры ИМО. Google обнаруживает 4 сайта университетов Финляндии, имеющих ссылки на головной сайт ПетрГУ. При этом сайты University of Oulu (www.oulu.fi) и Finnish-Russian Cross-Border University (cbu.fi) входят в 33 финских сайта, на которые сделаны ссылки с сайтов ПетрГУ и которые имеют обратные ссылки на них. Связи между подмножествами соответствующих сайтов изображены на рис. 3. Толщина линий примерно соответствует количеству найденных гиперссылок.

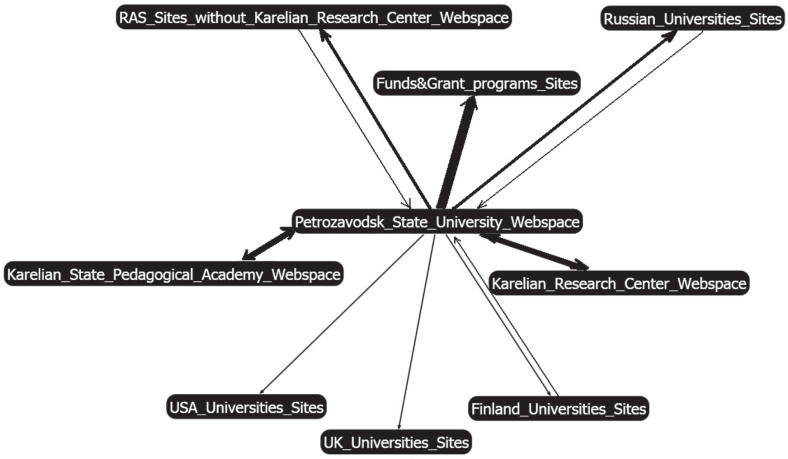


Рис. 3. Гиперссылочные связи между веб-пространством ПетрГУ и другими подмножествами сайтов

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

«Внутренняя» гиперссылочная связность веб-сайтов ПетрГУ во многом получена за счет ссылок, связывающих головной сайт с другими сайтами. Это понятно и объяснимо, поскольку существуют документы, регламентирующие работы по наполнению и развитию официального сайта ПетрГУ [5]. Однако эти документы касаются только головного сайта и не относятся к веб-пространству ПетрГУ в целом. Большое количество веб-сайтов, очевидно относящихся в веб-пространству ПетрГУ, не подпадают под действие указанных документов, и деятельность по их наполнению и развитию вполне можно назвать самодеятельной. Одним из результатов такой самодеятельности является отсутствие в веб-пространстве ПетрГУ, например, таких очевидных гиперссылок, как ссылки на сайты вышестоящих и подчиненных структур. Это, в свою очередь, приводит к «изолированным» и «висячим» сайтам в веб-пространстве ПетрГУ и значительно снижает показатели его присутствия в Вебе.

Документы, определяющие деятельность по развитию веб-пространства университета, несомненно, должны регламентировать не только порядок предоставления доменных имен (если речь идет о поддоменах головного сайта), но и рамочные правила размещения информации на таких сайтах веб-пространства ПетрГУ.

Использование для университетских веб-сайтов доменных имен, не ассоциируемых с доменом головного сайта, существенно снижает ряд характеристик присутствия университетского веб-пространства в Google и Яндекс. В то же время следует помнить о том, что наличие гиперссылок с таких сайтов может повысить значение вебометрического индикатора «ссылочная популярность» для веб-пространства университета (если такие гиперссылки есть). А для того чтобы они были в обязательном порядке, это требование также должно быть отражено в документах, регламентирующих деятельность веб-пространства университета.

Анализ «внешних» гиперссылок, сделанных с сайтов веб-пространства ПетрГУ, показывает высокую активность его участников. К сожалению, не все такие гиперссылки оказывают положительное влияние на имидж веб-пространства университета.

Большое количество «внешних» гиперссылок сделано на российские и зарубежные сайты университетов, научных учреждений, факультетов, кафедр, библиотек, грантодателей и др. В контексте присутствия веб-ресурсов в Вебе важным индикатором является количество гиперссылок, сделанных с внешних (по отношению к веб-пространству университета) сайтов на университетские сайты. В частности, еще более значимы «обратные» гиперссылки, то есть ссылки с тех сайтов, на которые сделаны ссылки с сайтов ПетрГУ. Насыщенные гиперссылочные связи на сегодняшний день обнаружены только с веб-пространствами КарНЦ РАН и КГПА. Во всех остальных рассмотренных случаях такие связи либо очень слабые, либо вовсе отсутствуют.

На эту ситуацию невозможно повлиять, используя внутриведомственные регламенты. Административное решение вопроса в данном случае заключается в том, что при подписании

договоров о сотрудничестве с другими организациями надо включать в текст пункт о взаимных гиперссылках на официальных сайтах. При этом очевидно, что ссылочная популярность веб-ресурсов в гораздо большей степени зависит от интереса к ним, а значит, от таких факторов, как их содержание, оформление и многих других, выходящих за рамки данной статьи.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития Петрозаводского государственного университета на 2012–2016 годы и гранта РГНФ № 12-03-12001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зеркала сайтов – Яндекс.Помощь: Вебмастер [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://help.yandex.ru/webmaster/?id=995297
2. Ланкин В. Е., Горелова Г. В., Сербин В. Д., Арутюнова Д. В., Татарова А. В., Баканов Г. Б., Макарова Е. Л. Исследование и разработка организационных систем управления в высших учебных заведениях. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. 178 с.
3. Печников А. А. Модель университетского Веба // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2010. № 6. С. 208–214.
4. Печников А. А., Чернобровкин Д. И. Адаптивный краулер для поиска и сбора внешних гиперссылок // Управление большими системами. Вып. 36. М.: ИПУ РАН, 2012. С. 301–315.
5. Приказ ректора ПетрГУ № 294 от 01.06.2007 г. «Об упорядочении работы по информационному наполнению и развитию официального сайта ПетрГУ» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://petrsu.ru/Structure/RCNIT/prikaz_294.
6. Типовое положение о высшем учебном заведении. Постановление Правительства Российской Федерации от 14 февраля 2008 г. № 71 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://government.consultant.ru/page.aspx?948857
7. Чернобровкин Д. И., Печников А. А. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ «Программа для поиска и сбора внешних гиперссылок BeeCrawler» Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам РФ № 2012619665 от 26 октября 2012 г.

Pechnikov A. A., Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)
Derbeneva O. Yu., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

HYPERLINKS' ANALYSIS OF PETROZAVODSK STATE UNIVERSITY WEB SPACE

A study of hyperlinks obtained from the informational web space of Petrozavodsk State University was carried out. Low connectivity of the sites, making up the university web space, was shown. The number of identified counter references from academic sites in Russia, UK, USA, and Finland was insignificant. The obtained research results forwarded a number of recommendations instrumental in the improvement of the university sites' presence on the Web. The described methods and approaches together with obtained results may be useful for developers of the web resources of other Russian universities and scientific institutions.

Key words: web space, hyperlink, academic sites, connectivity of sites

REFERENCES

1. *Zerkala saitov – Yandex.Pomosch: Webmaster* [Mirror sites – Yandex.Help: Webmaster]. Available at: http://help.yandex.ru/webmaster/?id=995297
2. Lankin V. E., Gorelova G. V., Serbin V. D., Arutyunova D. V., Tatarova A. V., Bakanov G. B., Makarova E. L. *Issledovanie i razrabotka organizatsionnykh system upravleniya v vysshikh uchebnykh zavedeniyakh* [Research and development of organizational management systems in higher education]. Taganrog, TIT SFU Publ., 2001. 178 p.
3. Pechnikov A. A. Model of a university Web [Model' universitetskogo Weba]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo* [Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod]. 2010. № 6. P. 208–214.
4. Pechnikov A. A., Chernobrovkin D. I. Adaptive crawler for search and gathering of external hyperlinks [Adaptivnyi krauler dlya poiska i sbora vneshnikh giperssylok]. *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Large-scale Systems Control]. 2012. Vol. 36. P. 301–315.
5. *Prikaz rektora PetrGU № 294 ot 01.06.2007 "Ob uporyadochenii raboty po informatsionnomu napolneniyu i razvitiyu ofitsial'nogo saita PetrGU"* [The order № 294 PetrSU Rector of 01.06.2007 "On the regulation of work on the content and development of the official website of PetrSU"]. Available at: http://petrsu.ru/Structure/RCNIT/prikaz_294.doc
6. *Tipovoe polozhenie o vysshem uchebnom zavedenii. Postanovlenie Pravitel'stva Rossiskoi Federatsii ot 14 fevralya 2008 № 71* [Standard Regulations on higher educational institution. Government Decree of February 14, 2008 № 71]. Available at: http://government.consultant.ru/page.aspx?948857
7. Chernobrovkin D. I., Pechnikov A. A. *Programma dlya poiska i sbora vneshnikh giperssylok BeeCrawler* [Program for searching and gathering external hyperlinks BeeCrawler]. Registration certificate RF, no. 2012619665, 2012.

Поступила в редакцию 25.01.2013

Март, № 2 **Физико-математические науки** **2013**

УДК 004.9

МИХАИЛ ДМИТРИЕВИЧ ШЛЕЙ
программист отдела информационных систем финансовой и управленческой деятельности Регионального центра новых информационных технологий, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
shlei@psu.karelia.ru

АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ РОГОВ
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
rogov@petrsu.ru

КОНСТАНТИН ВИКТОРОВИЧ МАТЮШИЧЕВ
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры геометрии и топологии математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
matyushichev@hotmail.com

ОСОБЕННОСТИ КОМПЬЮТЕРНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПОСТРОЕНИЯ ЗОН ВИДИМОСТИ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ ЗАСТРОЙКИ И РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ*

Представлено описание реализации алгоритма построения зон видимости объектов поселений в программной системе при помощи средств объектно-ориентированного программирования. В качестве исходной информации для работы алгоритма используется трехмерная модель поселения. В результате работы алгоритма строятся зоны видимости исследуемого объекта с учетом рельефа и взаимного расположения всех строений поселений. Особенностью реализации данного алгоритма является возможность его работы в обычном и прогрессивном режимах. В обычном режиме сначала выполняются все необходимые расчеты, а затем зоны видимости выводятся пользователю на экран совместно с генеральным планом поселения. В прогрессивном режиме зоны видимости выводятся по мере их расчета: сначала пользователю предоставляется изображение в низком разрешении, затем по мере завершения вычислений изображение на экране детализируется. Предложенный алгоритм реализован в программной системе, которая позволяет решать историко-архитектурные задачи по оценке видимости различных структурообразующих элементов поселений: одиночного строения, архитектурного ансамбля, водоема, а также по оценке замкнутости застройки.

Ключевые слова: программный комплекс, историко-архитектурные исследования, моделирование объектов поселений, прогрессивный алгоритм

Задача определения на местности зон видимости различных объектов возникает при проведении историко-архитектурных исследований поселений, при проектировании застройки, при выборе места размещения высотных станций сотовой связи и т. д. Построение и использование компьютерных трехмерных моделей поселений существенно упрощает решение данной задачи. Аналогичные модели и алгоритмы используются при выводе на экран трехмерной графики и моделировании интеллектуального поведения персонажей в компьютерных играх. Но при этом существующие методы определения видимости предназначены в первую очередь для определения областей местности, видимых из определенной точки [7], [8]. Например, в геоинформационной системе ArcGIS реализован модуль 3D Analyst, предоставляющий средства для определения видимой зоны поверхности для заданной точки наблюдения [6]. Поэтому в общем виде данные методы трудно применять для анализа изменения оценки видимости исследуемого объекта с различных мест поселения. Таким образом, задача построения зон видимости исследуемого объекта в трехмерных моделях поселений с использованием количественной оценки видимости остается актуальной.

В данной статье описаны особенности компьютерной реализации алгоритма построения зон видимости природных и рукотворных объектов поселений [5]. Алгоритм реализован в виде программного модуля информационной системы (ИС) комплексного архитектурного анализа планировочной структуры поселений «СКАПС».

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА «СКАПС»

Для замены ручного расчета множества объемно-планировочных характеристик планировочной структуры традиционных сельских поселений при проведении историко-архитектурных исследований и повышения точности

© Шлей М. Д., Рогов А. А., Матюшичев К. В., 2013

расчета разработана ИС «СКАПС» [3], [4]. Данная информационная система позволяет проводить комплексные исследования для анализа степени учета структурообразующего влияния солнца, водоемов и других объектов местности при организации застройки у разных народов.

В качестве исходной информации для работы ИС «СКАПС» выступают: генеральный план местности, информация о географической широте поселения и месяце наблюдения, матрица высот местности, исследуемый объект наблюдения. После того как пользователь загрузит в систему необходимую информацию, система автоматически выполнит генерацию рельефа, поиск построек на плане местности, рассчитает продолжительности освещения для всех них и построит зону видимости исследуемого объекта. Кроме этого можно рассчитать ряд статистических показателей по характеристикам освещенности и видимости для поселения в целом, которые можно использовать для сравнения при проведении исследования двух и более поселений.

Система разработана в среде Microsoft Visual Studio с использованием объектно-ориентированного подхода [3], [4].

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ ЗОН ВИДИМОСТИ ОБЪЕКТОВ ПОСЕЛЕНИЙ

Работа алгоритма построения зон видимости опирается на следующие классы.

1. Класс «Точка» определяет точки трехмерной модели поселения. Содержит три свойства: X, Y, $Z \in R$, которые определяют координаты точки.

2. Класс «Треугольник» определяет элементарный элемент триангуляционной поверхности. Содержит следующие свойства и методы:

- A, B, C класса «Точка». Определяют вершины треугольника.
- O класса «Точка». Определяет центр масс треугольника. Точка определяется при создании объекта как среднее арифметическое всех вершин треугольника $O\left(\frac{x_a+x_b+x_c}{3}, \frac{y_a+y_b+y_c}{3}, \frac{z_a+z_b+z_c}{3}\right)$.
- Функция *getVisibTriangl(N – точка)* предназначена для расчета оценки видимости данного треугольника из заданной точки наблюдения N. Результат выполнения функции – вещественное число. Подробное описание реализации данной функции представлено ниже.

3. Класс «Постройка» определяет модели построек поселения. Она содержит следующие свойства:

- [*Trs*] – массив треугольников, из которых состоит поверхность объекта.
- *TypeBuild* $\in N$ – тип постройки. Может принимать два значения: 1 – жилая постройка, 2 – вспомогательная постройка.

4. Класс «Рельеф» предназначен для определения модели поверхности рельефа поселения. Содержит массив треугольников – [*Trs*], описывающих поверхность рельефа. В данном классе реализован метод *getZp(P – точка)*. Предназначен для определения высоты рельефа в точке с координатами X, Y произвольной точки P. Результат определения высоты записывается в координату Z точки P.

5. Класс «Объект наблюдения» предназначен для определения модели исследуемого объекта. Содержит следующие свойства и методы:

- [*Trs*] – массив треугольников, описывающих поверхность исследуемого объекта.
- $[V_{i,j}]$, $i=1..n$, $j=1..m$ $V_{i,j} \in R$ – массив оценок видимости исследуемого объекта с различных точек местности (где $n \times m$ – общее количество наблюдений).
- Процедура *getVisibObject(trel – рельеф,* [*tbuild*] *– массив построек, typeR – целое число,* ΔP *– целое число, q – целое число).* Процедура предназначена для построения зон видимости исследуемого объекта поселения. Описание реализации данной функции представлено далее.

Теоретическая основа метода расчета оценки видимости исследуемого объекта из заданной точки наблюдения подробно представлена в [5]. Суть данного метода заключается в том, что в качестве оценки видимости исследуемого объекта используется сумма оценок видимости всех видимых треугольников модели данного объекта. Произвольный треугольник ABC считается видимым из точки N, если будет видна точка O, его центр масс. В качестве оценки видимости треугольника используется площадь центральной проекции этого треугольника на плоскость d, перпендикулярную направлению NO и удаленную на расстояние 1 от точки N. Пример построения проекции представлен на рис. 1.

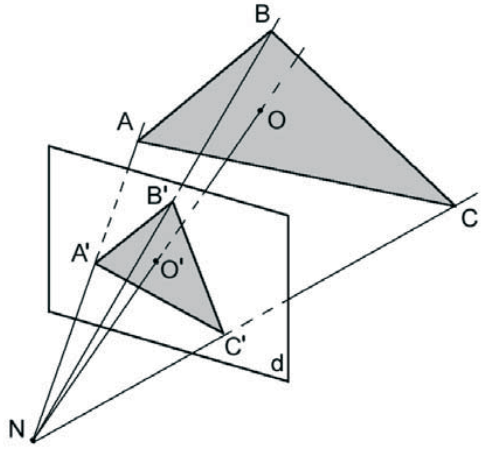


Рис. 1. Построение проекции объекта наблюдения

Метод оценки видимости треугольника из произвольной точки местности реализован при помощи программной функции

getVisibTriangl(N – точка) класса «Треугольник». В качестве исходных данных для функции выступают сам объект *TR* класса «Треугольник» и входной параметр функции – объект *N* класса «Точка». Координаты вершин треугольника хранятся в свойствах $A(x_a,y_a,z_a)$, $B(x_b,y_b,z_b)$, $C(x_c,y_c,z_c)$, координаты точки наблюдения $N(x_n,y_n,z_n)$. Далее представлено описание работы функции.

Шаг 1. Уравнение плоскости *d*, необходимой проекции треугольника *ABC* и находящейся на расстоянии 1 от точки *N* и перпендикулярно прямой *ON* имеет вид

$$A_d \times x + B_d \times y + C_d \times z + (1 - A_d \times x_0 - B_d \times y_0 - C_d \times z_0) = 0,$$

где $A_d = \frac{x_n - x_o}{|ON|}, B_d = \frac{y_n - y_o}{|ON|}, C_d = \frac{z_n - z_o}{|ON|}$, , x_0, y_0, z_0 – координаты центра тяжести треугольника *ABC*.

Шаг 2. Координаты вершины $A'(x_{a'},y_{a'},z_{a'})$ проекции треугольника *ABC* на плоскость *d* вычисляются следующим образом.

$$\begin{cases} x_{a'} = x_n + (x_n - x_a)\dfrac{A_d(x_n - x_0) + B_d(y_n - y_0) + C_d(z_n - z_0) + 1}{A_d(x_n - x_a) + B_d(y_n - y_a) + C_d(z_n - z_a)} \\ y_{a'} = y_n + (y_n - y_a)\dfrac{A_d(x_n - x_0) + B_d(y_n - y_0) + C_d(z_n - z_0) + 1}{A_d(x_n - x_a) + B_d(y_n - y_a) + C_d(z_n - z_a)} \\ z_{a'} = z_n + (z_n - z_a)\dfrac{A_d(x_n - x_0) + B_d(y_n - y_0) + C_d(z_n - z_0) + 1}{A_d(x_n - x_a) + B_d(y_n - y_a) + C_d(z_n - z_a)} \end{cases}.$$

Аналогичным способом находим координаты остальных вершин $B'(x_{b'},y_{b'},z_{b'})$, $C'(x_{c'},y_{c'},z_{c'})$.

Шаг 3. Оценка видимости треугольника *ABC* из точки *N* равна площади треугольника *A'B'C'*, то есть половине длины вектора, полученного как векторное произведение векторов, соответствующих двум сторонам треугольника *A'B'C'*.

$$S(A'B'C') = \frac{1}{2}\left|\left[A'B', A'C'\right]\right| = \frac{1}{2}|A'B'| \times |A'C'| \times \sin(\varphi),$$

где φ – угол между векторами *A'B'* и *A'C'*.

Шаг 4. Возвращаем оценку видимости треугольника *S(A'B'C')*. Выход из функции.

Описанный выше алгоритм является основой алгоритма оценки видимости исследуемого объекта из заданной точки и, соответственно, метода построения зон видимости объекта [5]. Метод построения зон видимости реализован при помощи процедуры *getVisibObject(trel – рельеф,* [*tbuild*] *– массив построек, typeR – целое число,* ΔP *– целое число, q – целое число)* класса «Объект наблюдения».

Исходными данными для работы процедуры является сам объект наблюдения *Obj* класса «Объект наблюдения», поверхность объекта задается при помощи массива треугольников [*Trs*], а также входные параметры процедуры: данные о рельефе местности, информация обо всех постройках местности, информация о режиме работы алгоритма – *typeR* (1 – обычный режим, 2 – прогрессивный), длина сторона квадрата для разбиения территории на участки – ΔP, *q* – количество категорий оценок видимости.

Особенностью реализации данной процедуры является возможность ее работы в обычном и прогрессивном режимах. В первом случае сначала выполняются все необходимые расчеты, а затем зоны видимости выводятся пользователю на экран совместно с генеральным планом поселения. Во втором случае зоны видимости выводятся по мере их расчета: сначала пользователю предоставляется изображение в низком разрешении, затем по мере завершения вычислений изображение на экране детализируется.

ОБЫЧНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ АЛГОРИТМА

Пусть исследуемая территория ограничена прямоугольником *ABCD*. Точка *O* – центр прямоугольника. Суть работы процедуры заключается в разбиении территории на квадраты (с заданной стороной ΔP), для каждого квадрата выполняется расчет оценки видимости исследуемого объекта *Obj*. Под оценкой видимости объекта с заданного квадрата понимается оценка видимости объекта из центра данного квадрата.

Определим, на какое количество квадратов с размером стороны ΔP можно разделить исследуемую территорию *ABCD*. Сторона *AD* делится на $n = 2 \times \left[\frac{AD}{2 \times \Delta P}\right]$ квадратов, сторона *AB* – на $m = 2 \times \left[\frac{AB}{2 \times \Delta P}\right]$ квадратов. Общее количество квадратов $n \times m$.

Замечание. Полученное число квадратов всегда целое и четное. Сетка квадратов для построения зон видимости строится таким образом, чтобы она была симметрична относительно центра прямоугольника *ABCD*. В случае если исследуемая территория не разбивается на целое число квадратов, в областях рядом с границей построение зон видимости не выполнятся (на рис. 2 данные области выделены штриховкой).

Координаты всех точек наблюдения определяются массивом *M*. Координаты точек наблюдения определяются следующим образом:

$$M_{i,j} = (x_i, y_j) = \left(Ox + \left(i - \frac{m-1}{2}\right) \times \Delta P,\ Oy + \left(j - \frac{n-1}{2}\right) \times \Delta P\right),$$

где $i = 1...m$, $j = 1...n$.

После этого при помощи алгоритма расчета оценки видимости объекта определяются все необходимые оценки видимости (*V* – массив оценок видимости) исследуемого объекта со всех квадратов, на которые была разбита территория: $V_{i,j} = Visib(M_{i,j})$, где *Visib(точка)* – функция определения оценки видимости исследуемого объекта из заданной точки [5].

Далее для каждой точки наблюдения определяется степень видимости объекта (по *q*-балльной шкале) $Vq_{i,j} = \left[\frac{(V_{i,j} - V_{\min}) \times q}{V_{\max} - V_{\min}}\right]$ для построения и вывода на экран зон видимости объектов. В за-

висимости от степени видимости объекта каждому квадрату присваивается определенный цвет. Чем выше оценка видимости, тем цвет темнее.

На рис. 2 приведен пример результата работы данного алгоритма. На исследуемой территории расположены две постройки. Территория разбита на квадраты со стороной, равной $OO_1 = \Delta P$. Для постройки (объект наблюдения), закрашенной темным цветом, построены зоны ее видимости. Наилучшая видимость постройки обеспечивается с ближайших квадратов, которые закрашены более темным цветом. В квадратах с центрами $V_{1,1}$, $V_{1,2}$ видимость отсутствует, поскольку вторая постройка является препятствием для наблюдения исследуемого объекта.

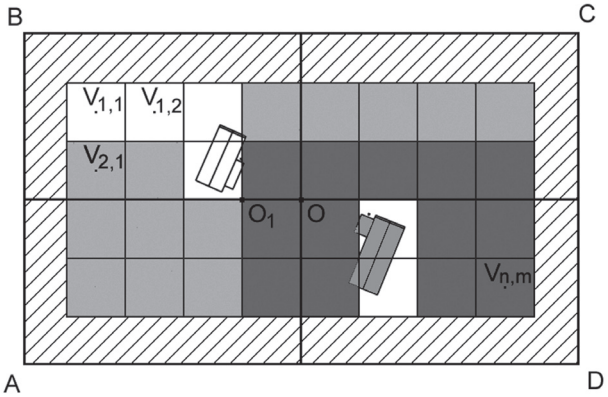


Рис. 2. Пример работы алгоритма построения зон видимости

Обычный режим построения зон видимости объекта удобно применять, когда исследователю известны все необходимые параметры работы для осуществления данной процедуры, и ему нужен только результат. Поскольку в ходе работы алгоритма выполняется большой объем вычислений, то время построения зон видимости занимает достаточно продолжительное время (для поселений большой площади и большом количестве точек наблюдения время работы процедуры может занимать несколько часов). Поэтому, если исследователю необходимо оперативно получить предварительную информацию о видимости объекта, то данный режим работы для него неудобен. Для решения этой проблемы реализован прогрессивный режим работы описываемой процедуры.

ПРОГРЕССИВНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ АЛГОРИТМА

Суть работы процедуры в прогрессивном режиме заключается в поэтапном разделении территории на квадраты. На первом этапе берутся большие размеры квадратов, таким образом строятся зоны видимости с низким разрешением, затем на следующем этапе большие квадраты разбиваются на девять равных квадратов с меньшими размерами для построения более детальных зон. Процедура разбиения продолжается до тех пор, пока не получим квадраты с размерами, заданными пользователем. Аналогичный подход применяется при передаче изображений через Интернет [2]. Например, при загрузке большого изображения в браузере оно показывается сначала в плохом качестве, а затем по мере загрузки качество улучшается.

Как и в обычном режиме работы, исследуемая территория *ABCD* разбивается на $n \times m$ количество квадратов с заданным размером стороны ΔP. Определяются точки наблюдения $M_{i,j}$, где $i = 1...m$, $j = 1...n$.

Поскольку с каждым этапом детализации зон видимости квадраты, на которые разбита территория, делятся на девять равных частей, то, зная общее количество точек наблюдения ($n \times m$), можно определить количество этапов по следующей формуле: $k = log_3(min(n,m)) + 1$. Таким образом, количество этапов зависит от того, на сколько раз меньшая сторона прямоугольника *ABCD* делится на число 3.

Длина стороны квадрата для первого этапа вычисляется следующим образом: $O_1'O = \Delta P$. Зная длину стороны квадрата, найдем необходимые точки наблюдения и их координаты – $M_{i1,j1}$, где $i_1 = 1...m_1$, $j_1 = 1...n_1$. Для полученных точек наблюдения рассчитываются оценки видимости объекта наблюдения и строятся предварительные зоны видимости. После этого размер стороны квадратов уменьшается в три раза и выполняется новое построение зон видимости. Данный процесс повторяется до тех пор, пока не выполнятся все этапы. На последнем этапе выполняется построение итоговых зон видимости для квадратов с заданной пользователем размером стороны ΔP.

Для ускорения работы данной процедуры при делении квадрата, построенного на предыдущем этапе, на девять равных квадратов оценка видимости центрального квадрата не пересчитывается заново, поскольку она равняется оценке видимости из центра исходного квадрата.

На рис. 3 приведен пример работы процедуры построения зон видимости в прогрессивном режиме работы за 2 этапа. Вариант а) представляет разделение территории на квадраты для первого этапа. Вариант б) – разделение для второго этапа. Серым фоном отмечены квадраты, для которых не требуется выполнять расчет оценки видимости. Под вариантами в) и г) представлены построенные зоны видимости на различных этапах.

Прогрессивный режим работы процедуры удобно использовать для построения зон видимости на генеральных планах большой площади и большом количестве точек наблюдений. Это особенно удобно, когда пользователь окончательно не выбрал параметры работы алгоритма и не определился с исследуемым объектом, но ему нужна предварительная информация о видимости того или иного объекта.

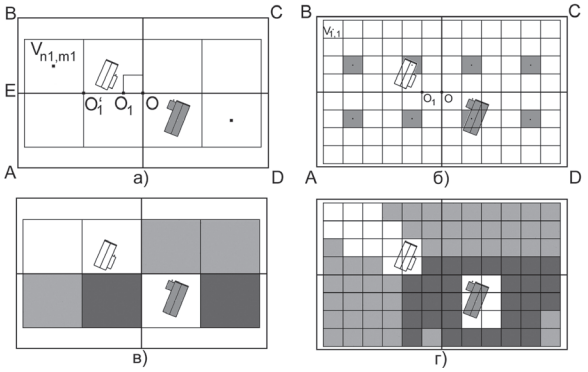


Рис. 3. Пример прогрессивного режима работы процедуры построения зон видимости

Для ускорения работы алгоритма массив точек наблюдения разбивается на несколько частей, и обработка каждой части запускается при помощи отдельного потока. Данный подход позволяет наиболее полно использовать мощности многоядерных вычислительных систем. После завершения работы представленной выше процедуры выполняется расчет статистических показателей с информацией о процентном соотношении площадей зон видимости для различных степеней видимости. То есть определяется, сколько процентов площади исследуемой территории занимает зона видимости каждого цвета.

Далее приведен ряд задач по оценке видимости различных объектов местности при проведении исследования поселений. В качестве примеров используется реальное сельское поселение Лахта.

ОЦЕНКА ВИДИМОСТИ ОДИНОЧНОЙ ПОСТРОЙКИ

Пример решения задачи построения зон видимости строения поселения описан в статье [5]. Данная задача использовалась для апробации алгоритма оценки видимости объектов. В качестве объекта исследования использовались различные строения как сельских, так и городских поселений. Проверка системы показала, что предложенные алгоритмы можно использовать для построения зон видимости отдельных строений городской или сельской застройки при выполнении историко-архитектурных исследований.

ОЦЕНКА ВИДИМОСТИ АРХИТЕКТУРНОГО АНСАМБЛЯ

Предложенный метод можно использовать для построения зон видимости не только отдельных зданий, но и для нескольких строений – архитектурного ансамбля. В данном случае в качестве исследуемого объекта при работе системы выступает массив треугольников, описывающих поверхности моделей исследуемых строений. В радиусе 30 м от застройки оценка видимости не рассчитывалась для ускорения алгоритма, поскольку для данной области информация о видимости объекта неактуальна. Полученный результат может использоваться при определении наиболее удачных мест для обзора определенной части застройки.

ОЦЕНКА ВИДИМОСТИ ВОДОЕМА

При построении зон видимости водоема в качестве исследуемого объекта выступает массив треугольников, описывающих поверхность водоема.

Следует заметить, что для моделирования поверхности водоема можно использовать треугольники бóльших размеров по сравнению с моделями построек. На рис. 4 приведен результат построения зон видимости водоема. Полученный результат можно использовать для выбора места строительства, которое обеспечивает возможность отличного обзора водоема. Также с помощью построенных зон видимости можно проводить исследование исторических поселений с целью выявления структурообразующих элементов застройки.

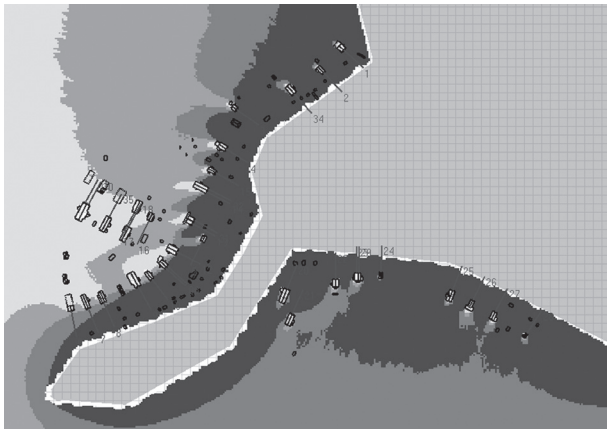


Рис. 4. Зоны видимости водоема

ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОТЫ АЛГОРИТМА

На примере построения зон видимости водоема было проведено исследование временных характеристик работы системы. В качестве исследуемого поселения, как уже говорилось выше, используется реальное поселение Лахта (площадь моделируемой территории 720 x 590 м^2). Размер квадратов, для которых определялась оценка видимости, – 1 м. В радиусе 5 м от исследуемого объекта оценка видимости не подсчитывалась. Время работы системы проверялось на различных конфигурациях вычислительной системы. В таблице приведены результаты исследования, из которых хорошо видно, что время работы по определению зон видимости зависит от вычислительной мощности центрального процессора. Наилучший по времени результат обеспечивается на рабочей станции с двумя процессорами, позволяющей одновременно выполнять 16 параллельных процессов.

Временные характеристики работы алгоритма построения зон видимости водоема на различных компьютерах

Параметры процессора	Количество ядер	Количество потоков	Время работы обычного алгоритма	Время работы прогрессивного алгоритма
Intel(R) Core(tm) 2 CPU 6420 @ 2.13GHz	2	2	2 часа 32 мин	2 часа 40 мин
Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2603 0 @ 1.80 MHz	4	4	1 час 45 мин	1 час 50 мин
2 процессора Intel(R) Xeon(R) CPU E5620 @ 2.40 MHz	8	16	50 мин	55 мин

При решении данной задачи в классическом виде исследователю необходимо выполнить этап полевых работ по сбору информации о видимости исследуемого объекта. Данный этап может занимать от нескольких дней до нескольких недель. Поэтому использование системы даже на относительно «слабых» вычислительных системах позволяет повысить скорость и точность проведения исследований поселений.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАМКНУТОСТИ ЗАСТРОЙКИ

Количественным описанием степени замкнутости архитектурного пространства традиционных сельских поселений занимался В. Ф. Гуляев. В качестве меры замкнутости использовалось отношение занимаемой площади проекции строений к незанятой на мнимом «экране» кругозора наблюдателя, на который проецируются постройки [1]. Данная степень замкнутости определяется для различных точек предполагаемого маршрута. Недостатком этой оценки является невозможность рассчитать замкнутость для определенной зоны поселения.

Используя метод оценки видимости объектов, можно определить замкнутость застройки другим способом. Для этого в качестве исследуемого объекта используем массив K, который включает в себя все строения поселения. Каждое строение поселения описывается набором треугольников $\mu_1, \mu_2, \ldots, \mu_K$. В качестве оценки замкнутости для заданной точки местности используется оценка видимости всех строений поселения: $\widetilde{V}_{(x,y)} = \sum_{i=1}^{K} \sum_{j \in \mu_i} getVisibTriangl(x, y)$. Оценка замкнутости рассчитывается для различных точек поселения, и с их помощью строятся зоны замкнутости застройки. Достоинством такого метода является то, что зоны замкнутости застройки можно посчитать для всего поселения сразу. На рис. 5 приведен пример построенных зон замкнутости для застройки поселения Лахта. Зоны с наиболее высокой оценкой замкнутости выделены более темным цветом.

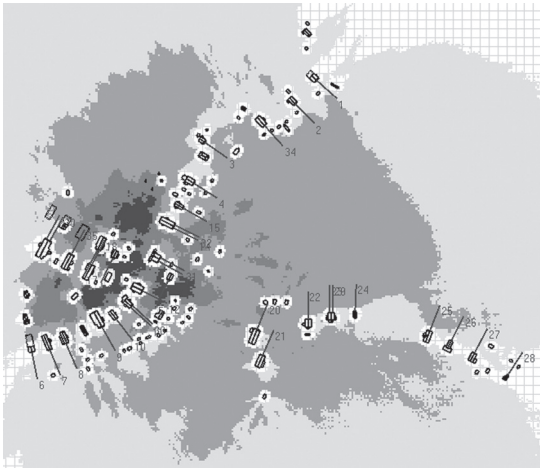


Рис. 5. Зоны замкнутости застройки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компьютерная реализация предложенного метода построения зон видимости объектов поселений в информационной системе позволяет ускорить процесс исследований, направленных на анализ структурообразующих объектов местности при организации застройки у разных народов.

С помощью примеров показан ряд задач, для решения которых можно использовать разработанную систему: построение зон видимости, как отдельного строения, так и определенной части застройки, построение зон видимости водоема, построение зон замкнутости всей застройки поселения.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуляев В. Ф. Количественное описание степени замкнутости архитектурного пространства традиционных сельских поселений // Проблемы исследования, реставрации и использования архитектурного наследия Русского Севера: Межвуз. сб. Петрозаводск, 1988. С. 48–54.
2. Симаков А. В. Прогрессивная передача изображений через Интернет // Нелинейные проблемы механики и физики деформируемого твердого тела. СПб.: СПбГУ, 2004. Вып. 8. С. 147–161.
3. Шлей М. Д. Информационная система расчета характеристик планировочной структуры традиционных сельских поселений // Современные проблемы науки и образования. – электрон. ст. – М.: Издательский Дом «АКАДЕМИЯ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ», 2012. № 6 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.science-education.ru/pdf/2012/6/320.pdf
4. Шлей М. Д. Система для определения зон видимости объектов поселения [Электронный ресурс] (17 Mb). Петрозаводск, 2012. Свидет. о гос. рег. № 18469 от 24.07.2012.

5. Ш л е й М. Д. Алгоритм построения зон видимости объектов поселений // Вестник Южно-Уральского университета. Сер. «Математическое моделирование и программирование». 2013. Т. 6. Вып. 1. С. 112–123.
6. ArcGIS Resource Center [Electronic resource]. Access mode: http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/
7. F o r t M. Visibility and proximity on triangulated surfaces [Electronic resource]. Access mode: http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/7890/tmfm.pdf?sequence=1
8. N a g y G. Terrain visibility // Rensselaer Polytechnic Institute. 1994.

Shley M. D., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Rogov A. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Matyushichev K. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

CHARACTERISTIC FEATURES OF COMPUTERIZED VISIBILITY ZONES' CONSTRUCTION FACTORING IN SETTLEMENT DEVELOPMENT AND RELIEF MODEL

The paper presents a description of the algorithm implementation used for the assessment of the objects' visibility zones. The algorithm is realized in a program system using the concepts of object-oriented programming. A three-dimensional model of the settlement involves input data for the algorithm. The result of the algorithm is a computed visibility zone of the studied object with regard to the relief of the area and mutual arrangements of all buildings. A special feature of the presented implementation is a possibility of its use in two modes: normal and progressive. In the normal mode, all computations are performed at the beginning, and then the visibility zones are show to the user together with the digital vector master plan of the settlement. In the progressive mode, the visibility zones are presented as they are computed, at first a low-resolution image is shown to the user, and then while the computations are in progress the image becomes more detailed. The designed program system can be used to solve historical and architectural problems of assessing visibility zones of the main objects in the settlement structure such as an isolated building, an architectural ensemble, a water body. It can also be facilitative in the assessment of the settlement structure proximity.

Key words: program system, historical and architectural research, modeling of settlement objects, progressive algorithm

REFERENCES

1. G u l y a e v V. F. Quantitative description of the closeness degree of the architectural space of traditional rural settlements [Kolichestvennoe opisanie stepeni zamknutosti arkhitekturnogo prostranstva traditsionnykh sel'skikh poseleniy]. *Problemy issledovaniya, restavratsii i ispol'zovaniya arkhitekturnogo naslediya Russkogo Severa.* Petrozavodsk, 1988. P. 48–54.
2. S i m a k o v A. V. Progressive image transmission via the Internet [Progressivnaya peredacha izobrazheniy cherez Internet]. *Nelineynye problemy mekhaniki i fiziki deformiruemogo tverdogo tela.* St. Petersburg, SPbGU Publ., 2004. Is. 8. P. 147–161.
3. S h l e y M. D. Information System For Computing the Characteristics of the Planning Structure of Traditional Rural Settlements [Informatsionnaya sistema rascheta kharakteristik planirovochnoy struktury traditsionnykh sel'skikh poseleniy]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya.* 2012. № 6. Available at: http://www.science education.ru/pdf/2012/6/320.pdf
4. S h l e y M. D. *Sistema dlya opredeleniya zon vidimosti ob"ektov poseleniya* [Information system for assessment of the visibility areas of settlement objects]. Svidet. o gos. reg. № 18469 ot 24.07.2012, 2012.
5. S h l e y M. D. The Algorithm for Modeling Visibility Area of Objects of the Settlement [Algoritm postroeniya zon vidimosti ob''ektov poseleniy]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo universiteta. Ser. "Matematicheskoe modelirovanie i programmirovanie"* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Mathematical Modelling, Programming & Computer Software"]. 2013. Vol. 6. № 1. P. 112–123.
6. ArcGIS Resource Center. Available at: http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/
7. F o r t M. Visibility and proximity on triangulated surfaces. Available at: http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/7890/tmfm.pdf?sequence=1
8. N a g y G. Terrain visibility // Rensselaer Polytechnic Institute. 1994.

Поступила в редакцию 28.01.2013

Март, № 2 **Физико-математические науки** **2013**

УДК 004.934.2

КИРИЛЛ КОНСТАНТИНОВИЧ ТОМЧУК
ассистент кафедры бортовой радиоэлектронной аппаратуры факультета радиотехники, электроники и связи, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
wake@inbox.ru

АНДРЕЙ ЮРЬЕВИЧ ЗИЛИНБЕРГ
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры бортовой радиоэлектронной аппаратуры факультета радиотехники, электроники и связи, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
uaz13@yandex.ru

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И БАЗОВЫЕ АЛГОРИТМЫ ВРЕМЕННОЙ СЕГМЕНТАЦИИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ

Представлен системный подход к временной сегментации речевых сигналов, основанный на разработанной иерархической модели речевых сигналов. Обосновано применение многоуровневой временной сегментации речевых сигналов и разработаны базовые алгоритмы для основных уровней сегментации: VAD-алгоритм; деление речевых сигналов на вокализованный, шумовой, взрывной сегменты; сегментация вокализованных фрагментов на периоды основного тона. Предложен возможный вариант разделения смежных вокализованных звуков с помощью анализа их структуры.

Ключевые слова: речь, модель речевого сигнала, сегментация, VAD, основной тон

ВВЕДЕНИЕ

Автоматическая обработка речи является современной и актуальной задачей, представленной широким кругом областей приложений: шумоподавление, сжатие речевых сигналов (РС), распознавание, модификация РС, кодирование и т. д. [3], [4], [5], [7], [8], [9], [10], [11], [15]. В силу недостаточной изученности процесса восприятия речи человеком, сложности структуры речевого сигнала, индивидуальных особенностей речи каждого человека, наличия огромного числа языковых культур многие из задач, стоящих перед автоматической обработкой речи, так и не были решены в достаточной степени для свободного практического применения.

Голосовой аппарат человека является акустической системой, состоящей из вибраторов, возбуждаемых потоком воздуха из легких в соответствии с законом Бернулли, и резонаторов – глотки, носовой и ротовой полостей. Механизмы возбуждения акустических колебаний связаны либо с работой гортани, либо с возникновением шумных или импульсных звуков при прохождении воздушного потока через сужения, образующиеся в определенных местах речевого тракта [13].

Все гласные звуки произносятся при активности только голосовых связок и без создания сужений в голосовом тракте. При произнесении согласных звуков в речевом аппарате возникают препятствия для свободного прохождения воздуха. В результате согласные, в том числе вокализованные ([*б*], [*н*], [*р*], …), во-первых, имеют меньшую мощность сигнала, по сравнению с гласными, а во-вторых, если при произнесении звука воздух с силой проталкивается через значительные сужения, в сигнале появляется шумовая компонента ([*з*], [*с*], [*ш*], [*т'*]). Кроме того, при произнесении согласного голосовые связки могут быть неактивны – тогда произносится либо чисто шумовой звук, возникающий при длительном протягивании воздуха через значительное сужение (ср. вокализованный [*з*] и шумовой [*с*]), либо так называемый взрывной звук, возникающий при силовом проходе воздуха через резко образуемое отверстие ([*п*], [*т*], [*т'*], ...). Таким образом, вокализованные (звонкие) звуки формируются с участием голосовых связок, шумовые (фрикативные) – за счет прохождения воздуха через сужения голосового тракта, а взрывные – с помощью кратковременного смыкания речевого аппарата, создания в речевых полостях повышенного давления и затем резкого размыкания аппарата. Частота колебания голосовых связок при произнесении вокализованных звуков называется частотой основного тона (ОТ). Форма голосового тракта остается в основном неизменной на интервале 10–30 мс. На этом интервале речь можно рассматривать как квазистационарный случайный процесс, поэтому большинство алгоритмов предварительной обработки основываются на анализе РС на указанном интервале времени.

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К МНОГОУРОВНЕВОЙ ВРЕМЕННОЙ СЕГМЕНТАЦИИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ

На основе информации о строении речевого сигнала, об особенностях реализаций звуков

© Томчук К. К., Зилинберг А. Ю., 2013

русской речи задача временной сегментации может быть разбита на несколько последовательно осуществляемых этапов, каждый из которых представляет собой соответствующий уровень сегментации РС (рис. 1).

На первом уровне сегментации (блок 1, рис. 1) происходит разбиение речевого сигнала на фрагменты активной речи и пауз. При этом в роли паузы может также выступать смычка – кратковременная пауза в пределах слова перед взрывным звуком. Вторым уровнем сегментации (блок 2, рис. 1) является разбиение активных участков речи на фрагменты, соответствующие трем основным типам звуков: вокализованные, шумовые и взрывные. Третий уровень (блок 5, рис. 1) относится к дополнительной сегментации только вокализованных фрагментов – разделение РС на отдельные периоды основного тона. Разбиение на периоды основного тона не обязательно является финальной стадией сегментации: в дальнейшем на ее основе может быть выполнено разбиение вокализованных фрагментов на отдельные аллофоны или группы из однотипных аллофонов. В данном случае становится возможным построение собственных нейронных сетей, марковских моделей и других эталонов для различных типов фонем. Например, в системе верификации, разрабатываемой компанией SPIRIT Corp. [12], процедура классификации, основывающаяся на смешанных гауссовских моделях, позволяет принимать во внимание отдельные фонемы или группы фонем и особенности их произнесения конкретным диктором.

Рис. 1. Этапы сегментации и параметризации речевого сигнала

На рис. 1 приведен алгоритм предлагаемого системного подхода к сегментации и последующей параметризации речевого сигнала.

На первом шаге обработки (блоки 1…3, рис. 1) сигнал сегментируется на фрагменты активной речи и паузы. Паузы не подвергаются дальнейшей сегментации, а информативным параметром (блок 9) участков паузы является их длительность. Над участками активной речи производится следующий, второй, уровень сегментации, на котором выделяются сегменты, соответствующие определенным типам звуков: вокализованные (блок 4), шумные (блок 8), взрывные глухие (блок 7).

Сегментация «речь / пауза»: VAD-алгоритм (блок 1, рис. 1)

Алгоритм определения временных границ речевой активности говорящего и в зарубежной, и в отечественной литературе сокращенно обозначают как VAD-алгоритм (Voice Activity Detection). Он позволяет произвести сегментацию сигналов по двум качественным параметрам: пауза и активность говорящего.

В результате применения VAD-алгоритма речевой сигнал становится сегментированным на A- и S-сегменты: сегменты активности говорящего A (activity) и сегменты пауз S (silence).

Одной из основных проблем, возникающих перед разработчиками VAD-алгоритма, является обеспечение его надежной работы в условиях шумов, помех, наводок. При этом алгоритм должен хорошо обнаруживать границы речевой активности даже при слабых граничных (начальных и конечных) звуках. Это могут быть шумовые звуки, сравнимые по уровню с фоновыми шумами, и плавно нарастающие / убывающие по уровню вокализованные звуки. Для борьбы с этими проблемами нами был разработан новый энергетический VAD-алгоритм.

В этом алгоритме для нахождения порога (блок 5, рис. 2) и сравнения с ним используется сигнал, полученный на основе модуля отсчетов исходного сигнала (блоки 2 и 3, рис. 2), пропущенного для подавления НЧ-наводок через высокочастотный фильтр (блок 1, рис. 2). При формировании порога определения речевой активности необходимо использовать характеристику всего набора значений отсчетов фонового шума. Это можно осуществить, определяя уровень порога на гистограмме (блок 4, рис. 2) отсчетов [2] такого фильтрованного сигнала, по которой видно общее распределение как ВЧ-шума, так и НЧ-компонент речевого сигнала. Функциональная схема такого алгоритма VAD представлена на рис. 2.

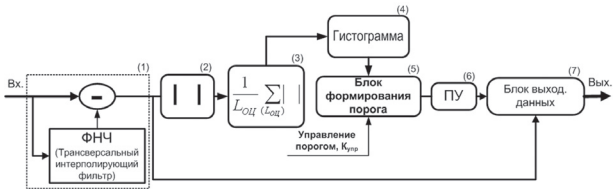


Рис. 2. Функциональная схема «энергетического» алгоритма VAD

В алгоритме VAD на интервалах оценивания текущих средних значений модулей отсчетов (длина интервала $L_{ОЦ}$ = 2,5…7 мс в зависимости от частоты дискретизации: по достаточной по шуму выборке в 50–70 отсчетов) осуществляется суммирование модулей отсчетов РС с последующей нормировкой на длину интервала (блок 3,

рис. 2). Гистограмма строится по результатам обработки отсчетов на интервале порядка 1,5…2 с, в течение которых внешний шум изменяется незначительно (стационарен). Для формирования порога активности используется мода гистограммы, характеризующая средний модуль ВЧ-сигнала на выходе фильтра (блок 1, рис. 2) в паузах.

Основным недостатком энергетического алгоритма является низкая точность определения границ слабых вокализованных звуков и – главное – высокая вероятность пропуска некоторых шумовых звуков, в особенности кратковременных шумовых звуков, расположенных обособленно от других между смычкой и паузой (например, звук [*m'*] на конце слова).

Для уменьшения неточности определения границ слабых вокализованных звуков необходимо вводить в VAD-алгоритм детектор вокализованных звуков, не зависящий от уровня сигнала (см. раздел «Сегментация “вокализованный / шумовой / взрывной”»).

Для отделения слабых шумовых звуков речи от фонового шума целесообразно воспользоваться текущим спектральным составом сигнала. Исследования показывают, что наиболее часто встречающийся фоновый шум (шум помещений, уличный шум) имеет более низкочастотный спектральный состав, нежели шумовые звуки активной речи. В этом случае для шумовых фрагментов речевого сигнала (как фоновых шумов, так и шумовых звуков) на спектрограмме вычисляется траектория «центра масс» спектра. Если оценка «центра масс» превышает некоторый пороговый уровень подряд на нескольких интервалах оценивания, есть основания полагать, что такой фрагмент относится к речевой активности.

На рис. 3 изображена временная функция только шумовой составляющей речевого сигнала, представляющего слово «*вафли*» (нешумовые составляющие вырезаны из реализации), и соответствующая спектрограмма с обозначением порога и «центра масс» спектра. На временной функции область шумов с высокой дисперсией соответствует звуку [*ф*].

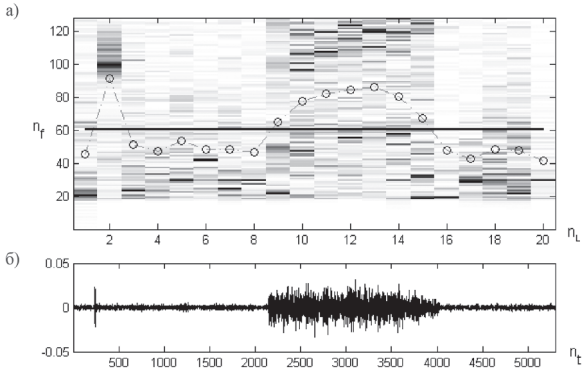


Рис. 3. Спектральное разделение речевых и фоновых шумов: а) спектрограмма сигнала с указанием траектории «центра масс» спектра и порогового уровня; б) временная функция сигнала

Сегментация «вокализованный / шумовой / взрывной» (блоки 2 и 6, рис. 1)

Разделение активных участков речи на шумовые, вокализованные и взрывные производится по выявлению характерных для определенных типов признаков. К примеру, такую сегментацию можно осуществить путем формирования выборочных корреляционных функций фильтрованной от низкочастотных наводок последовательности отсчетов на малых окнах анализа.

Задачу разделения «вокализованный / шумовой / взрывной» можно разделить на два этапа. На первом этапе производится сегментация «шумовой / нешумовой», а на втором, соответственно, сегментация нешумовых фрагментов на сегменты «вокализованный / взрывной».

Для выделения шумовых звуков пороговым параметром может являться отношение среднеквадратического отклонения (СКО) от линии нуля отсчетов речевого сигнала, пропущенного через низкочастотный фильтр, к СКО отсчетов исходного речевого сигнала:

$$K = \sigma_1 / \sigma_2; \quad \sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N} y_F^2(n)}{N}}; \quad \sigma_2 = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N} y^2(n)}{N}}, \qquad (1)$$

где σ_1 – СКО сигнала y_F (пропущенного через НЧ-фильтр исходного сигнала y); σ_2 – СКО исходного сигнала y; N – апертура прямоугольного окна низкочастотного фильтра (заметим, что весовая функция трансверсального фильтра может быть и сглаженной, например, соответствовать окнам Хемминга, Блекмана; при этом полоса среза НЧ-фильтра должна составлять порядка 500 Гц).

Для шумовых участков среднеквадратическое отклонение σ_2 от нуля исходного сигнала будет больше, чем СКО σ_1 фильтрованной версии сигнала, поэтому отношение K для шумовых участков заведомо меньше единицы.

Вокализованные фрагменты, которые соответствуют вокализованным звукам, выделяются из общей картины своей квазипериодичностью. Как известно, автокорреляционная функция периодического сигнала также является периодической функцией [4]. При реализации алгоритма вычисляются взаимные корреляционные функции (ВКФ) отрезка речевого сигнала, находящиеся на текущем окне анализа, и отрезков такой же длины, находящихся справа и слева от исследуемого. Такой подход позволяет более точно найти позиции начала и окончания вокализованного участка, нежели процесс вычисления АКФ от участка речевого сигнала с более широким окном анализа.

Для оценки периодичности следования экстремумов находятся максимумы и минимумы полученной ВКФ, вычисляется оценка среднего интервала их следования. Затем от этой оценки вычисляется оценка СКО интервалов между экстремумами. Для оценки относительной сте-

пени периодичности следования экстремумов используется отношение найденных оценок СКО и среднего интервала следования. Пример корреляционной функции для вокализованных участков показан на рис. 4. На рис. 4а приняты следующие обозначения: N – количество локальных максимумов и минимумов ВКФ; M – оценка среднего интервала; SD – оценка СКО интервалов от среднего значения.

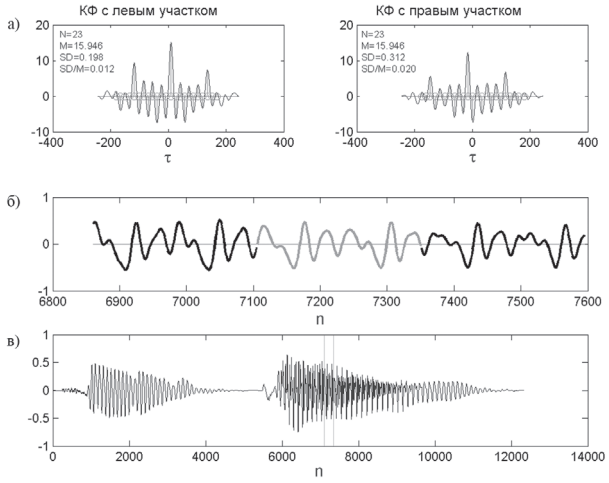


Рис. 4. Выделение вокализованных фрагментов речи: а) ВКФ исследуемого вокализованного участка речевого сигнала с двумя смежными вокализованными участками; б) временные функции исследуемого (в центре серый) участка и двух смежных; в) временная функция РС с указанием границ фрагмента, соответствующего эпюре «б» рисунка

Сегментация на периоды основного тона (блок 5, рис. 1)

В зависимости от выбранных функциональных методов обработки речевого сигнала может также потребоваться дополнительная сегментация вокализованных фрагментов на отдельные периоды основного тона, характеризующие колебания голосовых связок диктора.

Для сегментации вокализованных фрагментов РС периодов основного тона существует большое количество алгоритмов, работа которых основана на разных математических подходах [5].

Среди методов оценки периода ОТ можно выделить две основные подгруппы алгоритмов [3]: структурные методы оценки периода ОТ (локальные методы) и алгоритмы без привязки к временной структуре РС (интегральные методы).

При реализации корреляционного метода сегментации на периоды ОТ из речевого фрагмента берется участок длительностью не менее двух максимально возможных для человеческого голоса периодов ОТ (для человека T_{MAX} имеет значение ~20 мс) симметрично по времени относительно известной (или предполагаемой – на первом шаге работы алгоритма) левой границы периода ОТ.

В автокорреляционной функции этого фрагмента ищется максимум, лежащий в пределах возможного периода основного тона человека, то есть между значениями 2,5 и 20 мс (рис. 5б). Смещение, соответствующее этому максимуму, и является оценкой среднего для текущего фрагмента периода основного тона. Так как это средняя величина, она нуждается в коррекции: правая граница периода ОТ вычисляется прибавлением к левой границе длительности оценки среднего периода ОТ с коррекцией до точки ближайшего пересечения нуля в направлении снизу вверх (для сегментации предлагается руководствоваться переходами сигнала через ноль в направлении снизу вверх) пропущенного через ФНЧ сигнала. Завершающим шагом коррекции должен стать поиск ближайшего к положению найденной границы перехода через ноль снизу вверх уже исходным сигналом. На рис. 5а левая серая черта – известная левая граница периода ОТ, правая серая черта – полученная непосредственно по оценке среднего периода основного тона правая граница периода ОТ. Черная черта – скорректированная в ноль правая граница. Таким образом, расстояние между левой серой чертой и черной чертой является оценкой текущего периода основного тона, а расстояние между серыми чертами – средним периодом основного тона исследуемого участка речевого сигнала.

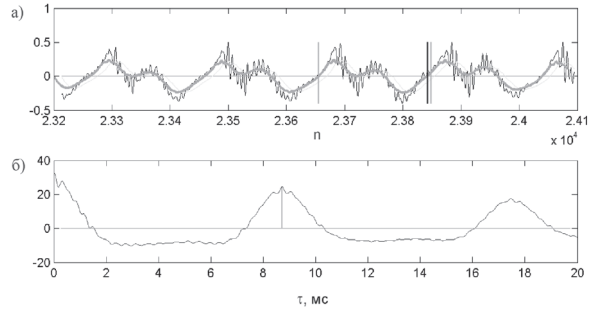


Рис. 5. Выделение периодов ОТ: а) исследуемый фрагмент сигнала; б) автокорреляционная функция исследуемого фрагмента

Сегментация вокализованных фрагментов на фонемы

В ряде функциональных приложений обработки речи может также возникнуть задача фонемной сегментации речевых сигналов. Проблема такой сегментации заключается в том, что на вокализованные звуки приходится в среднем три четверти общей длительности активной речи [14]. Поэтому различные вокализованные звуки зачастую следуют в речи непрерывно друг за другом. При этом переходы между отдельными звуками с сигнальной точки зрения могут представлять собой как плавное изменение структуры и «энергетики» колебания основного тона говорящего, так и относительно быструю их перестройку.

Для характеризации изменений структуры кластеров основного тона (ОТ-кластеров) можно ввести метрики, учитывающие разницу

«энергетик» и структур двух сравниваемых кластеров [14]. При этом плавные переходы внутри одного звука и между звуками являются трендами, а сравнительно резкие переходы между звуками – разладками структуры РС. Рассмотрим два вида метрик: амплитудно-структурную и структурную.

Амплитудно-структурные тренды выражаются как в амплитудных, так и в структурных изменениях периодов ОТ:

$$M_{амп-стр}(j) = \frac{1}{T_{OT}(j)A_{cp}(j)} \sum_{i=1}^{T_{OT}(j)} \left| X(i,j) - X(i,j-1) \right|, \quad (2)$$

где $M(j)$ – последовательность метрик, полученная на последовательности периодов ОТ $T_{от}(j-2) \Rightarrow T_{от}(j-1) \Rightarrow T_{от}(j) \Rightarrow T_{от}(j+1) \Rightarrow T_{от}(j+2) \Rightarrow \ldots$; $T_{от}(j)$ – длительность j-го периода ОТ; $A_{ср}(j)$ – средняя амплитуда группы периодов ОТ (группа состоит из 2–3 периодов), вычисленная на скользящем временном интервале для j-го периода ОТ.

Структурные тренды выражаются в структурных изменениях периодов ОТ:

$$M_{стр}(j) = \frac{1}{T_{OT}(j)} \sum_{i=1}^{T_{OT}(j)} \left| \frac{X(i,j)}{X_{\max}(j)} - \frac{X(i,j-1)}{X_{\max}(j-1)} \right|, \quad (3)$$

где $X_{max}(j)$ – максимальный отсчет на интервале j-го ОТ-кластера.

По формулам (2) и (3) видно, что для вычисления предложенных метрик длины векторов отсчетов речевого сигнала, соответствующих периодам ОТ, должны быть равны. Однако в общем случае в реальном РС длины двух смежных векторов ОТ немного отличаются, поэтому перед вычислением метрик необходимо уравнять длины двух исследуемых векторов путем векторной интерполяции.

В практических приложениях могут быть более полезны модифицированные методы анализа трендов и разладок. Например, для исключения случайных изменений структур и длительностей от одного периода ОТ к другому следует вычислять метрики не смежных периодов, а разнесенных друг от друга на несколько промежуточных периодов. В этом случае значения метрик в трендах станут несколько выше по величине (так как в тренде дальше отстоящие друг от друга периоды ОТ будут сильнее отличаться и, следовательно, иметь большую метрику), а огибающая метрик станет «плавнее».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системный подход к сегментации речевых сигналов позволяет получать необходимую для реализации речевых приложений детальность сегментации вплоть до выделения и параметрического описания отдельных периодов основного тона диктора. Приведенные в статье алгоритмы многоуровневой временной сегментации относятся к классу технологических и могут использоваться в широком спектре речевых приложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архипов И. О., Гитлин В. Г. Оценка точности выделения основного тона методом GS // Современные речевые технологии: Сборник трудов IX сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 1999. С. 38–42.
2. Зилинберг А. Ю., Корнеев Ю. А. Разработка и исследование временных и спектральных алгоритмов VAD (Voice Activity Detection) // Российская школа-конференция «Мобильные системы передачи данных». М.: МИЭТ, 2006. С. 58–70.
3. Кипяткова И. С. Комплекс программных средств обработки и распознавания разговорной русской речи // Информационно-управляющие системы. 2011. № 4. С. 53–59.
4. Кипяткова И. С., Карпов А. А. Автоматическая обработка и статистический анализ новостного текстового корпуса для модели языка системы распознавания русской речи // Информационно-управляющие системы. 2010. № 4. С. 2–8.
5. Маркел Дж. Д., Грэй А. Х. Линейное предсказание речи: Пер. с англ. М.: Связь, 1980. 308 с.
6. Михайлов В. Г., Златоустова Л. В. Измерение параметров речи. М.: Радио и связь, 1987. 168 с.
7. Ронжин А. Л., Глазков С. В. Метод автоматического распознавания голосовых команд и неречевых акустических событий // Информационно-управляющие системы. 2012. № 4. С. 74–77.
8. Ронжин А. Л., Карпов А. А., Кагиров И. А. Особенности дистанционной записи и обработки речи в автоматах самообслуживания // Информационно-управляющие системы. 2009. № 5. С. 32–38.
9. Ронжин А. Л., Карпов А. А., Лобанов Б. М., Цирульник Л. И., Йокиш О. Фонетико-морфологическая разметка речевых корпусов для распознавания и синтеза русской речи // Информационно-управляющие системы. 2006. № 6. С. 24–34.
10. Савченко В. В., Акатьев Д. Ю. Результаты экспериментальных исследований методики формирования фонетической базы данных диктора из непрерывного потока его разговорной речи // Информационно-управляющие системы. 2012. № 6. С. 38–42.
11. Савченко В. В., Савченко А. В. Метод фонетического декодирования слов в информационной метрике Кульбака – Лейблера для систем автоматического анализа и распознавания речи с повышенным быстродействием // Информационно-управляющие системы. 2013. № 2. С. 7–12.
12. Свириденко В. А. Аутентификация личности по голосу // Мобильные системы. 2004. № 2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.spirit.ru/articles/svi_mb.html
13. Старченко И. Б., Вишневецкий В. Ю. Практикум по курсу «Математическое моделирование биологических процессов и систем». Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. 36 с.
14. Томчук К. К., Зилинберг А. Ю., Корнеев Ю. А. Анализ трендов и разладок структуры ОТ-кластеров вокализованных сегментов речи // Сборник докладов Научной сессии ГУАП. СПб.: ГУАП, 2010. С. 70–73.
15. Хованова Н. А., Хованов И. А. Методы анализа временных рядов. Саратов: ГосУНЦ «Колледж», 2001. 120 с.

Tomchuk K. K., Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (St. Petersburg, Russian Federation)
Zilinberg A. Yu., Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (St. Petersburg, Russian Federation)

HIERARCHICALLY STRUCTURED MODEL AND BASIC ALGORITHMS OF TIME DOMAIN SEGMENTATION OF SPEECH SIGNALS

This paper introduces a systematic approach to speech signal (SS) segmentation based on developed hierarchically structured SS-model. Ground is given to application of multilevel time voice sound record segmentation, and basic algorithms of principal segmentation stages are developed: VAD algorithm; "voiced / noise / plosive" segmentation; voiced fragments' segmentation into separate pitch periods. The possible variant of splitting adjacent voiced sounds using analysis of their structure has been proposed.

Key words: speech, model of speech signal, segmentation, VAD, pitch

REFERENCES

1. Arkhipov I. O., Gitlin V. G. Evaluation of the accuracy of pitch by GS metod [Otsenka tochnosti vydeleniya osnovnogo tona metodom GS]. *Sovremennye rechevye tekhnologii: Sbornik trudov IX sessii Rossiyskogo akusticheskogo obshchestva*. Moscow, GEOS Publ., 1999. P. 38–42.
2. Zilinberg A. Yu., Korneev Yu. A. Development and research of temporal and spectral algorithms VAD [Razrabotka i issledovanie vremennykh i spektral'nykh algoritmov VAD (Voice Activity Detection)]. *Rossiyskaya shkola-konferentsiya "Mobil'nye sistemy peredachi dannykh"*. Moscow, MIJeT, 2006. P. 58–70.
3. Kipyatkova I. S. Software complex of processing and recognition of conversational Russian speech [Kompleks programmnykh sredstv obrabotki i raspoznavaniya razgovornoy russkoy rechi]. *Informatsionno-upravlyayushchie systemy*. 2011. № 4. P. 53–59.
4. Kipyatkova I. S., Karpov A. A. Automatic processing and statistical analysis of a news text for the language model of Russian speech recognition [Avtomaticheskaya obrabotka i statisticheskiy analiz novostnogo tekstovogo korpusa dlya modeli yazyka sistemy raspoznavaniya russkoy rechi]. *Informatsionno-upravlyayushchie systemy*. 2010. № 4. P. 2–8.
5. Markel J. D., Grey A. H. *Lineynoe predskazanie rechi* [Linear prediction of speech]. Moscow, Svyaz' Publ., 1980. 308 p.
6. Mihaylov V. G., Zlatoustova L. V. *Izmerenie parametrov rechi* [Measuring speech parameters]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1987. 168 p.
7. Ronzhin A. L., Glazkov S. V. The method of automatic recognition of voice commands and non-speech acoustic events [Metod avtomaticheskogo raspoznavaniya golosovykh komand i nerechevykh akusticheskikh sobytiy]. *Informatsionno-upravlyayushchie systemy*. 2012. № 4. P. 74–77.
8. Ronzhin A. L., Karpov A. A., Kagirov I. A. Particular qualities of remote recording and processing of speech in self-service machine [Osobennosti distantsionnoy zapisi i obrabotki rechi v avtomatakh samoobsluzhivaniya]. *Informatsionno-upravlyayushchie systemy*. 2009. № 5. P. 32–38.
9. Ronzhin A. L., Karpov A. A., Lobanov B. M., Tsirul'nik L. I., Jokish O. Phonetic and morphological marking of speech cases for recognition and synthesis of Russian speech [Fonetiko-morfologicheskaya razmetka rechevykh korpusov dlya raspoznavaniya i sinteza russkoy rechi]. *Informatsionno-upravlyayushchhie sistemy*. 2006. № 6. P. 24–34.
10. Savchenko V. V., Akat'ev D. Yu. Results of experimental research of method of forming a phonetic database speaker of continuous flow of his speech [Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy metodiki formirovaniya foneticheskoy bazy dannykh diktora iz nepreryvnogo potoka ego razgovornoy rechi]. *Informatsionno-upravlyayushchie systemy*. 2012. № 6. P. 38–42.
11. Savchenko V. V., Savchenko A. V. The method of phonetic decoding of words in information metric of Kullback-Leibler for automatic analysis and speech recognition with high performance [Metod foneticheskogo dekodirovaniya slov v informastionnoy metrike Kul'baka – Leyblera dlya sistem avtomaticheskogo analiza i raspoznavaniya rechi s povyshennym bystrodeystviem]. *Informatsionno-upravlyayushchie systemy*. 2013. № 2. P. 7–12.
12. Sviridenko V. A. Authenticate of personality on the voice [Autentifikatsiya lichnosti po golosu]. *Mobil'nye sistemy*. 2004. № 2. Available at: http://www.spirit.ru/articles/svi_mb.html
13. Starchenko I. B., Vishnevetskii V. Yu. Workshop on the course "Mathematical modeling of biological processes and systems" [Praktikum po kursu "Matematicheskoe modelirovanie biologicheskikh protsessov i system"]. Taganrog, TTI YFU, 2010. 36 p.
14. Tomchuk K. K., Zilinberg A. Ju., Korneev Ju. A. The analysis of trend and disorders in the structure of clusters containing voiced speech segments [Analiz trendov i razladok struktury OT-klasterov vokalizovannykh segmentov rechi]. *Sbornik dokladov Nauchnoy sessii GUAP.* St. Petrsburg, GUAP, 2010. P. 70–73.
15. Khovanova N. A., Khovanov I. A. Methods of time series analysis [*Metody analiza vremennykh ryadov*]. Saratov, GosUNC "Kolledzh", 2001. 120 p.

Поступила в редакцию 24.01.2013

Март, № 2 **Рецензии** **2013**

УДК 519

ЛЕОН АГАНЕСОВИЧ ПЕТРОСЯН
доктор физико-математических наук, профессор, декан факультета прикладной математики – процессов управления, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
spbuoasis7@peterlink.ru

Рец. на кн.: **Мазалов В. В., Менчер А. Э., Токарева Ю. С. Переговоры. Математическая теория. – СПб.: Лань, 2012. – 304 с.**

В книгу, посвященную теоретико-игровому анализу моделей переговоров, вошли результаты самих авторов и зарубежных коллег. Несомненна новизна данной тематики в отечественной литературе. Рассматриваются задача о дележе пирога, последовательные переговоры, переговоры со случайными предложениями, арбитражные процедуры, процедуры организации конкурсов и проведения сделок, модели репутации и их влияние на окончательное решение переговоров, а также вопросы устойчивой реализации достигнутых соглашений.

Книгу отличает хороший методический подход. Авторы начинают с простых моделей, затем, усложняя их, привлекают новые математические методы. Книга начинается с понятия справедливости. Этому посвящена первая глава, в которой переговоры связаны с процедурой распределения ресурсов. Переговоры должны быть справедливыми и приводить к решению, свободному от дискриминации и от зависти, эффективному (оптимальному по Парето), чтобы его нельзя было улучшить в ущерб кому-то из участников. Та же схема применяется во второй главе, где переговоры должны определить удобное время для встречи его участников. Затем в схему проведения переговоров вводится новый участник – арбитр. Этому посвящены главы с третьей по пятую. В третьей главе описывается схема проведения переговоров со случайными предложениями, которая была предложена в работах Мазалова и Сакагучи. Здесь арбитр предлагает участникам какое-либо решение, и те соглашаются с ним или нет. После этого принимается окончательное решение с использованием каких-либо правил или проводится голосование. Детально разбирается эта схема переговоров и находятся ее характеристики: длительность переговоров, оптимальное поведение, решение. В четвертой и пятой главах исследованы переговоры с использованием различных арбитражных процедур, в которых учитывается мнение арбитра о поступивших предложениях. Описаны арбитражные процедуры по последнему предложению, согласительный арбитраж, арбитраж с наказанием и др.

Шестая глава представляет комбинированные арбитражные процедуры. В седьмой главе в арбитражных процедурах принимает участие арбитражный комитет из нескольких членов, в котором мнение арбитров моделируется вероятностными распределениями. Мнения арбитров могут быть независимы или иметь какую-то корреляцию. Строится оптимальное решение и исследуется влияние этих факторов на окончательное решение.

Восьмая глава посвящена исследованию стохастических процедур проведения конкурсов. Это совершенно новая тема в теоретико-игровой литературе, и поэтому она будет интересна специалистам.

В девятой главе ищется равновесие в процедуре проведения торговых сделок между продавцами и покупателями. Подробно обсуждается метод построения равновесия в одношаговой модели, и затем результаты распространяются на многошаговую модель.

В десятой главе исследуется влияние репутации арбитров на окончательное решение переговоров. При этом модели репутации применяются и в задаче о зарплате и моделях проведения конкурсов.

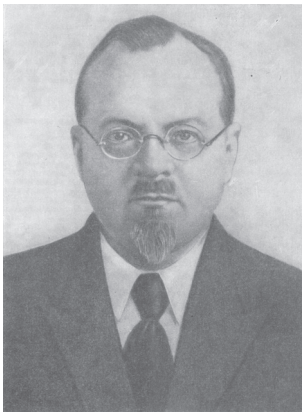
В одиннадцатой главе исследуется вопрос об устойчивости достигнутых соглашений. При этом применяется принцип динамической устойчивости. Авторы демонстрируют его эффективность на так называемых рыбных войнах, там, где возникает конфликт при использовании биоресурсов.

Авторам, с одной стороны, удалось изложить материал доступно для читателя, с другой – представить материал математически строго с использованием современного аппарата теории игр. Библиографический обзор поможет читателю ориентироваться в дальнейших исследованиях по интересующему направлению.

Книга может быть использована как учебное пособие для чтения лекций по теории игр для студентов специальностей «прикладная математика и информатика» и «экономическая кибернетика». Кроме того, она представляет интерес для математиков, работающих в области теории игр, а также специалистов в области экономики, управления и исследования операций.

Поступила в редакцию 25.02.2013

© Петросян Л. А., 2013



ПРАВДИЧ-НЕМИНСКИЙ ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ (02.06.1879 – 17.05.1952)

Основатель кафедры физиологии человека и животных ПетрГУ – основоположник электроэнцефалографии.

В 2013 году отмечается знаменательное событие в нейрофизиологии – столетний юбилей регистрации активности мозга.

В 1913 году в престижном научном журнале Европы «Zbl. Physiol.» впервые были опубликованы результаты исследования электрической активности мозга у собаки (Pravdich-Neminsky V. V. Ein Versuch der Registrierung der elektrischen Gehirnerscheinungen (In German). Zbl Physiol 27: 951–960, 1913). Автором публикации был отечественный ученый, нейрофизиолог В. В. Правдич-Неминский, работавший в то время на кафедре физиологии Киевского университета. Он ввел специальный термин для полученной записи электрической активности мозга, назвав ее «электроцереброграммой». Считается, что данный термин семантически более точен, чем введенный позже и используемый в настоящее время термин «электроэнцефалограмма». Работы В. В. Правдич-Неминского наряду с исследованиями В. Я. Данилевского заложили основы современной электроэнцефалографии. Их заслуги были признаны и автором метода клинической электроэнцефалографии немецким психиатром Г. Бергером, который в 1929 году впервые опубликовал результаты исследования биоэлектрической активности мозга человека и предложил термин «электроэнцефалограмма» и его аббревиатуру ЭЭГ.

В. В. Правдич-Неминским была предложена первая классификация зарегистрированных им ритмов мозговой активности. Он выделил «медленные волны» частотой 0,5–10 Гц и «быстрые волны», среди которых различал волны первого (10–15 Гц) и второго (20–30 Гц) порядков. Ученый впервые описал явление десинхронизации электрической активности мозга, которое он наблюдал как замещение «медленной» активности мозга на «быструю» при электрическом раздражении седалищного нерва.

В двадцатые годы XX века В. В. Правдич-Неминский продолжал исследования в области утомления и входил в состав советско-германской группы по изучению головного мозга. В 1929 году решением Ученого совета Наркомата просвещения РСФСР ему было присвоено звание профессора, а в 1935 году Президиумом АН СССР присуждена ученая степень доктора биологических наук без защиты диссертации. В 30-е годы прошлого столетия после ареста по групповому делу В. В. Правдич-Неминский отбывал ссылку в Архангельске, затем работал в Вологодском ветеринарном институте и в последующем в Вятском зооветинституте.

В 1940 году в созданном Карело-Финском университете В. В. Правдич-Неминский организовал кафедру физиологии человека и животных в составе биологического факультета. Эта кафедра прекратила свою работу во время Великой Отечественной войны, и профессор не оставил своих непосредственных учеников, но и по сей день ученые кафедры продолжают заниматься проблемами нейрофизиологии. В Петрозаводском университете успешно развивается Карельская научная нейрофизиологическая школа, которую возглавляет профессор Ю. В. Лупандин.

С 1941 по 1944 год В. В. Правдич-Неминский руководил кафедрой физиологии человека и животных Саратовского университета. С 1949 по 1952 год он возглавлял лабораторию электроцеребрографии и общей физиологии АМН СССР. Ученый разработал и усовершенствовал методы параллельной регистрации биопотенциалов коры головного мозга и сердечно-сосудистых тонов, предложил метод тоноэлектроцеребрографии, позволяющий судить об электрической активности головного мозга в определенные фазы сердечной деятельности. Кроме того, он исследовал антагонизм ионов аммония и магния в организме (Электроцеребрография, электромиография и значение ионов аммония в жизненных процессах организма. Л.: Медгиз, 1958. 196 с.) и изучал фагоцитарную активность крови. Признается его научный вклад в разработку теории химической природы передачи нервного возбуждения.

Умер В. В. Правдич-Неминский 17 мая 1952 года в Москве.

Л. И. Герасимова, Ю. В. Лупандин, А. Ю. Мейгал
кафедра физиологии человека и животных, патофизиологии медицинского факультета,
Петрозаводский государственный университет

26 января 2013 года исполнилось 50 лет доктору физико-математических наук, профессору кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета Петрозаводского государственного университета *Александру Лионовичу Пергаменту.*

АЛЕКСАНДР ЛИОНОВИЧ ПЕРГАМЕНТ
К 50-летию со дня рождения

А. Л. Пергамент после окончания учебы на физико-математическом факультете в 1985 году сразу начал работу в ПетрГУ в должности инженера кафедры физики твердого тела. В 1995 году он защищает диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а в 2008 году – доктора физико-математических наук в РГПУ им. А. И. Герцена. С 2009 года и по настоящее время является профессором кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники.

А. Л. Пергамент активно занимается научной работой. Он руководитель проекта «Электронные компоненты на основе оксидов переходных металлов с фазовым переходом металл – изолятор» (Государственное задание Минобрнауки России университету на оказание услуг № 2.3282.2011), читает курсы «Коллективные эффекты в твердых телах и плазме» и «Физические основы получения информации». Он автор 154 публикаций, в том числе нескольких монографий.

А. Л. Пергамент награжден Почетной грамотой МО РФ.

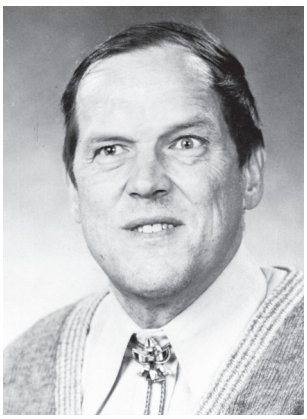
9 февраля 2013 года исполнилось 75 лет доктору биологических наук, профессору кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета Петрозаводского государственного университета *Евгению Алексеевичу Румянцеву.*

ЕВГЕНИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ РУМЯНЦЕВ
К 75-летию со дня рождения

Е. А. Румянцев родился в Вытегорском районе Вологодской области. В 1961 году с отличием окончил естественно-географический факультет Карельского государственного педагогического института, в 1964 году – очную аспирантуру. В 1966 году защитил кандидатскую диссертацию, в 1990-м – докторскую. С 1994 года и по настоящее время профессор кафедры зоологии и экологии ПетрГУ. Е. А. Румянцев – высококвалифицированный специалист-паразитолог, биолог и эколог широкого профиля. Его конкретные научные интересы – систематика и фаунистика, экологическая паразитология, палео- и зоогеография. Им открыто 5 новых видов паразитических животных. Е. А. Румянцев разработал ряд практических рекомендаций, направленных на улучшение эпизоотического состояния основных промысловых водоемов Северо-Запада, в частности «Рекомендации по борьбе с болезнями сиговых и лососевых рыб в озерных и садковых хозяйствах», утвержденные Главным управлением ветеринарии в качестве нормативно-методического документа. Им опубликовано более 150 научных работ, в том числе 4 монографии. В 1998 году присвоено почетное звание Заслуженного деятеля науки Республики Карелия.

Поздравляем юбиляров, желаем здоровья, научных достижений и успехов в педагогической деятельности!

Редакция журнала «Ученые записки Петрозаводского государственного университета»



5 марта исполнилось 85 лет со дня рождения почетного профессора Университета Турку, одного из самых известных финских ученых в области прикладной математики и теоретической физики, внесшего большой вклад в развитие финско-российского научного сотрудничества, Олави Бертела Хеллмана.

ОЛАВИ БЕРТЕЛ ХЕЛЛМАН

К 85-летию со дня рождения

Олави Бертел Хеллман родился в Хельсинки. Его отец был финансовым директором компании Kymmene OY (ныне она называется UPM). Семья Хеллман имела российские корни: отец родился в Санкт-Петербурге, бабушка была русская. После обучения в Техническом университете Хельсинки и защиты докторской диссертации в 1955 году Олави Хеллман работал в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе, затем в Институте Нильса Бора (Центр NORDITA) в Копенгагене. В 1961 году он был назначен на должность профессора прикладной математики и математической статистики в Университете Турку, где активно и плодотворно работал почти полвека. Кроме того, он много лет возглавлял Институт прикладной математики Университета Турку.

Научные интересы Олави Хеллмана касались математических моделей физики элементарных частиц, затем его главным научным интересом стала теория оптимального поиска целей. Его заслугой является создание единой теории поиска, в построении которой он активно сотрудничал с российскими коллегами из Математического института АН СССР и Вычислительного центра Академии наук СССР, был соруководителем ряда совместных научных проектов. В 1985 году в издательстве «Наука» на русском языке вышла его монография «Введение в теорию оптимального поиска».

Профессор Хеллман имеет большие заслуги как один из главных организаторов системы подготовки специалистов по прикладной математике, исследованию операций и компьютерным наукам в Финляндии. Под его руководством более десяти докторантов защитили диссертации. Многие годы он был редактором научного журнала «European Journal of Operational Research».

За долгие годы работы профессор Хеллман собрал большую библиотеку научной литературы по математике и физике, главным образом на русском языке, которым он свободно владел. В 2012 году Олави Хеллман и его дочь Анни передали эту библиотеку из 4000 томов в дар Петрозаводскому университету. Уверены, что многие поколения студентов и аспирантов будут учиться по книгам из библиотеки профессора Хеллмана!

Математический и физико-технический факультеты, ректорат ПетрГУ сердечно поздравляют Олави Хеллмана с юбилеем и желают ему крепкого здоровья и творческого долголетия!

Редакция журнала «Ученые записки Петрозаводского государственного университета»

CONTENTS

BIOLOGY

Antipina G. S.
ALGAE, HIGHER PLANTS, AND LICHENS OF PETROZAVODSK: SPECIES DIVERSITY 7

Drozdov S. N., Kholoptseva E. S.
POSSIBILITY OF USING MULTIFACTOR EXPERIMENTS IN STUDY OF PLANTS' ECOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL CHARACTERISTICS . . 11

Lukin A. A., Ivanter D. E., Belyaev D. S.
CONTEMPORARY ICHTHYOFAUNA STATUS OF VYGOZERO RESERVOIR 16

Onishchenko I. N., Ryzhkov L. P., Onishchenko N. A.,
VOKHTOZERO – WATER RESERVOIR OF CAGE CULTURE FISHERY 23

Lyabzina S. N., Uzenbaev S. D.
ECOLOGY OF CARRION BEETLES (COLEOPTERA, SILPHIDAE) IN KARELIA 27

Kholodov E. V.
WILD FOREST REINDEER IN VODLOZERO NATIONAL PARK 33

MEDICAL SCIENCE

Delieva A. N., Dolinina L. Yu., Galkina O. V., Trofimov V. I.
SPECIFICS OF CELLULAR AND HUMORAL MECHANISMS OF LOCAL INFLAMMATION IN COPD OF VARYING SEVERITY 36

Michurina S. V., Vasendin D. V., Ishchenko I. Yu.
SPECIAL STRUCTURAL AND MICROSTRUCTURAL CHANGES IN THYMUS IN «CATABOLIC» PHASE AFTER EXPERIMENTAL HYPERTHERMIA 41

EARTH SCIENCE

Nilov M. Yu.
GEOPHYSICAL CRITERIA FOR PROSPECTING Au-Cu-Mo-PORPHYRY STOCKWORK DEPOSITS: CASE STUDY OF KADILAMPI SITE IN WESTERN KARELIA 48

AGRICULTURAL SCIENCE

Yemel'yanova A. S., Lupova E. I.
CHANGES IN NUMERIC CHARACTERISTICS OF VARIABLE PULSE DIAGRAMS RESULTING FROM ACUTE STRESS IN COW-HEIFERS. 52

Gavrilov V. N.
THE EXPERIENCES OF NORWAY SPRUCE CULTIVATION IN KARELIA IN A PROCESS OF DRAINED SEDGE-SPHAGNUM BIRCH STANDS' RECONSTRUCTION 55

ENGINEERING SCIENCE

Pitukhin A. V., Skobtsov I. G., Serebryanskiy N. I.
DETERMINATION OF OPTIMAL REPAIR POSTS' NUMBER AT TECHNICAL SERVICE ENTERPRISE 59

Yeflov V. B., Pitukhin E. A., Stafeev F. V.
REVIEW OF QUERY EXECUTION IN DBMS H2 62

Lisov V. Yu., Yazov V. N.
EXPERIMENTAL DETERMINATION OF SOIL SHEAR RESISTANCE 66

Rochev A. A.
ON ANALYSIS OF SPATIAL ELASTOPLASTIC COMPOSITE BARS 69

PHYSICS AND MATHEMATICS

Khartsev S., Grishin A., Manuilov S.
MAGNETOSTATIC WAVES IN $Y_3Fe_50_{12}$ FILMS ON SILICON 73

Podgorniyy V. I., Belashev B. Z., Osaulenko R. N., Ternovoy A. N.
SYNTHESIS OF CARBIDES IN ARC DISCHARGE PLASMA AND THEIR IDENTIFICATION . 78

Krupyanskiy D. S., Lobov D. V., Osaulenko R. N.
IMPLEMENTATION OF MOLECULAR DYNAMICS METHOD USING NVIDIA CUDA TECHNOLOGY 84

Gostev V. A., Lekhto E. G.
GAS-DISCHARGE ACTIVE OXYGEN GENERATOR. 87

Danilov S. V., Fofanov A. D.
COMPUTER MODELING AND X-RAY DIFFRACTION ANALYSIS OF CARBON NANOTUBES . 90

Leri M. M., Pavlov Yu. L.
FOREST FIRE ON RANDOM GRAPH WITH INFLAMMABLE EDGES 96

Pechnikov A. A., Derbeneva O. Yu.
HYPERLINKS' ANALYSIS OF PETROZAVODSK STATE UNIVERSITY WEB SPACE 100

Shley M. D., Rogov A. A., Matyushichev K. V.
CHARACTERISTIC FEATURES OF COMPUTERIZED VISIBILITY ZONES' CONSTRUCTION FACTORING IN SETTLEMENT DEVELOPMENT AND RELIEF MODEL. 107

Tomchuk K. K., Zilinberg A. Yu.
HIERARCHICALLY STRUCTURED MODEL AND BASIC ALGORITHMS OF TIME DOMAIN SEGMENTATION OF SPEECH SIGNALS 114

Reviews

Petrosyan L. A.
The book review: Mazalov V. V., Mencher A. E., Tokareva Yu. S. Negotiations. Mathermatical Theory. . . 120

Memory

In memory V. V. Pravdich-Neminskiy 121

Jubilation

To the 50th birthday anniversary of A. L. Pergament. . . 122
To the 75th birthday anniversary of E. A. Rumyantsev . 122
To the 85th birthday anniversary of Olavi Bertel Hellman 123