
Министерство образования и науки
Российской Федерации

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

№ 6 (135). Сентябрь, 2013

Серия: Естественные и технические науки

Главный редактор

А. В. Воронин, доктор технических наук, профессор

Зам. главного редактора

В. Б. Акулов, доктор экономических наук, профессор

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

В. С. Сюнёв, доктор технических наук, профессор

Ответственный секретарь журнала

Н. В. Ровенко, кандидат филологических наук

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

Статьи журнала рецензируются

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

uchzap.petsu.ru

Редакционный совет

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

Редакционная коллегия серии
«Естественные и технические науки»

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

Ministry of Education and Science
of the Russian Federation

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

№ 6 (135). September, 2013

Natural & Engineering Sciences

Chief Editor

Anatoly V. Voronin, Doctor of Technical Sciences, Professor

Chief Deputy Editor

Vladimir B. Akulov, Doctor of Economic Sciences, Professor

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

Vladimir S. Syunev, Doctor of Technical Sciences, Professor

Executive Secretary

Nadezhda V. Rovenko, Candidate of Philological Sciences

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

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

uchzap.petrSU.ru

Editorial Council

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

Editorial Board of the Series
“Natural & Engineering Sciences”

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

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЯ

- Рыжков Л. П., Трофимов И. И.*
Некоторые эколого-биологические данные о полярном триглопсе (*Triglops nybelini*) Баренцева моря 7
- Горбач В. В.*
Ландшафтная дифференциация группировок булавоусых чешуекрылых (Lepidoptera, Hesperioidea et Papilionoidea) в условиях средней тайги Карелии 10
- Обухова Е. С., Сидорова Н. А.*
Физиологическая характеристика ахромогенных видов рода *Pseudomonas* в условиях динамики термического режима культивирования 19
- Стесько А. В.*
Некоторые особенности возрастного состава лиманды (*Limanda limanda* L., 1758) Баренцева моря 22

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

- Введенский В. П., Рыбачков В. В., Шубин Л. Б.*
Влияние эндобронхиальной терапии на эволюцию локального статуса при аспирационном повреждении трахеобронхиального дерева 26
- Голдобин В. В., Клочева Е. Г., Сироткина О. В., Вавилова Т. В., Ласковец А. Б.*
Атеротромботический и лакунарный инсульты у пациентов пожилого возраста: особенности клинических проявлений и тромбоцитарного гемостаза 30
- Жураховская Д. В., Лоскутова Е. Е., Виноградова И. А.*
Оценка степени информированности фармацевтических работников по вопросам эффективности и безопасности нестероидных противовоспалительных препаратов 36
- Маркелов Ю. М., Драчева М. С., Дородная И. А.*
Спектр лекарственной устойчивости среди микобактерий туберкулеза с множественной лекарственной устойчивостью 40

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Дмитриева А. В.*
Геохимия и рудная минерализация сяргозерского умереннощелочного комплекса (Центральная Карелия) 45

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

- Болгов А. Е., Чистякова И. А., Кондратюк Е. А.*
Эффективность многопрофильной деятельности животноводческих предприятий 51
- Бахмет О. Н.*
Особенности почв скальных ландшафтов Карельского побережья Белого моря 55

- Минин Н. С., Захаров А. Ю.*
Рост сосняков искусственного происхождения под влиянием рубок ухода 60

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Карпенко С. Н., Петров А. Н., Евсеева А. В.*
Диаграммы-изохроны высокопрочного модифицированного бетона 65
- Питухин А. В., Васильев С. Б., Колесников Г. Н., Панов Н. Г., Копарев В. С.*
Модель разрушения древесностружечных плит при растяжении перпендикулярно пласти 68
- Скабин А. В., Rogov A. A.*
Математическая модель распознавания символов 73
- Борматова Е. П., Давыдов М. П.*
One-dimensional governing equations for the creep under hydrogen diffusion flow 76
- Косенков А. Ю.*
Новые исследования часовен пряжинских карел 84

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Мольков С. И., Савин В. Н.*
Influence of processes on dust particles' surface on their electrical charge in ordered plasma-dust structures 89
- Скорикова Н. С., Фофанов А. Д., Осауленко Р. Н., Алешина Л. А., Кудина Е. Ф.*
Структурное состояние ксерогелей на основе жидкого стекла, модифицированных никелем, кобальтом и титаном 94
- Подгорный В. И., Осауленко Р. Н., Трошин Е. В.*
Использование омического нагрева для очистки многостенных углеродных нанотрубок 102
- Березина О. Я., Кириенко Д. А., Клочкова Т. А., Яковлева Д. С.*
Влияние электрополевого воздействия на свойства тонких пленок гидратированного пентаоксида ванадия 107
- Кузнецов Д. В., Лебедев А. А., Москин Н. Д., Варфоломеев А. Г.*
Теоретико-графовые модели с упорядоченной иерархической структурой и их использование в анализе синтаксиса поэтических текстов 113
- Кузнецов В. А., Денисов Д. В.*
Метод определения весов показателей при расчете рейтинга 119

ЮБИЛЕИ

- К 60-летию А. Н. Петрова 123
- Contents 124

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

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

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ РАН

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

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

Учредитель: ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет»

Редактор Г. А. Мехралиева. Корректор С. Л. Смирнова. Переводчик Н. К. Дмитриева. Верстка М. А. Моросин

Подписано в печать 20.09.2013. Формат 60×90^{1/8}. Бумага офсетная. Печать офсетная.
10 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. (1-й завод – 175 экз.). Изд. № 325

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

ЛЕОНИД ПАВЛОВИЧ РЫЖКОВ

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

ИЛЬЯ ИВАНОВИЧ ТРОФИМОВ

аспирант кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
trofimov2010@gmail.com

**НЕКОТОРЫЕ ЭКОЛОГО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О ПОЛЯРНОМ ТРИГЛОПСЕ
(*TRIGLOPS NYBELINI*) БАРЕНЦЕВА МОРЯ**

Проанализированы материалы тралово-акустических съемок 2002–2008 годов экосистемы Баренцева моря по полярному триглопсу (*Triglops nybelini* Jensen, 1944). Были получены новые данные по пространственному и батиметрическому распределению, встречаемости, основным биологическим характеристикам этого вида.

Ключевые слова: Баренцево море, ТАС, полярный триглопс, биологические характеристики

ВВЕДЕНИЕ

Разносторонние исследования биологии, экологии, трофологии и паразитологии рыб в основном направлены на изучение промысловых видов. Биология полярного триглопса, его распространение в Баренцевом и Гренландском морях исследованы недостаточно полно. Информация о нем ограничивается кратким упоминанием о его присутствии в водах Баренцева моря [1], [2], [5], [7]. В последнем десятилетии XX века температуры Норвежского, Гренландского и Баренцева морей несколько изменились, в связи с чем начались изменения границ существовавшего ледового пояса [9]. Стали доступными районы высоких широт для проведения многоцелевых научных исследований, которые ранее практически были невозможны.

Известно, что на сегодняшний день в Баренцевом море обитают три вида рыб рода *Triglops*: триглопс атлантический – *Triglops murrayi* (Gunther, 1888), триглопс полярный – *Triglops nybelini* (Jensen, 1944), остроносый триглопс – *Triglops pingeli* (Reinhardt, 1837) [1], [4], [5]. Целью данной работы стало изучение биологии одного из этих видов – полярного триглопса и его роли в пищевых связях рыб в Баренцевом море; рассмотрено пространственное и батиметрическое распределение полярного триглопса в Баренцевом море, размерная и половая структура его скоплений, его питание.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материал собирался в различные сезоны в период с 2002 по 2008 год на акватории Баренцева моря и сопредельных вод общей площадью более 2000 тыс. км². Наибольшая часть материала собрана в осенне-зимний период в связи

с целевой особенностью ежегодных многовидовых тралово-акустических съемок (МВ ТАС) научными судами Полярного научно-исследовательского института (ПИНРО) и Норвежского института морских исследований (IMR). Общее количество траловых станций за рассматриваемый период составило более 5 тыс., из которых полярный триглопс отмечался в 788 уловах.

Сбор материала проводился донным тралом с ячеей 125–135 мм с мелкаячейистой вставкой 16 мм («рубашкой»). С каждой траловой станции, где присутствовало достаточное количество особей вида, проводилось определение длины тела не менее 50 выловленных экземпляров с определением пола. В случае меньшего количества выловленных рыб промерялись 100% особей. Длина тела определялась от начала рыла до конца лучей хвостового плавника (зоологическая длина) с точностью до 1 см.

Часть рыб из уловов периодически подвергалась биологическому анализу в соответствии с принятыми методиками [3], [6]. Всего за период исследований проанализировано более 6,5 тыс. особей. Для визуального определения степени наполнения желудка использовали следующую шкалу в баллах: 0 – желудок пустой, 1 – наполнение желудка малое, 2 – среднее, 3 – полное, 4 – желудок растянут, пища просвечивает через его стенки. Особи с вывернутыми желудками не учитывались в анализе [6].

Статистическая обработка результатов проведена с использованием общепринятых методов, расчет данных и построение графических изображений выполнены с использованием пакетов программ MS Office Windows и геоинформационной системы Serfer ver. 7.0.

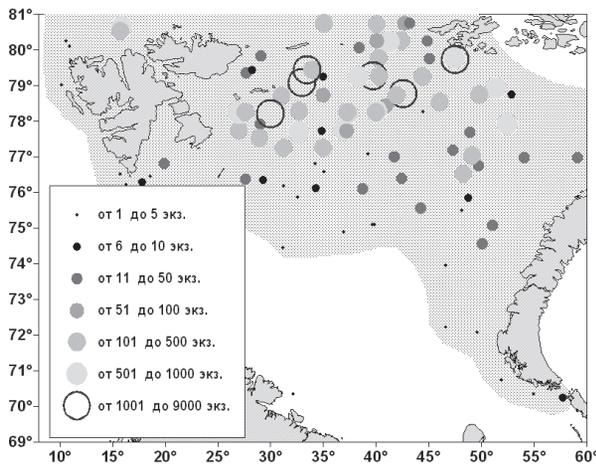


Рис. 1. Встречаемость (на 1 ч траления) и распространение полярного триглопса в Баренцевом море (по данным ТАС в 2002–2008 годах)

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полярный триглопс обитает на обширной акватории Баренцева моря и сопредельных вод. Преимущественно встречается в области влияния холодных арктических вод. На северо-западе и в центральной части моря южная граница его распространения проходит приблизительно по 74° с. ш., а на востоке моря он встречается и в более южных широтах, вплоть до 70° с. ш., концентрируясь вдоль берегов архипелага Новая Земля, что подтверждают данные литературных источников [1], [4], [8]. Отмечен в широком диапазоне глубин, от 10 до 787 м, преимущественно на глубинах от 190 до 370 м (рис. 1), в то время как в литературных источниках диапазон глубин несколько иной – от 71 до 930 м, в среднем 200–600 м. За период с 2002 по 2008 год на обследованной акватории северной границы ареала полярного триглопса достигнуто не было. В целом доля полярного триглопса в уловах траловых станций варьировала от единичных особей до 8% от общей массы уловов. Наиболее часто этот вид отмечался на акватории между архипелагами Шпицберген и Земля Франца-Иосифа. Основными районами его встречаемости в Баренцевом море были области влияния холодной ветви Медвежинского течения.

Размерный состав за весь период исследований был представлен самцами с длиной тела от 2 до 14 см, модой 8–9 см и самками с длиной тела от 2 до 15 см, модой 7–10 см (рис. 2). В то же время имеющиеся литературные данные указывают на максимальную длину тела самцов до 12,5 см, самок – до 17,0 см [1], [8]. Численно в уловах преобладали самки (58%).

Основная масса рыбы была представлена особями с созревающими половыми продуктами в III стадии зрелости (самцы – 57%, самки – 40%), что, вероятно, связано с тем, что материал получен преимущественно в осенне-зимний период проведения МВ ТАС.

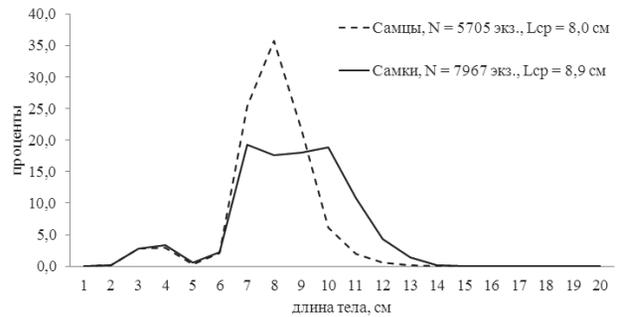


Рис. 2. Размерный состав полярного триглопса в Баренцевом море в 2002–2008 годах

За период исследований основная доля содержимого желудков приходилась на представителей отряда Temisto (79%), Euphausiacea (10%). В целом спектр питания был представлен 9 объектами, за исключением переваренной пищи, не поддающейся систематизации. Средний балл наполнения желудков составил 1,3 (рис. 3). Различий в составе пищи у самцов и самок не выявлено.

Необходимо отметить определенную роль полярного триглопса в трофической цепи основных промысловых видов рыб. По данным проведенных исследований, встречаемость рыб *Triglops nybelini* в желудках различных рыб составила: треска – до 2,2%, пикша – до 1,1%, камбала-ерш – до 2,5%, палтус черный – менее 0,5%.

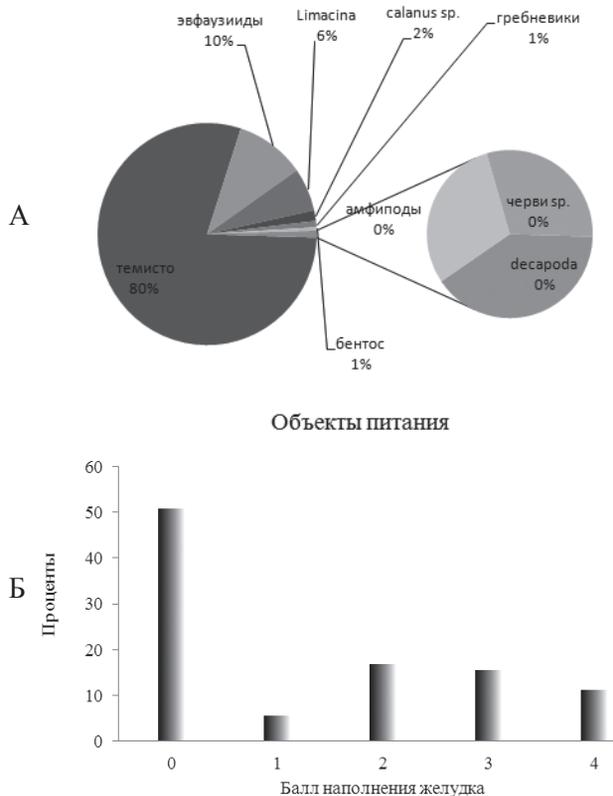


Рис. 3. Питание полярного триглопса в Баренцевом море в 2002–2008 годах: А – спектр питания, Б – степень наполнения желудка

ВЫВОДЫ

Полярный триглопс широко распространен в акватории Баренцева моря, преимущественно в области влияния холодных вод арктического происхождения, несколько концентрируясь около архипелага Шпицберген и Земли Франца-Иосифа. Южная граница ареала коррелирует с границами холодного Медвежинского течения. Выявленная верхняя граница его батиметрического распределения (10 м) указывает, что этот вид может встречаться на более мелководных участках, чем считалось ранее (71 м). Северные границы ареала в рассматриваемый период исследований не достигнуты. Длина тела рыб варьирует от 2 до 15 см, в то время как в литературных источниках для этой акватории отме-

чена характерная длина тела рыб вида в пределах до 10,8 см для самцов и до 11,7 см для самок с максимальной длиной до 17,0 см у единичных особей. В уловах преобладают самки (около 60%). Массовое созревание рыбы происходит в осенний период. Основу питания полярного триглопса составляют темисто (79%) и эвфаузиды (10%), а сам он является кормовым объектом для трески, пикши, камбалы-ерша и черного палтуса.

БЛАГОДАРНОСТИ

Благодарим сотрудников Полярного научно-исследовательского института и Норвежского института морских исследований, участвовавших в МВ ТАС с 2002 по 2008 год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрияшев А. П. Рыбы северных морей СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1954. 566 с.
2. Зернов М. С. О нахождении редких видов рыб на восточном Мурмане // Природа. 1950. № 9. С. 66–67.
3. Долгов А. В. Методическое пособие по сбору материалов для изучения питания и пищевых взаимоотношений рыб Баренцева моря. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 1996. 16 с.
4. Долгов А. В. Непромысловые рыбы // Исследования ПИНРО в районе архипелага Шпицберген. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2004. С. 230–265.
5. Долгов А. В. Атлас-определитель рыб Баренцева моря. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2011. 188 с.
6. Инструкции и методические рекомендации по сбору и обработке биологической информации в морях Европейского Севера и Северной Атлантики. М.: Изд-во ВНИРО, 2004. 300 с.
7. Книпович Н. М. Определитель рыб морей Баренцева, Белого и Карского // Труды НИИ по изучению Севера. 1926. Вып. 27. 223 с.
8. Лебедев В. Д., Спановская В. Д., Савваитова К. А., Соколов Л. И., Цепкин Е. А. Рыбы СССР. М.: Мысль, 1969. 448 с.
9. Терещенко В. В. Гидрометеорологические условия в Баренцевом море в 1985–1998 гг. Мурманск: ПИНРО, 1999.

Ryzhkov L. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Trofimov I. I., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

**SOME ECOLOGICAL AND BIOLOGICAL DATA
 ON POLAR TRIGLOPS (*TRIGLOPS NYBELINI*) OF BARENTS SEA**

Analysis of materials containing 2002–2008 trawler-acoustic surveys of the Barents Sea ecosystems in regard to polar triglops (*Triglops nybelini* Jensen, 1944) was carried out. We received new data on spatial and bathymetric distributions, occurrence, and major biological characteristics of the species.

Key words: Barents Sea, TAS, polar triglops, biological characteristics

REFERENCES

1. Andriyashchev A. P. *Ryby severnykh morey SSSR* [Fish of the northern seas of the USSR]. Moscow; Leningrad, Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1954. 566 p.
2. Zernov M. S. On discovery of rare species of fish in the eastern Murman [O nakhozhdenii redkikh vidov ryb na vostochnom Murmane]. *Priroda* [Nature]. 1950. № 9. P. 66–67.
3. Dolgov A. V. *Metodicheskoe posobie po sboru materialov dlya izucheniya pitaniya i pishcheyykh vzaimootnosheniy ryb Barentseva morya* [Guidelines on materials' collection pertaining nutrition and food relationships of Barents Sea fish]. Murmansk, PINRO Publishing House, 1996. 16 p.
4. Dolgov A. V. Non-target fish [Nepromyslovye ryby]. *Issledovaniya PINRO v rayone arkhipelaga Shpitsbergen* [Research PINRO in Spitsbergen]. Murmansk, PINRO Publishing House, 2004. P. 230–265.
5. Dolgov A. V. *Atlas-opredelitel' ryb Barentseva morya* [Atlas-directory of Barents Sea fish]. Murmansk, PINRO Publ., 2011. 188 p.
6. *Instruktsii i metodicheskie rekomendatsii po sboru i obrabotke biologicheskoy informatsii v moryakh Evropeyskogo Severa i Severnoy Atlantiki* [Instructions and guidelines for collection and processing of biological information in the European North Sea and North Atlantic]. Moscow, VNIRO Publ., 2004. 300 p.
7. Книпович Н. М. *Определитель рыб морей Баренцева, Белого и Карского* [The determinant of fish of the Barents, White and Kara]. *Trudy NI po izucheniyu Severa* [Proceedings of the Institute for the Study of the North]. 1926. Is. 27. 223 p.
8. Lebedev V. D., Spanovskaya V. D., Savvaitova K. A., Sokolov L. I., Tsepkin E. A. *Ryby SSSR* [Fishes of the USSR]. Moscow, Mysl' Publ., 1969. 488 p.
9. Tereshchenko V. V. *Gidrometeorologicheskie usloviya v Barentsevom more v 1985–1998 gg.* [Metrological and hydrological conditions in the Barents Sea in 1985 and 1998]. Murmansk, PINRO Publ., 1999. 176 p.

Поступила в редакцию 02.07.2013

ВЯЧЕСЛАВ ВАСИЛЬЕВИЧ ГОРБАЧ

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

ЛАНДШАФТНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ГРУППИРОВОК БУЛАВОУСЫХ ЧЕШУЕКРЫЛЫХ (*Lepidoptera*, *Hesperioidea* et *Papilionoidea*) В УСЛОВИЯХ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ КАРЕЛИИ*

Биотопические группировки булавоусых чешуекрылых изучали в сельскохозяйственном и лесном ландшафтах в течение 4 сезонов. В результате 1554 учетов, проведенных в 111 местообитаниях, зарегистрировали 3832 особи 50 видов. Общность списков составляет около 90 %. Отличия обусловлены единичными находками видов-мигрантов, таких как белянка *Pontia edusa*, желтушка *Colias hyale*, перламутровка *Issoria lathonia*, и локализацией популяций толстоголовки *Pyrgus alveus*, голубянки *Aricia nicias* и перламутровки *Boloria freija*. Ландшафтная дифференциация наиболее четко проявилась в соотношениях относительной плотности и встречаемости видов. Наиболее существенные отличия выявлены в структуре населения. В сельскохозяйственном ландшафте преобладали брюквенница *Pieris napi*, крапивница *Nymphalis urticae* и толстоголовка *Thimelicus lineola*, в лесном – малиница *Callophrys rubi*, перламутровка *Brenthis ino* и чернушка *Erebia ligea*. Вместе с крушинницей *Gonepteryx rhamni*, доминирующей в обоих случаях, их общая доля в выборках составила 29 и 42 % соответственно. Выявленные отличия определяются прежде всего соотношением стадий различного типа в пределах ландшафтных контуров. Сравнение видового богатства, плотности населения и α -разнообразия показало, что биотопические группировки, формирующиеся в сходных местообитаниях, меняются слабо. Кластеризация группировок посредством компонентного анализа указала на три направления изменчивости обилия видов – тяготение видов к болотным, луговым и лесным местообитаниям. Эти результаты, подчеркивая роль структуры ландшафта в формировании многовидового населения, подтверждают вывод о высокой стабильности среднетаежных биотопических группировок булавоусых чешуекрылых. Стабильность обеспечивается прежде всего избирательностью видов по отношению к местообитаниям.

Ключевые слова: средняя тайга Карелии, булавоусые чешуекрылые, ландшафтное распределение видов, изменчивость биотопических группировок

В таежных ландшафтах булавоусые чешуекрылые распределены крайне неравномерно [2], [7], [8]. Пространственная конфигурация их популяций определяется избирательностью видов по отношению к местообитаниям: обычно бабочки населяют более или менее открытые биотопы (болота, луга, поляны, вырубki, просеки и т. д.), доля которых в структуре таких ландшафтов, как правило, невелика. Соответствие условий среды экологической специфике каждого вида обуславливает свойственное только ему биотопическое распределение. Наиболее простым вариантом является строгая приуроченность к очень узкому набору похожих местообитаний. В другом случае вид может заселять самые разнообразные биотопы и не являться характерным ни для одного из них. Между этими крайними показателями избирательности существует множество переходов. Пространственная неоднородность среды, при которой подходящие для существования особей местообитания представлены относительно небольшими участками, неизбежно порождает дискретность в распро-

странении видов на локальном уровне. Степень обособленности популяций определяется прежде всего конфигурацией ландшафта, набором подходящих стадий и качеством среды в местах обитания [9], [11], [12].

Пространственное распределение булавоусых чешуекрылых в условиях средней тайги Карелии исследовано нами ранее [13]. Основной целью настоящей работы стало установление ландшафтных отношений между видами. Особое внимание уделено изучению дифференциации населения, возникающей вследствие различия подходов к осуществлению хозяйственной деятельности на разных территориях, и общих трендов его изменчивости по градиентам среды. Состав и структуру биотопических группировок, формирующихся в сельскохозяйственном и лесном ландшафтах, исследовали по выборкам бабочек из окрестностей с. Кончезера и заповедника «Кивач», полученным в 1993–1994 и 1995–1996 годах. Локальные отличия этих соседних территорий обусловлены, прежде всего, особенностями структуры ландшафта. Окрестности

Таблица 1

Исследованные местообитания, число заложённых трансект и зарегистрированных в ходе учётов бабочек

| Тип биотопа | Число местообитаний | | | Число трансект | | Число учётов | Число видов | Число особей |
|--|---------------------|-------|-------|----------------|-------|--------------|-------------|--------------|
| | Кончезеро | Кивач | Всего | <i>Lim</i> | Всего | | | |
| Лесные сфагновые болота (MIR) | 7 | 9 | 16 | 1–12 | 47 | 282 | 21 | 900 |
| Лишайниковые сосняки (DPF) | 7 | 5 | 12 | 1–5 | 33 | 198 | 14 | 93 |
| Зеленомошные сосняки (HPF) | 10 | 6 | 16 | 1–4 | 42 | 252 | 41 | 543 |
| Березняки (HBF) | – | 8 | 8 | 2–3 | 19 | 114 | 19 | 89 |
| Осинники (HAF) | – | 5 | 5 | 2–5 | 15 | 90 | 16 | 62 |
| Осоково-разнотравные лесные луга (SFM) | – | 7 | 7 | 1–7 | 16 | 96 | 28 | 355 |
| Влажно-разнотравные лесные луга (HFM) | 4 | 8 | 12 | 1–6 | 27 | 162 | 32 | 353 |
| Разнотравно-злаковые лесные луга (DFM) | – | 15 | 15 | 1–3 | 21 | 126 | 26 | 347 |
| Разнотравно-злаковые открытые луга (DOM) | 14 | – | 14 | 1–3 | 19 | 114 | 30 | 618 |
| Придорожные биотопы (RDS) | 6 | – | 6 | 3–4 | 20 | 120 | 36 | 472 |
| Всего | 48 | 63 | 111 | 1–12 | 259 | 1554 | 50 | 3832 |

Примечание. Обозначения типов биотопов приняты по [13], *Lim* – диапазон варьирования.

с. Кончезера представляют собой типичный сельскохозяйственный район с обширными полями, сенокосами и выпасами, с лесным фондом, используемым для заготовок древесины. Таежные биоценозы заповедника «Кивач» развиваются естественным путем, не испытывая прямого антропогенного воздействия по крайней мере в течение последних 80 лет.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных признаков была взята частота встреч видов при учётах бабочек на болотах, лесных прогалинах, лугах и в придорожных биотопах (табл. 1). Обычно исследованиями удавалось охватить все местообитания определенного типа, выявленные на соответствующих территориях. В других случаях использовали метод случайного отбора. На каждом из выбранных участков было заложено от 1 до 12 трансект длиной 150 м. В крупных местообитаниях использовали несколько линейных маршрутов, расположенных так, чтобы соблюсти соотношение неоднородностей в структуре растительного покрова¹. При необходимости особей отлавливали, определяли, а затем отпускали или собирали как эталонные экземпляры. Учеты проводили с мая по сентябрь при благоприятных погодных условиях (облачность не более 30 %, температура воздуха не менее 15 °С, скорость ветра не более 5 м/с) в часы максимальной активности насекомых (с 10 до 15 часов). Соблюдение установленных метеорологических и временных ограничений позволило минимизировать влияние на данные погодных условий и суточных изменений активности булавоусых чешуекрылых.

Полученные в результате учётов бабочек данные обобщали по принципу сходства биотопов. Внутри выделенных групп исследовали видовой состав, относительную плотность населения и видовое разнообразие группировок, оценива-

ли степень их общности. Видовое разнообразие (α -разнообразие) описывали с помощью индексов Шеннона, Симпсона и Бергера – Паркера [6]. Мерой общности группировок служило евклидово расстояние. Рост его среднего значения свидетельствует об увеличении изменчивости биотопических группировок, формирующихся в сходных условиях. Значимость отличий переменных при попарном сравнении выборок оценивали с помощью критерия Стьюдента. Поскольку в ряде случаев проверка эмпирических распределений на нормальность дала отрицательные результаты, мы дополнили алгоритм расчетов вычислением рангового критерия Манна – Уитни. Если в итоге получали альтернативные статистические выводы об отличиях выборок, то результаты интерпретировали, опираясь на выводы о характере распределений: когда распределения частот в обеих сравниваемых выборках подчинялись нормальному закону, ориентировались на критерий Стьюдента, в других случаях – на критерий Манна – Уитни.

Видовое богатство, встречаемость и направленность изменчивости населения изучали по средним значениям плотности населения в сводных (групповых) выборках. Видовое богатство описывали гипергеометрическими кривыми насыщения, демонстрирующими отличия выделенных групп по скорости пополнения видовых списков с ростом объема выборок [6]. Встречаемость представлена долей местообитаний, в которых был зарегистрирован вид (положительных проб), от их общего числа. Тренды изменчивости населения (β -разнообразие) изучали с помощью компонентного анализа [3]. Исходная матрица состояла из n объектов (здесь – выделенных групп местообитаний), охарактеризованных по m признакам (средним значениям относительной плотности каждого вида). Во всех случаях использовали нормированные массивы данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ

К настоящему времени на рассматриваемых территориях известно по 60 видов. Помимо бабочек, зарегистрированных на трансектах в окрестностях с. Кончезера и в заповеднике «Кивач» (табл. 2), это толстоголовка *Carterocephalus palaemon*, парусник *Papilio machaon*, белянки *Pieris brassicae* и *Pontia edusa*, голубянки *Nordmania pruni*, *Glaucopsyche alexis* и *Aricia nicias*, нимфалиды *Nymphalis antiopa*, *N. io*, *Vanessa atalanta*, *V. cardui*, *B. titania*, *Issoria lathonia* и *A. paphia* – в первом случае; толстоголовки *P. malvae* и *C. palaemon*, парусник *P. machaon*, белянки *P. brassicae*, *P. rapae* и *Colias hyale*, голубянки *N. pruni*, *L. hippothoe* и *G. alexis*, нимфалиды *N. antiopa*, *N. io*, *V. atalanta*, *V. cardui*, *E. maturna* и *Boloria frigga*, бархатницы *L. petropolitana* и *C. glycerion* – во втором². Общность списков составляет около 90 %. Наиболее высокое обилие и встречаемость в окрестностях с. Кончезера имели бруквенница *P. napi*, крапивница *N. urticae*, крушинница *G. rhamni* и толстоголовка *T. lineola*, в заповеднике «Кивач» преобладали малинница *C. rubi*, перламутровка *B. ino*, чернушка *E. ligea* и крушинница *G. rhamni*. Обобщенная доля этих видов в выборках равна 29 и 42 % соответственно. Булавоусые чешуекрылые в сельскохозяйственном ландшафте распределены более равномерно, чем в лесном. Например, встречаемость 25 % и более (от общего числа местообитаний) в окрестностях с. Кончезера показана для 19 видов, тогда как в заповеднике «Кивач» – всего для 11 (табл. 2). В условиях лесного ландшафта резко падает встречаемость у толстоголовок *T. lineola* и *O. sylvanus*, голубянки *P. icarus*, перламутровки *A. adippe* и заметно возрастает у малинницы *C. rubi*, перламутровки *B. ino* и чернушки *E. ligea*. Толстоголовка *P. malvae*, репница *P. rapae*, червонец *L. hippothoe*, шашечница *E. maturna*, перламутровка *A. paphia*, буроглазка *L. petropolitana* и сенница *C. glycerion*, известные по фаунистическим сборам и из окрестностей с. Кончезера и из заповедника «Кивач», в ходе учетов зарегистрированы лишь на одной из рассматриваемых территорий. Однако наиболее высокая локализация популяций свойственна толстоголовке *P. alveus*, перламутровкам *B. freija* и *B. titania*, буроглазке *P. aegeria*, чернушке *E. euryale* и сатиру *O. jutta*.

Ландшафтную дифференциацию биотопических группировок булавоусых чешуекрылых изучали на примере лесных сфагновых болот, зеленомошных сосняков и разнотравно-злаковых лугов. Наименьшие отличия в видовом составе характерны для болотных группировок. На лесных сфагновых болотах в окрестностях с. Кончезера зарегистрировали 18 видов бабочек, в заповеднике «Кивач» – 17 видов. Общность списков составила 80 %. Имеющаяся изменчи-

Таблица 2
Видовой состав и структура населения булавоусых чешуекрылых в сельскохозяйственном (окрестности с. Кончезера) и лесном (заповедник «Кивач») ландшафтах Северо-Западного Прионежья

| Вид | Кончезеро, n = 48 | | | Кивач, n = 63 | | |
|----------------------------------|-------------------|------|----|---------------|------|----|
| | M | S | Ps | M | S | Ps |
| <i>Pyrgus alveus</i> | 0,4 | 1,8 | 10 | – | – | – |
| <i>P. malvae</i> | 0,2 | 0,7 | 10 | – | – | – |
| <i>Carterocephalus silvicola</i> | 0,3 | 1,2 | 6 | 0,1 | 0,6 | 6 |
| <i>Thymelicus lineola</i> | 3,6 | 6,6 | 42 | 0,2 | 0,8 | 10 |
| <i>Ochlodes sylvanus</i> | 2,3 | 3,9 | 40 | 0,1 | 0,6 | 8 |
| <i>Leptidea sinapis</i> | 3,0 | 10,1 | 25 | 0,5 | 1,2 | 17 |
| <i>Anthocharis cardamines</i> | 1,2 | 2,1 | 31 | 1,1 | 2,2 | 32 |
| <i>Aporia crataegi</i> | 1,3 | 3,4 | 21 | 0,3 | 0,9 | 14 |
| <i>Pieris napi</i> | 7,4 | 9,0 | 65 | 2,2 | 3,4 | 46 |
| <i>P. rapae</i> | 0,8 | 2,4 | 15 | – | – | – |
| <i>Colias palaeno</i> | 0,3 | 0,8 | 17 | 0,9 | 2,8 | 17 |
| <i>Gonepteryx rhamni</i> | 3,7 | 3,9 | 69 | 3,4 | 5,4 | 62 |
| <i>Callophrys rubi</i> | 1,6 | 3,8 | 29 | 6,9 | 20,5 | 75 |
| <i>Lycaena hippothoe</i> | 1,7 | 7,2 | 10 | – | – | – |
| <i>L. virgaureae</i> | 0,8 | 1,9 | 19 | 0,6 | 2,9 | 6 |
| <i>Celastrina argiolus</i> | 0,4 | 1,4 | 15 | 0,6 | 1,1 | 32 |
| <i>Plebeius argus</i> | 1,8 | 4,1 | 31 | 0,5 | 1,7 | 11 |
| <i>P. idas</i> | 1,8 | 3,8 | 31 | 0,3 | 1,3 | 8 |
| <i>P. optilete</i> | 0,6 | 1,3 | 23 | 2,7 | 7,0 | 21 |
| <i>Aricia artaxerxes</i> | 1,0 | 3,9 | 13 | 0,2 | 0,8 | 8 |
| <i>A. eumedon</i> | 0,5 | 2,4 | 6 | 0,1 | 0,5 | 3 |
| <i>Polyommatus amandus</i> | 2,0 | 4,2 | 33 | 0,4 | 1,0 | 16 |
| <i>P. icarus</i> | 3,0 | 3,8 | 58 | 0,2 | 1,1 | 5 |
| <i>P. semiargus</i> | 1,4 | 3,1 | 31 | 0,5 | 1,7 | 13 |
| <i>Limenitis populi</i> | 0,8 | 2,7 | 13 | 0,8 | 2,6 | 14 |
| <i>Nymphalis urticae</i> | 5,3 | 6,2 | 69 | 1,9 | 3,4 | 38 |
| <i>Polygonia c-album</i> | 0,7 | 2,0 | 21 | 0,8 | 2,5 | 21 |
| <i>Arashnia levana</i> | 1,5 | 4,4 | 23 | 0,4 | 1,3 | 11 |
| <i>Euphydryas maturna</i> | 0,6 | 2,7 | 10 | – | – | – |
| <i>Melitaea athalia</i> | 0,5 | 1,2 | 15 | 0,2 | 1,0 | 3 |
| <i>Boloria aquilonaris</i> | 0,9 | 2,4 | 17 | 2,6 | 7,1 | 17 |
| <i>B. eunomia</i> | 0,3 | 1,2 | 8 | 1,4 | 5,2 | 11 |
| <i>B. euphrosyne</i> | 0,3 | 1,3 | 8 | 0,7 | 2,9 | 11 |
| <i>B. freija</i> | – | – | – | 0,3 | 1,9 | 3 |
| <i>B. selene</i> | 2,5 | 4,0 | 44 | 1,4 | 2,4 | 38 |
| <i>B. titania</i> | – | – | – | 0,4 | 2,0 | 8 |
| <i>B. ino</i> | 1,9 | 3,2 | 40 | 5,8 | 8,8 | 73 |
| <i>Argynnis adippe</i> | 1,3 | 2,2 | 38 | 0,3 | 1,2 | 6 |
| <i>A. aglaja</i> | 1,7 | 3,1 | 35 | 1,4 | 2,6 | 32 |

Окончание табл. 2

| Вид | Кончезеро, n = 48 | | | Кивач, n = 63 | | |
|------------------------------|-------------------|-----|----|---------------|-----|----|
| | М | S | Ps | М | S | Ps |
| <i>A. paphia</i> | – | – | – | 2,6 | 7,5 | 25 |
| <i>Pararge aegeria</i> | 0,1 | 0,9 | 2 | 0,2 | 1,3 | 3 |
| <i>Lasiommata maera</i> | 1,5 | 3,5 | 27 | 0,8 | 1,6 | 30 |
| <i>L. petropolitana</i> | 0,8 | 3,9 | 8 | – | – | – |
| <i>Coenonympha glycerion</i> | 1,7 | 8,3 | 8 | – | – | – |
| <i>C. tullia</i> | 0,1 | 0,5 | 2 | 0,1 | 0,6 | 2 |
| <i>Aphantopus hyperantus</i> | 5,9 | 8,5 | 58 | 0,7 | 2,1 | 24 |
| <i>Erebia embla</i> | 0,1 | 0,4 | 4 | 0,2 | 0,8 | 5 |
| <i>E. euryale</i> | – | – | – | 0,4 | 2,3 | 5 |
| <i>E. ligea</i> | 0,1 | 0,4 | 8 | 5,3 | 8,0 | 60 |
| <i>Oeneis jutta</i> | 0,2 | 1,1 | 2 | 0,6 | 2,9 | 5 |

Примечание. n – число изученных биотопических группировок бабочек, М – средняя арифметическая, S – стандартное отклонение (экз./га), Ps – встречаемость вида (% от числа группировок).

вость возникла в основном за счет случайного залета форм, никак не связанных со сфагновыми болотами – зорьки *A. cardamines*, голубянки *C. argiolus*, шашечницы *E. maturna*, буроглазки *L. maera* и глазка *A. hyperantus*. Главными отличительными чертами населения болот в заповеднике «Кивач» стали присутствие популяций *B. freija* и высокая относительная плотность бабочек – 101,9 против 26,7 экз./га (табл. 3). Совместный вклад в сравниваемые выборки 6 наиболее обычных на среднетаежных болотах видов – желтушки *C. palaeno*, голубянок *C. rubi*, *P. argus*, *P. idas*, *P. optilete*, перламутровок *B. aquilonaris* и *B. eunomia* – доходит до 80–90 %. Группировки булавоусых чешуекрылых, формирующиеся на прогалинах в зеленомошных сосняках, отличаются наиболее высокой изменчивостью. В окрестностях с. Кончезера в таких местообитаниях зарегистрировали 37 видов, в заповеднике «Кивач» – 26 видов. Общность списков не превышает 60 %. Ландшафтная специфика группировок определяется прежде всего локализацией популяций толстоголовки *P. alveus*, перламутровок *A. paphia*, *B. titania*, буроглазки *L. petropolitana* и чернушки *E. euryale*. Средние значения относительной плотности в сельскохозяйственном и лесном ландшафтах равны 75,0 и 27,3 экз./га соответственно. В лесных местообитаниях окрестностей с. Кончезера наиболее обычны беляночка *L. sinapis*, пестрокрыльница *A. levana*, брюквенница *P. napi*, буроглазка *L. maera*, крушинница *G. rhamnii* и малиница *C. rubi*, в заповеднике «Кивач» – ленточник *L. populi*, чернушка *E. ligea*, перламутровка *B. ino* и малиница *C. rubi*. Большинство из них имели относительно низкую встречаемость, на уровне 30–50 % от общего числа исследованных лесных местообитаний на рассматриваемых

территориях. Совокупный вклад этих бабочек в исследуемые выборки составил 53 и 76 %. На открытых и лесных разнотравно-злаковых лугах найдено 30 и 26 видов соответственно. Общность списков видов превысила 70 %. При переходе от лесного к сельскохозяйственному ландшафту с 60,2 до 112,3 экз./га возросла относительная плотность населения лугов, в разы увеличилась встречаемость таких видов, как толстоголовки *T. lineola* и *O. sylvanus*, голубянки *P. amandus*, перламутровки *B. selene* и глазка *A. hyperantus*. Противоположный тренд изменчивости продемонстрировали углокрыльница *P. c-album* и перламутровка *B. ino*. Неожиданно низкую встречаемость в заповеднике «Кивач» показали голубянка *P. icarus* и перламутровка *A. adippe*, виды вполне обычные в Северо-Западном Прионежье. В свою очередь, на открытых лугах окрестностей с. Кончезера не удалось обнаружить ни одной особи других многочисленных видов – перламутровки *A. paphia* и чернушки *E. ligea*. Помимо перечисленных видов, заметный вклад в ландшафтную дифференциацию луговых группировок бабочек внесли и более редкие формы, такие как толстоголовка *P. alveus*, белянка *P. rapae*, червонец *L. hippothoe*, перламутровка *B. titania* и сеница *C. glycerion*. Доля самых многочисленных видов (брюквенницы *P. napi*, глазка *A. hyperantus*, толстоголовки *T. lineola*, крапивницы *A. urticae* на открытых лугах и перламутровки *A. paphia*, крушинницы *G. rhamnii*, брюквенницы *P. napi*, крапивницы *N. urticae* на лесных лугах) составила 42–45 % от объема выборок соответственно.

Результаты сравнения значений евклидова расстояния (табл. 3), с помощью которого измеряли внутригрупповую вариабельность выборок, указывают на большую неоднородность биотопических группировок в лесном ландшафте. Эта общая тенденция сохраняется в отношении населения булавоусых чешуекрылых луговых и лесных местообитаний и нарушается на болотах. Для группировок болот отмечена наименьшая изменчивость и по другим показателям. Они сходны по числу видов и по всем индексам α -разнообразия, значимо отличаясь лишь по относительной плотности населения: число зарегистрированных особей при учетах имаго на болотах заповедника «Кивач» почти в четыре раза больше, чем на болотах, расположенных в окрестностях с. Кончезера. На лугах и в сосняках-зеленомошниках выявлен противоположный тренд: показатели видового богатства и обилия бабочек возрастают в местообитаниях, расположенных в сельскохозяйственном ландшафте. Более сложные отношения возникают здесь между индексами, измеряющими видовое разнообразие. Показано, что биотопические группировки булавоусых чешуекрылых окрестностей с. Кончезера в целом более разнообразны, чем в заповеднике «Кивач». Тем не менее сравнение выборок из местообита-

Таблица 3

Характеристики исследованных биотопических группировок булавоусых чешуекрылых

| Параметр | Болота | | Сосняки | | Луга | | Все местообитания | | |
|--|--------------------------------|--|---------------------------------|--|---------------------------------|---|-----------------------------------|---|-------|
| | Кончезеро, n = 7 *n = 21 | Кивач, n = 9 *n = 36 | Кончезеро, n = 10 *n = 45 | Кивач, n = 6 *n = 15 | Кончезеро, n = 14 *n = 91 | Кивач, n = 15 *n = 105 | Кончезеро, n = 48 *n = 1128 | Кивач, n = 63 *n = 1953 | |
| Число видов | M | 8,0 | 8,2 | 12,6 | 7,7 | 12,4 | 9,5 | 11,1 | 8,6 |
| | S | 0,6 | 3,2 | 4,4 | 1,4 | 2,5 | 3,8 | 4,6 | 3,6 |
| | | t = 0,16, df=14, p = 0,869 W = 21,5, p = 0,532 | | t = 3,29, df=14, p = 0,007 W = 7,0, p = 0,014 | | t = 1,70, df=27, p = 0,023 W = 54,0, p = 0,027 | | t = 3,16, df=109, p = 0,002 W = 997,5, p = 0,002 | |
| Относительная плотность населения, экз./га | M | 26,7 | 101,9 | 75,0 | 27,3 | 112,3 | 60,2 | 69,8 | 51,2 |
| | S | 11,8 | 51,2 | 23,9 | 9,5 | 34,1 | 26,3 | 43,5 | 42,7 |
| | | t = 3,49, df = 14, p = 0,004 W = 54,0, p = 0,002 | | t = 4,64, df = 14, p < 0,001 W = 1,0, p = 0,002 | | t = 5,23, df = 27, p < 0,001 W = 84,0, p < 0,001 | | t = 2,38, df = 109, p = 0,019 W = 1125,0, p = 0,021 | |
| Видовое разнообразие, индекс Шеннона (H) | M | 1,89 | 1,68 | 2,17 | 1,96 | 2,23 | 1,98 | 2,07 | 1,79 |
| | S | 0,12 | 0,45 | 0,42 | 0,41 | 0,18 | 0,36 | 0,46 | 0,44 |
| | | t = 1,12, df = 14, p = 0,284 W = 19,0, p = 0,375 | | t = 2,34, df = 14, p = 0,035 W = 12,0, p = 0,057 | | t = 2,42, df = 27, p = 0,022 W = 58,5, p = 0,046 | | t = 3,28, df = 109, p = 0,001 W = 909,0, p < 0,001 | |
| Видовое разнообразие, индекс Симпсона (1/C) | M | 5,63 | 4,83 | 7,50 | 4,57 | 7,84 | 6,53 | 7,19 | 5,35 |
| | S | 1,25 | 1,56 | 2,88 | 1,67 | 1,76 | 2,42 | 2,67 | 2,23 |
| | | t = 1,06, df = 14, p = 0,310 W = 19,0, p = 0,377 | | t = 2,26, df = 14, p = 0,040 W = 13,0, p = 0,073 | | t = 1,66, df = 27, p = 0,108 W = 65,0, p = 0,847 | | t = 3,94, df = 109, p < 0,001 W = 888,0, p < 0,001 | |
| Видовое разнообразие, индекс Бергера – Паркера (1/D) | M | 3,69 | 3,17 | 4,14 | 2,95 | 4,73 | 4,25 | 4,31 | 3,39 |
| | S | 1,34 | 0,85 | 1,26 | 1,21 | 1,22 | 1,70 | 1,34 | 1,41 |
| | | t = 0,39, df = 14, p = 0,366 W = 22,0, p = 0,595 | | t = 1,86, df = 14, p = 0,085 W = 14,5, p = 0,103 | | t = 0,86, df = 27, p = 0,398 W = 69,0, p = 0,121 | | t = 3,49, df = 109, p < 0,001 W = 857,0, p < 0,001 | |
| Изменчивость группировок, евклидово расстояние (d) | M | 1,850 | 1,670 | 1,103 | 1,627 | 1,111 | 1,209 | 1,197 | 1,689 |
| | S | 1,075 | 0,608 | 0,116 | 0,519 | 0,108 | 0,276 | 0,499 | 0,553 |
| | | t = 0,81, df = 55, p = 0,366 W = 364,0, p = 0,823 | | t = 6,41, df = 58, p < 0,001 W = 556,5, p < 0,001 | | t = 6,78, df = 194, p < 0,001 W = 6656,5, p < 0,001 | | t = 24,67, df = 3079, p < 0,001 W > 10 000, p < 0,001 | |

Примечание. n – число изученных группировок, *n – объем выборок для оценки d, M – средняя арифметическая, S – стандартное отклонение, t – критерий Стьюдента (отличия средних арифметических); W – критерий Манна – Уитни (отличия медиан)

ний одного типа (лесных и луговых) не выявило безусловной ландшафтной дифференциации: отличия по индексу Шеннона в обоих случаях значимы, по индексу Бергера – Паркера случайны, мера Симпсона подтверждает значимость отличий только в случае с лесными группировками³. Вместе с тем степень выявленной дифференциации невелика. Об этом говорят значимости критерия Стьюдента, близкие к пороговому уровню ($\alpha = 0,05$), и отсутствие достоверных отличий по критерию Манна – Уитни во всех случаях, кроме одного. Результаты сравнения кривых насыщения (рис. 1) показывают, что при равных усилиях в заповеднике «Кивач» можно встретить больше видов. Сходную динамику роста в окрестностях с. Кончезера демонстрируют лишь лесные группировки, пополнение которых происходит за счет луговых форм, активно проникающих во все местообитания сельскохозяйственного ландшафта. В заповеднике «Кивач» большин-

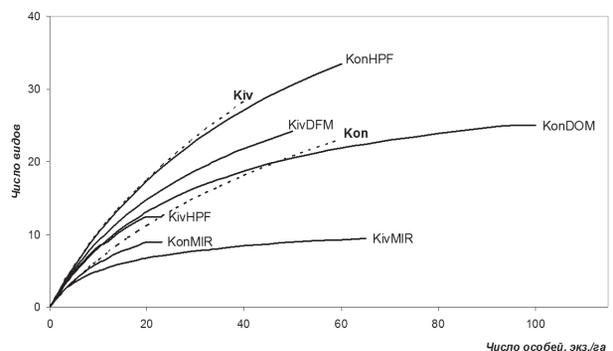


Рис. 1. Видовое богатство биотопических группировок булавоусых чешуекрылых: Кон – Кончезеро (сельскохозяйственный ландшафт), Кив – Кивач (лесной ландшафт), MIR – лесные сфагновые болота, HPF – зеленомошные сосняки, DFM и DOM – лесные и открытые разнотравно-злаковые луга. Пунктирными линиями выделены кривые, характеризующие видовое богатство населения бабочек изученных ландшафтов в целом

ство таких бабочек концентрируются на лесных лугах, определяя тем самым их промежуточное положение между двумя вариантами собственно лесных местообитаний. Суммарное видовое богатство в лесном ландшафте достигается гармоничной интеграцией болотных, лесных и луговых группировок булавоусых чешуекрылых, тогда как структура населения в окрестностях с. Кончезера определяется луговыми группировками: динамика пополнения общего списка видов при увеличении объема выборки фактически дублирует ход кривой насыщения последних.

Использование компонентного анализа для совокупной оценки степени ландшафтной дифференциации рассмотренных биотопических группировок булавоусых чешуекрылых позволило выявить три основных тренда изменчивости обилия видов, соответствующих значимым главным компонентам (рис. 2). Первая компонента отвечает за общую изменчивость обилия бабочек. Согласно полученным значениям, все виды выстраиваются вдоль ее оси от редких форм (*C. tullia*, *B. freija*, *P. malvae*, *E. euryale*) до самых многочисленных (*P. napi*, *N. urticae*, *G. rhamnii*, *B. ino*). Значения факторных нагрузок, указывающие на близость группировок, формирующихся на болотах, лугах или в лесных местообитаниях, свидетельствуют о наличии общих закономерностей в распределении видов и относительно высокой стабильности населения бабочек сходных биотопов. Межландшафтные различия носят более частный характер и сильнее проявляются в следующих главных компонентах. Дифференциация видов по второй компоненте выражена в асимметрии группировок открытых лугов и болот. Соответственно, максимальные значения здесь получили виды, достигающие наивысшего обилия в окрестностях с. Кончезера (*A. hyperantus*, *T. lineola*, *P. napi*, *P. icarus*), а минимальные – виды, доминирующие на болотах заповедника «Кивач» (*C. rubi*, *B. aquilonaris*, *P. optilete*). По третьей компоненте обособились лесные формы (*E. ligea*, *L. populi*, *A. raphia*, *B. ino*). Ординация факторных

нагрузок на плоскости второй и третьей компонент обобщает ландшафтные различия в структуре населения булавоусых чешуекрылых: группировки, формирующиеся в сельскохозяйственном ландшафте, смещены к левому правому углу, в область высоких положительных значений второй компоненты, а группировки лесного ландшафта – к правому нижнему углу, в область аналогичных значений третьей компоненты. Болотные группировки занимают обособленное положение, составляя наиболее стабильный кластер в этой системе.

ОБСУЖДЕНИЕ

Население булавоусых чешуекрылых в исследованных ландшафтах фактически не отличается по видовому составу. Высокая степень общности обусловлена соседством территорий, центры которых – с. Кончезеро и пос. Водопад Кивач – расположены друг от друга на расстоянии около 15 км. Незначительные отличия возникли из-за единичных находок видов-мигрантов, таких как белянка *P. edusa*, желтушка *C. hyale*, перламутровка *I. lathonia*, и локализации популяций толстоголовки *P. alveus*, голубянки *A. nicias*, перламутровок *B. freija* и *B. frigga*⁴. Ландшафтная дифференциация наиболее четко проявилась в соотношениях относительной плотности и встречаемости видов. Показано заметное расхождение по структуре населения (табл. 2), и в особенности по составу доминирующих форм, среди которых только крушинница *G. rhamnii* является общим видом. Основная причина структурных различий кроется в своеобразии набора подходящих для существования бабочек участков среды. Данные о числе исследованных местообитаний в окрестностях с. Кончезера и заповеднике «Кивач» (табл. 1) в целом адекватно отражают соотношения основных типов местообитаний на рассматриваемых территориях. Наличие и качество таких участков во многом определяется историей освоения и существующей практикой хозяйственного использования ресурсов среды. Так, в заповеднике «Кивач» ключевым компонентом наземных экосистем являются старовозрастные леса. Наименее затененные местообитания представлены здесь небольшими прогалинами естественного происхождения и участками с разреженным древостоем. Второе место занимают сфагновые болота. Большинство лугов – это бывшие сенокосы, сохранившиеся на территории заповедника с прежних времен. Они занимают небольшие по площади участки, вкрапленные в лесные массивы по берегам водотоков и на прилегающих к охранной зоне территориях. Растительный покров является типичным для запада среднетаежной зоны и в настоящее время не испытывает прямого антропогенного воздействия. Как следствие, для населения булавоусых чешуекрылых характерно преобладание видов, тяготеющих

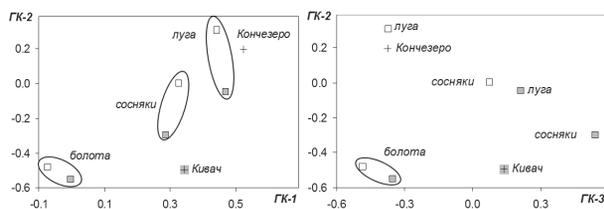


Рис. 2. Ординация группировок булавоусых чешуекрылых: по осям главных компонент (ГК-1, ГК-2 и ГК-3) даны значения факторных нагрузок. Дисперсии первой, второй и третьей компонент равны 2,60; 2,35 и 1,24, информативность составляет 32,5; 29,4 и 15,5 % соответственно. Серым цветом отмечены выборки из лесного ландшафта заповедника «Кивач», остальные объекты представляют сельскохозяйственный ландшафт окрестностей с. Кончезера. Кресты (+) показывают положение выборок, обобщающих результаты всех учетов бабочек в соответствующих ландшафтах, квадраты – выборки из местообитаний

к лесным и болотным местообитаниям [13]. Ландшафт в окрестностях с. Кончезера имеет типичный для сельскохозяйственных районов облик. Значительные площади заняты полями и лугами, имеется разветвленная сеть дорог. Лесной покров, трансформированный сплошными и выборочными рубками, составляют молодые и средневозрастные сосняки со значительным участием лиственных пород в составе парцелл. Имеется большое число полей, просек, редколесий и других открытых и полузатененных местообитаний. Сфагновые болота представлены мелкими участками, расположенными по берегам лесных озер. Сокращение площади лесов отрицательно сказалось на состоянии многих болотных массивов, некоторые из них деградировали в результате изменения гидрологического режима. Соответственно, и среди бабочек ведущие позиции здесь занимают формы, тяготеющие к местообитаниям открытого типа.

Обособленность участков, пригодных для существования бабочек, ведет к увеличению изменчивости биотопических группировок булавоусых чешуекрылых в лесном ландшафте (табл. 3). Многие виды в силу низкой численности популяций и возникающей в связи с этим ограниченности дисперсии особей в пространстве не в состоянии колонизировать все подходящие местообитания. Такие бабочки имеют низкую встречаемость и обычно представлены в выборках немногими особями. Примером могут служить упомянутые выше локальные формы, в том числе и перламутровка *B. frigga*, единственный экземпляр которой был найден в 1980 году на одном из хорошо изученных болот заповедника «Кивач» [4]. Несомненно, это была расселяющаяся особь, происхождение которой до сих пор остается неизвестным. Вместе с тем нужно отметить, что евклидово расстояние, посредством которого измеряли изменчивость, довольно чувствительно к объему и структуре сравниваемых выборок: добавление новых данных сильнее сказывается на менее многочисленных и насыщенных видами группировках, доминирование одних и тех же форм сближает группировки в большей мере, чем общность видового состава. Именно поэтому локальные эффекты при формировании населения булавоусых чешуекрылых заповедника «Кивач» более отчетливо проявляются в лесных местообитаниях и на болотах, чем на лугах. В окрестностях с. Кончезера изменчивость среди лесных группировок менее выражена вследствие большей насыщенности их видами. Основная причина богатства и высокой плотности населения заключается в большем разнообразии лесных местообитаний, подходящих для бабочек. Дополнительно происходит пополнение группировок за счет притока особей из луговых местообитаний. Интенсивность миграционных потоков в сельскохозяйственном ландшафте обеспечивает развитая сеть природ-

ных коридоров, представленная придорожными биотопами, просеками и цепочками более или менее открытых участков в лесных массивах. Полевые наблюдения и экспериментальные исследования подтверждают важность подобных структурных особенностей ландшафта для расселения бабочек [14], [16]. В итоге состав группировок, приближаясь к максимально возможному в данных условиях по числу видов, становится более стабильным. При формировании населения лугов также имеют место краевые эффекты, выравнивающие структуру населения, но здесь они менее выражены, чем в лесу. Болотные группировки в окрестностях с. Кончезера малочисленны и поэтому наиболее изменчивы. Даже наличие немногих видов, проникших на какое-либо болото из соседних биотопов, заметно увеличивает обобщенное расстояние между выборками. Индексы видового разнообразия в целом адекватно отражают выявленные тренды, указывая на более высокую степень выравниваемости видов по обилию в местообитаниях сельскохозяйственного ландшафта. Следует, однако, принять во внимание, что, несмотря на некоторую специфику используемых мер, они прежде всего измеряют вклад доминирующих форм: чем меньше их число и выше численность, тем меньше α -разнообразие группировки. В частности, по причине резкого преобладания *C. rubi*, *B. aquilonaris* и *P. optilete* меньшие оценки видового разнообразия получили болотные группировки заповедника «Кивач» (табл. 3). И это несмотря на то, что общая плотность населения при сходном видовом богатстве и суммарная численность всех остальных тирфобиев здесь была в несколько раз выше, чем в сельскохозяйственном ландшафте.

Ландшафтная дифференциация биотопических группировок булавоусых чешуекрылых, выявленная в ходе исследования, тем не менее вторична по отношению к основным направлениям пространственной изменчивости обилия видов. Результаты компонентного анализа указывают на высокий уровень сходства группировок, формирующихся в местообитаниях одного типа, на шкале общего обилия видов (*ГК-1* на рис. 3). Таким образом, вклад специфики среды в значения первой главной компоненты оказался минимальным. Существенные расхождения выявились лишь в следующих, менее значимых компонентах. Взаимозависимости признаков, выраженные в значениях факторных нагрузок, подтверждают вывод о сбалансированности населения булавоусых чешуекрылых в лесном ландшафте и о резком возрастании вклада луговой компоненты в сельскохозяйственном ландшафте, сделанный на основе анализа динамики видового богатства (рис. 2). Однако и здесь в основе изменчивости обилия лежат обозначенные ранее градиенты [13] – тяготение видов к болотным, луговым и лесным местообитаниям. Эти результаты, подчеркивая роль

структуры ландшафта в формировании населения, подтверждают вывод о высокой стабильности среднетаежных биотопических группировок булавоусых чешуекрылых, которая обеспечивается прежде всего избирательностью видов по отношению к местообитаниям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За время, прошедшее с начала исследований, существенно изменилась среда обитания бабочек на рассматриваемых территориях. В заповеднике «Кивач» многие луга в значительной степени деградировали. Одни покрылись древесно-кустарниковой растительностью, другие превратились в кочковатые высокотравные, часто заболоченные пустоши, мезофильная луговая растительность постепенно сменяется лесным разнотравьем. Соответственно, уменьшилось обилие бабочек, связанных с этими лугами (Н. Н. Кутенкова, личное сообщение). Еще больше изменились условия в окрестностях с. Кончезера. С конца 1990-х годов, когда практически полностью прекратилось сельскохозяйственное производство на этой территории, начали зарастать кустарником ранее использовавшиеся угодья. Некоторые из изученных лу-

гов, расположенных в особенно живописных местах по берегам озер, постепенно застраиваются, на других естественным образом сократилось разнообразие травянистой растительности. В лесных массивах вследствие активизации лесозаготовок появились обширные вырубки. На некоторых из них развилась богатая травянистая растительность и сформировались группировки чешуекрылых, сходные с описанными выше группировками лесных лугов. В результате в окрестностях с. Кончезера наблюдается постепенное сокращение встречаемости многих видов, тяготеющих к открытым лугам (*P. napi*, *A. hyperantus*, *T. lineola*, *P. amandus*, *L. hippothoe*, *C. glycerion* и др.), и увеличивается обилие лесных видов (*B. ino*, *E. ligea*, *A. paphia* и др.). В ряде местообитаний теперь регулярно попадают перламутровка *B. tiania* и голубянка *A. nicias*. Кроме того, в антропогенных ландшафтах стали вполне обычны такие мигранты, как репейница *V. cardui*, адмирал *V. atalanta* и павлиний глаз *N. io*, чаще стали встречаться белянка *P. edusa* и желтушка *C. hyale*. Массовое проникновение этих видов в Северо-Западное Прионежье, по видимому, связано с климатическими трендами последних десятилетий [1], [10], [15].

*Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг., подпроект «Создание и развитие деятельности Научно-образовательного центра природоохранных и экологических проблем Севера» (Институт рационального природопользования на Европейском Севере).

ПРИМЕЧАНИЯ

- ¹ Распределение бабочек определяется прежде всего размещением источников нектара на исследуемом участке.
- ² Сведения даны с учетом публикаций Н. Н. Кутенковой [4] и современных сборов, выполненных в окрестностях с. Кончезера.
- ³ Выводы о значимости отличий между лесными и луговыми группировками сделаны по t-критерию, поскольку распределение частот в сравниваемых выборках подчиняется нормальному закону.
- ⁴ Голубянка *A. nicias* лишь в 2000-х годах начала попадаться в окрестностях с. Кончезера, перламутровка *B. frigga* известна из заповедника «Кивач» по единственному экземпляру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болотов И. Н., Подболоцкая М. В., Колосова Ю. С., Зубри Н. А. Современный поток мигрантов и его роль в формировании фауны булавоусых чешуекрылых (Lepidoptera, Rhopalocera) на морских островах с молодой аллотонной биотой // Известия РАН. Сер. биологическая. 2013. № 1. С. 88–98.
2. Кожанчиков И. В. Новое в изучении фауны и экологии чешуекрылых Карельского перешейка // Труды ЗИН АН СССР. 1958. Т. 24. С. 3–88.
3. Коросов А. В., Горбач В. В. Компьютерная обработка биологических данных. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2010. 84 с.
4. Кутенкова Н. Н. Чешуекрылые (Lepidoptera) заповедника «Кивач» // Флора и фауна заповедников СССР. М., 1989. 59 с.
5. Любичев А. А. К методике количественного учета и районирования насекомых. Фрунзе: Изд-во АН Киргизской ССР, 1958. 167 с.
6. Мэггаран Э. Экологическое разнообразие и его измерение. М.: Мир, 1992. 181 с.
7. Резниченко Е. С., Горбач В. В. Биотопические группировки булавоусых чешуекрылых (Lepidoptera, Diurna) в экосистемах северной тайги Карелии // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2012. № 2 (123). С. 19–25.
8. Татарин А. Г., Долгин М. М. Видовое разнообразие булавоусых чешуекрылых на европейском Северо-Востоке России. СПб.: Наука, 2001. 244 с.
9. Хански И. Ускользящий мир: экологические последствия утраты местообитаний. М.: Т-во научных изданий КМК, 2010. 340 с.
10. Dennis R. L. H. Butterflies and Climate Change. Manchester: Manchester University Press, 1993. 302 p.
11. Dover J. W., Rescia A., Fungariño S., Fairburn J., Carey P., Lunt P., Arnot C., Dennis R. L. H., Dover C. J. Land-use, environment, and their impact on butterfly populations in a mountainous pastoral landscape: individual species distribution and abundance // J. Insect Conserv. 2011. Vol. 15. P. 207–220.
12. Gilpin M., Hanski I. Metapopulation Dynamics: Empirical and Theoretical Investigations. L.: Academic Press, 1991. 336 p.
13. Gorbach V. V., Saarinen K. The butterfly assemblages of Onega Lake Area in Karelia, middle taiga of NW Russia (Hesperioidea, Papilionoidea) // Nota Lepid. 2002. Vol. 25. № 4. P. 267–279.

14. Haddad N. Corridor and distance effects on interpatch movements: a landscape experiment with butterflies // *Ecol. Appl.* 1999. Vol. 9. № 2. P. 612–622.
15. Parmesan C., Ryrholm N., Stefanescu C., Hill J. K., Thomas C. D., Descimon H., Huntley B., Kaila L., Kullberg J., Tammaru T., Tennet W. J., Thomas J. A., Warren M. Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming // *Nature*. 1999. Vol. 399. P. 579–583.
16. Sutcliffe O. L., Thomas C. D. Open corridors appear to facilitate dispersal by ringlet butterflies (*Aphantopus hyperantus*) between woodland clearings // *Conserv. Biol.* 1996. Vol. 10. № 5. P. 1359–1365.

Gorbach V. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

LANDSCAPE DIFFERENTIATION OF BUTTERFLY ASSEMBLAGES (LEPIDOPTERA, HESPERIOIDEA ET PAPILIONOIDEA) IN MIDDLE TAIGA OF KARELIA

Butterfly assemblages were studied in agricultural and forest landscapes for 4 seasons. 3832 species of 50 types were observed during 1554 transect counts at 111 sites. The similarity in the list of observed species amounted to 90 %. The differences are attributed to single findings of migrants such as *Pontia edusa*, *Colias hyale*, *Issoria lathonia*, and localization of populations of *Pyrgus alveus*, *Aricia nicias* and *Boloria freija*. Landscape heterogeneity is most clearly displayed in the ratio between relative density and occurrence of species. Essential differences were found in the structure of population. *Pieris napi*, *Nymphalis urticae* and *Thimelicus lineola* prevail in agricultural area. Such forms as *Callophrys rubi*, *Brenthis ino*, and *Erebia ligea* dominated in forest environment. Together with *Gonepteryx rhamni*, which dominated in both cases, the total proportion in studied samples was 29 and 42 %, respectively. The landscape differentiation is determined by the ratio of suitable habitats. Comparisons of species' richness, population density, and α -diversity show that butterfly assemblages of similar sites vary insignificantly. Clustering of assemblages by component analysis (PCA) indicated three main trends in variations of butterfly abundance: the affinity of species to either peatlands, meadows or forest environment. The obtained results speak of the role played by the landscape structure for population development and support our conclusion that butterfly assemblages in middle taiga are characterized by high stability. The stability, first of all, is provided by habitat selection of different species.

Key words: middle taiga of Karelia, butterflies, landscape distribution of species, changeability of assemblages

REFERENCES

1. Bolotov I. N., Podbolotskaya M. V., Kolosova Y. S., Zubriy N. A. The current flow of migration and its contribution to Rhopalocera lepidopteran fauna on marine islands with young allochthonous biotas // *Biology Bulletin*. 2013. Vol. 40. № 1. C. 78–88.
2. Kozhanchikov I. V. New facts in the study of fauna and ecology of the Lepidoptera in Karelian Isthmus [Novoe v izuchenii fauny i ekologii cheshuekrylykh Karel'skogo peresheyka]. *Trudy ZIN AN SSSR* [Proc. Zool. Inst. Acad. Sci. USSR]. 1958. Vol. 24. P. 3–88.
3. Korosov A. V., Gorbach V. V. *Komp'yuternaya obrabotka biologicheskikh dannykh* [Computer Processing of Biological Data]. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2010. 84 p.
4. Kutenkova N. N. Lepidoptera of Kivach Natural Reserve [Cheshuekrylye (Lepidoptera) zapovednika "Kivach"]. *Flora i fauna zapovednikov SSSR* [Flora and Fauna of Natural Reserves in USSR]. Moscow, 1989. 59 p.
5. Lyubishchev A. A. *K metodike kolichestvennogo ucheta i rayonyrovaniya nasekomykh* [To the Method of Quantitative Count and Zoning of Insects]. Frunze, Acad. Sci. Kirghiz SSR Publ., 1958. 167 p.
6. Magguran A. E. Ecological Diversity and its Measurement. L.; Sydney, Croom-Helm, 1988. 181 p.
7. Reznichenko E. S., Gorbach V. V. The butterfly assemblages (Lepidoptera, Diurna) in ecosystems of northern taiga of Karelia [Biotopicheskie gruppirovki bulavouslykh cheshuekrylykh (Lepidoptera, Diurna) v ekosystemakh severnoy taygi Karelii] *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences]. 2012. № 2 (123). P. 19–25.
8. Tatarinov A. G., Dolgin M. M. *Vidovoe raznoobrazie bulavouslykh cheshuekrylykh na evropeyskom Severo-Vostoke Rossii* [The Species Diversity of Butterflies in European North-East of Russia]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2001. 244 p.
9. Hanski I. The Shrinking World: Ecological Consequences of Habitat Loss. Oldendorf/Luhe: Int. Ecol. Inst., 2005. EE Book 14. 340 p.
10. Dennis R. L. H. *Butterflies and Climate Change*. Manchester, Manchester University Press, 1993. 302 p.
11. Dover J. W., Rescia A., Fungariño S., Fairburn J., Carey P., Lunt P., Arnot C., Dennis R. L. H., Dover C. J. Land-use, environment, and their impact on butterfly populations in a mountainous pastoral landscape: individual species distribution and abundance // *J. Insect Conserv.* 2011. Vol. 15. P. 207–220.
12. Gilpin M., Hanski I. *Metapopulation Dynamics: Empirical and Theoretical Investigations*. L.: Academic Press, 1991. 336 p.
13. Gorbach V. V., Saarinen K. The butterfly assemblages of Onega Lake Area in Karelia, middle taiga of NW Russia (Hesperioidea, Papilionoidea) // *Nota Lepid.* 2002. Vol. 25. № 4. P. 267–279.
14. Haddad N. Corridor and distance effects on interpatch movements: a landscape experiment with butterflies // *Ecol. Appl.* 1999. Vol. 9. № 2. P. 612–622.
15. Parmesan C., Ryrholm N., Stefanescu C., Hill J. K., Thomas C. D., Descimon H., Huntley B., Kaila L., Kullberg J., Tammaru T., Tennet W. J., Thomas J. A., Warren M. Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming // *Nature*. 1999. Vol. 399. P. 579–583.
16. Sutcliffe O. L., Thomas C. D. Open corridors appear to facilitate dispersal by ringlet butterflies (*Aphantopus hyperantus*) between woodland clearings // *Conserv. Biol.* 1996. Vol. 10. № 5. P. 1359–1365.

Поступила в редакцию 15.04.2013

ЕЛЕНА СЕРГЕЕВНА ОБУХОВА

аспирант кафедры зоологии и экологии животных эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
Obyhova_elena@mail.ru

НАТАЛЬЯ АНАТОЛЬЕВНА СИДОРОВА

кандидат биологических наук, доцент кафедры фармакологии, организации и экономики фармации, микробиологии и гигиены медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
vanlis@petrsu.ru

ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АХРОМОГЕННЫХ ВИДОВ РОДА *PSEUDOMONAS* В УСЛОВИЯХ ДИНАМИКИ ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА КУЛЬТИВИРОВАНИЯ*

Доминирующей группой бактерий в микрофлоре водоемов Карелии является род *Pseudomonas*. Такое положение в биоценозе может быть обусловлено приспособленностью микроорганизмов к действию внешней среды. Наиболее значимым фактором физической природы является воздействие температуры. Целью данной работы стало изучение влияния температуры на параметры роста и развития *Pseudomonas alcaligenes* и *Pseudomonas cichoril*. Исследованию подвергались 25 ахромогенных штаммов *Pseudomonas alcaligenes* и *Pseudomonas cichoril*, выделенных из водоемов Карелии и аутофлоры рыбы. Микроорганизмы культивировали на мясопептонном бульоне (МПБ) при температуре от 5 до 35 °С в течение 24–120 ч. Скорость роста, время достижения максимальной плотности и скорость генерации устанавливали спектрофотометрически. В ходе исследований показано, что наибольшая скорость роста у *Pseudomonas alcaligenes* и *Pseudomonas cichoril* отмечается при культивировании с температурой 15 °С, наименьшее время достижения максимальной плотности у *Pseudomonas alcaligenes* – 15 °С, у *Pseudomonas cichoril* – 20 °С.

Ключевые слова: псевдомонады, температурный фактор, скорость роста, скорость генерации

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее внимание исследователей привлекают различные виды бактерий с высокой экологической пластичностью [9], [11]. Распространенные бактерии, такие как *Pseudomonas*, способны модулировать экспрессию генов в ответ на широкий круг стрессоров окружающей среды, обеспечивая физиолого-биохимическую адаптацию. Данные литературы свидетельствуют, что представители рода *Pseudomonas* являются одной из доминирующих культивируемых групп микроорганизмов, изолируемых из кишечника различных видов рыб. Псевдомонады наряду с аэромонадами являются типичными представителями водных микробиоценозов и нормофлоры рыб [7]. В больших количествах они представлены в грунтах и прудовой воде [3].

Физиологическое поведение бактериальных клеток часто зависит от температуры и обеспечивается посредством терморегулируемых доменов. Обширные литературные данные свидетельствуют, что при акклиматизации пойкилотермных организмов к низкой температуре, как правило, идут значительные внутриклеточные перестройки, включая увеличение разме-

ра клеток, повышение активности ферментов и изменение состава мембран [10], [11]. В связи с этим цель данной работы заключалась в том, чтобы оценить влияние динамики температуры на активность *Pseudomonas alcaligenes* и *Pseudomonas cichoril*.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования в чистую культуру выделены 25 ахромогенных штаммов *Pseudomonas alcaligenes* и 25 – *Pseudomonas cichoril* из микрофлоры воды и аутофлоры форели. Оба вида характеризуются большим разнообразием условий обитания и, следовательно, обладают хорошими адаптационными возможностями, быстро приспосабливаясь к изменениям в окружающей среде, поэтому представляют собой удобные модели для изучения влияния температурного режима на физиологические свойства микроорганизмов. Бактерии культивировали на мясопептонном бульоне в колбах Эрлен – Мейера объемом 250 мл на круговой качалке (180–200 об./мин) при температуре от 5 до 35 °С в течение 24–120 ч. Физиологические параметры – скорость роста, время достижения максимальной плотности и скорость генерации – устанавливали спектрофотометрически.

Таблица 1
Влияние температуры на скорость роста *Pseudomonas alcaligenes* (е. о. п.)

| Время, ч | Т инкубирования | | | | | | |
|----------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 5 °С | 10 °С | 15 °С | 20 °С | 25 °С | 30 °С | 35 °С |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 24 | 0,10 | 0,20 | 0,23 | 0,23 | 0,13 | 0,09 | 0,09 |
| 48 | 0,11 | 0,40 | 0,72 | 0,62 | 0,34 | 0,31 | 0,30 |
| 72 | 0,22 | 0,60 | 0,85 | 0,65 | 0,58 | 0,36 | 0,29 |
| 96 | 0,45 | 0,80 | 0,89 | 0,89 | 0,89 | 0,57 | 0,41 |
| 120 | 0,63 | 1,20 | 1,30 | 0,90 | 1,00 | 0,80 | 0,72 |

Таблица 2
Время достижения максимальной плотности (ч) и одной генерации – G (мин) *Pseudomonas alcaligenes* (n = 25) при разных температурах культивирования

| Температурные условия культивирования | Время достижения max P | G |
|---------------------------------------|------------------------|--------------|
| 5 °С | 27,12 ± 0,53 | 31,12 ± 0,41 |
| 10 °С | 18,24 ± 0,51 | 29,45 ± 0,38 |
| 15 °С | 16,11 ± 0,48 | 24,56 ± 0,36 |
| 20 °С | 17,20 ± 0,43 | 27,54 ± 0,34 |
| 25 °С | 21,30 ± 0,49 | 29,35 ± 0,38 |
| 30 °С | 24,80 ± 0,52 | 31,16 ± 0,41 |
| 35 °С | 27,82 ± 0,53 | 32,48 ± 0,43 |

Таблица 3
Время достижения максимальной плотности (ч) и одной генерации – G (мин) *Pseudomonas cichoril* (n = 25) при разных температурах культивирования

| Температурные условия культивирования | Время достижения max P | G |
|---------------------------------------|------------------------|--------------|
| 5 °С | 32,16 ± 0,47 | 30,60 ± 0,39 |
| 10 °С | 25,31 ± 0,27 | 30,24 ± 0,37 |
| 15 °С | 21,20 ± 0,24 | 29,11 ± 0,32 |
| 20 °С | 18,42 ± 0,19 | 21,40 ± 0,26 |
| 25 °С | 24,50 ± 0,26 | 31,10 ± 0,33 |
| 30 °С | 27,80 ± 0,32 | 35,24 ± 0,48 |
| 35 °С | 28,20 ± 0,33 | 35,40 ± 0,48 |

Таблица 4
Влияние температуры на скорость роста *Pseudomonas cichoril* (е. о. п.)

| Время, ч | Т инкубирования | | | | | | |
|----------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 5 °С | 10 °С | 15 °С | 20 °С | 25 °С | 30 °С | 35 °С |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 24 | 0 | 0,09 | 0,29 | 0,12 | 0,09 | 0 | 0 |
| 48 | 0,23 | 0,56 | 0,67 | 0,25 | 0,34 | 0,26 | 0,18 |
| 72 | 0,34 | 0,78 | 0,78 | 0,67 | 0,42 | 0,37 | 0,28 |
| 96 | 0,39 | 0,92 | 0,89 | 0,74 | 0,64 | 0,62 | 0,54 |
| 120 | 0,76 | 0,98 | 1,21 | 0,92 | 0,83 | 0,72 | 0,69 |

Для расчета продолжительности одной генерации (мин) псевдомонад при разных температурных условиях использовали формулу [6]:

$$G = (0,3010 \cdot t) / (\log b - \log a),$$

где t – время роста популяции; b – количество бактерий через заданный период культивирования; a – количество засеянных бактерий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследований установлено, что при экспозиции 48, 72 и 120 ч наибольшая скорость роста *Pseudomonas alcaligenes* наблюдается при температуре 15 °С. При 24-часовой экспозиции получен одинаковый показатель – 0,23 при температурах 15 и 20 °С, а при 96-часовой – 0,89 при температурах 15, 20 и 25 °С (табл. 1).

Наименьшее время, за которое популяция *Pseudomonas alcaligenes* достигает максимальной плотности, 16,11 ± 0,48 ч, при этом генерация составляет 24,56 ± 0,36 мин. Такие данные получены при температуре культивирования 15 °С (табл. 2).

Для *Pseudomonas cichoril* наименьшая скорость достижения максимальной плотности составляет 18,42 ± 0,19 и наблюдается при условиях культивирования с температурой 20 °С, генерация в таком случае равна 29,11 ± 0,32 (табл. 3).

Для роста *Pseudomonas cichoril* оптимальной температурой также является 15 °С, в трех вариантах инкубирования из пяти при этом значении оптическая плотность максимальна и составляет соответственно 0,29; 0,67 и 1,25 единиц для времени экспозиции 24; 48 и 120 ч. При инкубировании 72 ч получен одинаковый показатель – 0,78 при температуре 10 и 15 °С, а при экспозиции 96 ч наибольший рост зафиксирован при температуре 10 °С и составляет 0,92 е. о. п. (табл. 4).

По результатам изучения влияния температуры на особенности роста и скорость генерации *Pseudomonas alcaligenes* и *Pseudomonas cichoril* можно отметить, что температура выполняет ведущую роль в популяционной изменчивости бактерий. Установлен оптимальный температурный диапазон для *Pseudomonas alcaligenes* и *Pseudomonas cichoril* – 15–25 °С, который наряду с питательным субстратом является направляющим и стабилизирующим фактором отбора. При переходе от низких температур (5 °С) к высоким (35 °С) создается стрессовая ситуация, усиливающая гетерогенность популяции, вследствие чего увеличивается потенциальная возможность освоения штамминовой экологической ниши. Снижение температуры может привести к возникновению у псевдомонад способности к прототрофному питанию. В таких условиях проявляются сапрофитические свойства микроорганизма, позволяющие ему долго сохраняться в окружающей среде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучены физиологические свойства *Pseudomonas alcaligenes* и *Pseudomonas cichoril* в условиях динамики термического режима культиви-

рования. Установлено влияние температуры на скорость роста и скорость генерации исследуемых штаммов. Показано, что температурный оптимум для изучаемых микроорганизмов – 15–25 °С.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг., а также при поддержке программы «Умник».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев А. А., Гинцбург А. Л., Бондаренко В. М. Мир микробов // Вестник РАМН. 2000. № 11. С. 11–14.
2. Йегер Л. Клиническая иммунология и аллергология. М.: Медицина, 1990. Т. 1. 721 с.
3. Каховский А. Е. Распределение сапротрофных бактерий родов *Aeromonas* и *Pseudomonas* по акватории рыбоводного пруда // Болезни рыб и водная токсикология. М.: ВНИИПРХ, 1987. С. 21–30.
4. Лукьяненко В. И. Иммунология рыб. Врожденный иммунитет. М.: Агропромиздат, 1989. 347 с.
5. Миллер Г. Г. Биологическое значение ассоциаций микроорганизмов // Вестник РАМН. 2000. № 1. С. 45–51.
6. МУК 2293–81. Методические указания по санитарно-микробиологическому исследованию почвы. 1981. 87 с.
7. Нур Эльдин Ами М. А. О частоте выделения из органов клинически здоровых белых толстолобиков условно-патогенных бактерий *Aeromonas punctata* и *Pseudomonas* // Тез. докл. VI Всесоюзного совещания по болезням и паразитам рыб. М., 1974. С. 169–172.
8. Harikrishnan R., Balasundaram C., Heo M.-S. Fish health aspects in grouper aquaculture // Aquaculture. 2011. № 320. P. 1–21.
9. Hartig C., Loffhagen N., Harms H. Formation of trans fatty acids is not involved in growth-linked membrane adaptation of *Pseudomonas putida* // Appl. Env. Microbiol. 2005. Vol. 71. P. 1915–1922.
10. Klein W., Weber M. H. W., Marahiel M. A. Cold shock response of *Bacillus subtilis*: isoleucine-dependent switch in the fatty acid branching pattern for membrane adaptation to low temperatures // J. Bacteriol. 1999. Vol. 181. P. 5341–5349.
11. Medeot D., Bueno M., Dardanelli M., Garcia de Lema M. Adaptational changes in lipids of *Bradyrhizobium** SEMIA 6144 nodulating peanut as a response to growth temperature and salinity // Curr. Microbiol. 2007. Vol. 54. P. 31–35.

Obukhova E. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

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

PHYSIOLOGICAL FEATURES OF ACHROMOGENIC SPECIES OF GENUS *PSEUDOMONAS* IN DYNAMIC CONDITIONS OF THERMAL CULTIVATION

The dominant group of bacteria in microbial flora of Karelian water is *Pseudomonas* genus. This biocenosis phenomenon is observed in Karelian water basins due to high adaptive ability of the microorganisms. The most important physical factor affecting adaptive characteristics of the studied microorganisms is external temperature. Therefore, the aim of this work is to reveal and study the effect of thermal actions on growth parameters and development of *Pseudomonas alcaligenes* and *Pseudomonas cichoril*. 25 achromogenic strains of *Pseudomonas alcaligenes* and *Pseudomonas cichoril* allocated from Karelian water reservoirs and autoflora of fish were researched. Microorganisms were cultivated in beef-extract broth (BCH) at temperatures ranging from 5 to 35 °C for 24–120 hours. Spectrophotometric analysis identified bacteria's growth rate, time required to reach the maximum density, and generation rate. The research showed that the highest growth rate in *Pseudomonas alcaligenes* and *Pseudomonas cichoril* is observed when cultivatin temperature reaches 15 °C. The shortest time to reach the maximum density of *Pseudomonas alcaligenes* is achieved at the temperature of –15 °C, and *Pseudomonas cichoril* –20 °C.

Key words: *Pseudomonas*, temperature factor, the rate of growth, the generation

REFERENCES

1. Vorob'ev A. A., Gintsburg A. L., Bondarenko V. M. The world of microbes [Mir mikrobov]. *Vestnik RAMN* [Herald of the Russian Academy of medical Sciences]. 2000. № 11. P. 11–14.
2. Yeger L. *Klinicheskaya immunologiya i allergologiya* [Clinical immunology and allergology]. Moscow, Meditsina Publ., 1990. Vol. 1. 721 p.
3. Kakhovskiy A. E. Distribution of saprotrophic genera of bacteria *Aeromonas* and *Pseudomonas* in fishpond waters [Raspredelenie saprotrofnnykh bakteriy rodov *Aeromonas* i *Pseudomonas* po akvatorii rybovodnogo pruda] // *Bolezni ryb i vodnaya toksikologiya* [Diseases of fish and aquatic toxicology]. Moscow, VNIIPRKH Publ., 1987. P. 21–30.
4. Luk'yanenko V. I. *Immunobiologiya ryb. Vrozhdenyy immunitet* [Immunological biology of fish. Innate immunity]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1989. 347 p.
5. Miller G. G. Biological significance of associations of microorganisms [Biologicheskoe znachenie assotsiatsiy mikroorganizmov]. *Vestnik RAMN* [Herald of the Russian Academy of medical Sciences]. 2000. № 1. P. 45–51.
6. MUK 2293–81. *Metodicheskie ukazaniya po sanitarno-mikrobiologicheskomu issledovaniyu pochvy* [Methodical instructions on sanitary-microbiological study of soil]. 1981. 87 p.
7. Nur El'din Amin M. A. About the frequency allocation of bodies of clinically healthy white carp conditionally pathogenic bacteria *Aeromonas punctata* and *Pseudomonas* [O chastote vydeleniya iz organov klinicheski zdorovykh belykh tolstolobikov uslovno-patogennykh bakteriy *Aeromonas punctata* i *Pseudomonas*]. *Tezisy dokladov VI vsesoyuznogo soveshchaniya po boleznyam i parazitam ryb* [Abstracts of all-Union meeting on the diseases and parasites of fishes]. Moscow, 1974. P. 169–172.
8. Harikrishnan R., Balasundaram C., Heo M.-S. Fish health aspects in group aquaculture // *Aquaculture*. 2011. № 320. P. 1–21.
9. Hartig C., Loffhagen N., Harms H. Formation of trans fatty acids is not involved in growth-linked membrane adaptation of *Pseudomonas putida* // *Appl. Env. Microbiol.* 2005. Vol. 71. P. 1915–1922.
10. Klein W., Weber M. H. W., Marahiel M. A. Cold shock response of *Bacillus subtilis*: isoleucine-dependent switch in the fatty acid branching pattern for membrane adaptation to low temperatures // *J. Bacteriol.* 1999. Vol. 181. P. 5341–5349.
11. Medeot D., Bueno M., Dardanelli M., Garcia de Lema M. Adaptation changes in lipids of *Bradyrhizobium** SEMIA 6144 nodulating peanut as a response to growth temperature and salinity // *Curr. Microbiol.* 2007. Vol. 54. P. 31–35.

Поступила в редакцию 04.07.2013

АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ СТЕСЬКО
аспирант кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
stesko@pinro.ru

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВОЗРАСТНОГО СОСТАВА ЛИМАНДЫ (*LIMANDA LIMANDA* L., 1758) БАРЕНЦЕВА МОРЯ*

Описан возрастной состав лиманды по материалам исследований 1997–2005 годов в Баренцевом море. Выделены основные возрастные группы. Проведено сравнение методик исследования.

Ключевые слова: *Limanda limanda* L., 1758, возраст, группы

ВВЕДЕНИЕ

Лиманда (*Limanda limanda* L., 1758) относится к семейству камбаловых, имеет второе народное название – ершоватка. Распространена на обширной акватории, включающей моря от Белого и Баренцева на юг до Бискайского залива, а также районы Северной Атлантики близ берегов Исландии. Предпочитает песчаные грунты на глубинах до 50 м, реже – 130 м. Основными объектами питания этой рыбы являются черви, моллюски и небольшие ракообразные. Сроки нереста растянуты и зависят от места обитания рыбы: так, в Баренцевом море ее нерест проходит позднее, чем у побережья Европы или в Белом море [1], [3].

Возрастной состав и особенности роста лиманды хорошо изучены в популяциях, обитающих в Северном и Балтийском морях, а также у берегов Исландии. В работах зарубежных исследователей со второй половины XX века можно встретить результаты изучения различных возрастных параметров, а также особенностей роста лиманды с применением метода обратных расчислений [12], [13], [14]. В отечественной литературе лиманда упоминается достаточно редко, особенно в последние годы. Развернутое исследование, включающее в себя описание особенностей роста рыбы, выполнено по Белому морю [9]. Анализ возрастного состава баренцевоморской лиманды встречается в литературе с середины XX века, однако последние работы затрагивают только особенности ее распределения [7], [8]. Настоящее исследование ставит целью восполнение этого пробела.

Основной задачей данной работы является определение возраста и сопутствующих характеристик баренцевоморской лиманды по материалам исследований 1997–2005 годов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Объектом исследования являлась лиманда (*Limanda limanda* L., 1758). Материал был получен в ходе исследований на научно-промысловых судах и в периоды проведения многовидо-

вых тралово-акустических съемок, проводимых ФГУП «ПИНРО» с 1997 по 2005 год, а также в 2012 году. В качестве основных инструментов для сбора материала в таких экспедициях использовались тралы различных конструкций, а также акустические приборы, по которым определяют параметры скоплений рыб в зоне работ.

Полевую обработку принятого на борт улова проводили по стандартным методикам [5]. Измеряли зоологическую длину и массу рыб, определяли пол, массу печени и пищевого комка, спектр питания, брали отолиты для последующей обработки.

Возраст рыб определяли по целым отолитам и методом «break and burn» [11]. В первом случае отолиты выдерживались в 95% этаноле, после чего рассматривались под стереомикроскопом. При использовании метода «break and burn» отолит разламывали в поперечном сечении так, чтобы слом проходил через ядро, обжигали в пламени спиртовки. Готовый препарат рассматривали в капле глицерина под стереомикроскопом. Результаты определения возраста по разным методикам были подвергнуты сравнению. Возраст по целым отолитам и по слому («break and burn») был определен двумя разными людьми независимо друг от друга, что увеличивало оправдываемость полученных результатов. В работах использовались преимущественно правые отолиты. Ввиду того что рост самцов и самок у большинства видов камбал отличается, данные по ним в работе представлены отдельно [13].

Статистическую обработку материала производили по общепринятым методикам при помощи пакета программ MS Office [4]. Используются следующие условные обозначения: S – стандартное отклонение, CV – коэффициент вариации, $M \pm m$ – арифметическая средняя и ошибка средней.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Большая часть проб в настоящей работе была получена в Восточном Прибрежном районе

Баренцева моря, где концентрации лиманды достаточно высоки [7], [8].

Основная часть попавших в трал самок лиманды принадлежит к возрастным группам 8–11 лет. Возрастные группы от 12 лет и старше были достаточно редки, их доля в полученной выборке составила не более 15%. Младшие возрастные группы (5–7 лет) также были немногочисленны, их доля от общего числа обработанных проб лиманды составила 13% (рис. 1). Было отмечено постепенное снижение относительного числа особей возрастов от 11 лет и более.

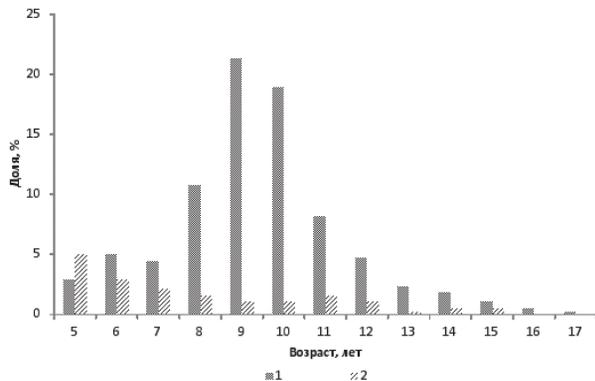


Рис. 1. Возрастной состав самок (1) и самцов (2) лиманды в пробах; N = 313 и N = 67 соответственно

Соотношение самцов и самок составило 1:4,5. Это может быть объяснено особенностями формирования популяции лиманды. Более 60% самцов этого вида имели возраст от 5 до 7 лет. Прочие возрастные группы были распределены неравномерно (рис. 1). Интересно, что подобная картина складывалась в 1999–2001 годах при анализе половозрастного состава морской камбалы, обитающей преимущественно на юго-востоке Баренцева моря (в этом же районе были взяты пробы лиманды). Возраст доминирующих групп у самцов морской камбалы был 5–7 лет, у самок – 8–9 лет [6].

Наблюденный линейный рост лиманды показывал высокую степень изменчивости в каждой возрастной категории как самок, так и самцов. Колебания показателей длины у самок наиболее часто встречающихся возрастных групп (8–10 лет) были несколько занижены, особенно если сравнивать с аналогичными показателями младших групп (CV 8,2–10,7% при общем размахе 7,1–21,2%). Показатели CV самцов по массовым группам в целом выше, чем у самок, за исключением малочисленных возрастных групп (табл. 1).

Длина исследованных рыб колебалась в широком диапазоне, четко определить тугорослую и быстрорастущую группу не представилось возможным. Условное разделение лиманды по этому признаку допустимо при помощи линии тренда, отражающей основную тенденцию в динамике роста рыб по наблюдаемым данным.

Таблица 1
Средние показатели длины самок и самцов различных возрастных групп

| Возраст, лет | M ± m, мм | | N, экз. | | S, мм | | CV, % | |
|--------------|--------------|--------------|---------|----|-------|------|-------|------|
| | F | M | F | M | F | M | F | M |
| 2 | 124 | 90 | 1 | 1 | – | – | – | – |
| 3 | 122,1 ± 4,0 | 112,8 ± 3,2 | 26 | 27 | 20,4 | 16,6 | 16,7 | 14,7 |
| 4 | 149,7 ± 4,9 | 129,8 ± 4,3 | 10 | 6 | 15,6 | 14,0 | 10,4 | 10,8 |
| 5 | 193,6 ± 10,6 | 161,6 ± 6,5 | 11 | 19 | 35,3 | 28,5 | 18,2 | 17,7 |
| 6 | 228,4 ± 10,4 | 198,2 ± 12,7 | 19 | 11 | 45,4 | 42,1 | 19,7 | 21,3 |
| 7 | 255,9 ± 13,1 | 225,0 ± 17,3 | 17 | 8 | 54,2 | 49,0 | 21,2 | 21,8 |
| 8 | 301,7 ± 5,1 | 253,3 ± 22,9 | 41 | 6 | 32,4 | 56,1 | 10,7 | 22,1 |
| 9 | 313,1 ± 2,8 | 290,0 ± 9,2 | 81 | 4 | 25,6 | 18,3 | 8,2 | 6,3 |
| 10 | 318,6 ± 4,0 | 315,0 ± 9,6 | 72 | 4 | 34,2 | 19,1 | 10,7 | 6,1 |
| 11 | 330,0 ± 6,4 | 268,3 ± 21,7 | 31 | 6 | 35,4 | 53,1 | 10,7 | 19,8 |
| 12 | 317,8 ± 10,5 | 292,5 ± 13,8 | 18 | 4 | 44,7 | 27,5 | 14,0 | 9,4 |
| 13 | 365,6 ± 8,7 | 220,0 | 9 | 1 | 26,0 | – | 7,1 | – |
| 14 | 348,6 ± 12,2 | 335,0 | 7 | 2 | 32,4 | 7,1 | 9,3 | 2,1 |
| 15 | 347,5 ± 25,6 | 280,0 | 4 | 2 | 51,2 | 14,1 | 14,8 | 5,1 |
| 16 | 340 | – | 2 | – | 28,3 | – | 8,3 | – |
| 17 | 400 | – | 1 | – | – | – | – | – |

Коэффициент корреляции между параметрами длины и возраста самок и самцов составил 0,62 и 0,73 соответственно.

Длина самок и самцов лиманды увеличивалась равномерно до достижения 8 лет, после чего рост рыб замедлялся (рис. 2).

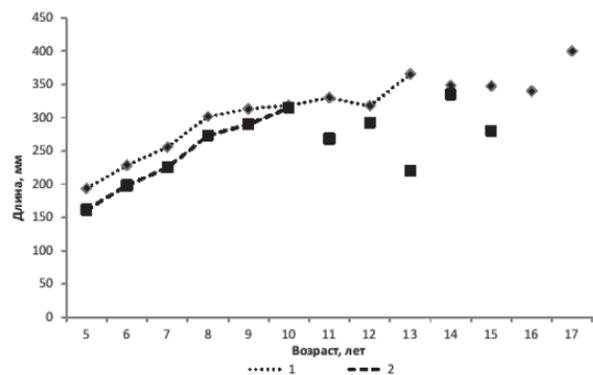


Рис. 2. Средние показатели длины самок (1) и самцов (2) лиманды Баренцева моря различных возрастных групп в пробах 1997–2005 годов: N = 313 и N = 67 соответственно

Более развернутый ответ на вопрос о линейном росте лиманды можно получить при помощи метода обратных расчислений.

В сравнении с отношением длина – возраст показатель масса – возраст варьировал сильнее как у самок, так и у самцов. Например, масса самок возрастной группы 11 лет колебалась от 210 до 960 г, самцов – от 69 до 400 г. Коэффициенты корреляции между показателями массы и возраста составили 0,62 у самок и 0,72 у самцов.

В целом показатели массы лиманды варьировали сильнее, чем длины: CV самок составил

21,3–67,2 %, CV самцов – 6,5–78,6 %. При этом в последнем случае заметно, что в больших по численности выборках диапазон колебаний коэффициента вариации шире. Также следует отметить, что наиболее сильные колебания массы отмечались у рыб возрастных групп 8–12 лет (табл. 2).

Таблица 2
Средние показатели массы возрастных групп самок и самцов

| Возраст, лет | M ± m, мм | | N, экз. | | S, мм | | CV, % | |
|--------------|---------------|--------------|---------|----|-------|-------|-------|------|
| | F | M | F | M | F | M | F | M |
| 2 | 60 | 7,5 | 1 | 1 | – | – | – | – |
| 3 | 23,2 ± | 16,6 ± | 26 | 27 | 14,0 | 8,0 | 60,4 | 47,6 |
| 4 | 41,5 ± | 24,9 ± | 10 | 6 | 14,3 | 7,1 | 34,3 | 28,4 |
| 5 | 101,2 ± 18,1 | 45,8 ± 6,4 | 11 | 19 | 60,2 | 27,7 | 59,4 | 60,5 |
| 6 | 147,5 ± 22,8 | 92,2 ± 21,3 | 19 | 11 | 99,2 | 70,5 | 67,2 | 76,5 |
| 7 | 196,0 ± 25,6 | 140,8 ± 39,1 | 17 | 8 | 105,6 | 110,6 | 53,8 | 78,6 |
| 8 | 309,5 ± 14,5 | 203,2 ± 54,1 | 41 | 6 | 92,9 | 132,5 | 30,0 | 65,2 |
| 9 | 349,1 ± 10,2 | 301,8 ± 33,4 | 81 | 4 | 91,9 | 66,8 | 26,3 | 22,1 |
| 10 | 389,5 ± 14,6 | 329,5 ± 10,7 | 72 | 4 | 124,0 | 21,3 | 31,8 | 6,5 |
| 11 | 456,5 ± 28,2 | 253,1 ± 56,8 | 31 | 6 | 157,1 | 139,1 | 34,4 | 55,0 |
| 12 | 358,0 ± 30,1 | 264,0 ± 42,1 | 18 | 4 | 127,9 | 84,2 | 35,7 | 31,9 |
| 13 | 574,9 ± 40,8 | 90,8 | 9 | 1 | 122,3 | – | 21,3 | – |
| 14 | 448,0 ± 47,2 | 400,0 | 11 | 2 | 156,5 | 0 | 34,9 | 0 |
| 15 | 534,5 ± 121,5 | 314,5 | 4 | 2 | 243,1 | 89,8 | 45,5 | 28,6 |
| 16 | 478,0 | – | 2 | – | 162,6 | – | 34,0 | – |
| 17 | 750,0 | – | 1 | – | – | – | – | – |

Коэффициент корреляции между длиной и массой исследованных рыб составил 0,89 и 0,92 у самок и самцов соответственно.

Таким образом, около 64% представленных в работе самок принадлежали к возрастным группам 8–11 лет средней длиной 301–310 мм (CV = 10,7 %) и массой 309–456 г (CV = 30–34,4 %). В выборке самцов более 50 % представлены особями 5–7 лет средней длиной 161–225 мм при CV = 17,7–21,8 % и массой 46–141 г при CV = 60,5–78,6 %. Максимальная длина лиманды в пробах составила 420 мм при массе 960 г (самка 11 лет).

Результаты сравнения методов определения возраста демонстрируют, что полученный методом «break and burn» показатель в среднем оказывался на один год больше возраста, определенного по целым отолитам. При этом коэффициент корреляции рядов данных по возрастам одних и тех же рыб, определенным обоими методами, был равен 0,78, что говорит об относительно высокой степени схожести полученных результатов. Возраст старших возрастных групп, определенный по целым отолитам, был стабильно ниже, чем при обработке методом

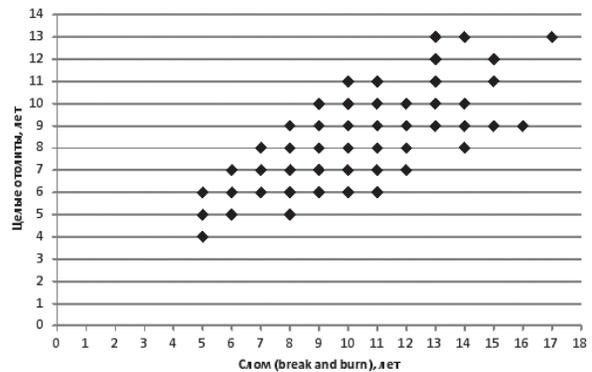


Рис. 3. Сравнительные результаты возрастного анализа по целым отолидам и по слому, N = 266

«break and burn», размах несоответствия достигал 7 лет (рис. 3).

Причиной такой разницы служит более четкая видимость тонких краевых колец на сломе отолида. Так, максимальный возраст лиманды по целым отолидам составил 13 лет, а по слому – 17. Завышенные показатели возраста при работе с целыми отолидами в сравнении с «break and burn» скорее всего обусловлены влиянием субъективного человеческого фактора, который неизбежен в такого рода исследованиях [10].

Таким образом, метод определения возраста по целым отолидам можно применять к рыбам небольших размеров, предположительно младших возрастных групп. Он простой и безопасный: при работе методом «break and burn» есть вероятность расколоть отолид на мелкие составляющие, что сильно затруднит процесс работы с ним.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная часть самок лиманды принадлежала к возрастной группе 8–11 лет. Доля возрастных групп рыб от 12 лет составила 13%. Младшие возрастные группы (5–7 лет) также были немногочисленны, их доля от общего числа обработанных проб самок лиманды составила 15%. Соотношение самцов и самок – 1:4,5.

Наблюдаемый линейный рост лиманды показывал достаточно высокую степень индивидуального варьирования в каждой возрастной категории как самок, так и самцов. Более 70 % проанализированных в работе самок принадлежали к возрастным группам 8–11 лет средней длиной 301–310 мм (CV = 10,7 %) и массой 309–456 г (CV = 30–34,4 %). В выборке самцов 57 % были представлены особями 5–7 лет средней длиной 161–225 мм (CV = 17,7–21,8 %) и массой 46–141 г (CV = 60,5–78,6 %).

Возраст рыб, определенный методом «break and burn», в среднем оказывался на один год больше, чем оцененный по целым отолидам. Размах несоответствия достигал 7 лет.

* 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. Андрияшев А. П. Рыбы северных морей СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1954. 570 с.
2. Вилер А. Определитель рыб морских и пресноводных вод Северо-Европейского бассейна: Пер. с англ. М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1983. 428 с.
3. Есипов В. К., Сластиникова Г. С. Камбала *Pleuronectes limanda* L. (s. *Limanda limanda* L.) Баренцева моря // Сборник научно-промысловых работ на Мурмане / Под ред. С. Я. Миттельмана. М.; Л.: СНАБТЕХИЗДАТ, 1932. С. 180–189.
4. Ивантер Э. В., Коросов А. В. Введение в количественную биологию. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2011. 302 с.
5. Инструкции и методические рекомендации по сбору и обработке биологической информации в районах исследовательского ПИНРО. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2002. 291 с.
6. Кузнецова Е. Н. Рост рыб и стратегии их жизненных циклов: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М.: ВНИРО, 2003. 49 с.
7. Руднев В. Г., Тростянский Н. Н. Распределение, ресурсы и биология лиманды в южной части Баренцева моря // Прибрежные гидробиологические исследования: Труды ВНИРО. М.: Изд-во ВНИРО, 2005. С. 236–244.
8. Стес'ко А. В. Распределение и биомасса лиманды Баренцева моря в 1990–2010 гг. // Тез. докл. XI Всерос. конф. по проблемам рыбопромыслового прогнозирования (Мурманск, 22–24 мая 2012 г.). Мурманск, 2012.
9. Шерстков А. С. Особенности роста ершоватки (*Limanda limanda* L.) в Онежском заливе Белого моря // Материалы отчетной сессии Северного филиала ПИНРО по итогам научно-исследовательских работ 2003–2004 гг. Архангельск, 2007. С. 66–78.
10. ICES. Report of the Workshop on Age Reading of Flounder (WKARFLO), 20–23 March 2007, Öregrund, Sweden. ICES CM 2007/ACFM:10. 2007. 69 p.
11. Hassenger T. K. Comparison of three different otolith-based methods for age determination of turbot (*Scophthalmus maximus*) // The Danish Institute for Fisheries and Marine Research. 1991. Vol. 9. P. 39–43.
12. Jonsson G. Contribution to the biology of the dab (*Limanda limanda* L.) in Icelandic waters // Ritfiskideildar. 1966. Vol. 4 (3).
13. Lozan J. L. Investigation on the growth dab (*Limanda limanda* L.) in eight areas of the North Sea and comparisons with earlier findings // Arch. FishWise. 1989. Vol. 39 (2). P. 111–146.
14. Rijnsdorp A. D., Vethaak A. D., Van Leeuwen P. I. Population of biology of dab *Limanda limanda* in the southeastern North Sea // Marine ecology progress series. 1992. Vol. 91. P. 19–35.

Stes'ko A. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

SOME FEATURES OF AGE COMPOSITION OF COMMON DAB (*LIMANDA LIMANDA* L., 1758) OF BARENTS SEA

The paper provides a description of the common dab age composition based on the results of the surveys carried out in 1997–2005 in the Barents Sea. The main age groups were singled out. A comparison of all research methods used in the process of our study is provided.

Key words: *Limanda limanda* L., 1758, age, group

REFERENCES

1. Andriyashchev A. P. *Ryby severnykh morey SSSR* [Fish of the northern seas of USSR]. Moscow; Leningrad, AS USSR Publ., 1954. 570 p.
2. Viler A. *Opredelitel' ryb morskikh i presnovodnykh vod Severo-Evropeyskogo basseyna* [Key to the fish of the Northern Europe]. Moscow, Legkaya i pishcheyaya promyshlennost' Publ., 1983. 428 p.
3. Esipov V. K., Slastnikova G. S. *Plaice Pleuronectes limanda* L. (s. *Limanda limanda* L.) of the Barents sea [Kambala *Pleuronectes limanda* L. (s. *Limanda limanda* L.) Barentseva morya]. *Sbornik nauchno-promyslovykh rabot na Murmane* [Digest of science-fishing papers at Murman]. Moscow; Leningrad, SNABTEKHIZDAT Publ., 1932. P. 180–189.
4. Ivanter E. V., Korosov A. V. *Vvedenie v kolichestvennyuyu biologiyu* [Introduction to quantitative biology]. Petrozavodsk, PSU Publishing, 2011. 302 p.
5. *Instruktsii i metodicheskie rekomendatsii po sboru i obrabotke biologicheskoy informatsii v rayonakh issledovaniy PINRO* [Instruction and methodological recommendation for collection and processing biological information in regions of research PINRO]. Murmansk, PINRO Publ., 2002. 291 p.
6. Kuznetsova E. N. *Rost ryb i strategii ikh zhiznennykh tsiklov. Avtoref. diss. d-ra biol. nauk* [Growth of fish and their life strategies. Dr. biology. sci. diss]. Moscow, VNIRO Publ., 2003. 49 p.
7. Rudnev V. G., Trostyanskiy N. N. *Raspredelenie, resursy i biologiya limandy v yuzhnoy chasti Barentseva morya* [Distribution, resources and biology of dab in the southern Barents Sea]. *Pribeznyye gidrbiologicheskie issledovaniya: Trudy VNIRO* [Coastal hydrobiological investigation: VNIRO Proceedings]. Moscow, VNIRO Publ., 2005. P. 236–244.
8. Stes'ko A. V. *Distribution and biomass of Barents Sea's dab in 1990–2010* [Распределение и биомасса лиманды Баренцева моря в 1990–2010 гг.]. *Tezisy dokladov XI Vseros. konf. po problemam rybopromysloвого прогнозirovaniya (Murmansk, 22–24 maya 2012 g.)* [Thesis of XI national conference about fishery forecasting problems]. Murmansk, 2012.
9. Sherstkov A. S. *Osobennosti rosta ershovatki (Limanda limanda L.) v Onezhskom zalive Belogo morya* [Characteristics of dab's growth (*Limanda limanda* L.) in Onega Bay of White Sea]. *Materialy otchetnoy sessii Severnogo filiala PINRO po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot 2003–2004 gg.* [Materials reporting session of the Northern Branch PINRO on the results of research 2003–2004]. Arkhangelsk, 2007. P. 66–78.
10. ICES. Report of the Workshop on Age Reading of Flounder (WKARFLO), 20–23 March 2007, Öregrund, Sweden. ICES CM 2007/ACFM:10. 2007. 69 p.
11. Hassenger T. K. Comparison of three different otolith-based methods for age determination of turbot (*Scophthalmus maximus*) // The Danish Institute for Fisheries and Marine Research. 1991. Vol. 9. P. 39–43.
12. Jonsson G. Contribution to the biology of the dab (*Limanda limanda* L.) in Icelandic waters // Ritfiskideildar. 1966. Vol. 4 (3).
13. Lozan J. L. Investigation on the growth dab (*Limanda limanda* L.) in eight areas of the North Sea and comparisons with earlier findings // Arch. FishWise. 1989. Vol. 39 (2). P. 111–146.
14. Rijnsdorp A. D., Vethaak A. D., Van Leeuwen P. I. Population of biology of dab *Limanda limanda* in the southeastern North Sea // Marine ecology progress series. 1992. Vol. 91. P. 19–35.

Поступила в редакцию 01.10.2012

ВАСИЛИЙ ПЕТРОВИЧ ВВЕДЕНСКИЙ

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

ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ РЫБАЧКОВ

доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой госпитальной хирургии лечебного факультета, Ярославская государственная медицинская академия (Ярославль, Российская Федерация)
vvasp@mail.ru

ЛЕОНИД БОРИСОВИЧ ШУБИН

кандидат медицинских наук, доцент кафедры патологической анатомии, Ярославская государственная медицинская академия (Ярославль, Российская Федерация)
lbsh@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ЭНДОБРОНХИАЛЬНОЙ ТЕРАПИИ НА ЭВОЛЮЦИЮ ЛОКАЛЬНОГО СТАТУСА ПРИ АСПИРАЦИОННОМ ПОВРЕЖДЕНИИ ТРАХЕОБРОНХИАЛЬНОГО ДЕРЕВА

Аспирационное повреждение трахеобронхиальной системы протекает с гиперпродукцией экспектората и бронхообструкцией. Это является одной из причин развития гиповентиляции легких и пневмонии. Цель работы – оценка эффективности эндобронхиальной терапии аспирационного повреждения трахеобронхиального дерева. Материалом послужили результаты лечения 407 пострадавших с сочетанной травмой, осложненной бронхолегочной аспирацией. Мужчин – 355, женщин – 52, возраст от 16 до 76 лет, АРАСНЕ II – $16,47 \pm 0,14$ балла, ISS – $23,46 \pm 0,21$ балла. Эндоскопически констатированы одно- или двухсторонние диффузные и диффузно-очаговые катаральные ($n = 127$), геморрагические ($n = 162$), эрозивные ($n = 46$) и фибринозные ($n = 72$) эндобронхиты. У 317 больных базовую интенсивную терапию сочетали с ежедневными 2-кратными ингаляциями. В лечении 90 пациентов использовали фиброоптические эндобронхиальные инстилляции перфторана в суточной дозе 0,25 мл/кг. Исследовали динамику эндоскопической семиотики, влияние перфторана на слизистую и изменения цитологической картины پوشного эпителия поврежденных бронхов. Положительная динамика аспирационного повреждения бронхов на фоне ингаляционной терапии констатирована у 56,15% больных, при проведении инстилляций перфторана – у 80% ($p < 0,001$). При хромоbronхоскопии выявлено, что после введения перфторана не отмечено признаков его отрицательного влияния на патологически измененные ткани бронхов. Цитологически установлено, что через 24 часа от начала терапии перфтораном имела место трансформация клеточной реакции в воспалительно-регенераторный тип в виде резко уменьшенного числа нейтрофилов и их дегенеративных форм ($p < 0,05$), а также появление макрофагов, участвующих в фагоцитозе. На фоне проведения ингаляций без перфторана сохранялся дегенеративно-воспалительный тип реакции. Таким образом, эндобронхиальные инстилляци перфторана являются более эффективным методом лечения аспирационного повреждения бронхов вне зависимости от характера воспаления по сравнению с ингаляционным воздействием.

Ключевые слова: аспирационное повреждение бронхов, ингаляционная терапия, фиброоптические эндобронхиальные инстилляци перфторана

Аспирационное повреждение трахеи и бронхов, сопровождаемое гиперпродукцией патологического секрета и бронхообструкцией, вызывает нарушения вентилиационной и экспекторационной функций трахеобронхиальной системы [3], [5], [8]. Это влечет за собой развитие гиповентиляции легочной ткани, играющей важную роль в патогенезе пневмонии [2], [9], [10]. Оптимизировать лечение аспирационных эндобронхитов позволяет использование методов направленного эндоскопического воздействия. Однако оценки эффективности лечебных фибробронхоскопий (ФБС) при данной патоло-

гии весьма разнятся – от позитивных [7] до скептических [4].

Цель работы – определение эффективности эндоскопической терапии аспирационных повреждений трахеобронхиального дерева (ТБД) с использованием визуально контролируемых инстилляций перфторана (ИП).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом послужили результаты лечения 407 пострадавших с сочетанной травмой, осложненной бронхолегочной аспирацией, – 355 мужчин, 52 женщины, возраст от 16 до

76 лет. Тяжесть состояния по APACHE II составила $16,47 \pm 0,14$ балла, общая тяжесть травмы по ISS – $23,46 \pm 0,21$ балла. Эндоскопически во всех наблюдениях констатировано аспирационное повреждение визуально контролируемых отделов ТБД в виде одно- или двухсторонних диффузных или диффузно-очаговых катаральных ($n = 127$), геморрагических ($n = 162$), эрозивных ($n = 46$) и фибринозных ($n = 72$) эндобронхитов.

Для определения эффективности проводимого лечения больные были разделены на две группы. В контрольной группе ($n = 317$) базовую интенсивную терапию сочетали с ежедневными 2–3-кратными ингаляциями с целью восстановления дренажной функции нижних дыхательных путей, снижения активности воспаления, улучшения микроциркуляции слизистой и повышения ее репаративных свойств. У больных основной группы ($n = 90$) основное лечение дополняли визуально контролируемые эндобронхиальными инстилляциями перфторана – газотранспортного перфторуглеродного кровезаменителя, улучшающего доставку и передачу кислорода тканям. ПР вводили в просвет измененных отделов ТБД по катетерам с внутренним диаметром 0,45 мм, проведенным по рабочему каналу фиброэндоскопа. Суточная доза инстиллируемого перфторана не превышала 0,25 мл/кг. Количество однократно вводимого препарата, частота ежедневно выполняемых лечебных ФБС определялись особенностями бронхоархитектоники, распространенностью и выраженностью воспалительных изменений ТБД. Эффективность каждого из методов лечения определяли как снижение выраженности воспалительно-некротических изменений до уровня катарального эндобронхита первой степени и оценивали на 6-е сутки проводимой терапии (средний срок эпителизации эрозий и язв на месте удаленных гранулаций и папиллом бронхов).

ФБС проводили с использованием эндоскопов BF-40 и BF-PE 2 фирмы «Olympus» с пре- и постоксигенацией на фоне респираторной поддержки без разгерметизации дыхательного контура при постоянном мониторинге AD, PS, SpO₂. Характер изменений бронхов классифицировали согласно критериям J. M. Lemoine (1971) [6]. В силу выраженности и динамизма нарушений проходимости ТБД, обусловленной гиперпродукцией патологического экспектората, бронхообструкцию констатировали как любые нарушения свободы и проходимости дыхательных путей, бронхообтурацию – как полное их закрытие.

Для проведения цитологического исследования выполняли браш-биопсию слизистой наиболее заинтересованных бронхов 2–4-й генераций. Забор материала проводили сразу после удаления аспирационного субстрата и через 24 часа

от начала эндобронхиальной терапии – ингаляций без использования перфторана или визуально контролируемых инстилляций ПР. Наносили тонкий мазок на обезжиренное предметное стекло, высушивали в течение 30 мин и проводили окраску по методу Романовского – Гимза. При оценке цитогрaмм определяли относительное количество клеточных элементов (макрофагов, лимфоцитов, нейтрофильных и эозинофильных лейкоцитов) в монослойных препаратах, просматривая не менее 200 клеток.

Для объективизации оценки влияния перфторана на слизистую ТБД выполняли хромо-бронхоскопию с витальным нейтральным 0,25% метиленовым синим [1].

Статистическая обработка результатов исследований выполнена на персональном компьютере с использованием пакета статистических прикладных программ «Microsoft Statistica 6.0». Описательная статистика представлена в виде средних величин и их ошибки ($M \pm m$), их сравнение проводили с расчетом t-критерия Стьюдента. Учитывая небольшое число наблюдений, проверка статистических гипотез осуществлялась на основе непараметрических тестов Манна – Уитни и Колмогорова – Смирнова. Критический уровень значимости при проверке статистических гипотез в данном исследовании принимался равным 0,05.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На фоне проведения ингаляций при катаральном эндобронхите 2–3-й степени ($n = 119$) положительный эффект отмечен у 101 (84,87%) пациента. При выполнении инстилляций перфторана ($n = 8$) – во всех наблюдениях ($p < 0,002$).

Нивелирование картины геморрагического воспаления на фоне лечения в контрольной группе ($n = 131$) выявлено у 52 (39,69%) больных, в основной ($n = 31$) – у 29 (93,55%) ($p < 0,001$).

Ингаляционная терапия при эрозивном поражении ТБД ($n = 27$) способствовала уменьшению выраженности патологических изменений до уровня катарального эндобронхита первой степени в 8 (29,63%) наблюдениях, использование ПР ($n = 19$) – в 14 (73,68%) ($p < 0,01$).

Нивелирование фибринозного воспаления в контрольной группе ($n = 40$) отмечено у 17 (42,5%) пациентов, в основной ($n = 32$) – у 21 (65,63%) ($p < 0,05$).

Таким образом, уменьшение выраженности воспалительно-некротических изменений слизистой ТБД до уровня катарального эндобронхита первой степени на фоне ингаляционной терапии констатировано у 178 (56,15%) больных, при проведении ФБС с инстилляциями перфторана – у 72 (80%) ($p < 0,001$). По данным хромо-бронхоскопии выявлено, что после введения ПР не отмечено макроскопических признаков отрицательной динамики как со стороны патологи-

Таблица 1
Характеристика цитогрaмм при аспирационном повреждении ТБД на фоне эндобронхиальной терапии перфтораном

| Клеточные элементы в поле зрения, % | Исходный уровень (n = 6) | Через 24 часа от начала инстилляций перфторана (n = 6) |
|-------------------------------------|--------------------------|--|
| Число фагоцитирующих макрофагов | 2,17 ± 0,98 | 19,17 ± 3,49* |
| Число нейтрофильных лейкоцитов | 78,33 ± 8,21 | 60 ± 4,24* |
| Число лимфоцитов | 19,5 ± 8,62 | 20,83 ± 7,44* |

Примечание: * – различие достоверно (p < 0,05).

чески измененных тканей нижних дыхательных путей, так и эндоскопически неизменной слизистой.

При цитологическом исследовании покровного эпителия бронхов 2–4-й генераций через 24 часа после начала терапии перфтораном констатирована положительная динамика, указывающая на трансформацию клеточной реакции в воспалительно-регенераторный тип в виде резко уменьшенного числа нейтрофилов и их дегенеративных форм, а также появления позитивных клеточных элементов – макрофагов, участвующих в фагоцитозе (табл. 1).

В то же время у пациентов, в лечении которых использовалась ингаляционная терапия без ПР, сохранялся дегенеративно-воспалительный тип воспаления (табл. 2).

Резистентность изменений слизистой ТБД в контрольной группе имела место у 139 больных в виде сохранившихся и появившихся свежих эрозий и язв (n = 23–16,55%), увеличении площади геморрагического (n = 41–29,5%) и фибринозного (n = 75–53,96%) воспаления. Отсутствие положительной динамики в основ-

Таблица 2
Характеристика цитогрaмм при аспирационном повреждении бронхов на фоне ингаляционной терапии без использования перфторана

| Клеточные элементы в поле зрения, % | Исходный уровень (n = 6) | Через 24 часа от начала ингаляционной терапии без перфторана (n = 6) |
|-------------------------------------|--------------------------|--|
| Число фагоцитирующих макрофагов | 0,67 ± 0,82 | 1,33 ± 0,82 |
| Число нейтрофильных лейкоцитов | 90 ± 2,45 | 87,33 ± 1,97 |
| Число лимфоцитов | 9,33 ± 2,07 | 11,33 ± 1,37 |

ной группе было констатировано у 18 пациентов. У двух (11,11%) имели место терапieresистентные эрозии, у одного (5,56%) сохранялась картина геморрагического эндобронхита и у 5 (83,33%) – фибринозного.

Проведение ингаляционной терапии в 120 (37,87%) наблюдениях сопровождалось гиперпродукцией патологического секрета с бронхообструкцией (n = 71) или кровотечениями в просвет ТБД с гемоаспирацией и гемообтурацией (n = 49). Это требовало проведения эндоскопической реканализации пораженных бронхов. При использовании ПР локальная обструкция нижних дыхательных путей, диктовавшая необходимость выполнения их деблокации, имела место у 8 (8,89%) больных (p < 0,001): у 5 – в силу гиперсекреции экспектората и у 3 – при однократно состоявшемся малом кровотечении.

Таким образом, установлено преимущество использования визуально контролируемых эндобронхиальных инстилляций перфторана при лечении аспирационного повреждения бронхов по сравнению с неинвазивной тактикой ведения больных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукомский Г. И., Шулытко М. Л., Виннер М. Т., Овчинников А. А. Бронхопульмонология. М.: Медицина, 1982. 400 с.
2. Chastre J., Luyt C. E. Other therapeutic modalities and practices: implications for clinical trials of hospital-acquired or ventilator-associated pneumonia // Clin. Infect. Dis. 2010. Vol. 51 (Suppl. 1). P. 54–58.
3. Hess D. R. Airway clearance: physiology, pharmacology, techniques and practice // Respir. Care. 2007. Vol. 52. P. 1392–1396.
4. Johnson J., Hirsch C. Aspiration pneumonia: recognizing and managing a potentially growing disorder // Postgrad. Med. 2003. Vol. 113, № 3. P. 83–92.
5. Kikawada M., Iwamoto T., Takasaki M. Aspiration and infection in the elderly: epidemiology, diagnosis and management // Drugs. aging. 2005. Vol. 22. P. 115–130.
6. Lemoine J. M. Endoscopische Befunde der wesentlichen bronchopulmonalen Krankheiten // Internist. 1971. Bd. 12. S. 430–436.
7. Moore F. A. Treatment of aspiration in intensive care unit patient // J. Parenter. Enteral. Nutr. 2002. Vol. 26. P. 69–74.
8. Paintal H., Kuschner W. Aspiration syndromes 10 clinical pearls every physicians should know // Int. J. Clin. Pract. 2007. Vol. 61, № 5. P. 846–852.
9. Scolapio J. S. Methods for decreasing risk of aspiration pneumonia in critically ill patients // J. Parenter. Enteral. Nutr. 2002. Vol. 26. P. 58–61.
10. Tiddens H., Silverman M., Bush A. The role of Inflammation in airway disease // Am. J. Respir. Crit. Care Med. 2000. Vol. 62. P. 7–10.

Vvedenskiy V. P., Outpatient clinic № 2 of Yaroslavl (Yaroslavl, Russian Federation)
Rybachkov V. V., Yaroslavl State Medical Academy (Yaroslavl, Russian Federation)
Shubin L. B., Yaroslavl State Medical Academy (Yaroslavl, Russian Federation)

ENDOBONCHIAL THERAPY EFFECT ON STATUS LOCALIS EVOLUTION IN CASE OF TRACHEOBONCHIAL TREE ASPIRATION INJURY

Aspiration injury of tracheobronchial system is accompanied by hyper-production of expectorate and bronchial obstruction. This is one of the reasons of the lungs' hypoventilation progression and pneumonia. The objective of the study is to assess efficiency of endobronchial therapy in aspiration injury of tracheobronchial tree. Treatment results of 407 patients suffering from concomitant trauma complicated by bronchopulmonary aspiration serve as research materials. Among studied patients were 355 men and 52 women; the age ranged from 16 to 76, APACHE II – $16,47 \pm 0,14$ points, ISS – $23,46 \pm 0,21$ points. Unilateral, bilateral diffuse or focal diffuse catarrhal ($n = 127$), hemorrhagic ($n = 162$), erosive ($n = 46$) and croupous ($n = 72$) types of endobronchitis were revealed endoscopically. In treatment of 417 patients, intensive background therapy was combined with daily double inhalations. Treatment of 90 patients included fiber-optic endobronchial instillations of perflourane (daily dose is 0,25 ml/kg). Dynamics of endoscopic semiotics, perflourane effect on mucosa, and cytogram changes of damaged bronchial surface of epithelium was studied. Positive dynamics provided by inhalation therapy was observed in 56,15 % patients, and in 80 % ($p < 0,001$) – in cases of perflourane instillations. The use of chromobronchoscopy showed no signs of negative effect caused by perflourane. The use of cytologic diagnostics established transformation of cellular reaction into inflammatory and regeneration type revealed in the form of sharply reduced number of neutrophils and their involution bands ($p < 0,05$). The reaction took place 24 hours after perflourane therapy had been started. In cases when inhalations were deprived of perflourane, degenerative-inflammatory reaction type persisted. Irrespective of the nature of inflammation, endobronchial perflourane instillations are more effective in treatment of bronchi aspiration injuries than treatment based on inhalation.

Key words: bronchi aspiration injury, inhalation therapy, fiber-optic endobronchial instillations of perflourane

REFERENCES

1. Lukomskiy G. I., Shulytko M. L., Vinner M. G., Ovchinnikov A. A. *Bronhopul'monologiya* [Bronchopulmonology]. Moscow, Meditsina Publ., 1982. 400 p.
2. Chastre J., Luyt C. E. Other therapeutic modalities and practices: implications for clinical trials of hospital-acquired or ventilator-associated pneumonia // *Clin. Infect. Dis.* 2010. Vol. 51 (Suppl. 1). P. 54–58.
3. Hess D. R. Airway clearance: physiology, pharmacology, techniques and practice // *Respir. Care.* 2007. Vol. 52. P. 1392–1396.
4. Johnson J., Hirsch C. Aspiration pneumonia: recognizing and managing a potentially growing disorder // *Postgrad. Med.* 2003. Vol. 113, № 3. P. 83–92.
5. Kikawada M., Iwamoto T., Takasaki M. Aspiration and infection in the elderly: epidemiology, diagnosis and management // *Drugs. aging.* 2005. Vol. 22. P. 115–130.
6. Lemoine J. M. Endoscopische Befunde der wesentlichen bronchopulmonalen Krankheiten // *Internist.* 1971. Bd. 12. S. 430–436.
7. Moore F. A. Treatment of aspiration in intensive care unit patient // *J. Parenter. Enteral. Nutr.* 2002. Vol. 26. P. 69–74.
8. Paintal H., Kuschner W. Aspiration syndromes 10 clinical pearls every physicians should know // *Int. J. Clin. Pract.* 2007. Vol. 61. № 5. P. 846–852.
9. Scolapio J. S. Methods for decreasing risk of aspiration pneumonia in critically ill patients // *J. Parenter. Enteral. Nutr.* 2002. Vol. 26. P. 58–61.
10. Tiddens H., Silverman M., Bush A. The role of Inflammation in airway disease // *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2000. Vol. 62. P. 7–10.

Поступила в редакцию 07.06.2013

ВИТАЛИЙ ВИТАЛЬЕВИЧ ГОЛДОБИН

кандидат медицинских наук, доцент кафедры неврологии им. академика С. Н. Давиденкова, Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
vgoldobin@inbox.ru

ЕЛЕНА ГЕОРГИЕВНА КЛОЧЕВА

доктор медицинских наук, профессор кафедры неврологии им. академика С. Н. Давиденкова, Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
vgoldobin@inbox.ru

ОЛЬГА ВАСИЛЬЕВНА СИРОТКИНА

доктор биологических наук, старший научный сотрудник, Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова (Гатчина, Российская Федерация)
vgoldobin@inbox.ru

ТАТЬЯНА ВЛАДИМИРОВНА ВАВИЛОВА

доктор медицинских наук, профессор кафедры клинической лабораторной диагностики, Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
vgoldobin@inbox.ru

АНАСТАСИЯ БОРИСОВНА ЛАСКОВЕЦ

врач отделения клинической лабораторной диагностики, Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
vgoldobin@inbox.ru

АТЕРОТРОМБОТИЧЕСКИЙ И ЛАКУНАРНЫЙ ИНСУЛЬТЫ У ПАЦИЕНТОВ ПОЖИЛОГО ВОЗРАСТА: ОСОБЕННОСТИ КЛИНИЧЕСКИХ ПРОЯВЛЕНИЙ И ТРОМБОЦИТАРНОГО ГЕМОСТАЗА

Ишемический инсульт чаще возникает у лиц пожилого и старческого возраста. Патогенез атеротромботического и лакунарного инсультов определяется взаимодействием тромбоцита с эндотелиоцитом сосуда, что объясняет назначение антиагрегантных препаратов для вторичной профилактики. Цель исследования – изучение клинических данных и показателей тромбоцитарного гемостаза у пациентов пожилого возраста, перенесших атеротромботический и лакунарный инсульты. Обследованы 35 больных с инсультом ($66,3 \pm 3,9$ года) и 13 лиц без инсульта ($63,6 \pm 5,2$ года). Всем обследуемым выполнено стандартное клиничко-лабораторное обследование, позволяющее верифицировать патогенетический вариант инсульта, исследование тромбоцитарного гемостаза: аденозиндифосфат-индуцированная агрегометрия и проточная цитометрия экспрессии рецепторов к фибриногену, фактору Виллебранда и Р-селектина, а также молекулярно-генетическое исследование. Данные агрегометрии при стимуляции 2,5 и 5 мкмоль аденозиндифосфата свидетельствовали о более высокой активности тромбоцитов у здоровых лиц ($85,3 \pm 28,1$ и $54,1 \pm 20,0\%$, $p < 0,05$; $83,8 \pm 23,7$ и $64,9 \pm 19,6\%$, $p < 0,05$), однако экспрессия Р-селектина указывала на активацию тромбоцитов у пациентов с инсультом ($24,1 \pm 12,8$ и $36,1 \pm 17,9\%$, $p < 0,05$). При атеротромботическом инсульте мутантную аллель гена тромбоцитарного рецептора к фактору Виллебранда выявили у 8 (20,0%) пациентов, что значимо ($p < 0,05$) больше, чем у больных с лакунарным инсультом – один (6,7%) больной. У больных с атеротромботическим инсультом наблюдалась прямая достоверная корреляция ($r = 0,608$; $p = 0,012$) балла NIHSS при выписке с экспрессией рецепторов к фактору Виллебранда, что указывало на худшее восстановление пациентов с более высокой экспрессией данных рецепторов. У пациентов пожилого возраста с атеротромботическим и лакунарным инсультами наблюдалась активация тромбоцитарного звена гемостаза. Стандартная агрегометрия недостаточно информативна для оценки активации тромбоцитов у данных больных. Прогностическое значение для течения острого периода инсульта у пациентов пожилого возраста с атеротромботическим ишемическим инсультом имеет экспрессия рецептора к фактору Виллебранда на тромбоците.

Ключевые слова: ишемический инсульт, тромбоциты, агрегация, Р-селектин, рецепторы к фибриногену, тромбоцитарный гликопротеин 1ba

Медико-социальная значимость церебрального ишемического инсульта связана с высокими показателями инвалидизации и летальности пациентов [1]. Частота развития первичного ишемического инсульта (ИИ) увеличивается в пожилом возрасте: в когортных исследованиях показано развитие инсульта у 2% лиц в возрасте 45–64 лет, у 8% лиц 64–74 лет и у 11% лиц возраста 75 лет и более [13]. До настоящего времени механизмы развития ИИ окончательно не ясны. Определяющую роль в патогенезе атеротромботического и лакунарного инсультов играет взаимодействие тромбоцитов с эндотелиоцитами сосудистой стенки [3]. Важной составляющей вторичной профилактики атеротромботического и лакунарного инсультов является назначение антиагрегантных препаратов. Однако на современном этапе профилактики эффективность антиагрегантной терапии составляет 25% [6], а повторный ИИ развивается в течение 5 лет у 16–42% больных [2], [6], что указывает на необходимость определения особенностей терапии для пациентов с различными патогенетическими вариантами ИИ. Выделение классификационных подгрупп атеротромботического инсульта (АТИ) и лакунарного инсульта (ЛИ) связано с нарушением кровоснабжения мозга на различных уровнях: атеротромбозом магистральных артерий при АТИ и поражением мелких пенетрирующих артерий при ЛИ, чаще вследствие липогиалиноза.

Целью данного исследования являлось изучение клинических данных и показателей тромبوцитарного гемостаза у пациентов пожилого возраста, перенесших атеротромботический и лакунарный инсульты.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Были обследованы 35 пациентов в возрасте $66,3 \pm 3,9$ года (основная группа) и 13 здоровых лиц в возрасте $63,6 \pm 5,2$ года (контрольная группа). Набор пациентов проводился в клинике неврологии СЗГМУ им. И. И. Мечникова и в ангионеврологическом отделении ГУЗ «Городская больница святой преподобномученицы Елизаветы» (Санкт-Петербург).

Критериями включения в исследование являлись наличие АТИ или ЛИ в остром периоде, подтвержденное компьютерной томографией (КТ) или магнитно-резонансной томографией (МРТ) головного мозга.

Диагноз АТИ устанавливали при обнаружении стеноза соответствующей очагу артерии (> 50% по данным дуплексного сканирования), отсутствии признаков кардиогенной эмболии и при размере очага поражения головного мозга > 20 мм при КТ или МРТ [5]. Критериями ЛИ были наличие лакунарного синдрома в клинической картине; отсутствие признаков кардиогенной эмболии, стеноза ипсилатеральной моз-

говой артерии > 50%; размер очага поражения головного мозга < 20 мм при КТ или МРТ [5].

Критериями невключения были: постоянный прием антикоагулянтных препаратов, наличие острого инфаркта миокарда, нестабильной стенокардии, фибрилляции предсердий, острой сердечной недостаточности, хронической сердечной недостаточности выше 2-й стадии по классификации Нью-Йоркской кардиологической ассоциации, пороков клапанов сердца, анамнестические данные о проведении коронарной ангиопластики или аортокоронарного шунтирования, ангиопластики брахиоцефальных артерий, каротидной эндартерэктомии, протезирования клапанов сердца. В исследование не включали пациентов с сопутствующими хроническими заболеваниями головного мозга (рассеянный склероз, болезнь Паркинсона, опухоли); заболеваниями системы крови; наличием хронической почечной недостаточности с проведением гемодиализа; лиц, постоянно принимающих антидепрессанты из группы селективных ингибиторов обратного захвата серотонина.

Для сравнения клинических и гемореологических показателей были выделены 2 группы в соответствии с вариантом ишемического инсульта: 1-ю группу составили 20 больных с АТИ в возрасте $66,5 \pm 4,4$ года, 2-ю группу – 15 пациентов с ЛИ в возрасте $65,9 \pm 3,1$ года.

Комплексное обследование включало: клинико-неврологическое, инструментальное и лабораторное исследования. На каждого больного заполнялась специально разработанная карта.

Неврологический осмотр выполняли по стандартной методике. Проводилась оценка состояния пациентов на момент поступления и при выписке по общепринятым шкалам в баллах: по шкале инсульта Американского национального института здоровья (NIHSS), которая характеризует основные нарушения при церебральном инсульте [7], [9], и по шкале Ранкина, которая позволяет оценить степень инвалидизации в повседневной жизни [8].

КТ или МРТ головного мозга выполняли всем больным на 2–5-й день от развития заболевания для верификации очага ишемии в веществе мозга, оценки его локализации и размеров.

Лабораторное исследование включало клинический анализ крови при поступлении и на 10-й день от развития ИИ, а также аденозиндифосфат (АДФ) индуцированную агрегатометрию и проточную цитометрию на 10-й день от развития инсульта. Венозную кровь забирали в утреннее время, натощак. В условиях процедурного кабинета под венозным жгутом проводилась венепункция локтевой вены иглой 21G со свободным током крови через вакутейнер в вакуумные полипропиленовые пробирки, содержащие в качестве антикоагулянта K_2 и K_3 соль этилиндиаминтетрауксусной кислоты (для гема-

тологического анализа) или 3,8% цитрат натрия (для агрегометрии и проточной цитометрии). Выполнение клинического анализа крови с подсчетом количества тромбоцитов осуществляли кондуктометрическим методом на автоматических гематологических анализаторах «Beckman Coulter LH 500» и «MaxM» (США). Показатель среднего объема тромбоцитов (MPV) рассчитывался прибором автоматически из гистограммы тромбоцитов.

АДФ-индуцированную агрегацию тромбоцитов исследовали фотометрическим методом на агрегометре «SOLAR» (Беларусь). Концентрация индуктора составляла 2,5 мкМ, 5 мкМ (АДФ производства «Sigma-Aldrich», США). Результат оценивали по изменению степени светопропускания в точке максимума, а также по скорости агрегации через 30 с после добавления АДФ. Перед исследованием на проточном цитометре проводили центрифугирование полученной крови при 1500 об./мин в течение 5 мин при комнатной температуре для получения богатой тромбоцитами плазмы (БТП). Обедненную тромбоцитами плазму (ОТП) получали путем центрифугирования БТП при 3000 об./мин в течение 15 мин. ОТП использовали для разведения БТП до 300 тыс. кл/мкл, если это было необходимо, а также для калибровки агрегометра на уровень $T = 100\%$. Содержание гликопротеидов Pb/IIIa и Iba на поверхности тромбоцитов, а также число клеток, экспрессирующих Р-селектин, определяли на проточном цитометре «CYTOMICS FC 500» («Beckman Coulter», США). Использовались меченые моноклональные антитела CD61-FITC, CD62P-PE (Beckman Coulter, США) и VM16d-FITC (Российский кардиологический научно-производственный комплекс Росмедтехнологий, РФ). Количество рецепторов Pb/IIIa и Iba на поверхности тромбоцитов до и после индукции 10 мкМ АДФ оценивали по показателю средней интенсивности флуоресценции. Экспрессию Р-селектина на поверхности тромбоцитов оценивали как процент клеток, меченных CD62P-PE до и после индукции 10 мкМ АДФ. Математически рассчитывались параметры:

1) $\Delta\text{Pb/IIIa}$, который показывает увеличение в процентах количества рецепторов Pb/IIIa на поверхности тромбоцитов после индукции АДФ;

2) ΔP -селектин, показывающий увеличение процента тромбоцитов, экспрессирующих Р-селектин после индукции АДФ.

Молекулярно-генетическое исследование включало выявление точечной мутации гена тромбоцитарного гликопротеида Iba , локализованного в 13-м локусе короткого плеча 17-й хромосомы (с.3550С>Т – замена С на Т в 3550-й позиции). Наличие данной миссенс-мутации приводит к замене триптофана на метионин в 145-м положении аминокислотной последова-

тельности белка (Thr145Met), в результате чего изменяется функциональная активность рецептора к фактору Виллебранда, что предрасполагает к тромбообразованию и увеличивает риск развития сердечно-сосудистых заболеваний почти в 3 раза [10].

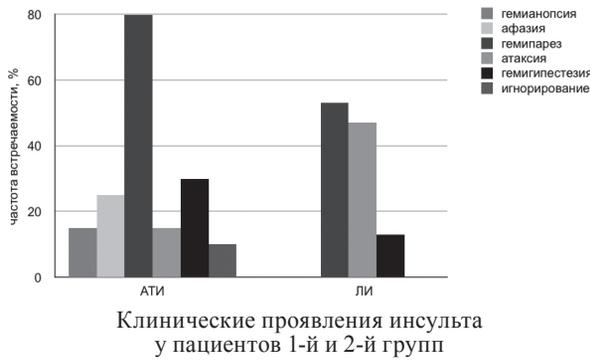
Дезоксирибонуклеиновую кислоту (ДНК) выделяли из лейкоцитов крови стандартным фенол-хлороформным методом. Лизис клеток проводили по методу Канкеля с использованием реактивов фирмы «Хеликон» (РФ). Выход ДНК составлял 40–50 мкг ДНК из 500 мкл цельной крови. Для идентификации однонуклеотидных замен использовали амплификацию соответствующего участка гена методом полимеразной цепной реакции (ПЦР) с последующим рестрикционным анализом. Амплификацию проводили на амплификаторе «Терцик» (термостат программируемый четырехканальный для проведения ПЦР анализа ТП4-ПЦР-01 – «Терцик» ТУ 9452–001–46482062–98, НПФ «ДНК-Технология», РФ) при помощи термостабильной высокопроцессивной рекомбинантной Taq ДНК полимеразы фирмы «Fermentas» (Литва). В результате реакции получали фрагмент 587 полинуклеотидов, который подвергался ферментативному расщеплению с помощью рестриктазы Hin II (1 ед.) в рестрикционном буфере. Продукт рестрикционного анализа электрофоретически разделяли при 30 мА (150 В) в полиакриламидном геле в трис-боратном буфере. Результаты визуализировали в ультрафиолетовом свете после окрашивания бромистым этидием. В случае нормального аллельного варианта (Thr) определялись фрагменты 270 полинуклеотидов, 201 полинуклеотид и 1163 полинуклеотида, при мутации образуются фрагменты 386 полинуклеотидов и 201 полинуклеотид (Met).

Статистическую обработку результатов выполняли с использованием пакета программ Statistica 6,0 for Windows (StatSoft Inc.). Изучаемые количественные признаки представлены в виде $M \pm \sigma$, где M – среднее, σ – одно стандартное отклонение. Проверка нормальности распределения проводилась по критерию Шапиро – Уилкса. Для проверки гипотезы о равенстве средних для двух групп использовались параметрические (t -Стьюдента для независимых выборок; t -Стьюдента для связанных выборок) или непараметрические (χ^2 , Манна – Уитни, Вилкоксона) критерии. Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основные клинические проявления ИИ у обследованных пациентов представлены на рисунке. У больных с АТИ выявлялись афазия, гемипарез, нехарактерные для ЛИ.

Значения NIHSS и шкалы Ранкина в 1-й и 2-й группах при поступлении и при выписке



представлены в табл. 1. Наблюдалось достоверно ($p < 0,05$) более высокое значение NIHSS при поступлении у больных с АТИ, что свидетельствовало о более тяжелом состоянии указанных пациентов. Также у пациентов с АТИ был выявлен значимо ($p < 0,05$) более высокий балл по шкале Ранкина при выписке, что указывало на выраженное нарушение функциональной независимости. Полученные различия могут быть объяснены большим размером очага при АТИ по сравнению с ЛИ, что предполагает более тяжелое течение заболевания [5].

Таблица 1
Значения клинических шкал у пациентов с различными вариантами ИИ

| Группа пациентов | NIHSS, балл | | Шкала Ранкина, балл | |
|------------------|-----------------|-------------|---------------------|-------------|
| | при поступлении | при выписке | при поступлении | при выписке |
| 1-я | 7,6 ± 3,1* | 3,4 ± 2,0 | 2,7 ± 0,7 | 1,8 ± 0,7* |
| 2-я | 4,8 ± 2,6* | 2,3 ± 1,7 | 2,3 ± 0,6 | 1,3 ± 0,5* |

Примечание. * – $p < 0,05$.

Наблюдалось достоверное уменьшение показателей клинических шкал при выписке по сравнению со значениями при поступлении в обеих группах ($p < 0,05$), что указывало на благоприятное течение ИИ у обследованных пациентов.

Количество тромбоцитов у пациентов 1-й группы при поступлении составило $233,7 \pm 60,6 \times 10^9 / л$, MPV – $10,0 \pm 1,0$ фл, на 10-й день соответственно $225,2 \pm 40,0 \times 10^9 / л$ и $10,4 \pm 1,0$ фл. У больных 2-й группы указанные показатели были $244,7 \pm 59,1 \times 10^9 / л$, $8,7 \pm 0,9$ фл, $217,7 \pm 39,8 \times 10^9 / л$ и $9,0 \pm 1,1$ фл. Достоверного различия тромбоцитарных показателей гемограммы при поступлении и при выписке у пациентов 1-й и 2-й групп не наблюдалось ($p > 0,05$). В течение первых 10 суток заболевания было выявлено снижение MPV в обеих группах ($p < 0,05$), что свидетельствовало об уменьшении размеров тромбоцитов. MPV рассматривают как один из маркеров функционального исхода ишемического инсульта. Снижение значений данного показателя в динамике заболевания может указывать на благоприятный прогноз инсульта у обследованных пациентов [12].

Исследование агрегации тромбоцитов показало более ($p < 0,05$) высокие значения степени агрегации при стимуляции 2,5 и 5 мкмоль АДФ у здоровых лиц по сравнению с основной группой (табл. 2). Полученные данные могут быть связаны с влиянием постоянно проводимой антиагрегантной терапии в основной группе, изменяющим взаимодействие тромбоцита с индуктором агрегации.

Таблица 2
Агрегометрические показатели у обследуемых с ишемическим инсультом и лиц контрольной группы

| Индуктор агрегации | Пациенты с инсультом | | Контрольная группа | |
|--------------------|----------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| | Степень, % | Скорость, % / мин | Степень, % | Скорость, % / мин |
| 2,5 мкмоль АДФ | 54,1 ± 20,0* | 23,7 ± 9,1 | 85,3 ± 28,1* | 29,8 ± 14,1 |
| 5 мкмоль АДФ | 64,9 ± 19,6* | 26,7 ± 10,0 | 83,8 ± 23,7* | 32,8 ± 14,9 |

Примечание. * – $p < 0,05$.

Степень агрегации тромбоцитов при стимуляции 2,5 мкмоль АДФ в 1-й группе составила $54,4 \pm 18,1$ %, во 2-й – $53,8 \pm 23,0$ %; скорость агрегации была соответственно $24,7 \pm 9,1$ % / мин и $22,3 \pm 9,3$ % / мин. При стимуляции 5 мкмоль АДФ степень агрегации в 1-й группе была равна $65,6 \pm 21,2$ %, во 2-й – $64,0 \pm 17,8$ %; скорость агрегации составила соответственно $26,9 \pm 10,3$ % / мин и $26,5 \pm 9,8$ % / мин. Достоверных различий агрегометрических данных у пациентов 1-й и 2-й групп выявлено не было ($p > 0,05$).

Показатели экспрессии тромбоцитами Р-селектина приведены в табл. 3. Наблюдалось достоверно ($p < 0,05$) более высокое количество тромбоцитов, экспрессирующих Р-селектин после стимуляции АДФ в основной группе по сравнению с контрольной. Экспрессия Р-селектина является специфическим маркером активации тромбоцита, отражающим его конформационные изменения, поскольку в неактивированном состоянии Р-селектин депонирован в α -гранулах тромбоцита [11]. Выявление активации тромбоцитов у пациентов с ИИ по сравнению с контрольной группой при проточной цитометрии может свидетельствовать о предпочтительности данного метода по сравнению со стандартной агрегометрией. Достоверного различия показателей экспрессии Р-селектина у больных 1-й и 2-й групп выявлено не было ($p > 0,05$).

Таблица 3
Экспрессия Р-селектина на тромбоцитах в обследуемых группах

| Группа | Тромбоциты, экспрессирующие Р-селектин, % | | |
|-------------|---|---------------------|-------------|
| | базальный уровень | стимулированный АДФ | Δ |
| Основная | 6,0 ± 5,7 | 36,1 ± 17,9* | 82,4 ± 14,3 |
| Контрольная | 4,4 ± 4,5 | 24,1 ± 12,8* | 77,6 ± 18,6 |

Примечание. * – $p < 0,05$.

В табл. 4 представлены результаты проточной цитометрии (в единицах интенсивности флуоресценции) с определением экспрессии рецепторов Пб/Ша на поверхности тромбоцита. У пациентов с ИИ наблюдалось более высокое значение Δ , чем в контрольной группе. До 80% рецепторов Пб/Ша равномерно распределены на мембране тромбоцитов, остальные 20% находятся в канальцевой системе «внутри тромбоцита» [4]. Таким образом, можно предположить, что полученное высокое значение Δ для пациентов с инсультом связано с наличием у них большей пластичности мембраны активированных тромбоцитов.

Таблица 4
Количество рецепторов Пб/Ша на тромбоцитах в сравниваемых группах

| Группа | Интенсивность флуоресценции | | |
|-------------|-----------------------------|---------------------|--------------|
| | базальная | стимулированная АДФ | Δ , % |
| Основная | 7,4 ± 1,4 | 8,2 ± 1,9 | 12,4 ± 5,0* |
| Контрольная | 7,5 ± 1,5 | 8,3 ± 2,3 | 8,4 ± 6,9* |

Примечание. * – $p < 0,05$.

Сравнение уровней экспрессии рецепторов Пб/Ша на поверхности тромбоцита у пациентов 1-й и 2-й групп значимых различий не выявило ($p > 0,05$).

Экспрессия рецепторов к фактору Виллебранда на тромбоците (в единицах интенсивности флуоресценции) в основной группе составила $4,3 \pm 2,5$, в контрольной – $4,9 \pm 1,2$, достоверного различия выявлено не было ($p > 0,05$). Экспрессия рецепторов к фактору Виллебранда на тромбоците в 1-й группе была $3,8 \pm 1,4$, во 2-й – $4,9 \pm 3,4$, значимого различия не выявлено ($p > 0,05$).

Гетерозиготное носительство мутантной аллели с.3550С>Т наблюдалось у 9 (аллельная частота 12,9%) пациентов с инсультом и у одного (3,8%) обследуемого контрольной группы, достоверного различия не было ($p > 0,05$). В 1-й группе мутантную аллель выявили у 8 (20,0%) пациентов, что значимо ($p < 0,05$) больше, чем во 2-й – один больной (6,7%).

В 1-й группе наблюдалась прямая достоверная корреляция ($r = 0,608$; $p = 0,012$) балла NIHSS при выписке с экспрессией рецепторов Пб на тромбоците, что указывало на худшее восстановление пациентов с более высокой экспрессией рецепторов к фактору Виллебранда на тромбоците. Тромбообразование определяется взаимодействием фактора Виллебранда со специфическими рецепторами клеток крови, в первую очередь тромбоцитов, и образованием комплекса фактор Виллебранда – рецептор к фактору Виллебранда – IX–V. В доступной нам литературе нет данных об экспрессии рецепторов к фактору Виллебранда на тромбоците у пациентов с АТИ. Перспективным направлением терапии у данных пациентов могут стать препараты, направленные на блокаду рецептора к фактору Виллебранда или комплекса фактор Виллебранда – рецептор к фактору Виллебранда.

Во 2-й группе наблюдалась прямая достоверная корреляция балла по шкале Ранкина при выписке с показателями агрегации тромбоцитов: скоростью агрегации тромбоцитов при индукции 2,5 мкмоль АДФ ($r = 0,800$; $p = 0,005$), значением D P-селектина ($r = 0,722$; $p = 0,018$). Полученная корреляционная связь указывала на худшее восстановление функциональной независимости больных ЛИ с повышенной агрегацией и активацией тромбоцитов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что у пациентов пожилого возраста с атеротромботическим и лакунарным инсультами наблюдается активация тромбоцитарного звена гемостаза. Стандартная агрегометрия недостаточно информативна для оценки активации тромбоцитов у данных больных. Прогностическое значение для течения острого периода инсульта у пациентов пожилого возраста с атеротромботическим ишемическим инсультом может иметь экспрессия рецептора к фактору Виллебранда на тромбоците. У больных с лакунарным инсультом на восстановление могут оказывать влияние показатели, характеризующие агрегацию и активацию тромбоцитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев Е. И., Скворцова В. И., Стаховская Л. В. Эпидемиология инсульта в России // Журнал неврологии и психиатрии (Приложение «Инсульт»). 2003. С. 4–9.
2. Суслина З. А., Пирадов М. А. Инсульт: диагностика, лечение, профилактика. М.: МЕДпресс-информ, 2009. 288 с.
3. Суслина З. А., Танашян М. М., Ионов В. Г. Ишемический инсульт: кровь, сосудистая стенка, антитромботическая терапия. М.: Медицинская книга, 2005. 248 с.
4. Шитикова А. С. Тромбоцитарный гемостаз. СПб.: Изд-во СПб ГМУ, 2000. 227 с.
5. Adams H. P. Jr., Bendixen B. H., Kappelle L. J. et al. Classification of sup-type of acute ischemic stroke. Definition for use in a multicenter clinical trial. TOAST. Trial of Org 10172 in acute stroke treatment // Stroke. 1993. Vol. 24. № 1. P. 35–41.
6. Antithrombotic Trialists' Collaboration. Collaborative meta-analysis of randomised trials of antiplatelet therapy for prevention of death, myocardial infarction, and stroke in high risk patient // BMJ. 2002. Vol. 324. № 7329. P. 71–86.
7. Biller J., Love B., Marsh III E. et al. Spontaneous improvement after acute ischemic stroke // Stroke. 1990. Vol. 21. № 7. P. 1008–1012.
8. Bonita R., Beaglehole R. Modification of Rankin Scale: recovery of motor function after stroke // Stroke. 1988. Vol. 19. № 12. P. 1497–1500.

9. Brott T., Adams H. P., Olinger C. P. et al. Measurement of acute cerebral infarction: a clinical examination scale // *Stroke*. 1989. Vol. 20. № 7. P. 864–870.
10. Gonzalez-Conejero R., Lozano M. L., Rivera J. et al. Polymorphisms of platelet membrane glycoprotein Ib associated with arterial thrombotic disease // *Blood*. 1998. Vol. 92. № 8. P. 2771–2776.
11. Harrison P., Cramer E. M. Platelet α -granules // *Blood Rev.* 1993. Vol. 7. № 1. P. 52–62.
12. Mayda-Domac F., Misirli H., Yilmaz M. Prognostic role of mean platelet volume and platelet count in ischemic and hemorrhagic stroke // *J. Stroke Cerebrovasc. Dis.* 2010. Vol. 19. № 1. P. 66–72.
13. Pleis J. R., Lethbridge-Cejku M. Summary health statistics for US adults: National Health Interview Survey, 2006. National Center for Health Statistics // *Vital Health Stat.* 2007. № 235. P. 1–153.

Goldobin V. V., North-Western State Medical University named after I. I. Mechnikov (St. Petersburg, Russian Federation)
Klocheva E. G., North-Western State Medical University named after I. I. Mechnikov (St. Petersburg, Russian Federation)
Sirotkina O. V., Petersburg Nuclear Physics Institute (Gatchina, Russian Federation)
Vavilova T. V., North-Western State Medical University named after I. I. Mechnikov (St. Petersburg, Russian Federation)
Laskovets A. B., North-Western State Medical University named after I. I. Mechnikov (St. Petersburg, Russian Federation)

ATHEROTHROMBOTIC AND LACUNAR STROKES IN ELDERLY PATIENTS: CLINICAL MANIFESTATIONS AND PLATELET HAEMOSTASIS

Occurrence of ischemic stroke incidences increases with aging. The relations between platelets and endothelial cells are pivotal in pathogenesis of atherothrombotic and lacunar stroke, therefore, antiplatelet drugs' administration is common for the purpose of prevention of secondary strokes. The goal of the study was to investigate clinical manifestation and platelet homeostasis parameters in elderly patients with atherothrombotic and lacunar strokes. 35 patients with stroke ($66,3 \pm 3,9$ years) and 13 persons without stroke ($63,6 \pm 5,2$) were examined. We performed routine clinical examination and laboratory investigation to reveal pathogenetic variants of stroke. Platelet homeostasis investigation: adenosindiphosphate-induced agregometry and flow-cytometry of receptor expression for fibrinogen; von Willebrand factor and P-selectin, and molecular genetic test were carried out. Agregometry with stimulation by 2,5 and 5 μ mol adenosindiphosphate revealed high reactive activity of platelets in a healthy group ($85,3 \pm 28,1\%$ and $54,1 \pm 20,0\%$, $p < 0,05$; $83,8 \pm 23,7\%$ and $64,9 \pm 19,6\%$, $p < 0,05$), at the same time P-selectin expression revealed platelet activation in patients with stroke ($24,1 \pm 12,8\%$ and $36,1 \pm 17,9\%$, $p < 0,05$). The point mutation into von Willebrand factor receptor gene was recognized in 8 (20,0%) patients with atherothrombotic stroke, which was significantly higher in comparison to patients with lacunar stroke – 1 (6,7%). We found direct correlation between NIHSS point on discharge and von Willebrand receptor expression upon platelets in patients with atherothrombotic stroke ($r = 0,608$; $p = 0,012$), that pointed to worse recovery in patients with higher expression of such receptors. Platelet hemostasis activation took place in elderly patients with atherothrombotic and lacunar stroke. Standart agregometry was not informative enough for estimation of platelets' activation in such patients. The expression of von Willebrand factor receptor upon platelet was important for stroke prognosis in atherothrombotic patients.

Key words: ischemic stroke, platelet, aggregation, P-selectin, fibrinogen receptors, platelet glycoprotein 1ba

REFERENCES

1. Gusev E. I., Skvortsova V. I., Stakhovskaya L. V. Stroke epidemiology in Russia [Epidemiologiya insul'ta v Rossii]. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii (Prilozhenie "Insul't")*. 2003. P. 4–9.
2. Suslina Z. A., Piradov M. A. *Insul't: diagnostika, lechenie, profilaktika* [Stroke: diagnosis, treatment, prevention]. Moscow, MEDpress-inform Publ., 2009. 288 p.
3. Suslina Z. A., Tanashyan M. M., Ionova V. G. *Ishemicheskii insul't: krov', sosudistaya stenka, antitromboticheskaya terapiya* [Ischemic stroke: blood, vascular wall, antitrombotic treatment]. Moscow, Meditsinskaya kniga Publ. 2005. 248 p.
4. Shitikova A. S. *Trombotsitarnyy gemostaz* [Platelet hemostasis]. St. Petersburg, SPbGMU Publ., 2000. 227 p.
5. Adams H. P. Jr., Bendixen B. H., Kappelle L. J. et al. Classification of sup-type of acute ischemic stroke. Definition for use in a multicenter clinical trial. TOAST. Trial of Org 10172 in acute stroke treatment // *Stroke*. 1993. Vol. 24. № 1. P. 35–41.
6. Antithrombotic Trialists' Collaboration. Collaborative meta-analysis of randomized trials of antiplatelet therapy for prevention of death, myocardial infarction, and stroke in high risk patient // *BMJ*. 2002. Vol. 324. № 7329. P. 71–86.
7. Biller J., Love B., Marsh III E. et al. Spontaneous improvement after acute ischemic stroke // *Stroke*. 1990. Vol. 21. № 7. P. 1008–1012.
8. Bonita R., Beaglehole R. Modification of Rankin Scale: recovery of motor function after stroke // *Stroke*. 1988. Vol. 19. № 12. P. 1497–1500.
9. Brott T., Adams H. P., Olinger C. P. et al. Measurement of acute cerebral infarction: a clinical examination scale // *Stroke*. 1989. Vol. 20. № 7. P. 864–870.
10. Gonzalez-Conejero R., Lozano M. L., Rivera J. et al. Polymorphisms of platelet membrane glycoprotein Ib associated with arterial thrombotic disease // *Blood*. 1998. Vol. 92. № 8. P. 2771–2776.
11. Harrison P., Cramer E. M. Platelet α -granules // *Blood Rev.* 1993. Vol. 7. № 1. P. 52–62.
12. Mayda-Domac F., Misirli H., Yilmaz M. Prognostic role of mean platelet volume and platelet count in ischemic and hemorrhagic stroke // *J. Stroke Cerebrovasc. Dis.* 2010. Vol. 19. № 1. P. 66–72.
13. Pleis J. R., Lethbridge-Cejku M. Summary on health statistics for US adults: National Health Interview Survey, 2006. National Center for Health Statistics // *Vital Health Stat.* 2007. № 235. P. 1–153.

Поступила в редакцию 27.06.2013

ДАРЬЯ ВЛАДИМИРОВНА ЖУРАХОВСКАЯ
старший преподаватель кафедры фармакологии, организации и экономики фармации, микробиологии и гигиены медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
zhurakhovskaya@mail.ru

ЕКАТЕРИНА ЕФИМОВНА ЛОСКУТОВА
доктор фармацевтических наук, профессор, заведующий кафедрой управления и экономики фармации медицинского факультета, Российский университет дружбы народов (Москва, Российская Федерация)
ekaterinaloskuttova@gmail.com

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

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ИНФОРМИРОВАННОСТИ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ ПО ВОПРОСАМ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ НЕСТЕРОИДНЫХ ПРОТИВОВОСПАЛИТЕЛЬНЫХ ПРЕПАРАТОВ*

Исследованы вопросы рационального применения нестероидных противовоспалительных препаратов по результатам анкетирования провизоров и фармацевтов г. Петрозаводска. Выявлены критерии рекомендаций обезболивающих препаратов, источники информации фармацевтических работников о лекарственных средствах. При оценке информированности об основных фармакологических свойствах нестероидных противовоспалительных препаратов выявлен недостаточный уровень знаний правил отпуска, преимуществ и недостатков высокоселективных ингибиторов ЦОГ-2, возможных побочных эффектов препаратов данной группы.

Ключевые слова: нестероидные противовоспалительные препараты, фармацевтические работники, оценка информированности, анкетирование

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы безопасности лекарственной терапии особенно актуальны в настоящее время как в России, так и за рубежом. По оценкам Всемирной организации здравоохранения, более половины всех лекарств назначаются, отпускаются или продаются ненадлежащим образом и каждый второй пациент принимает их неправильно [3]. К наиболее распространенным видам нерационального использования лекарственных препаратов (ЛП) относятся: использование ЛП с большим количеством побочных эффектов, что приводит к увеличению расходов на лечение; назначение лекарств при наличии противопоказаний, а также назначение несовместимых препаратов; неприемлемое самолечение, часто с помощью рецептурных ЛП [1].

В настоящее время одной из наиболее широко применяемых в медицине групп ЛП являются нестероидные противовоспалительные препараты (НПВП). По некоторым данным, во всем мире более 30 млн человек вынуждены принимать их постоянно, 300 млн принимают их хотя бы кратковременно (из них до 200 млн приобретают препараты без рецепта врача) [2]. Согласно

данным IMS Health, общий объем продаж анализируемого сегмента в 2009 году составлял 11,5 млрд руб. в оптовых ценах, в натуральном выражении объем реализации достигал 128,8 млн упаковок [4].

Высокий уровень потребления НПВП обусловлен уникальным сочетанием противовоспалительного, болеутоляющего и жаропонижающего эффектов, а следовательно, достаточно широким спектром показаний к применению. Наличие большого количества ЛП данной группы в различных ценовых сегментах сделало их доступными для всех слоев населения.

В то же время неконтролируемый прием НПВП, их неадекватный выбор и режим дозирования могут приводить к развитию серьезных побочных реакций. Ввиду этого фармацевтические работники обязаны обладать определенными профессиональными знаниями, обеспечивающими безопасность ЛП для конкретного пациента, даже несмотря на то, что консультирование посетителей аптек ограничено перечнем ЛП, отпускаемых без рецепта врача.

Целью настоящего исследования явилось изучение информированности фармацевтических

работников аптечных организаций г. Петрозаводска по вопросам эффективности и безопасности НПВП для повышения рациональности их использования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для анализа степени информированности провизоров и фармацевтов был использован метод анкетирования. Всего в опросе приняли участие 109 сотрудников аптек различных форм собственности.

Анкета состояла из двух частей. В первую вошли вопросы о специальности и должности, стаже работы, оценке частоты обращений за обезболивающими препаратами. Далее следовали вопросы о критериях, на которых базируются рекомендации аптечных работников по выбору обезболивающего средства, источниках информации о лекарствах. В конце анкеты всем респондентам предлагалось перечислить десять обезболивающих препаратов, которые они отпускают чаще всего. Вторая часть анкеты представляла собой тест, позволяющий оценить степень информированности специалистов о НПВП. Тест состоял из десяти вопросов с предоставленными вариантами ответа.

Обработка результатов анкетирования проводилась с помощью статистических методов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Среди опрошенных доля провизоров составила 49,5 %, фармацевтов – 50,5 %. Большинство респондентов (54,1 %) имели стаж работы до 5 лет.

Подавляющая часть провизоров и фармацевтов отметили, что обезболивающие препараты посетители спрашивают часто (38,5 %) или очень часто (60,6 %) и они занимают одно из первых мест (57,8 %) в товарообороте аптеки.

В основном фармацевтические работники рекомендуют тот или иной обезболивающий препарат на основании следующих критериев: эффективность (92,7 %), минимум побочных действий (69,7 %), длительность действия и скорость наступления эффекта (67,0 %), цена (53,2 %). При рекомендации ЛП провизоры и фармацевты отдают предпочтение оригинальным (87,2 %) и импортным (64,2 %) препаратам.

При анализе частоты обращений за обезболивающими препаратами выявлены пять самых популярных, по мнению аптечных работников: «Пенталгин» (отметили 76,1 % опрошенных), «Нурофен» (71,6 %), «Найз» (67,9 %), «Кеторол» (59,6 %) и «Темпалгин» (52,3 %).

В качестве источников информации о ЛП фармацевтические работники в первую очередь отметили медицинских представителей, специализированную медицинскую литературу и справочники (по 82,6 %), а также специализированные медицинские журналы (62,4 %). Кроме того, специалисты опираются на информацию, получен-

ную из рекламной продукции (56,9 %), Интернета (42,2 %) и средств массовой информации (26,6 %).

Второй блок анкеты был связан с оценкой знаний провизоров и фармацевтов о НПВП. В первом вопросе было предложено выбрать среди перечисленных препаратов те, которые относятся к исследуемой группе. Большинство опрошенных отметили основных представителей нестероидных противовоспалительных средств: «Ибупрофен», «Диклофенак», «Нимесулид», «Индометацин», «Мелоксикам», «Кеторолак» и др. Редко назначаемые ЛП, например холина салицилат («Отинум»), «Флурбипрофен» («Стрепфен»), «Бензидамин» («Тангум Верде») и «Фенилбутазон» отметили менее половины респондентов. Интересно, что метамизол натрия («Анальгин») как нестероидное противовоспалительное средство выбрали только 44,0 % опрошенных. Неверные ответы дали 35,8 % провизоров и фармацевтов.

Далее анкетироваемым необходимо было отметить ЛП из группы НПВП, отпускаемые без рецепта врача. Большинство опрошенных верно указали препараты безрецептурного отпуска. Но наряду с правильными ответами около половины (54,1 %) сотрудников аптек неверно отметили препараты рецептурного отпуска, например «Ибуклин», «Вольтарен», «Индометацин», «Найз» и «Кеторол».

Вопрос, касающийся механизма действия НПВП, показал, что подавляющее большинство провизоров и фармацевтов (86,2 %) осведомлены о том, что данная группа ЛП ингибирует фермент циклооксигеназу (ЦОГ). Вместе с тем только 58,7 % опрошенных указали, что НПВП угнетают синтез простагландинов. Неверные варианты ответа встречались редко: так, лишь 11,0 % считают, что НПВП снижают возбудимость центра терморегуляции и 9,2 % – ингибируют фермент фосфолипазу.

При выборе основных показаний к применению НПВП большинство опрошенных верно отметили такие варианты ответа, как «ревматические заболевания» – 96,3 %, «болевого синдром различной этиологии» – 95,4 %, «неревматические заболевания опорно-двигательного аппарата» – 76,1 %, «лихорадка» – 68,8 % и «дисменорея» – 55,0 %. При этом стоит отметить, что другие показания к приему препаратов данной группы, например неврологические заболевания, почечная и печеночная колика, отметили менее половины фармацевтических работников. Кроме того, 9,2 % респондентов указали такие неверные варианты ответа, как «подавление инфекции» и «лейкопения».

В следующем вопросе от сотрудников аптек требовалось выбрать основные отличия селективных ингибиторов ЦОГ-2 от неселективных ингибиторов ЦОГ. 77,1 % опрошенных верно указали снижение частоты гастроэнтерологи-

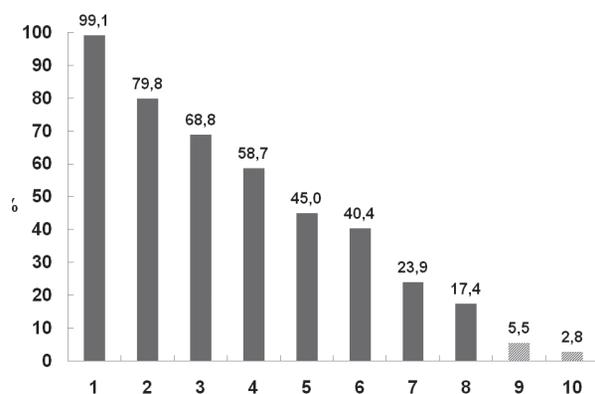
ческих побочных реакций. Важно отметить, что лишь 18,3 % провизоров и фармацевтов информированы о том, что селективные ингибиторы ЦОГ-2 повышают частоту развития побочных реакций со стороны сердечно-сосудистой системы и только четверть опрошенных (26,6 %) указали на отсутствие у них антиагрегантного эффекта. При этом более трети респондентов отметили наличие у селективных препаратов более выраженного обезболивающего и противовоспалительного эффекта (35,8 и 47,7 % соответственно) и менее выраженное гепато- и нефротоксическое действие (33,9 %), что неверно.

Установлено, что подавляющее большинство опрошенных (99,1 %) знают о наличии у НПВП гастроэнтерологических (диспепсия, язвы, кровотечения) нежелательных реакций. О гепатотоксичности и возможности развития гиперчувствительности, аллергии осведомлены 79,8 и 68,8 % соответственно. Около половины всех респондентов знают о гемато- (агранулоцитоз, анемия) (58,7 %) и нефротоксичности (45,0 %) НПВП, а также о возможности развития бронхоспазма (40,0 %). В ряде случаев провизоры и фармацевты отмечали неверные варианты ответа (см. рисунок).

Важно отметить, что 10,1 % опрошенных фармацевтических работников считают рациональной комбинацию нескольких нестероидных противовоспалительных средств, несмотря на то что подобное сочетание, как известно, не только не вызывает повышения терапевтического эффекта, но значительно усиливает побочные действия.

В конце опроса респондентам было предложено указать три ЛП из группы НПВП, которые, на их взгляд, обладают наиболее выраженным противовоспалительным, обезболивающим и антиагрегантным эффектом. На первое место по силе противовоспалительного эффекта около половины фармацевтических работников верно поставили «Индометацин» (57,8 %), «Диклофенак» (57,8 %), «Мелоксикам» (54,1 %) и «Нимесулид» (53,2 %), что соответствует опубликованным данным об экспериментальных исследованиях и клинических наблюдениях.

Выраженное обезболивающее действие провизоры и фармацевты верно отметили у «Кеторолака» (70,6 %) и метамизола натрия (51,4 %), но подобный по силе эффект у «Диклофенака» и «Индометацина» указали только 32,1 и 18,3 % опрошенных соответственно.



Информированность о побочных эффектах НПВП (результаты опроса в процентах; штриховкой выделены неверные варианты ответа). 1 – гастроэнтерологические (диспепсия, язвы, кровотечения), 2 – гепатотоксичность, 3 – гиперчувствительность, аллергия, 4 – гематотоксичность (агранулоцитоз, анемия), 5 – нефротоксичность (снижение фильтрации, интерстициальный нефрит), 6 – бронхоспазм, 7 – тератогенное действие, 8 – коагулопатия, 9 – дисбактериоз, 10 – нарушения обмена

Наличие антиагрегантного эффекта абсолютное большинство респондентов (85,3 %) верно отметили у ацетилсалициловой кислоты. Вместе с тем фармацевтические работники также отмечали выраженность данного вида действия у «Индометацина», метамизола натрия, «Нимесулида», «Диклофенака» и «Целекоксиба», хотя у последнего препарата – специфического ингибитора ЦОГ-2 – подобный эффект полностью отсутствует.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование показало, что в целом фармацевтические работники г. Петрозаводска профессионально подготовлены по вопросам эффективности и безопасности НПВП. Однако выявлены некоторые проблемы недостаточности знаний в области правил отпуска, отличий высокоселективных препаратов, а также возможных побочных эффектов нестероидных противовоспалительных средств.

Результаты позволяют сделать вывод о необходимости повышения уровня информированности провизоров и фармацевтов в области рационального применения НПВП. Полученные данные могут быть использованы для выработки соответствующих мер по улучшению эффективности использования препаратов данной группы.

* 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. Воронов Г. Г., Пищенко Ю. А. Проблема рационального использования лекарственных средств // Охрана материнства и детства. 2006. № 2 (8). С. 13–20.
2. Клиническая фармакология нестероидных противовоспалительных средств / Под ред. Ю. Д. Игнатова, В. Г. Кукуца, В. И. Мазурова. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. 256 с.
3. Лекарственные средства и их рациональное использование. Информационный бюллетень № 338. ВОЗ, май 2010 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs338/ru/index.html>
4. Уварова Ю. Рынок нестероидных противовоспалительных препаратов // Ремедиум. 2010. № 9. С. 17–20.

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

Loskutova E. E., Peoples' Friendship University of Russia (Moscow, Russian Federation)

Vinogradova I. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

HEALTH LITERACY ASSESSMENT OF PHARMACISTS ABOUT SAFETY AND EFFICIENCY OF NON-STEROID ANTI-INFLAMMATORY DRUGS

The aim of the research was to study and assess awareness of pharmaceutical specialists in Petrozavodsk about rational use of non-steroid anti-inflammatory drugs (NSAID). 109 participants completed anonymous questionnaires. Statistical processing of the results was performed. Criteria for recommendation pain controlling medications and sources of information were identified. To assess and study pharmacists' literacy on NSAID pharmacological properties a 10-question test was carried out. Results of the test showed that pharmaceutical specialists are well informed about rational use of non-steroid anti-inflammatory drugs. At the same time, the knowledge of pharmacists about what NSAID drugs are prescription or over-the-counter ones, their possible side effects, advantages, and disadvantages of selective cyclooxygenase-2 inhibitors was found to be insufficient. The results of this work can be used to develop special program to promote safe NSAID use.

Key words: non-steroidal anti-inflammatory drugs, pharmaceutical specialists, assessment of awareness, questionnaire

REFERENCES

1. Voronov G. G., Pishchenko Yu. A. Problem of Rational Use of Medicines [Problema ratsional'nogo ispol'zovaniya lekarstvennykh sredstv]. *Okhrana materinstva i detstva* [Protection of Motherhood and Childhood]. 2006. № 2 (8). P. 13–20.
2. *Klinicheskaya farmakologiya nesteroidnykh protivovospalitel'nykh sredstv* [Clinical Pharmacology of Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drugs]. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2010. 256 p.
3. World Health Organization. Medicines: rational use of medicines. Fact sheet no 338. 2010. Available at: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs338/en/index.html>
4. Uvarova Yu. Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drugs Market [Rynok nesteroidnykh protivovospalitel'nykh preparatov]. *Remedium* [Remedium]. 2010. № 9. P. 17–20.

Поступила в редакцию 23.05.2013

ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ МАРКЕЛОВ

доктор медицинских наук, доцент кафедры лучевой диагностики и лучевой терапии, онкологии, урологии и фтизиатрии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

markelov@psu.karelia.ru

МАРИЯ СЕРГЕЕВНА ДРАЧЕВА

врач-интерн, Республиканский противотуберкулезный диспансер (Петрозаводск, Российская Федерация)

markelov@psu.karelia.ru

ИРИНА АЛЕКСАНДРОВНА ДОРОДНАЯ

заведующий бактериологической лабораторией, Республиканский противотуберкулезный диспансер (Петрозаводск, Российская Федерация)

markelov@psu.karelia.ru

СПЕКТР ЛЕКАРСТВЕННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СРЕДИ МИКОБАКТЕРИЙ ТУБЕРКУЛЕЗА С МНОЖЕСТВЕННОЙ ЛЕКАРСТВЕННОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ*

Изучен спектр лекарственной устойчивости (ЛУ) к противотуберкулезным препаратам (ПТП) основного (I) и резервного (II) рядов среди 422 больных туберкулезом (ТБ), относящихся к различным категориям с множественной лекарственной устойчивостью (МЛУ). Частота вторичной широкой лекарственной устойчивости (ШЛУ) среди вторичной МЛУ составила 13,3%, что в 1,9 раза превышает приводимые литературные данные по РФ. Частота первичной тотальной ЛУ к ПТП I ряда среди новых случаев с МЛУ составила 48,5%. Приобретенная частота тотальной ЛУ к ПТП I ряда составляла от 53,8% среди категории «прервавшие курс химиотерапии (ХТ)» с последующим формированием МЛУ до 80% среди категории «прерванный курс ХТ с МЛУ», что подтверждает нецелесообразность использования эмпирического режима ИБ при подозрении на ТБ с МЛУ. Наиболее высокая частота и неблагоприятная структура ЛУ к ПТП резервного ряда отмечалась среди категорий «контингенты с МЛУ» и «прерванный курс ХТ с МЛУ», являющихся основным источником формирования случаев с ШЛУ (приобретенной ШЛУ-ТБ). Полученные данные требуют внедрения новых организационных форм лечения больных с МЛУ с целью улучшения приверженности к лечению и диктуют необходимость внедрения молекулярно-генетических методов, обеспечивающих быстрое определение ЛУ к ПТП основного и резервного рядов с назначением адекватной химиотерапии.

Ключевые слова: туберкулез с множественной лекарственной устойчивостью, категории больных с множественной лекарственной устойчивостью, спектр лекарственной устойчивости

Одной из наиболее актуальных проблем современной фтизиатрии является предупреждение распространения лекарственно устойчивого туберкулеза. Наряду с распространением ТБ с множественной лекарственной устойчивостью в последние годы появились случаи с наиболее неблагоприятной структурой ЛУ – широкой лекарственной устойчивостью – сочетанной устойчивостью к изониазиду (H), рифампицину (R), и ПТП II ряда: фторхинолону и канамицину и/или амикацину и/или капреомицину. ШЛУ-ТБ формируется в результате неадекватной химиотерапии противотуберкулезными препаратами резервного ряда больных с МЛУ-ТБ как на этапе назначения им эмпирической ХТ, так и в результате перерывов и «отрывов» от лечения, в связи с чем важно изучение спектра лекарственной устойчивости среди различных категорий больных с МЛУ-ТБ. По данным ВОЗ [13], в 2010 году уже 58 стран мира отметили ШЛУ-ТБ, который

составляет, по расчетным данным, 5,4% от всех случаев МЛУ-ТБ в мире. По данным Центрального научно-исследовательского института туберкулеза Российской академии медицинских наук (ЦНИИТ РАМН), ШЛУ-ТБ составляет 3% от впервые выявленных случаев ТБ с МЛУ и 7% среди больных с МЛУ-ТБ, ранее получавших лечение [14]. Анализ причин распространения ТБ с МЛУ на территории Республики Карелия (РК), проведенный ранее, показал [4], что основным путем распространения явился эпидемический. Этому способствовала высокая ассоциированность на территории РК штаммов микобактерий туберкулеза (МБТ) с МЛУ с генотипом Beijing (более 90%) [6], обладающих повышенной контагиозностью и вирулентностью [1], [2], [3], [7], [9], [10], [11], [12], поздняя диагностика открытых форм ТБ, частые уклонения от лечения (отрывы от лечения) больных ТБ, длительное определение ЛУ и как следствие – развитие амплифика-

ции ЛУ в условиях неадекватной ХТ эмпирическими режимами, а также внутрибольничная передача штаммов МБТ с МЛУ другим пациентам во время длительного пребывания в стационаре [4]. Одной из причин быстрого распространения приобретенной МЛУ на территории РК явилось широкое использование эмпирического режима ПА для лечения рецидивов ТБ и случаев неудачи лечения по I режиму в условиях высокой распространенности полирезистентности и ЛУ к стрептомицину (S) среди данных категорий больных [5]. Учитывая, что ПТП резервного (II) ряда обладают меньшей активностью, чем ПТП основного ряда, имеют больше побочных эффектов и хуже переносятся больными, а отрывы от лечения больных с МЛУ-ТБ на фоне длительного курса лечения отмечаются значительно чаще [4], вышеуказанные факторы способствуют быстрому распространению ШЛУ-ТБ.

Нами проанализирована частота распространения ЛУ к ПТП основного ряда (S – стрептомицину, H – изониазиду, R – рифампицину, E – этамбутолу) и резервного ряда (K – канамицину, Pt – противомиаиду, OfI – офлоксацину, Cm – капреомицину, Cs – циклосерину, Am – амикацину, PASK) в течение 2008–2011 годов среди 422 больных ТБ с МЛУ, относящихся к различным категориям. Категории больных с МЛУ были выделены согласно [8]: «МЛУ из новых случаев» (больные, у которых впервые выявлен ТБ, ранее не получавшие лечение по поводу ТБ) (198 случаев); «рецидивы больных с МЛУ» (больные с рецидивом ТБ, у которых ранее был зарегистрирован эффективный исход курса ХТ по поводу МЛУ) (47 случаев); «прерванный курс ХТ» (больные, зарегистрированные как прервавшие курс ХТ, у которых в процессе ХТ выявлена МЛУ) (26 случаев); «прерванный курс ХТ с МЛУ» (больные с МЛУ, получавшие ХТ препаратами резервного ряда, прервавшие курс ХТ) (59 случаев); «неэффективный курс ХТ» (больные, получавшие ХТ ПТП основного ряда, перерегистрированные как «неэффективный курс ХТ», у них в процессе ХТ выявлена МЛУ) (37 случаев); «контингенты с МЛУ» (больные, получившие более 2 курсов ХТ с неэффективным лечением,

у больных выявлена МЛУ) (55 случаев). Лекарственная устойчивость к препаратам основного (I) и резервного (II) рядов определялась на плотных средах методом абсолютных концентраций и на жидких средах (ВАСТЕС–MGIT – 960).

Анализ лекарственной устойчивости к резервным ПТП среди штаммов МБТ, полученных от больных с МЛУ в 2011 году, выявил 35 случаев с ШЛУ, в том числе 4 с первичной ШЛУ. Анализ частоты ШЛУ среди случаев с МЛУ-ТБ, ранее получавших лечение, показал, что частота приобретенной ШЛУ (13,3%) в 1,9 раза превышала аналогичные данные, приведенные в [14] (табл. 1).

Таблица 1

Динамика множественной и широкой лекарственной устойчивости среди штаммов микобактерий туберкулеза, выделенных среди «новых случаев» и «ранее леченных» больных ТБ на территории Карелии (2008–2011 годы)

| Год | МЛУ среди «новых случаев» ТБ | В том числе с ШЛУ | МЛУ среди ранее леченных | В том числе с ШЛУ |
|-------------------------------|------------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|
| 2008 | 61 | 1 | 215 | 20 |
| 2009 | 59 | – | 191 | 22 |
| 2010 | 54 | 2 | 186 | 32 |
| 2011 | 56 | 4 | 201 | 31 |
| Мср (и уд. вес МЛУ среди ШЛУ) | 57,5 | 1,8 (3,0%) | 198,3 | 26,3 (13,3%) |

Анализ частоты ЛУ к ПТП основного ряда и канамицину среди категории «МЛУ из новых случаев ТБ» показал, что частота первичной тотальной ЛУ ко всем препаратам основного ряда в 2008–2009 годах среди данной категории колебалась от 45 до 60,7% (табл. 2). В среднем за 4 года среди новых случаев с МЛУ первичная тотальная ЛУ к ПТП основного ряда составила 48,5%. В связи с тем что число больных из других категорий с МЛУ в течение 2008–2011 годов было незначительным, мы объединили другие категории с МЛУ, зарегистрированные за 4 года, в одну таблицу (табл. 3). Как видно из табл. 3, анализ частоты приобретенной тотальной ЛУ к ПТП основного ряда и K колебался от 53,8%

Таблица 2

Структура первичной лекарственной устойчивости к противотуберкулезным препаратам основного ряда среди новых случаев больных с МЛУ (2008–2011 годы)

| Год | Кол-во МЛУ (абс.) | HRE | | SHR | | SHRE | | SHREK | | Сочетание SHRE + SHREK | |
|-----------------|-------------------|------|-----|------|------|------|------|-------|-----|------------------------|------|
| | | абс. | % | абс. | % | абс. | % | абс. | % | абс. | % |
| 2008 | 43 | 1 | 2,3 | 10 | 23,3 | 19 | 44,2 | 3 | 7,0 | 23 | 60,5 |
| 2009 | 48 | 2 | 4,2 | 14 | 29,2 | 23 | 47,9 | 1 | 2,1 | 24 | 58,3 |
| 2010 | 51 | 3 | 5,9 | 18 | 35,3 | 17 | 33,3 | 2 | 3,9 | 19 | 45,1 |
| 2011 | 56 | – | – | 15 | 26,8 | 27 | 48,2 | 3 | 5,3 | 30 | 60,7 |
| Всего за 4 года | 198 | 3 | 1,5 | 57 | 28,8 | 86 | 43,4 | 9 | 4,5 | 96 | 48,5 |

Примечание. Достоверность различий частоты ЛУ к 3 ПТП (30,3%) и тотальной ЛУ 48,5% (по Фишеру) < 0,05.

Таблица 3

Частота приобретенной тотальной ЛУ к ПТП I ряда и канамицину (SHRE + SHREK) среди различных категорий больных с МЛУ (2008–2011 годы)

| Категория больных | Рецидивы | Неэффективный курс ХТ | Контингенты «хроники» с МЛУ | Прерванный курс ХТ | Прерванный курс ХТ с МЛУ |
|---|----------|-----------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------------|
| Всего за 4 года с МЛУ (абс.) | 47 | 37 | 55 | 26 | 59 |
| Сочетание SHRE + SHREK (абс.) | 31 | 22 | 41 | 14 | 47 |
| Уд. вес среди данной категории (%) | 65 | 59,5 | 74,5 | 53,8 | 80 |
| Достоверность различий между «Прерванный курс ХТ с МЛУ» (по Фишеру) | P > 0,05 | P < 0,05 | P > 0,05 | P < 0,05 | – |

среди категории «прервавшие курс ХТ» с последующим формированием МЛУ до 80% среди категории «прерванный курс ХТ с МЛУ». Высокий удельный вес тотальной ЛУ к ПТП I ряда среди больных с МЛУ свидетельствует об опасности развития амплификации на фоне лечения эмпирическими режимами (I и IIА) и необходимости внедрения молекулярно-генетических методов для быстрого определения ЛУ. Полученные данные также подтверждают целесообразность использования препаратов основного ряда в составе эмпирического режима ПБ при подозрении на ТБ с МЛУ – как среди новых случаев, так и при подозрении МЛУ среди других категорий больных.

Анализ частоты ЛУ к ПТП II ряда среди категории «МЛУ из новых случаев» представлен в табл. 4. Как видно из табл. 4, наиболее часто встречалась ЛУ к К (8,3–23,2%) и Pt (7,1–18,6%). Следует отметить достоверное (P < 0,05) нарастание частоты ЛУ к Cm и снижение к К, что связано с широким использованием Cm вместо К при лечении больных с МЛУ в 2009–2010 годах на территории РК. Анализ частоты ЛУ к ПТП резервного ряда среди других категорий больных с МЛУ (табл. 5) показал, что наиболее часто встречалась ЛУ к К (от 14,6% случаев среди «МЛУ из новых случаев» до 36,3% среди «контингентов с МЛУ») и «Pt» (от 12,1% среди «МЛУ из новых случаев» до 30,9% среди «контингентов с МЛУ»), что связано с частым использованием данных препаратов при проведении предыдущих курсов ХТ для лечения случаев ТБ с МЛУ. Наиболее высокая частота и неблагоприятная структура ЛУ к ПТП резерв-

ного ряда отмечались среди категорий «контингенты с МЛУ» и «прерванный курс ХТ с МЛУ» (табл. 5). Среди категорий «прерванный курс ХТ с МЛУ» в 15,3% случаев отмечалось сочетание ЛУ к фторхинолонам OfI и Cm, что свидетельствовало о наличии ШЛУ.

ВЫВОДЫ

Значительный удельный вес приобретенной ШЛУ среди случаев с МЛУ-ТБ, ранее получавших лечение (13,3%), на территории РК свидетельствует о серьезных дефектах в организации контролируемой ХТ больных с МЛУ-ТБ и требует внедрения новых организационных форм лечения, в том числе с включением мер социальной поддержки, направленных на снижение отрывов от лечения, а также диктует необходимость внедрения молекулярно-генетических методов для быстрого определения ЛУ к ПТП основного и резервного рядов и последующей коррекции ХТ.

В среднем за последние 4 года частота тотальной лекарственной устойчивости к ПТП I ряда составила от 56% среди категории «МЛУ из новых случаев» до 80% среди категории «прерванный курс ХТ с МЛУ», что является основанием для отказа от использования противотуберкулезных препаратов основного ряда при лечении данных категорий больных (режим ПБ) и свидетельствует о необходимости внедрения молекулярно-генетических методов, обеспечивающих быстрое определение лекарственной устойчивости.

Частота ЛУ к канамицину среди категории «МЛУ из новых случаев» невысока, колеблется от 8,3 до 23,2%, причем отмечено ее достовер-

Таблица 4

Частота ЛУ к ПТП II ряда среди новых случаев с МЛУ (2008–2011 годы)

| Год | Всего новых случаев с МЛУ (абс.) | К | | Pt | | OfI | | Cm | |
|--|----------------------------------|----------|------|----------|------|----------|-----|----------|------|
| | | абс. | % | абс. | % | абс. | % | абс. | % |
| 2008 | 43 | 10 | 23,2 | 8 | 18,6 | 2 | 4,6 | 1 | 2,3 |
| 2009 | 48 | 4 | 8,3 | 6 | 12,5 | 1 | 2,1 | – | – |
| 2010 | 51 | 7 | 13,7 | 4 | 7,8 | 2 | 3,9 | 3 | 5,9 |
| 2011 | 56 | 8 | 14,3 | 4 | 7,1 | 2 | 3,6 | 6 | 10,7 |
| Достоверность различий (2008 и 2011) (по Фишеру) | – | P < 0,05 | | P < 0,05 | | P > 0,05 | | P < 0,05 | |

Таблица 5

Частота ЛУ к ПТП резервного ряда среди различных категорий больных с МЛУ
(2008–2011 годы)

| Категория больных | Кол-во больных | K (%) | Pt (%) | Ofi (%) | Cm (%) | Cs (%) | Am (%) | PASK (%) |
|--------------------------------------|----------------|----------|----------|----------|----------|--------|--------|----------|
| Новые случаи | 198 | 14,6 | 12,1 | 3,5 | 5 | – | – | – |
| Рецидивы | 47 | 17 | 17 | 4,3 | 14,9 | – | – | – |
| Достоверность различий по Фишеру (P) | | P > 0,05 | P > 0,05 | P > 0,05 | P < 0,05 | | | |
| НЭКХТ | 37 | 32,4 | 10,8 | – | 2,7 | 2,7 | – | – |
| Достоверность различий по Фишеру (P) | | P < 0,05 | P > 0,05 | – | P > 0,05 | | | |
| Контингенты | 55 | 36,3 | 30,9 | 5,5 | 9,1 | 7,3 | – | 7,3 |
| Достоверность различий по Фишеру (P) | | P < 0,05 | P < 0,05 | P > 0,05 | P < 0,05 | | | |
| Прерванный курс ХТ с МЛУ | 59 | 35,6 | 25,4 | 15,3 | 15,3 | – | 6,8 | – |
| Достоверность различий по Фишеру (P) | | P < 0,05 | P < 0,05 | P < 0,05 | P < 0,05 | | | |
| Прерванный курс ХТ | 26 | 15,4 | 19,2 | 7,7 | 7,7 | – | – | – |
| Достоверность различий по Фишеру (P) | | P > 0,05 | P < 0,05 | P > 0,05 | P < 0,05 | | | |

Примечание. Достоверность различий по Фишеру (P) рассчитана между частотой ЛУ среди новых случаев и других категорий.

ное снижение (до 8,3 % в 2011 году), что позволяет использовать канамицин в программе химиотерапии для лечения данной категории больных вместо капреомицина (до получения данных о лекарственной устойчивости) и существенно сократить расходы на проведение ХТ данной категории.

При выборе эмпирических режимов ХТ малоэффективным будет считаться применение канамицина у следующих категорий больных: «неэффективный курс ХТ» (ЛУ к канамицину в 32,4 % случаев), «прерванный курс ХТ с МЛУ» (ЛУ к канамицину в 35,6 %), «контингенты» (ЛУ к канамицину в 36,4 %), в программу ХТ

этих категорий необходимо с самого начала включать капреомицин.

Наиболее высокая частота к противотуберкулезным препаратам резервного ряда отмечена среди категорий «контингенты с МЛУ», «прерванный курс химиотерапии с МЛУ» (ЛУ к канамицину в 35,6–36,4 % случаев; ЛУ к протионамиду в 25,4–30,9 % случаев) и «сочетанная ЛУ к фторхинолонам» (5,5–15,3 %). Данные категории являются основным источником формирования случаев с широкой лекарственной устойчивостью, они и требуют особого внимания при отборе на лечение и контроля при проведении ХТ препаратами резервного ряда.

* 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. Андреевская С. Н. и др. Изучение *ex vivo* роста в макрофагах штаммов *Mycobacterium tuberculosis* разных генотипических кластеров // Проблемы туберкулеза и болезней легких. 2006. № 12. С. 43–48.
2. Вишневский Б. И., Нарвская О. В., Васильева С. Н., Сапожникова Н. В., Мокроусов И. В., Оттен Т. Ф. Вирулентность микобактерий туберкулеза // Проблемы туберкулеза. 2002. № 10. С. 33–36.
3. Маничева О. А., Ласунская Е. Б., Журавлев В. Ю. Лекарственная чувствительность *Mycobacterium tuberculosis* в сопоставлении с их жизнеспособностью, цитотоксичностью, генотипом и течением процесса у больных туберкулезом органов дыхания // Проблемы туберкулеза и болезней легких. 2008. № 12. С. 18–22.
4. Маркелов Ю. М. Клинико-эпидемиологические особенности туберкулеза с множественной лекарственной устойчивостью и причины его распространения в Карелии // Туберкулез и болезни легких. 2011. № 8. С. 11–17.
5. Маркелов Ю. М., Дородная И. А. Лекарственно-устойчивый туберкулез в Карелии (2000–2005 гг.) // Проблемы туберкулеза и болезней легких. 2007. № 8. С. 8–10.
6. Маркелов Ю. М., Нарвская О. В. Циркуляция штаммов возбудителя с множественной лекарственной устойчивостью на территории Республики Карелия // Туберкулез и болезни легких. М., 2010. № 2. С. 54–56.
7. Нарвская О. В. Геномный полиморфизм *Mycobacterium tuberculosis* и его значение в эпидемическом процессе: Автореф. дис. ... д-ра мед. наук. СПб., 2003. 35 с.
8. Руководство по программному ведению лекарственно-устойчивого туберкулеза // ВОЗ. 2007. С. 208.
9. Скворцова Л. А., Павлова М. В., Сапожникова Н. В. Туберкулез сегодня: способность возбудителя, клиника и лечение // Проблемы туберкулеза и болезней легких. 2005. № 11. С. 6–9.
10. Тунгусова О. С. Бактериология и молекулярная генетика микобактерий туберкулеза. Архангельск: Изд. центр СГМУ, 2003. 102 с.

11. Тунгусова О. С., Марьяндышев А. О., Каугант Д. А. и др. Влияние лекарственной устойчивости на фитнес микобактерий туберкулеза генотипа W – Beijing // Проблемы туберкулеза и болезни легких. 2005. № 11. С. 46–50.
12. Glynn J., Whitley J., Bifani P. et al. Worldwide occurrence of Beijing/W strains of *Mycobacterium tuberculosis*: a systematic review // *Emerg. Infect. Dis.* 2002. Vol. 8. P. 843–849.
13. Multidrug and extensively drug-resistant TB (M/XDR-TB): 2010 (WHO) global report on surveillance and response. P. 58.
14. Punga V. V., Jakubowiak W. M., Danilova I. D., Somova T. R., Volchenkov G. V., Kazionny B. Y., Nemtsova T. S., Kiryanova E. V., Kourbatova E. V. Prevalence of extensively drug-resistant tuberculosis in Vladimir and Orel regions, Russia // *Int. J. Tuberc. Lung Dis.* 2009. № 13. P. 1309–1312.

Markelov Yu. M., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Dracheva M. S., TB dispensary (Petrozavodsk, Russian Federation)
Dorodnaya I. A., TB dispensary (Petrozavodsk, Russian Federation)

DRUG RESISTANCE SPECTRUM OF TUBERCULOSIS MYCOBACTERIA WITH MULTIPLE DRUG RESISTANCE

The spectrum of drug resistance (DR) to anti-TB drugs of primary (I) and alternative (II) group was studied in 422 patients suffering from tuberculosis (TB). The patients belong to different categories characterized by multi-drug resistance (MDR). The frequency of secondary drug-resistant patients (XDR) among secondary MDR was 13,3 %, which is 1,9 times higher than reflected in published data cited in the Russian Federation. The frequency of primary total DR to anti-TB drugs of the I series in new cases of MDR was 48,5 %. The acquired total frequency for DR to anti-TB drugs of the I series ranged from 53,8 %, in the category of “Abort rate XT”, followed by subsequent development of MDR, and amounted to 80 % in the category of “Interrupted course of chemotherapy with MDR”. The highest frequency and most unfavorable structure of DR to the second group of anti-TB drugs were revealed in the following categories: “Contingents MDR” and “Interrupted course of chemotherapy with MDR”. These categories are the main source of drug-resistant (XDR) (acquired XDR) cases. The obtained data speak of the need to introduce new organizational forms of treatment for patients with MD. Introduction of molecular genetic methods will help to identify DR to primary and alternative drugs rapidly and administer proper chemotherapy.

Key words: multiple drug-resistant TB, drug resistance to anti-TB drugs of the I and II line

REFERENCES

1. Andreevskaya S. N. et al. The study of ex vivo growth in macrophages of different strains of mycobacterium tuberculosis genotype clusters. Problems of Tuberculosis and Lung Disease [Izucheniye ex vivo rosta v makrofagakh shtammov mycobacterium tuberculosis raznykh genotipicheskikh klasterov]. *Problemy tuberkuleza*. 2006. № 12. P. 43–48.
2. Vishnevskiy B. I., Narvskaya O. V., Vasil'yev S. N., Sapozhnikov N. V., Mokrousov I. V., Otten T. F. Virulence of *Mycobacterium tuberculosis* Probl. tubes [Virulentnost' mikobakteriy tuberkuleza]. *Problemy tuberkuleza i bolezney legkikh* [Problems of tuberculosis and lung disease]. 2002. № 10. P. 33–36.
3. Manicheva O. A. Mycobacterium tuberculosis drug sensitivity in relation to their viability, cytotoxicity, genotype and the course of the process in patients with pulmonary tuberculosis [Lekarstvennaya chuvstvitel'nost' mycobacterium tuberculosis v sopostavlenii s ikh zhiznesposobnost'yu, tsitotoksichnost'yu, genotipom i techeniyem protsessa u bol'nykh tuberkulezom organov dykhaniya]. *Problemy tuberkuleza i bolezney legkikh* [Problems of tuberculosis and lung disease]. 2008. № 12. P. 18–22.
4. Markelov Yu. M. Drug-resistant tuberculosis in the Republic of Karelia (2000 to 2005) [Lekarstvenno-ustoychivyy tuberkulez v Karelii (2000–2005 gg.)]. *Problemy tuberkuleza i bolezney legkikh* [Problems of tuberculosis and lung disease]. 2007. № 8. P. 8–10.
5. Markelov Yu. M., Narvskaya O. V. The circulation of multi-drug resistant strains in the Republic of Karelia. Tuberculosis and Lung Disease [Tsirkulyatsiya shtammov vzbuditelya s mnozhestvennoy lekarstvennoy ustoychivost'yu na territorii Respubliki Kareliya]. *Problemy tuberkuleza i bolezney legkikh*. 2010. № 2. P. 54–57.
6. Markelov Yu. M. Clinical and epidemiological characteristics of multidrug resistance and the reasons for its spread in Karelia. Tuberculosis and Lung Disease [Kliniko-epidemiologicheskiye osobennosti tuberkuleza s mnozhestvennoy lekarstvennoy ustoychivost'yu i prichiny ego rasprostraneniya v Karelii]. *Problemy Tuberkuleza*. 2011. № 8. P. 11–17.
7. Narvskaya O. V. *Genomnyy polimorfizm mycobacterium tuberculosis i ego znachenije v epidemicheskom protsesse. Avtoref. dis. dokt. med. nauk* [Mycobacterium tuberculosis genome polymorphism and its importance in the epidemic process. Dr med. sci. diss.]. St. Petersburg, 2003. 35 p.
8. Guidelines for programmed management of drug-resistant tuberculosis [Rukovodstvo po programmnomu vedeniyu lekarstvenno-ustoychivogo tuberkuleza]. *VOZ*. 2007. P. 208.
9. Skvortsova L. A., Pavlova M. V., Sapozhnikov N. V. etc. Tuberculosis today: the ability of the pathogen, clinic and treatment [Tuberkulez segodnya: sposobnost' vzbuditelya, klinika i lecheniye]. *Problemy tuberkuleza i bolezney legkikh* [Problems of tuberculosis and lung disease]. 2005. № 11. P. 6–9.
10. Tungusova O. S. *Bakteriologiya i molekulyarnaya genetika mikobakteriy tuberkuleza* [Bacteriology and molecular genetics of mycobacteria]. Arkhangelsk, Izd. Tsentr SGMU, 2003. 102 p.
11. Tungusova O. S., Mar'yandyshhev A. O., Kaugant D. A. etc. The influence of drug resistance on the fitness of *Mycobacterium tuberculosis* genotype W – Beijing. Problems of Tuberculosis and Lung Disease [Vliyaniye lekarstvennoy ustoychivosti na fitness mikobakteriy tuberkuleza genotipa W – Beijing]. *Problemy tuberkuleza i bolezni legkikh* [Problems of tuberculosis and lung disease]. 2005. № 11. P. 46–50.
12. Glynn J., Whitley J., Bifani P. et al. Worldwide occurrence of Beijing/W strains of *Mycobacterium tuberculosis*: a systematic review // *Emerg. Infect. Dis.* 2002. Vol. 8. P. 843–849.
13. Multidrug and extensively drug-resistant TB (M/XDR-TB): 2010 (WHO) global report on surveillance and response. P. 58.
14. Punga V. V., Jakubowiak W. M., Danilova I. D., Somova T. R., Volchenkov G. V., Kazionny B. Y., Nemtsova T. S., Kiryanova E. V., Kourbatova E. V. Prevalence of extensively drug-resistant tuberculosis in Vladimir and Orel regions, Russia // *Int. J. Tuberc. Lung Dis.* 2009. № 13. P. 1309–1312.

Поступила в редакцию 05.02.2012

АНТОНИНА ВАСИЛЬЕВНА ДМИТРИЕВА
аспирант, Институт геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
dmitrieva-v@yandex.ru

ГЕОХИМИЯ И РУДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ СЯРГОЗЕРСКОГО УМЕРЕННОЩЕЛОЧНОГО КОМПЛЕКСА (Центральная Карелия)

Приводятся результаты минералого-геохимического изучения пород сяргозерского умереннощелочного комплекса, расположенного в Центральной Карелии в пределах Ондозерско-Сегозерской площади и включающего пироксениты, габбро, монцодиориты и сиениты. Породы обогащены щелочами, Р, Ti, Ba, Sr, а также легкими редкоземельными элементами (LREE). К первой фазе относятся пироксениты и габбро, к более поздней – монцодиориты и сиениты. Внедрение монцодиоритов и сиенитов сопровождается образованием щелочных метасоматитов. Рудная минерализация в пироксенитах, габбро и метасоматитах по ним представлена магнетитом, ильменитом, титанитом и апатитом, встречаются минералы, содержащие элементы Pt-группы (кейтконнит, мончеит). Внедрение более поздних жил альбититов сопровождается эпидотизацией пород, накладывающейся на все дифференциаты комплекса, и появлением сульфидов (пирит, халькопирит, борнит). С борнитом ассоциирует электрум (Ag до 35,28 %), реже встречаются цумоит, самородные серебро, теллур и висмут. Минералами – концентраторами LREE являются титанит, эпидот, Се-эпидот, ортит и более поздние карбонаты.

Ключевые слова: умереннощелочной комплекс, пироксенит, монцодиорит, сиенит, альбитит, рудные минералы, редкоземельные элементы

ВВЕДЕНИЕ

Умереннощелочные высоко-Mg неархейские массивы (санукитоиды) внедрялись на заключительных этапах развития зеленокаменных поясов в режиме трансенсии, то есть в условиях растяжения земной коры при сдвиговых деформациях. Возраст интрузивов западной зоны санукитоидов оценивается в 2700–2720 млн лет, восточной – 2730–2745 млн лет [7]. В ореолах подобных интрузивов в Канаде [5], [6], [9] и в других архейских гранит-зеленокаменных областях известны многочисленные, в том числе крупнейшие, месторождения.

В Центральной Карелии массивы Сяргозерский и Шаравалампи образуют сяргозерский умереннощелочной комплекс, который первоначально был выделен как габбро-монцонит-сиенит-гранитовый [3]. Возраст секущих даек лампрофиров был определен как 2742 ± 14 млн лет [4]. Умереннощелочные интрузивы приурочены к субмеридиональным сдвиговым зонам (шир-зонам), связанным с позднеколлизийным этапом, завершавшим архейское развитие Карельского кратона. По шир-зонам в пределах Ондозерско-Сегозерской площади внедрились дифференцированные от пироксенитов до сиенитов массивы, идентифицированные по геохимическим и по ряду других признаков как санукитоиды [1], [7]. Среди подобных плутонов наиболее изучен Панозерский, сложенный многофазным интрузивным комплексом и дайками лампрофиров [1], [7].

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ КОМПЛЕКСА И ВЗАИМООТНОШЕНИЯ ПОРОД

Дифференцированные умереннощелочные интрузивы Сегозерско-Ондозерской площади прорывают неархейские зеленокаменные толщи, сложенные амфиболитами, хлоритовыми и черными филлитовыми сланцами севернее оз. Сегозера, конгломератами и железистыми кварцитами в западной части (район р. Воломы), а также гранодиориты обрамления.

Интрузивы формируют узкие вытянутые многофазные тела (рис. 1). Первая фаза комплекса представлена габбро-пироксенитами, вторая – монцодиоритами и сиенитами. На участке Шаравалампи амфиболитизированные пироксениты приурочены к северной части массива. В монцодиоритах, развитых в восточной части участка, также встречаются ксенолиты пироксенитов и габбро.

Восточнее оз. Сяргозера установлены порфировидные сиениты, представленные гигантозернистыми лейкократовыми разностями с крупными (до 5 см длиной) кристаллами анортклаза. Вблизи оз. Торосозера они сменяются среднезернистыми массивными сиенитами красного цвета. Гранодиориты, развитые в восточнее участка Шаравалампи и включенные ранее в сяргозерский комплекс [3], нами отнесены к более ранним магматическим образованиям. Они имеют отклонения по химическому составу от общего тренда пород сяргозерского комплекса, сильно изменены, в них отмечаются наложенные амфибола, эпидота и титанита.

При внедрении более поздних дифференциатов происходит амфиболизация пироксенитов и габбро, их флогопитизация (или биотитизация) и калишпатизации, выделяются титанит и апатит. Этот высокотемпературный раннещелочной метасоматоз, по-видимому, можно рассматривать как фенитизацию пироксенитов и габбро [2]. К системе северо-восточных разрывных нарушений приурочены более поздние жилы альбититов мощностью 15–20 см, которые секут монцодиориты и включенные в них ксенолиты пироксенитов. С альбититами связана более поздняя эпидотизация, которая накладывается на все дифференциаты сяргозерского комплекса.

ПЕТРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОМПЛЕКСА

Сяргозерский умереннощелочной комплекс дифференцирован по составу (см. таблицу), содержание кремнезема варьирует от 43,5 % в пироксенитах до 63,5 % в сиенитах. Щелочность возрастает от 1,7 до 11,4 %. Во всем интервале содержаний SiO_2 фиксируются повышенные значения MgO : в породах 1-й фазы – 8–11 %, 2-й фазы – 1,3–2,5 %.

С увеличением содержания кремнезема линейно уменьшается содержание TiO_2 , FeO^* , MgO , CaO , P_2O_5 , и на диаграммах Харкера (рис. 2) породы комплекса формируют единые эволюционные тренды изменения составов, что подтверждает их генетическую связь и фракционный характер кристаллизации. Некоторые отклонения составов от линейных трендов могут быть

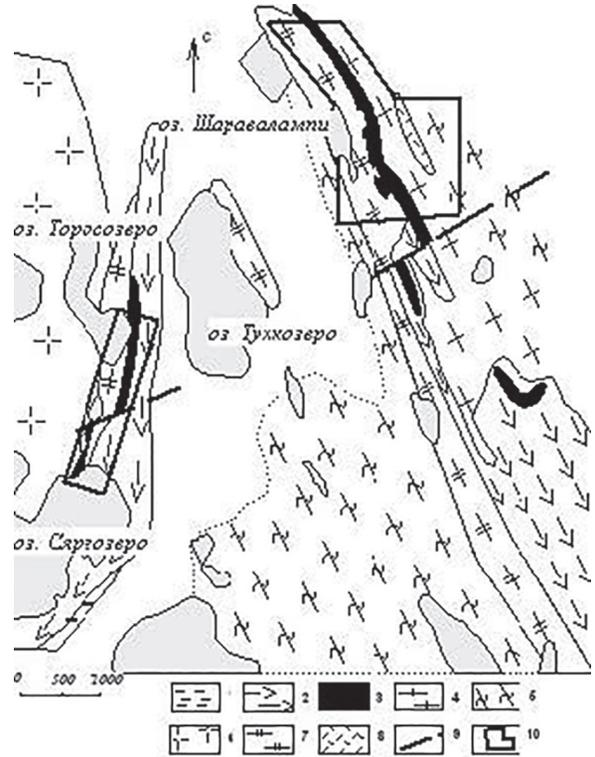


Рис. 1. Схема геологического строения Сяргозерской площади [3]:

1 – черные сланцы, 2 – амфиболиты по базальтам, 3 – амфиболиты по пироксенитам, 4 – монзониты – кварцевые монцодиориты, 5–6 – гранодиориты-плаггиограниты огнейсованные (5) и массивные (6), 7 – кварцевые сиениты, 8 – субщелочные аплитовидные лейкограниты, 9 – тектонические нарушения, 10 – детальные участки работ (1 – Шаравалампи, 2 – Торосозеро, 3 – д. Сяргозеро)

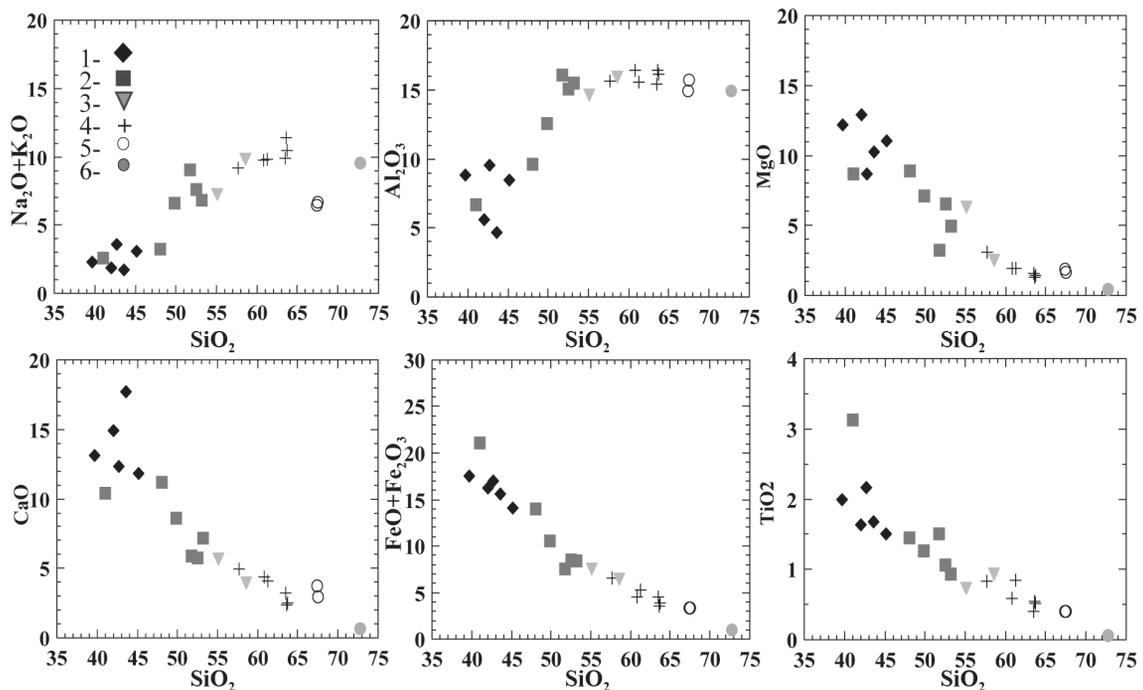


Рис. 2. Диаграммы Харкера для пород сяргозерского комплекса (1–4): 1 – пироксениты, 2 – габбро, 3 – монцодиориты, 4 – сиениты; 5 – вмещающие гранодиориты, 6 – альбититы

Состав пород умереннощелочного сяргозерского комплекса

| Комп. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|--------------------------------|--------|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| SiO ₂ | 67,52 | 58,54 | 45,1 | 72,77 | 43,54 | 53,16 | 52,54 | 51,78 | 63,62 | 63,68 | 41,06 |
| TiO ₂ | 0,4 | 0,93 | 1,5 | 0,06 | 1,68 | 0,93 | 1,06 | 1,51 | 0,54 | 0,52 | 3,12 |
| Al ₂ O ₃ | 15,71 | 15,89 | 8,49 | 14,89 | 4,66 | 15,47 | 15,04 | 16,05 | 16,4 | 16,15 | 6,67 |
| Fe ₂ O ₃ | 1,51 | 3,93 | 6,02 | 0,56 | 7,7 | 4,18 | 3,32 | 2,93 | 2,04 | 2,05 | 10,87 |
| FeO | 1,8 | 2,58 | 8,11 | 0,43 | 7,9 | 4,24 | 5,17 | 4,6 | 1,51 | 1,87 | 10,23 |
| MnO | 0,041 | 0,115 | 0,327 | 0,031 | 0,334 | 0,148 | 0,152 | 0,12 | 0,074 | 0,066 | 0,386 |
| MgO | 1,64 | 2,54 | 11,04 | 0,45 | 10,23 | 4,95 | 6,53 | 3,27 | 1,31 | 1,42 | 8,69 |
| CaO | 2,97 | 3,98 | 11,8 | 0,67 | 17,67 | 7,21 | 5,75 | 5,86 | 2,39 | 2,53 | 10,43 |
| Na ₂ O | 4,61 | 5,72 | 4,59 | 7,43 | 1,0 | 5,5 | 5,0 | 6,31 | 6,67 | 6,96 | 1,3 |
| K ₂ O | 2,08 | 4,1 | 1,5 | 2,14 | 0,7 | 1,3 | 2,58 | 2,71 | 4,72 | 3,5 | 1,32 |
| H ₂ O | 0,21 | 0,01 | 0,36 | 0,04 | 0,17 | 0,21 | 0,11 | 0,06 | 0,05 | 0,15 | 0,23 |
| Ппп | 1,31 | 0,79 | 2,67 | 0,47 | 2,01 | 1,54 | 1,7 | 3,81 | 0,34 | 0,81 | 4,81 |
| P ₂ O ₅ | 0,19 | 0,59 | 1,0 | 0,05 | 2,16 | 0,67 | 0,8 | 0,73 | 0,32 | 0,29 | 0,39 |
| Σalc | 6,69 | 9,82 | 3,09 | 9,57 | 1,7 | 6,8 | 7,58 | 9,02 | 11,39 | 10,46 | 2,62 |
| Total | 99,99 | 99,81 | 99,51 | 99,99 | 99,75 | 99,51 | 99,75 | 99,74 | 99,98 | 100,0 | 99,51 |
| Rb | 62,26 | 98,50 | 50,02 | 10,29 | 32,56 | 45,82 | 78,74 | 81,46 | 72,58 | 62,86 | 66,26 |
| Sr | 645,41 | 1621,41 | 975,81 | 59,41 | 1312,21 | 2749,41 | 1024,61 | 1057,81 | 1394,61 | 1040,61 | 546,21 |
| Y | 5,14 | 22,16 | 40,16 | 0,56 | 51,92 | 19,63 | 37,73 | 38,80 | 12,22 | 11,29 | 51,60 |
| Zr | 50,30 | 160,94 | 220,38 | 77,74 | 83,86 | 83,90 | 165,58 | 166,62 | 99,06 | 143,38 | 263,66 |
| Nb | 2,17 | 13,06 | 11,72 | 1,05 | 14,24 | 5,58 | 26,86 | 27,65 | 8,38 | 10,02 | 40,32 |
| Pb | 8,06 | 14,96 | 7,47 | 19,86 | 9,09 | 11,09 | 9,05 | 9,37 | 15,94 | 63,28 | 8,47 |
| Th | 1,74 | 8,30 | 5,30 | 2,40 | 9,62 | 3,34 | 12,40 | 12,49 | 8,08 | 12,97 | 11,04 |
| U | 0,31 | 1,08 | 0,97 | 3,31 | 0,93 | 0,55 | 1,23 | 1,24 | 1,20 | 3,68 | 2,97 |
| Ba | 853,80 | 2144,20 | 392,60 | 401,40 | 104,92 | 439,00 | 1231,00 | 1261,80 | 1985,80 | 1972,20 | 229,24 |
| Cr | 33,64 | 22,56 | 443,68 | <PO | 90,76 | 141,16 | 21,39 | 22,81 | 28,00 | 33,16 | 188,28 |
| Ni | 27,96 | 20,41 | 193,21 | 8,97 | 74,85 | 73,25 | 21,04 | 21,80 | 17,03 | 19,65 | 90,89 |
| Co | 9,48 | 17,60 | 49,18 | 1,70 | 48,02 | 27,10 | 20,37 | 21,30 | 8,26 | 8,51 | 68,06 |
| V | 46,68 | 125,52 | 263,84 | 11,19 | 311,52 | 172,48 | 150,32 | 156,60 | 64,20 | 63,52 | 504,04 |
| Ta | 0,18 | 1,28 | 0,48 | 0,12 | 1,59 | 0,38 | 3,15 | 3,21 | 0,66 | 0,68 | 3,0 |
| La | 19,17 | 104,07 | 128,15 | 0,76 | 275,51 | 61,79 | 171,99 | 175,23 | 73,83 | 72,91 | 161,43 |
| Ce | 31,18 | 187,38 | 287,46 | 1,87 | 539,18 | 141,46 | 358,86 | 358,50 | 142,18 | 125,10 | 376,74 |
| Pr | 4,35 | 25,08 | 42,80 | 0,40 | 70,00 | 20,58 | 45,64 | 45,76 | 18,66 | 15,71 | 49,12 |
| Nd | 16,06 | 89,99 | 150,59 | 2,03 | 255,83 | 80,35 | 163,87 | 164,87 | 67,31 | 57,23 | 177,67 |
| Sm | 2,91 | 15,83 | 29,16 | 0,30 | 44,48 | 14,98 | 30,68 | 31,15 | 11,16 | 9,14 | 32,74 |
| Eu | 1,04 | 4,38 | 5,89 | 0,12 | 9,66 | 3,69 | 7,14 | 7,26 | 3,08 | 2,70 | 7,98 |
| Gd | 2,63 | 13,68 | 24,04 | 0,25 | 36,71 | 11,96 | 24,75 | 24,89 | 9,19 | 7,76 | 27,52 |
| Tb | 0,28 | 1,37 | 2,54 | 0,02 | 3,60 | 1,25 | 2,54 | 2,57 | 0,88 | 0,74 | 3,01 |
| Dy | 1,24 | 5,56 | 10,52 | 0,11 | 14,02 | 5,15 | 10,36 | 10,38 | 3,40 | 2,88 | 13,17 |
| Ho | 0,22 | 0,89 | 1,70 | <PO | 2,22 | 0,85 | 1,61 | 1,64 | 0,53 | 0,45 | 2,20 |
| Er | 0,56 | 2,38 | 4,49 | 0,06 | 5,86 | 2,22 | 4,22 | 4,24 | 1,44 | 1,27 | 5,92 |
| Tm | 0,06 | 0,27 | 0,51 | <PO | 0,63 | 0,26 | 0,47 | 0,46 | 0,16 | 0,15 | 0,70 |
| Yb | 0,44 | 1,70 | 3,25 | 0,07 | 3,85 | 1,64 | 2,79 | 2,84 | 1,02 | 1,00 | 4,31 |
| Lu | 0,06 | 0,23 | 0,44 | <PO | 0,50 | 0,23 | 0,34 | 0,35 | 0,14 | 0,14 | 0,57 |
| Eu/Eu* | 0,067 | 0,053 | 0,039 | 0,078 | 0,042 | 0,049 | 0,046 | 0,046 | 0,054 | 0,057 | 0,047 |
| ΣREE | 80,20 | 452,82 | 691,54 | 5,99 | 1262,06 | 346,44 | 825,26 | 830,14 | 332,96 | 297,19 | 863,07 |
| Обр. | Ш-1 | Ш-2 | Ш-3 | Ш-4 | Ш-5 | Ш-6/1 | Ш-7 | Ш-8 | Ш-9 | Ш-11 | Ш-10 |

Примечание. 1–8 – уч. Шаравалампи: 1 – вмещающие гранодиориты. Сяргозерский комплекс: 2 – кварцевый монцодиорит (2-я фаза), 3 – ксенолит пироксенитов (1-я фаза) в монцодиоритах, 4 – жила альбитовая, 5 – амфиболит по пироксенитам с титанитом, 6–7 – ксенолит измененных габбро (1-я фаза) в монцодиоритах, 8 – биотитизированное габбро (1-я фаза). 9–11 – северный берег оз. Сяргозера – Торосозера: 9 – порфиридные гигантозернистые сиениты (2-я фаза), 10 – среднезернистые сиениты (2-я фаза), 11 – метасоматически измененный амфиболит по пироксениту (1-я фаза).

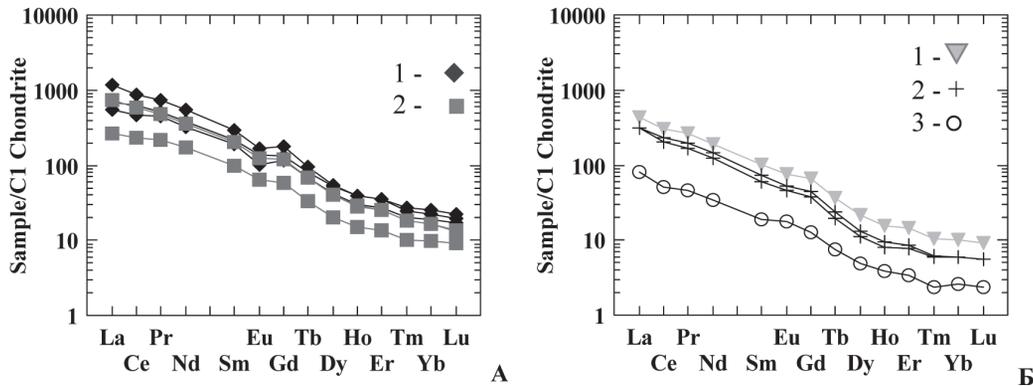


Рис. 3. Распределение REE в пироксенитах и габбро 1-й фазы (А), монцодиоритах и сиенитах 2-й фазы (Б), нормированное по хондриту [8]. А: 1 – пироксениты, 2 – габбро, Б: 1 – монцодиориты, 2 – сиениты, 3 – вмещающие гранодиориты

связаны как с неоднородным распределением кумулюсных фаз, так и с наложением поздних процессов.

Гранодиориты участка Шаравалампи содержат 67,5 % SiO_2 и имеют нормальную щелочность (6,7 %), в отличие от пород 2-й фазы (таблица, рис. 2). Жилы альбититов также имеют отклонения состава от общего тренда (рис. 2), что не позволяет отнести эти два типа пород к дифференцированному комплексу.

Геохимия. Для пород комплекса характерно высокое содержание Ba, Sr, REE, $\text{LaN/YbN} = 44\text{--}52$.

В пироксенитах $\sum\text{REE}$ достигает 1262 ppm, содержание Ba – 105–439 ppm, Sr – 546–2749 ppm, Zr – 84–264 ppm. В габбро концентрация $\sum\text{REE}$ – 830 ppm, Ba – 1231–1263 ppm, Sr – 1025–1058 ppm, Zr – 165–167 ppm. В монцодиоритах содержание $\sum\text{REE}$ – 452 ppm, Ba – 2144 ppm, Sr – 1621 ppm, Zr – 161 ppm. В сиенитах $\sum\text{REE}$ – 332 ppm, Ba – 1972–1986, Sr – 1041–1385, Zr – 99–143. Содержание Ba и Sr колеблется и зависит от наличия первичного K-полевого шпата и вторичного барита.

Для нормированных по хондриту распределений REE в породах обеих фаз сяргозерского комплекса можно отметить следующие характеристики (рис. 3): 1) фракционирование элементов во всем диапазоне; 2) более высокое содержание REE в мафических породах фазы 1; 3) наличие слабой отрицательной аномалии Eu в последних. Подобные характеристики в совокупности с высоким содержанием в породах Ba, Sr и Zr позволяют рассматривать в качестве возможного механизма генерации расплава плавление метасоматизированной мантии с фракционированием граната и небольшого количества плагиоклаза.

ИЗМЕНЕНИЯ ПОРОД И МИНЕРАЛОГИЯ ФОСФОР-ТИТАНОВЫХ РУД

Метасоматические изменения пород комплекса вызваны воздействием щелочных растворов, сопровождающих магматизм и более поздние жилы альбититов. Изменения пород

протекали в несколько стадий: 1) амфиболизация пород 1-й фазы, сопровождаемая выделением платиноидов (автометасоматический процесс); 2) внедрение монцодиоритов и сиенитов сопровождается щелочным метасоматозом и образованием Ba-содержащего K-полевого шпата, амфибола, альбита, флогопита, апатита и титанита в породах 1-й фазы; образование P-Ti-оруденения, Sr-Ba и редкоземельной минерализации (апатит, содержащий REE, титанит, ортит, Се-эпидот). 3) формирование поздних жил альбититов вызывает более низкотемпературные эпидотовые изменения (эпидозиты), сопровождающиеся образованием в породах 1-й фазы и их ксенолитах альбита, эпидота, актинолита, хлорита, кварца, рутила. К эпидозитам приурочена Au-Cu-S-минерализация. На поздних стадиях в них появляются кальцит, барит и карбонаты REE (Ba-Sr-REE-специализация).

Апатит-титанитовое оруденение установлено в пироксенитах и габбро 1-й фазы и представлено ассоциацией магнетита, ильменита, титанита, F-апатита. Рудные тела мощностью 10–60 м и имеющие суммарную протяженность около 1000 м были установлены ранее в результате геолого-геофизических работ [3]. В пироксенитах установлено апатит-магнетитовое, апатит-титанитовое и существенно апатитовое оруденение. Основные дифференциаты комплекса содержат магнетит, ильменит, апатит и редкие теллуриды Pt и Pd. Выделение магнетита и отчасти ильменита связано с раннемагматической стадией формирования ультраосновных дифференциатов. При внедрении в них более поздних монцодиоритов и сиенитов повышенной щелочности происходит обогащение титанитом, ильменитом и F-апатитом. В породах 2-й фазы, монцодиоритах и сиенитах магнетит, титанит и F-апатит являются акцессорными.

Редкоземельно-стронций-бариевая минерализация (REE, Ba, Sr). Накопление Ba и Sr в породах происходит в полевых шпатах более

кислых дифференциатов (для них характерна ассоциация альбит и К-полевой шпат) и щелочных метасоматитах по пироксенитам (фенитах), а также наложенных на них более поздних альбититов.

Содержание в породах ВаО – 0,09–1,16 %, в К-полевом шпате – до 2,75 %. При поздних процессах изменения пород Ва и Sr концентрируются в барите (ВаО – до 64,62 %, SrО – до 9,61 %) и целестине (ВаО – 10,11 %, SrО – 45,7 %).

Концентраторами REE являются титанит ($\Sigma\text{REE} \sim 4,5\%$) и более поздние минералы – ортит ($\Sigma\text{REE} 18,5\%$) и Се-эпидот (Ce_2O_3 7,3–8,6 %), а также низкотемпературные F-карбонаты, содержащие Се, La, Nd, иногда Pr.

Благороднометаллическая минерализация (ЭПГ, Au). В габбро-пироксенитовых массивах участка Шаравалампи содержание Pt – 0,038 г/т, Pd – 0,074 г/т, Au – 0,02 г/т [3]. В амфиболизированных пироксенитах обнаружены кейтконнит ($(\text{PdPtCu})_3\text{Te}$) и мончеит PtTe_2 , которые могли образоваться на автометасоматической стадии.

В зонах эпидотизации образуются прожилки и гнезда с сульфидами (пирит, халькопирит, борнит). В сростании с борнитом встречаются галенит, самородные Те и Ви, электрум (Ag до 35,28 %). В халькопирите обнаружены включения Ag и цумоита (ВиТе). Редко встречаются клаусталит, гринокит и касситерит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сяргозерский многофазный умереннощелочной комплекс дифференцирован от пироксенитов и габбро (1-я фаза) до монцодиоритов и сиенитов (2-я фаза). Метасоматические изменения пород происходили в несколько стадий:

1. Амфиболизация пироксенитов и габбро при автометасоматозе. Основные дифференциаты содержат магнетит, ильменит, апатит и теллуриды элементов платиновой группы.

2. Щелочной метасоматоз (фенитизация), интенсивная амфиболизация пород пироксенитов и габбро, образование Ва-Sr-содержащего К-полевого шпата, альбита, флогопита, апатита и титанита, связанное с внедрением монцодиоритов и сиенитов.

3. Щелочное более низкотемпературное изменение (образование альбита, эпидота, амфибола, хлорита, кварца, рутила и Au-Cu-S-минерализации), вызванное формированием жил альбититов.

На поздних стадиях изменения в породах появляются кальцит, барит и карбонаты REE. Альбититы сопровождаются образованием сульфидов меди, электрума, самородных Ag, Те, Ви, цумоита, иногда галенита, гринокита, клаусталита, единичными киноварью и касситеритом. Породы комплекса специализированы на Р, Ti, Ва, Sr, LREE, содержат в незначительном количестве Pt и Pd.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лобач-Жученко С. Б., Роллинсон Х., Чекулаев В. П., Гусева Н. С., Арестова Н. А., Коваленко А. В. Геология и петрология архейского высококальцевого и высокомагнезиального Панозерского массива Центральной Карелии // Петрология, 2007. Т. 15. № 5. С. 493–523.
2. Метасоматизм и метасоматические породы. М.: Научный мир, 1998. 489 с.
3. Слюсарев В. Д., Кулешевич Л. В., Павлов Г. М., Лавров М. М., Земцов В. А. Субщелочной магматизм района Сяргозера // Геология и полезные ископаемые Карелии / КарНЦ РАН. Петрозаводск, 2001. № 3. С. 66–86.
4. Bibikova E. V., Petrova A., Claersson S. The temporal evolution of sanukitoids in the Karelian Craton, Baltic Shield: an ion microprobe U-Th-Pb isotopic study of zircons // Lithos. 2005. Vol. 79. P. 129–145.
5. Card K. D., Poulsen K. H., Robert F. The Archean Superior Province of the Canadian Shield and its Lode Gold Deposits. The Geology of Gold Deposits: Perspective in 1988 // Economic Geology. 1989. № 6. P. 19–36.
6. Corfu F. The evolution of the southern Abitibi Greenstone belt in the light of precise U–Pb geochronology // Economic Geology. 1993. Vol. 88. P. 1323–1340.
7. Lobach-Zhuchenko S. B., Rollinson H. R., Chekulaev V. P., Ereštova N. A., Kovalenko A. V., Ivanikov V. V., Guseva N. S., Matukov D. I., Jarvis K. E. The Archean sanukitoid series of the Baltic Shield: geological setting, geochemical characteristics and implications for their origin // Lithos. 2005. Vol. 79. P. 107–128.
8. Sun S.-S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geological Society. 1989. Vol. 42. P. 313–345.
9. Sutcliffe R. H., Barrie C. T., Burrows D. R., Beakhouse G. P. Plutonism in the southern Abitibi subprovince: a tectonic and petrogenetic framework // Economic Geology. 1993. Vol. 88. P. 1359–1375.

Dmitrieva A. V., Institute of Geology, Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

GEOCHEMISTRY AND ORE MINERALIZATION OF YARGOZERO MODERATELY ALKALINE COMPLEX, CENTRAL KARELIA

Results of mineralogical and geochemical study of the rocks from Syargozero moderately alkaline complex (Central Karelia, Ondozero-Segozero prospect) consisting from pyroxenites, gabbro, monzodiorites and syenites are reported. The rocks are enriched with alkalis, P, Ti, Rb, Ba, Sr and light rare-earth elements (LREE). Phase I is represented by pyroxenites and gabbro, a later phase – by monzodiorites and syenites. The intrusion of monzodiorites and syenites is accompanied by formation of alkaline metasomatic rocks. Ore mineralization in pyroxenites, gabbro, and metasomatic rocks is represented by magnetite, ilmenite, titanite, and apatite. Naturally occurring minerals containing PGE's, such as keithconnit and moncheite, are also encountered. Rock epidotization, imposed on all differentiates of the complex, and occurrence of sulphides (pyrite, chalcopyrite and bornite) are associated with the effect of later albitite veins. Electrum (up to 35,28 % Ag) is associated with bornite; tsumoite, native silver,

tellurium, and bismuth are less common. Sphene, epidote, Ce-epidote, orthite, and later carbonates are minerals with high concentration of rare-earth minerals (LREE).

Key words: sub-alkaline suite, pyroxenite, monzodiorite, syenite, albitite, ore minerals, rare earth elements

REFERENCES

1. Lobach-Zhuchenko S.B., Rollinson H. R., Chekulaev V. P., Guseva N. S., Arestova N. A., Kovalenko A. V. Geology and petrology of the Archean Panozero high-K and high-Mg massif of Central Karelia [Geologiya i petrologiya arkheyskogo vysokokalievogo i vysokomagnezial'nogo Panozerskogo massiva Tsentral'noy Karelii]. *Petrologiya* [Petrology]. 2007. Vol. 15. № 5. P. 493–523.
2. *Metamorfizm i metasomaticheskie porody* [Metasomatism and metasomatic rocks]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 1998. 489 p.
3. Slyusarev V. D., Kuleshevich L. V., Pavlov G. M., Lavrov M. M., Zemtsov V. A. Sub-alkaline magmatism in Syargozero area [Subshchelochnoy magmatizm rayona Syargozera]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii* [Geology and Mineral Resources of Karelia]. 2001. № 3. P. 66–86.
4. Bibikova E. V., Petrova A., Claeresson S. The temporal evolution of sanukitoids in the Karelian Craton, Baltic Shield: an ion microprobe U-Th-Pb isotopic study of zircons // *Lithos*. 2005. Vol. 79. P. 129–145.
5. Card K. D., Poulsen K. H., Robert F. The Archean Superior Province of the Canadian Shield and its Lode Gold Deposits. The Geology of Gold Deposits: Perspective in 1988 // *Economic Geology*. 1989. № 6. P. 19–36.
6. Corfu F. The evolution of the southern Abitibi Greenstone belt in the light of precise U–Pb geochronology // *Economic Geology*. 1993. Vol. 88. P. 1323–1340.
7. Lobach-Zhuchenko S. B., Rollinson H. R., Chekulaev V. P., Arestova N. A., Kovalenko A. V., Ivanikov V. V., Guseva N. S., Matukov D. I., Jarvis K. E. The Archean sanukitoid series of the Baltic Shield: geological setting, geochemical characteristics, and implications for their origin // *Lithos*. 2005. Vol. 79. P. 107–128.
8. Sun S.-S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Geological Society*. 1989. Vol. 42. P. 313–345.
9. Sutcliffe R. H., Barrie C. T., Burrows D. R., Beakhouse, G. P. Plutonism in the southern Abitibi subprovince: a tectonic and petrogenetic framework // *Economic Geology*. 1993. Vol. 88. P. 1359–1375.

Поступила в редакцию 21.03.2013

АНАТОЛИЙ ЕФРЕМОВИЧ БОЛГОВ

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой зоотехнии, рыбоводства и товароведения агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

bolg@psu.karelia.ru

ИРИНА АЛЕКСАНДРОВНА ЧИСТЯКОВА

кандидат биологических наук, доцент кафедры зоотехнии, рыбоводства и товароведения агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

irina1620205@yandex.ru

ЕЛЕНА АЛЕКСЕЕВНА КОНДРАТЮК

кандидат экономических наук, старший преподаватель кафедры зоотехнии, рыбоводства и товароведения агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

jelenkon@mail.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МНОГОПРОФИЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ*

Исследованы основные показатели развития скотоводства, производства, переработки и реализации молока, а также использование ресурсов на примере многопрофильного предприятия ЗАО «Медвежьегорский молокозавод» (Республика Карелия). Установлено, что стадо отличается высокой продуктивностью, годовой удой на корову равен 7476 кг молока. Увеличение удоя в большей степени обусловлено ростом поголовья коров (на 10,0 %), чем увеличением продуктивности стада (на 4,4 %). Рост себестоимости молока на 3,31 руб./кг произошел за последний год вследствие увеличения общей суммы затрат на +5,52 руб./кг (или +32,2 %), а увеличение продуктивности стада сдерживало рост на 2,21 руб./кг и снизило себестоимость на 12,9 %. Несмотря на то что средняя цена реализации молока возросла на 2,73 руб./кг и составила 19,31 руб., его производство в ЗАО «Медвежьегорский молокозавод» за счет собственных ресурсов и при складывающихся рыночных условиях убыточно (-5,6 %). Выделение субсидий из средств республиканского бюджета в объеме 4,82 руб. на 1 кг товарного молока обеспечило его рентабельное производство (+18,0 %). Использование основных и потребление оборотных средств идет достаточно эффективно: фондоотдача составила 3,07 руб., коэффициент оборачиваемости – 1,02. Таким образом, ЗАО «Медвежьегорский молокозавод» как многопрофильное предприятие работает эффективно, ежегодно наращивает объемы производства молока и увеличивает поголовье дойного стада.

Ключевые слова: эффективность производства молока, переработка молока, рентабельность молока, молочное скотоводство, экономика животноводства

Рыночные отношения диктуют необходимость использовать все возможности для сохранения и развития сельскохозяйственного производства. В связи с этим некоторые животноводческие предприятия (в том числе в Карелии), стремясь сохранить конкурентоспособность, уменьшить зависимость от посредников, повысить эффективность работы с потребителями продукции и выручку, пытаются развивать не только производство молока, мяса, но и организовать собственную их переработку и реализацию.

Анализ результатов деятельности таких предприятий вызывает все больший интерес [3], [5], [6]. Кроме того, с целью стабилизации и дальнейшего развития животноводства разрабатываются прогнозы развития, в которых

обосновываются разные варианты сохранения и совершенствования основных отраслей животноводства, повышения их конкурентоспособности [2]. Однако имеющейся информации недостаточно для обобщения опыта их хозяйствования, выводов о целесообразности этого варианта функционирования молочных хозяйств, что вызывает необходимость анализа и дальнейших исследований эффективности деятельности многопрофильных предприятий.

Целью работы было исследование основных показателей развития скотоводства, производства молока, использования средств производства и трудовых ресурсов при многопрофильной деятельности на примере ЗАО «Медвежьегорский молокозавод». Для анализа были использованы формы годовой отчетности о финансово-эко-

номическом состоянии товаропроизводителей АПК, отчет Министерства сельского, рыбного и охотничьего хозяйства Республики Карелия за 2011 год [4].

ЗАО «Медвежьегорский молокозавод» является многопрофильным сельскохозяйственным и перерабатывающим предприятием. Сегодня это одно из немногих предприятий Карелии, производственная деятельность которого включает как производство молока и мяса, так и их переработку. В составе предприятия имеется цех по переработке молока, цех мясных полуфабрикатов, мини-пекарня и сеть магазинов. Продукция предприятия пользуется популярностью среди покупателей.

Среднесписочная численность работающих на молокозаводе в 2011 году составила 180 человек. В начале 2009 года предприятие включено в список системообразующих организаций Карелии, что говорит о его большой значимости для экономики республики.

Общая земельная площадь предприятия представлена только сельскохозяйственными угодьями, на протяжении многих лет она не изменялась и составляет 2102 га. Наибольший удельный вес в структуре сельхозугодий занимает пашня (75,1 %). На одну голову крупного рогатого скота приходится 0,04 га пастбищ. 100 % посевных площадей занимают кормовые культуры. Многолетние травы – основной источник кормов в хозяйстве. В 2011 году их доля в площади посевов составила 96,9 %, в том числе на сено 70,6 %.

Основной отраслью производства в ЗАО «Медвежьегорский молокозавод» является молочное скотоводство. Основная часть производства продукции хозяйства приходится на молоко – 90,9 % (табл. 1).

Таблица 1
Специализация
производственной деятельности
(по товарной продукции, 2011 год)

| Вид продукции | Товарная продукция, тыс. руб. | В % к итогу |
|--|-------------------------------|-------------|
| Молочные продукты, реализованные в переработанном виде (в пересчете на молоко) | 117245 | 90,9 |
| Мясо и мясопродукция, реализованная в переработанном виде (в пересчете на живую массу) | 10305 | 8,0 |
| Крупный рогатый скот в живой массе | 1451 | 1,0 |
| Итого по животноводству | 129001 | 100,0 |

В последние годы поголовье крупного рогатого скота существенно увеличилось и к концу 2011 года составило 1832 головы, в том числе 836 коров (табл. 2). Стадо отличается высокой продуктивностью. Удой на фуражную корову в течение года увеличился и составил 7476 кг, что на 286 кг больше, чем в 2010 году.

Таблица 2
Основные показатели развития
скотоводства

| Показатель | Год | |
|---|--------|--------|
| | 2010 | 2011 |
| Поголовье крупного рогатого скота на конец года (всего, гол.) | 1832 | 1832 |
| Среднегодовое поголовье коров, гол. | 760 | 836 |
| Удой на фуражную корову, кг | 7190 | 7476 |
| Объем производства молока, т | 5464,4 | 6249,9 |
| Молоко, реализованное в переработанном виде в зачетной массе, т | 6044,8 | 7066,6 |
| Товарность молока, % | 96,8 | 97,2 |
| Средняя сдаточная жирность молока, % | 3,89 | 3,96 |
| Затраты труда на производство 1 ц молока, ч-час. | 2,80 | 2,24 |

Увеличение поголовья и рост продуктивности позволили существенно увеличить объем производства молока за последние четыре года (2008–2011) – на 87 %, в том числе в 2011 году на 785,5 т (на 14,4 %). Однако с помощью метода цепных подстановок анализа данных выявлено, что в большей степени это обусловлено ростом поголовья коров (на 10,0 %), чем увеличением продуктивности стада (на 4,4 %). Следует отметить и увеличение средней сдаточной жирности молока на 0,07 %.

Все это свидетельствует о том, что в организации активно проводят работу, направленную на увеличение продуктивности коров. Товарность молока высокая – в пределах 97 %. Затраты труда на 1 ц молока невелики и имели тенденцию к снижению – с 2,98 ч-час. в 2009 году до 2,24 ч-час. в 2011 году.

Основным экономическим показателем производства молока является себестоимость продукции, ее уровень оказывает непосредственное влияние на конечный финансовый результат и конкурентоспособность продукта на рынке. Диспаритет цен, инфляция, увеличение затрат на производство и покупку кормов вызвали резкий рост себестоимости всей продукции животноводства. Себестоимость 1 кг товарного молока в 2011 году в ЗАО «Медвежьегорский молокозавод» достигла 20,45 руб., увеличение составило 3,31 руб. (или +19,3 %, табл. 3).

На отклонение в себестоимости продукции главным образом влияют два фактора первого порядка: изменение общей суммы затрат и изменение продуктивности животных. Применяв метод элиминирования, установили, что себестоимость возросла вследствие увеличения общей суммы затрат на +5,52 руб./кг (+32,2 %). Увеличение продуктивности стада на 286 кг сдерживало этот рост на 2,21 руб./кг, что снизило себестоимость на 12,9 %, но этого оказалось недостаточным. Следовательно, даже высокая продуктивность коров и хорошие темпы ее ро-

Таблица 3
Экономические показатели
производства молока

| Показатель | Год | |
|--|----------------|----------------|
| | 2010 | 2011 |
| Коммерческая себестоимость 1 кг товарного молока, руб. | 17,14 | 20,45 |
| Средняя цена реализации 1 кг молока, руб. | 16,58 | 19,31 |
| Убыток от реализации 1 кг молока, руб. | -0,56 | -1,14 |
| Получено субсидий на молоко (всего, тыс. руб.) на 1 кг товарного молока, руб. | 18 134 3,43 | 29 279 4,82 |
| Уровень субсидий к себестоимости товарного молока, % | 20,0 | 23,6 |
| Полная себестоимость товарного молока, тыс. руб. | 90 630 | 124 184 |
| Выручка от реализации товарного молока, тыс. руб. | 87 691 | 117 245 |
| Финансовый результат от реализации товарного молока, тыс. руб. | -2939 | -6939 |
| Рентабельность (убыточность) производства молока, % без учета субсидий с учетом субсидий | -3,2 +16,8 | -5,6 +18,0 |

ста, собственная переработка и реализация молока не перекрывают темпы увеличения затрат, обусловленных ростом цен на комбикорма, сельхозтехнику, электроэнергию, ГСМ, другие материально-технические ресурсы и услуги.

Несмотря на то что средняя цена реализации продукции возросла на 2,73 руб. за 1 кг и составила 19,31 руб., убыток от реализации молока в сравниваемые годы увеличился на 0,58 руб./кг и достиг в 2011 году 1,14 руб./кг. Вследствие этого производство молока в ЗАО «Медвежьегорский молокозавод» за счет собственных ресурсов и при складывающихся рыночных условиях убыточно (-3,2 и -5,6 %). При наличии целевого финансирования, выделении субсидий из средств республиканского бюджета в объеме 4,82 руб. на 1 кг товарного молока обеспечено его рентабельное производство (+18,0 %).

По данным отчета Министерства сельского, рыбного и охотничьего хозяйства Республики Карелия о результатах работы в 2011 году, сельскохозяйственным организациям республики оказана государственная поддержка из бюджетов всех уровней в сумме 408,5 млн руб. (+65,0 млн руб. к уровню 2010 года). Увеличение объемов субсидий позволило поддержать финансовую устойчивость ЗАО «Медвежьегорский молокозавод» на приемлемом уровне.

В задачу наших исследований входила также оценка эффективности использования и развития уже созданного производственного потенциала (табл. 4). Обеспеченность ЗАО «Медвежьегорский молокозавод» основными средствами увеличивается из года в год, однако уровень фондообеспеченности (6,3 млн руб.) и фондовооруженности труда (0,74 млн руб.) значительно

но ниже по сравнению с более рентабельными и финансовоустойчивыми сельхозорганизациями республики – ОАО «Племсовхоз „Меграга“» и ОАО «Племенное хозяйство „Ильинское“». Обеспеченность основными средствами на 100 га сельхозугодий в этих организациях в 2011 году достигла 14 млн руб., а на одного работника – 19 млн руб. Поэтому фондоотдача в ЗАО «Медвежьегорский молокозавод», хотя и находится на достаточно высоком уровне (3,07 руб.) и обусловлена переработкой собственной продукции, снизилась в 2011 году на 0,05 руб. на каждый рубль стоимости основных средств. Как известно, фондоотдача может повыситься в том случае, если темпы роста производительности труда опережают темпы роста фондовооруженности [1]. В данном случае это +12,9 и +15,0 % соответственно, то есть оптимальное соотношение между указанными экономическими категориями на предприятии не выдерживается.

Таблица 4
Эффективность использования средств
производства и трудовых ресурсов

| Показатель | Год | |
|---|----------------|----------------|
| | 2010 | 2011 |
| Фондообеспеченность на 100 га сельхозугодий, тыс. руб. | 5328 | 6303 |
| Фондовооруженность на 1 чел., тыс. руб. | 640,03 | 736,09 |
| Фондоотдача, руб. | 3,12 | 3,07 |
| Коэффициент износа основных средств на конец года, % | 40,5 | 42,2 |
| Коэффициент поступления основных средств, % | 20,3 | 24,5 |
| Коэффициент выбытия основных средств, % | 8,7 | 8,3 |
| Коэффициент оборачиваемости оборотных средств, раз | 0,97 | 1,02 |
| Продолжительность оборачиваемости средств, дни | 371 | 353 |
| Численность работников (всего, чел.) / из них занято в сельхозпроизводстве, % | 175 / 100,0 | 180 / 100,0 |
| Производительность труда на 1 чел., тыс. руб. | 1999,82 | 2257,34 |
| Среднегодовой доход 1 работника, тыс. руб. | 168,08 | 208,76 |
| Темп роста производительности труда, % | +12,9 | |
| Темп роста заработной платы, % | +24,2 | |

Техническое состояние основных средств характеризуется степенью их износа, обновления, выбытия, возрастным составом оборудования. Коэффициент износа основных средств ЗАО «Медвежьегорский молокозавод» находится на типичном уровне (42,2 % к концу 2011 года) и дает возможность разработать мероприятия по их обновлению.

Потребление оборотных средств на данном предприятии идет довольно эффективно: они переносят свою стоимость на готовую продук-

цию в течение одного производственного цикла, скорость оборота повышается, его продолжительность сократилась на 18 дней и составила 353 дня. Ускорение оборачиваемости способствует их абсолютному и относительному высвобождению из оборота.

Таким образом, в целом ЗАО «Медвежьегорский молокозавод» как многопрофильное предприятие работает эффективно, ежегодно наращивает объемы производства молока и увеличивает поголовье дойного стада. Предприятие работает стабильно, его финансовое положение достаточно устойчивое, просроченной задолженности по заработной плате нет, оно является ведущим предприятием района,

обеспечивающим рабочими местами местное население.

Целевое финансирование способствовало выведению хозяйственно-финансовой деятельности на рентабельный уровень, однако для обеспечения более высокой рентабельности, создания выгодной экономической среды предприятию необходимо выделять из бюджета субсидии размером не менее 25 % к себестоимости молока. Как предприятие, имеющее собственную переработку и реализацию молока, ЗАО «Медвежьегорский молокозавод» имеет существенное преимущество среди других сельхозтоваропроизводителей – дает возможность сохранения рабочих мест и развития инфраструктуры села.

* 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. Коваленко Н. Я., Сорокин В. С., Орехов С. А. Экономика сельского хозяйства: Учебник. М.: КолосС, 2008. 208 с.
2. Костомарин Н. М. Скотоводство: Учебник. СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2007. 431 с.
3. Нечаев В. И., Парамонов П. Ф., Халаявка И. Е. Экономика предприятий АПК: Учеб. пособие. СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2010. 461 с.
4. Отчет Министерства сельского, рыбного и охотничьего хозяйства Республики Карелия за 2012 год [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://gov.karelia.ru/>
5. Суровцев В., Частикова Е. Проблемы повышения конкурентоспособности производства молока в Ленинградской области при вступлении России в ВТО // Молочное и мясное скотоводство. 2012. № 7–8. С. 10.
6. Шалыпина И. П. Организация производства и переработки молока в условиях развития интеграционных процессов. Мичуринск: Изд-во Мичуринского госагроуниверситета, 2009. 143 с.

Bolgov A. E., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Chistyakova I. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Kondratyuk E. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

EFFECTIVENESS OF DIVERSIFIED LIVESTOCK ENTERPRISES

The main indicators of cattle breeding, production, processing, milk marketing, and use of resources were studied on the example of the diversified enterprise JSC “Medvezhiegorsky Milk Factory” (Republic of Karelia). It was found that the herd is highly productive; annual milk yield per cow is 7476 kg. The analysis revealed that the increase in the milk yield was caused more by the increase of the number of cows in the herd (10,0 %) than by the increase of the herds’ productivity (4,4 %). The last year rise in the cost of milk by 3,31 rub/kg occurred due to the increase of the total expenses by +5,52 rub/kg (or +32,2 %). The increase of the herd productivity restrained the cost growth by 2.21 rub./kg and reduced the cost by 12,9 %. Despite the fact that the average selling price of the milk has increased by 2,73 rub/kg and was 19,31 rubles, production of milk in JSC “Medvezhiegorsky Milk Factory” at the expense of its own resources under prevailing market conditions was unprofitable (–5,6 %). Subsidies from the national budget in the amount of 4,82 rubles per 1 kg of marketable milk provided its profitable production (+18,0 %). The use of basic and working assets is carried out effectively: the yield of capital investments amounted to 3,07 rubles; turnover ratio – 1,02. Thus, the diversified company JSC “Medvezhiegorsky Milk Factory” operates effectively. It annually increases milk production and the number of dairy cattle.

Key words: efficiency of milk production, milk processing, profitability of milk, dairy farming, economy of cattle breeding

REFERENCES

1. Kovalenko N. Yu., Sorokin V. S., Orekhov S. A. *Ekonomika sel'skogo khozyaystva* [Agricultural economics]. Moscow, KolosS Publ., 2008. 208 p.
2. Kostomarin N. M. *Skotovodstvo* [Cattle breeding]. St. Petersburg, Moscow, Krasnodar, Lan' Publ., 2007. 431 p.
3. Nechaev V. I., Paramonov P. F., Khalyavka I. E. *Ekonomika predpriyatiy APK* [Economics of agricultural enterprises]. St. Petersburg, Moscow, Krasnodar, Lan' Publ., 2010. 461 p.
4. *Otchet Ministerstva sel'skogo, rybnogo i okhotnich'ego khozyaystva RK za 2012 god* [Report of the Ministry of agriculture, fisheries and wildlife of the RK for the 2012]. Available at: <http://www.gov.karelia.ru>
5. Surovtsev V., Chastikova E. Problem of increasing competitiveness of milk production in Leningrad region when joining WTO [Problemy povysheniya konkurentosposobnosti proizvodstva moloka v Leningradskoy oblasti pri vstuplenii Rossii v VTO]. *Molochnoe i myasnoe skotovodstvo* [Dairy and beef cattle]. 2012. № 7. P. 10.
6. Shalyapina I. P. *Organizatsiya proizvodstva i pererabotki moloka v usloviyakh integratsionnykh protsessov* [Organization of production and processing of milk in conditions of integration]. Michurinsk, 2009. 143 p.

Поступила в редакцию 08.04.2013

ОЛЬГА НИКОЛАЕВНА БАХМЕТ

кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории лесного почвоведения и микробиологии, Институт леса Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
obahmet@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ПОЧВ СКАЛЬНЫХ ЛАНДШАФТОВ КАРЕЛЬСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ БЕЛОГО МОРЯ

В связи с высокой расчлененностью рельефа, частой сменой почвообразующих пород почвенный покров Карелии отличается очень сложным строением и мелкоконтурностью. В различных частях республики он отличается как по составу, так и по соотношению почв. Скальные ландшафты побережья Белого моря характеризуются специфическими условиями почвообразования, поэтому почвы, формирующиеся в этих ландшафтах, вызывают особый интерес. Для комплексного изучения территории через наиболее характерные элементы ландшафта закладывались профили, по которым детально описывался почвенный покров (характеризовалось морфологическое строение почв, отбирались почвенные образцы для химического анализа). Проведенные исследования показали, что в составе почвенного покрова преобладают маломощные почвы – примитивные, подбуры, слабообразованные подзолы. Они формируются на бедных по составу коренных породах (гранитогнейсах и гнейсогранитах), поэтому отличаются невысоким плодородием. Характерные для Карелии в целом подзолы, развитые на четвертичных отложениях, в изученных ландшафтах имеют ограниченное распространение. Вдоль побережья Белого моря встречаются уникальные для региона засоленные маршевые почвы. Они представляют большой интерес с точки зрения богатого биологического разнообразия. Биогеоценозы морских берегов чрезвычайно продуктивны, что особенно ценно в северных условиях для сохранения многих видов растений. Кроме того, засоленные марши привлекают особое внимание благодаря их способности аккумулировать в индустриально развитых районах большое количество поллютантов. Маршевые почвы района исследования в настоящее время не загрязнены, поэтому должны особо охраняться.

Ключевые слова: скальный ландшафт, органическое вещество, почва, органофиль, Белое море

ВВЕДЕНИЕ

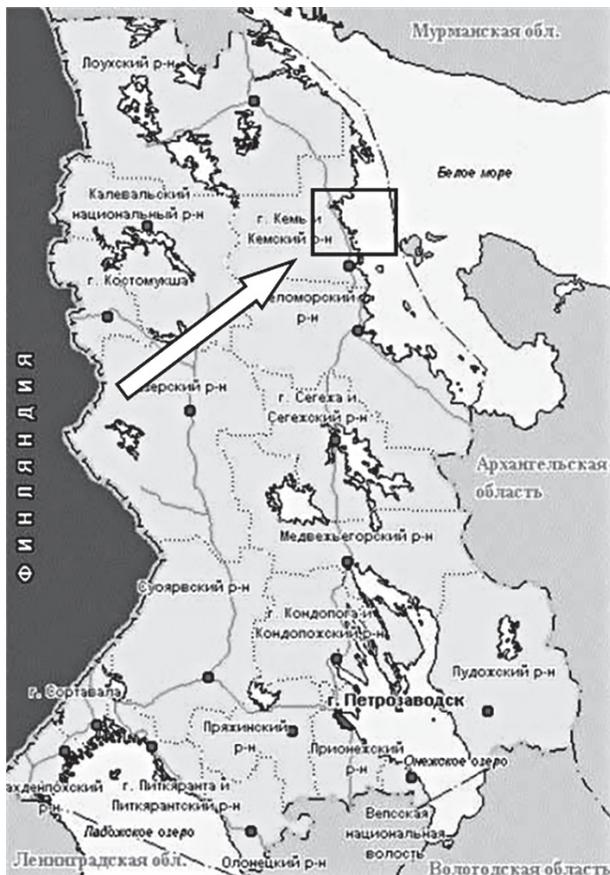
Своеобразные природные условия Карелии с ее умеренно холодным влажным климатом, преимущественным распространением почвообразующих пород легкого механического состава и преобладанием хвойных лесов обусловили широкое развитие в автоморфных местоположениях элювиально-иллювиального процесса почвообразования. В Карелии на рыхлых четвертичных отложениях в автоморфных условиях распространены различные виды подзолистых почв (около 60 % территории), в полугидроморфных условиях сформировались болотно-подзолистые почвы (18 %), в гидроморфных – болотные (20 %) [6]. Среди подзолистых и болотно-подзолистых почв преобладают песчаные и супесчаные разновидности, на долю почв суглинистого и глинистого состава приходится менее 6 % площади.

На выходах коренных пород на начальных стадиях почвообразования формируются примитивные почвы. В дальнейшем на элювии и элюво-делювии коренных пород развиваются подбуры. Однако площадь, занимаемая ими в почвенном покрове республики, невелика – 0,5 и 0,9 % соответственно.

В целом почвенный покров Карелии характеризуется очень сложным строением и мелкоконтурностью, что связано с чрезвычайной расчлененностью рельефа и сменой почвообразующих пород [2]. В зависимости от особенностей факторов почвообразования в различных районах республики формируется своеобразный почвенный покров. Почвы и почвенный покров скальных ландшафтов вдоль побережья Белого моря имеют ряд особенностей по сравнению с другими районами и территорией Карелии в целом.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

По классификации, разработанной А. Д. Волковым и А. Н. Громцевым, специфический ландшафт Карельского побережья Белого моря относится к северотаежным скальным среднезаболоченным ландшафтам с преобладанием сосновых местообитаний [3], [4]. Для него характерен сильнопересеченный рельеф денудационно-тектонического происхождения с частой сменой скальных гряд и холмов понижениями, занятыми болотами. В кристаллическом фундаменте преобладают кислые гранитогнейсы и гнейсограниты. Ледниковые отложения имеют



Район исследований

небольшую мощность, значительная часть территории практически лишена четвертичного покрова. Для данного ландшафта характерна средняя заболоченность (около 40 %), мощность торфяных залежей, как правило, не превышает 1,5–2,0 м.

Исследования почв и почвенного покрова скальных ландшафтов проводились нами в северо-восточной части Карелии на побережье Белого моря (см. рисунок). Данный район характеризуется экстремальными даже для северной части республики климатическими условиями: холодная продолжительная зима (количество дней с температурой ниже -5°C составляет 130–120), продолжительность безморозного периода – 105–115 дней, количество осадков – 550–575 мм в год.

В рамках российско-финляндской программы «Развитие устойчивого лесного хозяйства и сохранение биоразнообразия на Северо-Западе России» (руководитель – А. Н. Громцев) проводились исследования уникальных скальных ландшафтов Карельского берега Белого моря. Для проведения их комплексного обследования закладывались профили через наиболее характерные элементы ландшафта, по которым работали эксперты по геологии, лесоведению, гидрологии, болотоведению, ботанике и др. Де-

тально описывался почвенный покров каждого из профилей, отбирались почвенные образцы по горизонтам.

Анализ почвенных образцов включал определение кислотности, степени насыщенности основаниями, содержания фосфора и калия по общепринятым методикам [1], общего углерода и валового азота с помощью CHN-анализатора Perkin-Elmer 2400-II. В маршевых почвах дополнительно определяли содержание натрия, а также анализировали состав водной вытяжки по стандартным методикам [1].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Наличие маломощного покрова четвертичных отложений на автоморфных позициях рельефа скальных ландшафтов обусловило формирование примитивных почв. Они характеризуются небольшой мощностью и слабым развитием почвенных горизонтов. Представленные на изученной территории примитивные почвы можно разделить по степени развития почвообразовательного процесса: корковые, органогенные, щебнистые и слабодифференцированные. На самых первых стадиях почвообразования с появлением лишайников происходит накопление органического вещества, ускоряются процессы физического и химического выветривания кристаллических пород, в результате формируются корковые примитивные почвы (здесь и далее для определения почв используется региональная классификация [5]).

На следующих стадиях развития почвенного профиля появляются органогенные примитивные почвы, для которых характерен морфологический профиль О-М (лесная подстилка залегает на скальном основании). По характеру органогенного горизонта их можно разделить на грубогумусные (формируются на вершинах гряд) и торфянистые (приурочены к западинам). Чем глубже западина, тем больше мощность органогенного горизонта, в нижних слоях которого вследствие минерализации растительных остатков и увеличения содержания минеральных частиц содержание органического вещества снижается.

При появлении в профиле почв минерального щебнистого горизонта выделяются щебнистые примитивные почвы, для которых характерно морфологическое строение О-АВ-М. Однако мощность грубого хрящеватого элювия не превышает 10 см, а содержание мелкозема в нем составляет всего 13–25 %. При увеличении мощности минеральной толщи примитивные почвы характеризуются как слабодифференцированные, их можно рассматривать как переходную стадию к неполноразвитым подзолам.

Все примитивные почвы обладают укороченным органопрофилем, низким содержанием углерода и азота и, соответственно, низкими

лесорастительными свойствами (табл. 1). На скальных местоположениях примитивные почвы зачастую образуют несомкнутый почвенный покров.

Таблица 1
Химические показатели примитивных почв и подзолов неполноразвитых

| Горизонт | Глубина | pH _{KCl} | C | N | C/N | P ₂ O ₅ | K ₂ O |
|----------------------------------|---------|-------------------|------|------|------|-------------------------------|------------------|
| | | | % | | | мг / 100 г почвы | |
| Примитивная корковая | | | | | | | |
| ABC | 0–3 | 3,3 | 11,3 | 0,71 | 15,5 | 10,6 | 20,0 |
| Примитивная грубогумусная | | | | | | | |
| O | 0–2 | 3,2 | 56,8 | 2,00 | 28,4 | 217,5 | 14,0 |
| ABC | 2–10 | 3,4 | 5,0 | 0,50 | 10,0 | 61,1 | 11,1 |
| Примитивная торфянистая | | | | | | | |
| AT | 0–3 | 4,7 | 38,8 | 1,32 | 29,4 | 10,5 | 100,0 |
| T1 | 3–6 | 4,6 | 30,8 | 1,25 | 24,6 | 5,3 | 74,2 |
| T2 | 6–9 | 4,4 | 17,8 | 1,10 | 16,2 | 6,2 | 48,0 |
| Подзол неполноразвитый щебнистый | | | | | | | |
| O | 0–2 | 3,4 | 21,1 | 0,77 | 35,5 | 4,7 | 38,2 |
| EB | 2–6 | 3,9 | 1,8 | 0,05 | 39,8 | 2,2 | 1,7 |
| BC | 6–16 | 4,6 | 0,7 | 0,05 | 16,4 | 9,2 | 0,9 |

В дальнейшем почвообразование идет по подзолистому типу, что связано как с особенностями почвообразующих пород (бедностью их химического состава и устойчивостью к выветриванию), так и с климатическими характеристиками территории. Кроме того, на характер формирования почв оказывает влияние специфический опад хвойных древостоев. В результате развиваются подзолы, но так как мощность рыхлого щебнистого минерального материала невелика, эти почвы классифицируются как неполноразвитые щебнистые. От полноразвитых их отличает небольшая мощность профиля (до 20 см) и неполное развитие почвенных горизонтов (O-E/EB-BC-D). В связи с небольшой мощностью профиля в целом запасы органического вещества в них невелики.

Торфяные и торфяно-глеевые почвы распространены в основном в понижениях рельефа, но их можно встретить и в разломах на вершинах скалистых гряд. Эти почвы распространены в Карелии, на данной территории для них характерна небольшая мощность торфяной залежи. Среди торфяных почв встречаются как олиготрофные, так и эутрофные, но первые в значительной степени преобладают.

Торфяные олиготрофные (верховые) почвы имеют большую мощность (> 50 см). Профиль почвы подразделяется на горизонты также по степени трансформации растительных остатков – OT-T1-T2. Процессы превращения и минерализации органического вещества в них заторможены, поэтому, несмотря на высокое со-

держание углерода, они малоплодородны и отличаются крайне низкими лесорастительными свойствами.

По побережью Белого моря распространены очень интересные засоленные маршевые почвы. Это почвы низких морских побережий, формирующиеся в условиях периодического затопления приливными и нагонными морскими водами под различной, преимущественно солеустойчивой растительностью. Маршевые почвы – синлитогенные образования, им присущи все черты молодых почв. Часто они слоисты, ведущими почвообразовательными процессами являются дерновый процесс, оторфовывание, оглеение. Специфическими почвообразовательными процессами, связанными с воздействием моря, являются засоление и сульфатредукция (образование пиритных почвенных горизонтов). Маршевым почвам свойственен широкий спектр гранулометрического состава почвообразующих пород – от глин до крупных песков и камней.

Основными факторами, определяющими направление почвообразовательного процесса на морских берегах, являются характер береговых наносов, рельеф и уклон поверхности берега и взморья, а также форма береговой линии [7]. Карельский берег Белого моря по типу расчленения относится к фьордово-шхерному типу, и переход к суше обычно представляет собой скалистые уступы. Южнее (Поморский берег) берега становятся более пологими, и море занимает большую приливно-отливную зону. В результате формируется более широкая зона распространения маршевых засоленных почв. В районе же скальных ландшафтов Карельского берега эти почвы, как правило, занимают узкую полосу (10–40 м).

Распространение этих почв зависит от наличия и характера мелкозема, источником которого являются размываемые морем озы и собственно морские отложения. На автоморфных позициях маршевые почвы можно разделить на маршевые примитивные и маршевые дерновые (в подчиненных позициях можно встретить маршевые болотные почвы). Маршевые примитивные почвы формируются в непосредственной близости к морю: во время больших приливов и нагонных ветров они на непродолжительное время заливаются морской водой. Эти почвы имеют очень простое морфологическое строение профиля – Ad-AC(C), что связано с условиями их формирования. Горизонты этих почв имеют близкую к нейтральной реакцию среды и невысокое содержание органического вещества: поступившие на поверхность почвы органические остатки, не откладываясь, вымываются обратно в море (табл. 2). Довольно высокая степень насыщенности основаниями связана с поступающими с морской водой солями.

Химические показатели маршевых почв

| Горизонт | pH | | P ₂ O ₅ | K | Na | ГК* | V** | C | N |
|------------------------------------|------------------|------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | H ₂ O | KCL | | | | | | | |
| Маршевая примитивная почва | | | | | | | | | |
| Ad | 6,56 | 6,14 | 70,9 | 68,9 | 83,9 | 8,6 | 28,0 | 5,2 | 0,29 |
| AC | 6,59 | 6,41 | 34,4 | 10,6 | 15,1 | 0,6 | 3,8 | 0,4 | 0,04 |
| Маршевая дерновая почва | | | | | | | | | |
| Ad | 6,0 | 5,11 | 57,8 | 93,9 | 70,8 | 30,4 | 67,3 | 31,3 | 2,20 |
| A1Bf | 6,50 | 4,92 | 39,4 | 7,1 | 8,2 | 1,4 | 5,0 | 0,5 | 0,08 |
| Маршевая дерновая переходная почва | | | | | | | | | |
| Ad | 5,91 | 4,55 | 42,1 | 60,7 | 42,2 | 28,2 | 27,5 | 20,8 | 1,18 |
| A1Bf | 7,14 | 6,54 | 50,3 | 16,1 | 15,6 | 0,7 | 5,4 | 0,1 | 0,04 |
| BfC | 6,04 | 4,54 | 67,0 | 8,4 | 8,0 | 2,8 | 7,2 | 0,6 | 0,06 |

Примечание. * – гидролитическая кислотность, ** – степень насыщенности основаниями.

Маршевые дерновые почвы формируются в лагунах или на участках пологого перехода от уреза воды к лесу. Развитие дернового процесса в этих местах связано с большим поступлением органики как с морскими выбросами («подушки» водорослей), так и за счет отмирающей злаковой растительности. Благодаря переувлажнению в маршевых дерновых почвах часто встречаются следы оглеения. Засоление этих почв происходит в основном с солеными грунтовыми водами, частично с заплеском морской воды во время сильных штормов. Реакция среды в горизонтах маршевых дерновых почв, так же как и у маршевых примитивных, нейтральная, однако в них увеличивается количество углерода и азота. Количество элементов питания высокое, по степени засоления они относятся к слабозасоленным.

В лагунах также развиваются маршевые торфянистые почвы, которые отличаются от своих незасоленных аналогов нейтральной или слабокислой реакцией среды.

При постепенном выходе почвы из режима «прилив – отлив» доминирующее значение приобретают зональные факторы почвообразования, воздействие которых выражается в выщелоченности, проявлении признаков подзолообразовательного процесса.

Засоление в маршевых почвах сульфатно-хлоридное, иногда на поверхности появляются солевые выцветы (табл. 2, 3). Оно связано не только с промыванием соленой морской водой, но и со специфическим поступлением растительных остатков (морских водорослей и солеустойчивой береговой растительности).

Засоленные почвы нехарактерны для борельной зоны, поэтому маршевые почвы уникальны для Карелии. Принято считать, что засоление почв является одним из самых неблагоприятных факторов и способствует деградации земель, од-

Анализ водной вытяжки из горизонтов маршевых почв

| Горизонт | Сухой остаток | Минеральный остаток | K ₂ O | Na ₂ O | Cl |
|------------------------------------|---------------|---------------------|------------------|-------------------|-------|
| | | | | | |
| Маршевая примитивная почва | | | | | |
| Ad | 0,94 | 0,08 | 30,7 | 21,3 | 105,8 |
| AC | 0,28 | 0,11 | 4,6 | 7,2 | 40,7 |
| Маршевая дерновая почва | | | | | |
| Ad | 1,11 | 0,25 | 66,0 | 11,3 | 96,2 |
| A1Bf | 0,67 | 0,14 | 9,2 | 56,8 | 139,2 |
| Маршевая дерновая переходная почва | | | | | |
| Ad | 1,31 | 0,17 | 48,4 | 12,3 | 63,6 |
| A1Bf | 0,77 | 0,19 | 18,8 | 80,7 | 246,4 |
| BfC | 0,39 | 0,16 | 4,6 | 41,8 | 116,1 |

нако засоленные марши представляют большой интерес с точки зрения богатого биологического разнообразия. Кроме того, биогеоценозы морских берегов чрезвычайно продуктивны, что особенно ценно в северных условиях сохранения многих местных редких видов растений и мигрирующих водных птиц. Последнее время засоленные марши привлекают особое внимание из-за их способности аккумулировать в индустриально развитых районах большое количество поллютантов. Очистка и восстановление территорий, занятых маршевыми почвами, очень трудоемки и экономически затратны. Маршевые почвы района исследования в настоящее время не загрязнены (табл. 4), и поэтому должны особо охраняться. Прямые и побочные результаты антропогенного воздействия все сильнее сказываются и на состоянии Белого моря – северного моря с замедленным процессом самоочищения, отчего почвенный покров его береговой зоны очень уязвим.

Содержание тяжелых металлов в маршевых почвах

| Горизонт | Определяемый элемент, мг/кг | | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------|-----|-----|-------|------|------|------|-----|------|
| | Ni | Cd | Mn | Fe | Cu | Cr | Pb | Co | Zn |
| Маршевая примитивная почва | | | | | | | | | |
| Ad | 7,6 | 0,3 | 171 | 1520 | 10,1 | 6,0 | 15,4 | 1,2 | 38,5 |
| AC | 8,6 | 0,2 | 118 | 13283 | 35,2 | 15,4 | 9,9 | 2,7 | 25,7 |
| Маршевая дерновая почва | | | | | | | | | |
| Ad | 6,2 | 0,6 | 545 | 2302 | 22,4 | 14,9 | 27,5 | 2,2 | 69,5 |
| A1Bf | 9,1 | 0,7 | 83 | 8918 | 44,1 | 21,8 | 17,1 | 2,7 | 32,4 |
| Маршевая дерновая переходная почва | | | | | | | | | |
| Ad | 3,2 | 0,2 | 72 | 1026 | 10,8 | 6,7 | 15,5 | 0,9 | 35,6 |
| A1Bf | 3,6 | 0,1 | 27 | 1579 | 11,1 | 6,9 | 5,9 | 1,6 | 30,3 |
| BfC | 3,0 | 0,2 | 21 | 3118 | 25,8 | 5,9 | 4,9 | 1,0 | 15,7 |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом структура почвенного покрова скальных ландшафтов очень проста – набор почв, формирующихся в данных условиях, очень ограничен. Плодородие, а соответственно, и лесорастительные свойства этих почв очень низки. В почвенном покрове данной территории преобладают маломощные почвы, которые даже при незначительном воздействии быстро деградируют в связи с особенностями природных условий. В настоящее время деградация в основном происходит за счет пожаров и ветровой эрозии.

Территория распространения скальных ландшафтов невелика по площади, но она считается «лицом» Карелии. При нарушении природных условий почвенный покров этих ландшафтов очень быстро деградирует. Зональные почвы вследствие небольшой мощности при механических повреждениях легко разрушаются и смываются с кристаллического фундамента, их естественное восстановление может затягиваться на неопределенно длительное время. Маршевые почвы быстро аккумулируют любые загрязняющие вещества, поэтому также подлежат особой охране.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 488 с.
2. Бахмет О. Н., Морозова Р. М. Почвенный покров // Разнообразие биоты Карелии: условия формирования, сообщества, виды. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2003. С. 29–31.
3. Волков А. Д., Громцев А. Н., Еруков Г. В. и др. Экосистемы ландшафтов запада северной тайги (структура, динамика). Петрозаводск, 1995. 194 с.
4. Громцев А. Н. Ландшафтная экология таежных лесов: теоретические и прикладные аспекты. Петрозаводск, 2000. 144 с.
5. Морозова Р. М. Лесные почвы Карелии. Л.: Наука, 1991. 184 с.
6. Морозова Р. М., Федоренко Н. Г. Земельные ресурсы Карелии и их охрана. Петрозаводск, 2004. 152 с.
7. Цейц М. А., Добрынин Д. В., Белозерова Е. А. Структурная организация почвенного и растительного покрова маршей Поморского берега Белого моря // Экологические функции почв Восточной Фенноскандии. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2000. С. 95–107.

Bakhmet O. N., Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

CHARACTERISTIC FEATURES OF RUPESTRIAN LANDSCAPE SOILS OF KARELIAN WHITE SEA COAST

The soil cover of Karelia is motley and patchy because of the broken relief and frequent alternation of the parent rock species. Both the composition of soils and their ratios differ in various districts of the republic. Rocky landscapes of the White Sea coast offer very specific conditions for soil formation. The soils formed in these landscapes are of particular interest. To study the territory in a comprehensive way soil sections were made across the most typical landscape elements, and the soil cover was described in detail (the soil morphological structure was described, soil samples were collected for chemical analysis). The surveys have demonstrated the prevalence of shallow soils – primitive, podburs, leptic podzols in the soil cover. They develop on a poor bedrock (granite gneiss and gneiss granite), therefore, their fertility is rather low. Developed over Quaternary deposits Podzols deposits typical for Karelia are rather uncommon for the landscapes in question. Regionally unique salt marsh soils occur along the White Sea coast. They deserve much attention due to their high biological diversity. Coastal coenosis is very productive, which is especially valuable in northern conditions for survival of many plant species. Salt marshes are also noteworthy for their capacity to massively accumulate pollutants in industrial regions. Marsh soils in the study area are not yet polluted and should, therefore, be protected.

Key words: rupestrian landscape, organic matter, soil, organoprofile, White Sea

REFERENCES

1. Arinushkina E. V. Manual for chemical analysis of soil [Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv]. M.: MSU. 1970. 488 p.
2. Bakhmet O. N., Morozova R. M. Soil cover [Pochvennyy pokrov]. *Raznoobrazie bioty Karelii: usloviya formirovaniya, soobshchestva i vidy* [Biotic diversity of Karelia: conditions of formation, communities and species]. Petrozavodsk, KarRC Publ., 2003. P. 29–31.
3. Volkov A. D., Gromtsev A. N., Erukov G. V. Landscapes' ecosystems in the west of north taiga (structure, dynamic) [Ekosistemy landshaftov zapada severnoy taiga (struktura, dinamika)]. Petrozavodsk, 1995. 194 p.
4. Gromtsev A. N. *Landshaftnaya ekologiya tayezhnykh lesov: teoreticheskie i prikladnye aspekty* [Landscape ecology of taiga forests: theoretic and applied aspects]. Petrozavodsk, 2000. 144 p.
5. Morozova R. M. *Lesnye pochvy Karelii* [Forest soils of Karelia]. Leningrad, Nauka Publ., 1991. 184 p.
6. Morozova R. M., Fedorets N. G. *Zemel'nye resursy Karelii i ikh okhrana* [Land resources of Karelia and their protection]. Petrozavodsk, 2004. 152 p.
7. Tseyts M. A., Dobrynin D. V., Belozerova E. A. Structural organization of soil and plant cover of marshes of Pomorsky coast of White Sea [Strukturnaya organizatsiya pochvennogo i rastitel'nogo pokrova marshey Pomorskogo berega Belogo morya]. *Ekologicheskie funktsii pochv Vostochnoy Fennoskandii* [Ecological functions of soils in Eastern Fennoscandia]. Petrozavodsk, 2000. P. 95–107.

Подписано в редакцию 09.07.2013

НИКОЛАЙ СТЕПАНОВИЧ МИНИН

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства и почвоведения лесотехнического института, Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова (Архангельск, Российская Федерация)
AndreyZaharov29@yandex.ru

АНДРЕЙ ЮРЬЕВИЧ ЗАХАРОВ

младший научный сотрудник, Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, аспирант, ассистент кафедры лесоводства и почвоведения лесотехнического института, Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова (Архангельск, Российская Федерация)
AndreyZaharov29@yandex.ru

**РОСТ СОСНЯКОВ ИСКУССТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ
ПОД ВЛИЯНИЕМ РУБОК УХОДА**

На стационарных объектах в средней подзоне тайги Европейского Севера определена эффективность рубок ухода в сосняках искусственного происхождения, созданных в 1961 году механизированным посевом по свежей гари. Проведено два приема рубок ухода, которыми сформировано четыре варианта опыта различной густоты. На основе проведенных исследований сделаны выводы, подтверждающие лесоводственную и хозяйственную эффективность рубок ухода в сосняках искусственного происхождения. Рекомендовано проводить первый лесоводственный прием рубок ухода в возрасте культур 10–15 лет с целью создания целевого состава и уменьшения заглушающего влияния мелколиственных пород. Очередной прием должен быть направлен на формирование оптимальной густоты. Наилучший рост перспективных деревьев достигается после проведения высокоинтенсивной рубки ухода с оставлением в 20-летнем возрасте общей густоты 1,5 тыс. деревьев на 1 га.

Ключевые слова: рубки ухода, лесные культуры сосны, густота насаждения, продуктивность, лесоводственно-хозяйственная эффективность

ВВЕДЕНИЕ

Основная причина потерь лесокультурного производства – зарастание их мелколиственными породами. В условиях таежной зоны Европейского Севера даже имеющие хорошую приживаемость культуры сосны и ели, как правило, уже в первое десятилетие превращаются в молодняки смешанного состава. Хвойные оказываются в подчиненном пологе. В результате рост культур замедляется, идет интенсивный отпад. Без своевременного проведения рубок ухода созданные культуры теряют хозяйственное значение и затраты на их создание оказываются неоправданными.

В культурах сосны при естественном развитии насаждений возможны необратимые устойчивые процессы их смены на лиственные. При общей высокой густоте и незначительном участии сосны (до 3–4 единиц) она вообще может не сохраниться, так как взаимоотношения древесных пород носят выраженный характер конкуренции, неблагоприятный для нормальной жизнедеятельности сосны.

Предотвратить такую смену, оптимизировать условия восстановления и роста хвойных как в естественных, так и в искусственных насаждениях можно только с помощью рубок ухода.

Исследования [5], [6], [9] показали, что состав искусственных сосновых молодняков определяется не только густотой, но и количеством лиственного молодняка. Регулирование состава за счет изменения густоты посева и посадки возможно в тех условиях, где береза и осина не обгоняют в росте сосну. Если лиственные породы преобладают в составе культур и характеризуются высокой энергией роста, преобладания сосны в составе древостоя можно добиться только рубками ухода.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Цель нашей работы – определить эффективность рубок ухода в сосняках искусственного происхождения на основе длительных исследований их роста и состояния на стационарных объектах (постоянных пробных площадях) в средней подзоне тайги Европейского Севера. Объекты заложены сотрудником Северного НИИ лесного хозяйства Н. С. Мининым (ныне доцент кафедры лесоводства и почвоведения САФУ) и располагаются в Обозерском лесничестве, Северном участковом лесничестве, квартале № 64.

Культуры сосны (*Pinus sylvestris*) созданы в 1961 году механизированным посевом (ПСТ-

2А) по свежей гари на площади 300 га, исходный тип леса черничный. К моменту закладки опытов в 1970 году в культурах наблюдались признаки угнетения сосны не только пологом мелколиственных пород (*Betula pendula*), но и в рядах. Средняя высота лиственных пород в 1,5–2,0 раза превышала высоту сосны. Густота насаждения достигала 14,3...15,4 тыс. шт./га, в том числе 10,0...11,7 тыс. деревьев сосны на 1 га.

В результате первого приема рубок ухода число стволов сосны во всех вариантах опытов было доведено до 6,5 тыс. на 1 га и устранено негативное влияние угнетения за счет выборки 70...80% мелколиственных пород и части сосны в рядах. При первом приеме решалась задача создания целевого состава, тогда как при втором – уход за формой стволов, крон и приростом хозяйственно ценных пород. Второй прием рубок ухода интенсивностью 30, 37 и 47% по запасу и 57, 63 и 73% по числу стволов соответственно проведен в возрасте 20 лет. В результате густота по вариантам составила 2,7 (вариант 12а); 2,3 (вариант 12б); 1,6 (вариант 12в) тыс. деревьев сосны на 1 га. В насаждениях варианта 12к-80 второй прием рубок ухода не проводился. На контрольном участке (12к-70), где ухода не проводились к 20-летнему возрасту, густота составила 7,3 тыс. деревьев сосны и 5,4 тыс. деревьев лиственных на 1 га (состав 6С4Б). Все варианты опыта проведены в одной повторности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты рубок ухода проанализированы нами на основе материалов семи учетов в период наблюдений 1970–2012 годов. Некоторые результаты опубликованы ранее [4], [8].

Динамика естественного отпада, представляющая интерес для оценки объективности влияния рубок ухода на рост и продуктивность культур, и динамика таксационных показателей по годам исследований представлены в табл. 1 и 2.

Проведенный второй прием рубок ухода в 20-летних культурах в течение первых пяти лет практически исключил отпад сосны. Позже отпад увеличился во всех вариантах рубок ухода. Однако наблюдается общая закономерность:

Таблица 1

Отпад деревьев сосны после рубок ухода (числитель – число стволов, шт./га, знаменатель – запас, м³/га)

| Вариант опыта | Возраст, лет | | | | Итого |
|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | 20...25 | 26...38 | 39...44 | 45...51 | |
| 12К-70 контроль | $\frac{737}{2}$ | $\frac{2070}{25}$ | $\frac{2020}{29}$ | $\frac{873}{26}$ | $\frac{5700}{82}$ |
| 12К-80 | $\frac{400}{1}$ | $\frac{2142}{16}$ | $\frac{1145}{20}$ | $\frac{813}{22}$ | $\frac{4500}{59}$ |
| 12а | $\frac{6}{0}$ | $\frac{461}{13}$ | $\frac{700}{18}$ | $\frac{233}{13}$ | $\frac{1400}{44}$ |
| 12б | $\frac{6}{0}$ | $\frac{300}{9}$ | $\frac{600}{14}$ | $\frac{294}{12}$ | $\frac{1200}{32}$ |
| 12в | $\frac{0}{0}$ | $\frac{70}{4}$ | $\frac{227}{13}$ | $\frac{203}{10}$ | $\frac{500}{27}$ |

по мере увеличения интенсивности разреживаний отпад уменьшается как по числу стволов, так и по запасу. На участке без рубок ухода за 30 последних лет отпад сосны по числу стволов составил 80%, а в культурах с одним приемом рубок ухода – 70%. Кульминация отпада по числу деревьев в насаждениях наблюдалась в возрасте 26...44 года. Общий запас естественного отпада в древостоях с рубками ухода за последние 30 лет в 2...3 раза меньше, чем без рубок ухода. Густота культур с рубками ухода и в варианте их естественного развития к 50-летнему возрасту имеет тенденцию к стабилизации.

Об изменении роста и состояния культур можно судить уже в первые годы после рубок ухода. Существенное значение имеет при этом густота культур и, как следствие, – изменение экологических факторов [3].

На протяжении 40 лет отличие по высоте и диаметру сосны (табл. 2) в вариантах с рубками ухода («механическое» увеличение) и контроля не только сохраняется, но и возрастает. Если в первые годы после уходов (через 10 лет) оно составляло по средним диаметрам 1,0...2,7 см, по высоте – 0,3...0,9 м, то через 42 года увеличилось соответственно до 1,2...4,9 см и 1,3...2,7 м за счет прироста стволов в результате рубок ухода. Наибольшие различия наблюдались в вариантах с двумя приемами рубок ухода.

Запасы сосны в вариантах с двумя приемами рубок ухода (12а, 12б, 12в) восстановились до уровня контрольного через 15...19 лет после разреживаний, и к возрасту 51 года различия с контролем составили 39...80 м³/га. На участке с одним приемом рубок ухода (вариант 12к-80) запас сосны на протяжении 40 лет оставался выше контрольного.

Данные последнего учета (2012 год) показывают, что наличные запасы сосны в контрольном варианте и варианте с одним приемом рубок ухода уменьшились на 18 и 22 м³/га по сравнению с данными учета 2005 года. Это произошло в результате возрастающего отрицательного влияния лиственных пород на рост сосны и увеличения темпов естественного изреживания.

Прирост по запасу за последние 32 года в вариантах с рубками ухода составил от 149 до 201 м³/га по сравнению с 102 м³/га на контроле (табл. 3). Ежегодный прирост по запасу составил от 4,6 до 6,5 м³/га (3,2 м³/га в контрольном варианте).

Длительные наблюдения показали, что посредством рубок ухода даже при меньшем в 2–3 раза числе стволов сосны по сравнению с контролем можно получить одинаковый и даже больший запас древесины. Это позволит вырастить древостой с выходом крупномерных сортиментов, что показывают данные средних объемов стволов.

Говоря о рубках ухода, нельзя игнорировать ценологическую роль березы, которая может быть положительной или отрицательной. При заклад-

Таблица 2

Динамика основных таксационных показателей сосны в лесных культурах, пройденных рубками ухода, по годам исследований

| Показатель | Год учета | Вариант опыта | | | | |
|---------------------------------|---------------------------|------------------|------------|------------|------------|------------|
| | | 12К-70 контроль | 12К-80 | 12а | 12б | 12в |
| Число стволов, тыс. шт./га | 1970 после ухода | 15,4 10,0 | 7,4 6,5 | 8,2 6,5 | 8,2 6,6 | 8,3 6,5 |
| | 1980 после ухода | 12,7 7,3 | 7,4 6,4 | 3,3 2,7 | 2,9 2,4 | 1,7 1,6 |
| | 1984 | 12,1 6,6 | 7,2 6,2 | 3,3 2,7 | 2,9 2,4 | 1,7 1,6 |
| | 1993 | 9,3 4,3 | 4,8 3,9 | 2,8 2,3 | 2,5 2,0 | 1,6 1,4 |
| | 1999 | 5,4 2,9 | 4,6 3,5 | 2,5 2,0 | 2,3 1,8 | 1,6 1,4 |
| | 2005 | 5,2 2,7 | 4,6 3,4 | 2,0 1,5 | 1,9 1,4 | 1,4 1,2 |
| | 2012 | 2,9 1,6 | 2,3 1,9 | 1,7 1,3 | 1,5 1,2 | 1,2 1,1 |
| | Средний диаметр сосны, см | 1970 после ухода | 1,3 | 1,4 | 1,4 | 1,3 |
| 1980 после ухода | | 5,0 | 6,0 | 7,0 | 6,8 | 7,7 |
| 1984 | | 6,1 | 7,0 | 8,3 | 8,4 | 9,5 |
| 1993 | | 8,1 | 8,7 | 10,3 | 10,4 | 12,0 |
| 1999 | | 9,5 | 10,3 | 11,4 | 11,8 | 13,7 |
| 2005 | | 10,7 | 11,4 | 13,8 | 14,1 | 15,6 |
| 2012 | | 12,4 | 13,6 | 15,1 | 15,2 | 17,3 |
| Средняя высота сосны, м | 1970 после ухода | 2,7 | 2,9 | 2,8 | 2,7 | 2,8 |
| | 1980 после ухода | 5,3 | 5,6 | 6,0 | 5,9 | 6,2 |
| | 1984 | 7,2 | 7,3 | 7,7 | 7,5 | 7,9 |
| | 1993 | 10,3 | 10,3 | 10,6 | 10,5 | 11,4 |
| | 1999 | 12,5 | 13,0 | 12,7 | 12,8 | 13,7 |
| | 2005 | 13,7 | 15,0 | 15,0 | 15,1 | 15,6 |
| | 2012 | 15,2 | 16,5 | 16,6 | 17,1 | 17,9 |
| Запас сосны, м ³ /га | 1970 после ухода | 48 | 66 | 57 | 52 | 55 |
| | 1980 после ухода | 48 | 66 | 40 | 33 | 29 |
| | 1984 | 81 | 102 | 67 | 57 | 52 |
| | 1993 | 100 | 130 | 121 | 95 | 96 |
| | 1999 | 131 | 193 | 142 | 131 | 143 |
| | 2005 | 168 | 247 | 165 | 168 | 181 |
| | 2012 | 150 | 225 | 189 | 183 | 230 |

Примечание. Числитель – общее количество деревьев, знаменатель – число деревьев сосны.

ке опытов в междурядьях сосны было оставлено от 0,9 до 1,8 тыс. стволов березы. При повторных приемах рубок ухода – от 0,1 до 0,6 тыс. стволов березы, которые не мешали дальнейшему росту сосны, что благоприятно сказалось на межвидовых отношениях.

Таблица 3

Прирост основных таксационных показателей древостоев сосны в лесных культурах, пройденных рубками ухода за период (1980–2012 годы)

| Вариант опыта | Средний диаметр | | Средняя высота | | Запас | | Средний объем ствола | |
|-----------------|-----------------|--------------------|----------------|------------------|--------------------|--------------------|----------------------|------------------|
| | см | Процент к контролю | м | Процент контроля | м ³ /га | Процент к контролю | м ³ | Процент контроля |
| 12К-70 контроль | 7,4 | 100 | 9,9 | 100 | 102 | 100 | 0,086 | 100 |
| 12К-80 | 7,6 | 102 | 109 | 110 | 159 | 156 | 0,108 | 125 |
| 12а | 8,1 | 109 | 106 | 103 | 149 | 149 | 0,013 | 151 |
| 12б | 8,4 | 113 | 11,2 | 113 | 156 | 153 | 0,143 | 166 |
| 12в | 9,6 | 130 | 11,7 | 118 | 201 | 197 | 0,192 | 223 |

К 10-летнему возрасту культур на контрольном участке густота березовой части достигла 5,4 тыс. шт./га (средний диаметр – 1,6 м, средняя высота – 3,6 м), а к 2012 году березовая часть древостоя составила 1,3 тыс. шт./га (средний диаметр – 13,4 м, средняя высота – 16,0 м, запас – 80 м³/га). Таким образом, шел интенсивный отпад не только деревьев сосны, но и в березовой части культур. Береза при совместном произрастании с сосной и значительной доле в запасе древостоя служит сильным конкурентом сосны как в надземной, так и подземной среде.

Продуктивность культур сосны проанализирована нами после проведения второго приема рубок ухода (табл. 4). За общую продуктивность лесных культур принимали конечный наличный запас, количество удаленной древесины в процессе проведения рубок ухода и отпад за рассматриваемый период. Общая продуктивность культур (сосновая и лиственная части) в контрольном варианте на 4...22% выше по сравнению с пробными площадями с рубками ухода, в основном за счет отпада и наличия в запасе березы. На участках с рубками ухода сосновая часть по запасу древостоя превышает контрольный вариант на 3...22%. В варианте 12в с исходной выборкой 47% по запасу отмечена наибольшая продуктивность сосны, что обеспечивает целевое выращивание культур и их хозяйственную значимость.

Оценку результатов разреживаний можно также получить на примере анализа динамики роста 800 лучших деревьев на 1 га, которые к возрасту спелости должны сформировать древостой [1], [7].

Лучшие деревья отобраны при закладке опытов в каждом варианте с учетом количественных и качественных показателей, в течение 32 лет проводились регулярные наблюдения за их ростом. Результаты исследований за 19-летний период нами приведены ранее [4].

Проведенные в 2012 году исследования (табл. 5) показали, что на площадях, где были проведены рубки ухода, все показатели роста

Таблица 4
 Продуктивность культур сосны
 после рубок ухода (м³/га)

| Вариант опыта | Вырублено | Отпад | Запас растущего древостоя | Общая продуктивность |
|---------------|-----------------|-----------------|---------------------------|----------------------|
| 12К-70 | – | $\frac{99}{82}$ | $\frac{230}{150}$ | $\frac{329}{232}$ |
| 12К-80 | – | $\frac{67}{59}$ | $\frac{250}{225}$ | $\frac{317}{284}$ |
| 12а | $\frac{19}{17}$ | $\frac{44}{44}$ | $\frac{197}{183}$ | $\frac{260}{244}$ |
| 12б | $\frac{24}{19}$ | $\frac{32}{32}$ | $\frac{200}{189}$ | $\frac{256}{240}$ |
| 12в | $\frac{29}{26}$ | $\frac{27}{27}$ | $\frac{233}{230}$ | $\frac{289}{283}$ |

Примечание. В числителе данные древостоя в целом, в знаменателе – для сосны.

совокупности 800 лучших деревьев на 1 га превосходят таковые на контроле. В 51-летних культурах, формирующихся под влиянием двух приемов рубок ухода, доля участия 800 лучших деревьев на 1 га в общем запасе почти одинакова (84...86%) и выше, чем в контроле (57%). Следовательно, при рубках ухода в раннем возрасте можно отобрать необходимое число лучших деревьев, которые в основном составят будущее спелое насаждение.

ВЫВОДЫ

1. На вырубках европейской тайги молодняки искусственного происхождения формируются со значительной долей в составе мелколиственных пород, которые являются сильными конкурентами в произрастании культур хвойных. Без своевременного проведения рубок ухода культуры, созданные даже с соблюдением всех правил агротехники, теряют свое хозяйственное значение и затраты на их производство оказываются неоправданными. Особенно это актуально для культур, созданных в богатых условиях местопроизрастания.

2. Высокая энергия роста культур сосны в молодом возрасте способствует как наиболее быстрому увеличению запаса, так и наиболее быстрому его восстановлению после рубок ухода. Поэтому снижение густоты древостоя для получения максимальных диаметров сосны без снижения величины запаса древесины может быть осуществлено в этот период. Первый лесоводственный прием рубок ухода следует проводить в возрасте культур 10...15 лет, его главная цель – создание целевого состава и уменьшение заглушающего влияния мелколиственных пород.

При большой исходной густоте (6...7 тыс. деревьев на 1 га) рубки ухода должны быть более интенсивными, с уменьшением числа деревьев в несколько раз.

3. Рубки ухода следует проводить регулярно, опережая естественный отпад. В таежной зоне период повторяемости рубок ухода должен составлять 20–25 лет, а интенсивность должна быть высокой, особенно при уходе в молодняках, достигая выборки лиственных пород 70...80%.

4. Рубки ухода обеспечивают благоприятные условия для роста и развития совокупности лучших деревьев, которые к возрасту спелости должны сформировать древостой. Это позволяет создавать насаждения оптимального состава и густоты, обеспечивающие лучшие показатели роста по диаметру, запасу и объему. Наилучший рост перспективных деревьев достигается после проведения высокоинтенсивной рубки ухода с оставлением в 20-летнем возрасте общей густоты 1,5 тыс. деревьев на 1 га.

5. Высокоинтенсивные рубки ухода в лесных культурах сосны, зарастающих мелколиственной примесью, эффективны, повышают продуктивность сосняков искусственного происхождения и их лесоводственно-хозяйственное значение.

Таблица 5
 Характеристика роста 800 лучших деревьев (на 1 га) в культурах сосны,
 пройденных рубками ухода, за 32 года наблюдений

| Вариант опыта | Средний диаметр по годам, см | | Прирост по диаметру, см | Средняя высота по годам, м | | Прирост по высоте, м | Запас по годам, м ³ /га | | Прирост по запасу, м ³ /га | Процент от запаса всего древостоя, 2012 год |
|-----------------|------------------------------|----------|-------------------------|----------------------------|----------|----------------------|------------------------------------|----------|---------------------------------------|---|
| | 1980 год | 2012 год | | 1980 год | 2012 год | | 1980 год | 2012 год | | |
| 12К-70 контроль | 8,2 | 15,2 | $\frac{7,0}{85}$ | 6,3 | 15,2 | $\frac{8,9}{141}$ | 17 | 85 | $\frac{68}{400}$ | 57 |
| 12К-80 | 9,0 | 16,8 | $\frac{7,8}{87}$ | 6,6 | 16,5 | $\frac{9,9}{150}$ | 20 | 148 | $\frac{128}{640}$ | 66 |
| 12а | 9,0 | 17,7 | $\frac{8,7}{97}$ | 6,5 | 16,4 | $\frac{9,9}{152}$ | 20 | 164 | $\frac{144}{720}$ | 86 |
| 12б | 8,6 | 17,6 | $\frac{9,0}{105}$ | 6,3 | 17,1 | $\frac{10,8}{171}$ | 18 | 161 | $\frac{143}{794}$ | 85 |
| 12в | 8,8 | 18,8 | $\frac{10,0}{114}$ | 6,6 | 17,9 | $\frac{11,6}{176}$ | 20 | 193 | $\frac{173}{865}$ | 84 |

Примечание. В знаменателе – процент прироста к показателям 1980 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов А. Н., Величко Я. М. Рост молодняков сосны после разреживания // Восстановление и мелиорация лесов Карелии. Л., 1982. С. 83–88.
2. Минин Н. С. Влияние рубок ухода на микроклимат в сосняках искусственного происхождения в условиях таежной зоны Севера // Проблемы лесовыращивания на Европейском Севере. Архангельск: РИО АГТУ, 1999. С. 59–63.
3. Минин Н. С. Рост и формирование сосняков искусственного происхождения под воздействием рубок ухода в средней подзоне тайги // Экологические проблемы Севера: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 5. Архангельск: РИО АГТУ, 2002. С. 53–55.
4. Минин Н. С. Динамика роста лучших деревьев в сосняках искусственного происхождения под влиянием рубок ухода // Известия вузов. Лесной журнал. 2003. № 4. С. 25–30.
5. Паутов Ю. А. Состояние, рост и особенность формирования культур сосны в Коми АССР: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Л., 1984. 18 с.
6. Пигарев Ф. Т. Лесоводственное значение густоты культур сосны на Европейском Севере: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Л., 1973. 22 с.
7. Прокопьев М. Н. Воспроизводство сосновых лесов южной и средней подзон европейской тайги; Автореф. дис. ... д-ра. с.-х. наук. Л., 1984. 38 с.
8. Чибисов Г. А., Минин Н. С. Рубки ухода в сосновых культурах на Европейском Севере // Лесное хозяйство. 1988. № 6. С. 14–17.
9. Юдинцова Л. Г. Рост и формирование искусственных насаждений сосны в черничниковых и брусничниковых типах леса Ленинградской области: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Л., 1970. 21 с.

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

Zakharov A. Yu., Northern Research Institute of Forestry, Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov (Arkhangelsk, Russian Federation)

GROWTH OF ARTIFICIAL PINE FORESTS UNDER INFLUENCE OF THINNING

Efficiency of thinning in pine forest plantations on stationary objects in the middle taiga subzone of European North was determined. The studies were conducted in pine forest plantations created in 1961 by mechanized sowing of fresh burning. Two methods of thinning were implemented. Four variants of plantations with a various number of trees per ha were developed. Silvicultural and economic efficiency of thinning in pine forests plantations was confirmed by the results of our research. It is recommended to implement the first method of silvicultural thinning in pine forest cultures after they reach the age of 10–15 years. It helps to create a desired composition and to reduce the muffling effect of small-leaved species. The next method should be directed at optimum density development. The best growth of perspective trees is achieved after high-intensity thinning with general density of 1,5 thousand trees per 1 ha, leaving trees of 20 years old.

Key words: thinning, pine forest cultures, number of trees, productivity, silviculture and economic efficiency of thinning

REFERENCES

1. Kuznetsov A. N., Velichko Ya. M. The growth of young growth of pine after thinning [Rost molodnyakov sosny posle razrezhivaniya]. *Vosstanovlenie i melioratsiya lesov Karelii* [Reforestation and melioration forests of Karelia]. Leningrad, 1982. P. 83–88.
2. Minin N. S. Influence of thinning on microclimate in pine forests of artificial origin in conditions of taiga zone of the North [Vliyaniye rubok ukhoda na mikroklimat v sosnyakh iskusstvennogo proiskhozhdeniya v usloviyakh taezhnoy zony Severa]. Arkhangelsk, ASTU Publ., 1999. P. 59–63.
3. Minin N. S. Growth and formation of artificial pine stands under the influence of thinning in the middle taiga subzone [Rost i formirovaniye sosnyakov iskusstvennogo proiskhozhdeniya pod vliyaniem rubok ukhoda v sredney podzone taygi]. *Ekologicheskie problemy Severa: Mezhevuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Ecological problem of the North: collected scientific papers]. Is. 5. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2002. P. 53–55.
4. Minin N. S. The growth dynamics of the best trees in the pine forests of artificial origin under the influence of thinning [Dinamika rosta luchshikh derev'ev v sosnyakh iskusstvennogo proiskhozhdeniya pod vliyaniem rubok ukhoda]. *Lesnoy zhurnal* [Forest Journal]. 2003. № 4. P. 25–30.
5. Pautov Yu. A. *Sostoyaniye, rost i osobennost' formirovaniya kul'tur sosny v Komi ASSR. Avtoref. dis. kand. s.-kh. nauk* [Condition, growth and peculiarity forming of pine forests of artificial origin in Komi ASSR. Cand. agricultural sci. diss.]. Leningrad, 1984. 18 p.
6. Pigarev F. T. *Lesovodstvennoe znachenie gustomy kul'tur sosny na Evropeyskom Severe. Avtoref. dis. kand. s.-kh. nauk.* [Silviculture significance density of pine forests of artificial origin on European North. Cand. agricultural sci. diss.]. Leningrad, 1973. 22 p.
7. Prokop'ev M. N. *Vosproizvodstvo sosnovykh lesov yuzhnoy i sredney podzon evropeyskoy taygi. Avtoref. dis. dokt. s.-kh. nauk* [Reproduction of pine forests in south and middle taiga subzone. Dr. agricultural sci. diss.]. Leningrad, 1984. 38 p.
8. Chibisov G. A., Minin N. S. Thinning of pine forests in European North. [Rubki ukhoda v sosnyakh kul'turakh na Evropeyskom Severe]. *Lesnoe khozyaystvo* [Forest Management]. 1988. № 6. P. 14–17.
9. Yudinsova L. G. *Rost i formirovaniye iskusstvennykh nasazhdeniy sosny v chernichnikovyykh i brusnichnikovyykh tipakh lesa Leningradskoy oblasti. Avtoref. dis. kand. s.-kh. nauk* [The growth and forming of the pine forests of artificial origin in bilberry and cowberry type of forest in Leningrad Region. abstract of a thesis candidate of agricultural sciences. Cand. agricultural sci. diss.]. Leningrad, 1970. 21 p.

Поступила в редакцию 15.05.2013

СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ КАРПЕНКО

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем прочности и качества в строительстве, Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (Москва, Российская Федерация)
niisf_lab9@mail.ru

АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ПЕТРОВ

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой архитектуры, строительных конструкций и геотехники строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
petr@psu.karelia.ru

АННА ВЛАДИМИРОВНА ЕВСЕЕВА

инженер кафедры архитектуры, строительных конструкций и геотехники строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
evseevaanna@list.ru

ДИАГРАММЫ-ИЗОХРОНЫ ВЫСОКОПРОЧНОГО МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕТОНА*

Решение задач длительного деформирования железобетонных конструкций с применением нелинейных теорий ползучести сопряжено со значительными математическими трудностями. Целью исследования является разработка диаграммного подхода к расчету железобетонных конструкций на длительные нагрузки. В рамках общего подхода к описанию полной диаграммы деформирования бетона, сделанного Н. И. Карпенко, предложены эмпирические зависимости по описанию диаграмм-изохрон высокопрочного модифицированного бетона при длительном нагружении. Показано хорошее соответствие экспериментальных и теоретических данных. Полученные зависимости рекомендуются в качестве расчетного аппарата при проектировании железобетонных конструкций.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, ползучесть, высокопрочный модифицированный бетон, длительное нагружение, диаграммы-изохроны

Экспериментальные исследования по изучению свойств высокопрочных бетонов, модифицированных на органоминеральной основе, проведенные в последние годы Н. И. Карпенко, С. С. Каприеловым, И. М. Безгодовым, Е. Н. Кузнецовым, А. А. Андриановым, Д. С. Ромкиным и другими, подтвердили установленные ранее закономерности нелинейной ползучести бетона: инвариантность быстроснатекающих деформаций относительно возраста бетона в момент нагружения и противоречие принципу наложения воздействий. Эти обстоятельства создают существенные трудности при решении задач ползучести на базе общих нелинейных теорий, в частности двухкомпонентной модели [1]. Указанных противоречий при решении задач длительного деформирования можно избежать, если использовать так называемый диаграммный подход с представлением диаграмм деформирования бетона в виде диаграмм-изохрон.

Диаграммой-изохроной деформирования бетона называется кривая в координатах деформации-напряжения, все точки которой достигаются за равный промежуток времени – время нагружения. В общем случае при построении диаграмм-изохрон различают три условных ре-

жима нагружения: при действии постоянных напряжений, при линейном росте напряжений и при линейном росте деформаций. Поведение бетона при действии постоянных напряжений изучено наиболее полно, однако в реальных конструкциях такой режим практически не встречается. Второй режим существенно ближе к условиям реального нагружения, но сложен технически при проведении экспериментов. Последний режим нагружения, технически наиболее сложный, позволяет получить исчерпывающие данные о деформативных свойствах материала и выйти на нисходящую ветвь диаграммы деформирования.

Если длительность действия нагрузки не превышает одних суток, диаграммы-изохроны всех трех режимов практически совпадают с диаграммой кратковременного нагружения. В дальнейшем, с увеличением времени нагружения, зависимость диаграммы-изохроны от режима изменения напряжений становится более существенной, однако после примерно 100 суток нагружения эта разница практически исчерпывается. Учитывая практическую направленность задачи, предлагаемые в настоящей работе зависимости предполагают постоянство дейст-

вующих напряжений в течение всего времени нагружения, при этом теоретически допускается возможность работы бетона на нисходящей ветви диаграммы.

Связь между напряжениями и относительными деформациями бетона, выраженная через коэффициент секущего модуля, в наиболее общем виде предложена Н. И. Карпенко [2]. Для диаграмм-изохрон эта зависимость приобретает вид

$$\varepsilon_b(t, \tau) = \frac{\sigma_b(\tau)}{E_b(t, \tau)v_b(t - \tau)}, \quad (1)$$

где t – текущее время, τ – возраст бетона в момент нагружения, $(t - \tau)$ – время нагружения.

Коэффициент секущего модуля определяется по формуле

$$v_b(t - \tau) = \hat{v}_b(t, \tau) \pm [v_0 - \hat{v}_b(t, \tau)] \sqrt{1 - \omega_1(t, \tau)\zeta - \omega_2(t, \tau)\eta^2}, \quad (2)$$

где $\eta = \sigma_b(\tau) / R_b(t, \tau)$ – уровень напряжений в момент времени t .

Знак «плюс» соответствует восходящей, а «минус» – нисходящей ветви диаграммы-изохроны. Кроме этого, требуется соблюдение очевидного равенства

$$\varpi_1(t, \tau) + \varpi_2(t, \tau) = 1.$$

Коэффициент секущего модуля в вершине диаграммы-изохроны

$$\hat{v}_b(t, \tau) = R_b(t, \tau) / E_b(t, \tau)\varepsilon_{b0}(t, \tau), \quad (3)$$

где $\varepsilon_{b0}(t, \tau)$ – абсцисса вершины.

Ордината вершины диаграммы-изохроны определяется по эмпирической формуле, учитывающей экспериментально установленное снижение прочности бетона в условиях длительного нагружения

$$R_b(t, \tau) = [k + (1 - k)\phi(t - \tau)]R_b(\tau), \quad (4)$$

где k – коэффициент, отражающий экспериментально установленные пределы снижения прочности бетона при длительном нагружении и изменяющийся от 0,9 до 0,75. При практическом проектировании рекомендуется принимать $k = 0,85$; $\phi(t - \tau)$ – эмпирическая функция.

Анализ экспериментальных данных показал, что в диапазоне изменения времени нагружения от 1 мин и практически до бесконечности функция $\phi(t - \tau)$ может быть аппроксимирована простой зависимостью, линейной относительно логарифма времени нагружения

$$\phi(t - \tau) = 1,46 - 0,122 \ln(t - \tau), \quad (5)$$

где $(t - \tau)$ – время нагружения в минутах.

На функцию (5) накладывается ограничение $\phi(t - \tau) \leq 1$.

В условиях длительного нагружения полные деформации бетона складываются из двух составляющих – линейно-упругой и нелинейной. Линейно-упругая незначительно снижается в соответствии со снижением $R_b(t, \tau)$, а нелинейная нарастает в результате ползучести бетона. Приращение нелинейной составляющей существенно превосходит соответствующее снижение линейно-упругой во всех практически важных для расчета случаях (нарушение этого соотношения возможно только при очень высоких скоростях нагружения). Такой характер деформирования позволяет предложить для описания роста абсциссы вершины диаграммы-изохроны простую зависимость, аналогичную (4):

$$\varepsilon_{b0}(t, \tau) = \varepsilon_{b0}(\tau)\psi(t - \tau), \quad (6)$$

$$\text{где } \psi(t - \tau) = 0,76 + 0,059 \ln(t - \tau). \quad (7)$$

Параметры формулы (2), определяющие форму ветвей диаграммы-изохроны, также выражаются через функции, линейные относительно логарифма времени нагружения: для восходящей ветви

$$\varpi_1(t, \tau) = \left[1,25 - 0,1 \frac{R_b(t, \tau)}{R_0} \right] [0,67 + 0,081 \ln(t - \tau)] \leq 2, \quad (8)$$

для нисходящей ветви

$$\varpi_1(t, \tau) = \left[0,35 + 0,22 \frac{R_b(t, \tau)}{R_0} \right] [1,2 + 0,048 \ln(t - \tau)] \leq 2, \quad (9)$$

где $R_0 = 9,8$ МПа.

Зависимости (1)–(9) использованы для построения диаграмм-изохрон высокопрочного модифицированного бетона, реологические свойства которого были экспериментально исследованы в лаборатории проблем прочности и качества в строительстве НИИСФ РААСН. Для изготовления образцов-призм $100 \times 100 \times 400$ мм использовалась бетонная смесь с содержанием цемента 497 кг / куб. м и водоцементным отношением 0,128. Содержание песка и щебня двух фракций составило 707 и 1000 кг / куб. м соответственно. Бетонная смесь модифицировалась введением добавки МБ 10–30С в количестве 109 кг / куб. м. Гидроизолированные образцы-близнецы из бетона одного замеса в возрасте

Физико-механические характеристики бетона

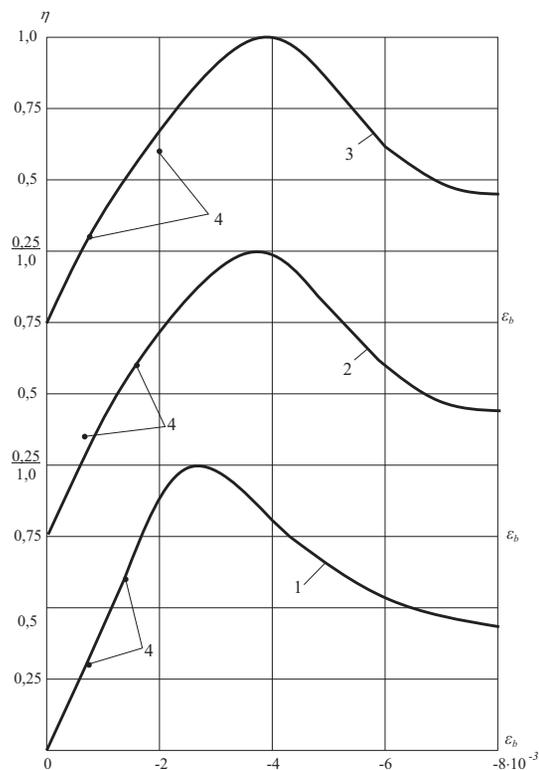
| Параметр | \bar{R} , МПа | \bar{R}_b , МПа | B^* , МПа | R_{bn^*} , МПа | E_b , МПа | $\varepsilon_{b0} \cdot 10^3$ |
|---------------------|-----------------|-------------------|-------------|------------------|-------------|-------------------------------|
| По данным [3] | 120 | 90 | 94 | – | 46 670 | $2,54 \cdot 10^{-3}$ |
| По СП 63.13330.2012 | – | – | 94 | 70 | 42 750 | $2,60 \cdot 10^{-3}$ |

Примечание. * – расчетное значение при коэффициенте вариации 0,135.

28 сут. после определения призмочной прочности были загружены длительной нагрузкой при двух уровнях напряжений 0,3 и 0,6 от призмочной прочности. Прочностные и деформативные характеристики бетона приведены в таблице.

На рисунке показаны расчетно-экспериментальные, по зависимостям (1)–(9), диаграммы-изохроны для трех режимов загрузки: 1 – при $t - \tau = 60$ мин, 2 – при $t - \tau = 100$ сут. и 3 – при $t - \tau = 360$ сут. Опытные точки 4 получены путем суммирования линейно-упругих деформаций и деформаций ползучести по данным [3]. Для бетона проектируемых конструкций расчетные диаграммы-изохроны могут быть построены по зависимостям (1)–(9) с использованием нормативных данных СП 63.13330.2012, которые приведены в таблице. В координатах $\varepsilon - \eta$ эти диаграммы практически совпадают с кривыми, полученными расчетно-экспериментальным путем.

Соотношение теоретических и опытных данных показывает, что диаграммы-изохроны, построенные по предлагаемым зависимостям, с достаточной для практических расчетов точностью описывают действительный нелинейный характер деформирования высокопрочного бетона и могут быть рекомендованы в качестве расчетного аппарата при проектировании железобетонных конструкций.



Расчетные диаграммы-изохроны

* 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. Г а л у с т о в К. З. Развитие нелинейной теории ползучести бетона и расчет железобетонных конструкций. М.: Изд-во физико-математической литературы, 2006. 248 с.
2. К а р п е н к о Н. И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
3. К а р п е н к о Н. И., Каприелов С. С., Ромкин Д. С., Безгоднов И. М., Андрианов А. А. Результаты исследования физико-механических и реологических характеристик высокопрочного бетона // Известия ОрелГТУ. 2009. Вып. № 1/21 (553). С. 39–54.

Karpenko S. N., Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Moscow, Russian Federation)
Petrov A. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Evseeva A. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

DIAGRAMS-ISOCHRONES OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE

The solution of the problem of the long-term deformation of reinforced concrete structures with application of nonlinear theories is connected with considerable mathematical difficulties. The research objective is to work out a diagram approach instrumental in calculation of reinforced concrete structures able to bear permanently acting load. Within the limits of the general approach to the description of the full deformation diagram for concrete, made by N. I. Karpenko, empirical dependences based on the description of high performance concrete diagrams-isochrones are offered. A strong correlation between theoretical and experimental data is presented. The received dependences are recommended as calculation vectors in designing reinforced concrete structures.

Key words: reinforced concrete structures, creep, high performance concrete, long-term loading, diagrams-isochrones

REFERENCES

1. Galustov K. Z. *Razvitie nelineynoy teorii polzuchesti betona i raschet zhelezobetonnykh konstruksiy* [The development of nonlinear theory of creep concrete and reinforcement of concrete structures, Moscow, Physical and mathematical literature Publ., 2006. 248 p.
2. Karpenko N. I. *Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona* [General models of reinforced concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1996. 416 p.
3. Karpenko N. I., Kaprielov S. S., Romkin D. S., Bezgodov I. M., Andrianov A. A. The results of investigation of mechanical and reological properties of high strength concrete [Rezultaty issledovaniya fiziko-mekhanicheskikh i reologicheskikh kharakteristik vysokoprochnogo betona]. *Proceedings of OreIGTU*. 2009. Is. 1/21 (553). P. 39–54.

Поступила в редакцию 30.05.2013

АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ ПИТУХИН

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

СЕРГЕЙ БОРИСОВИЧ ВАСИЛЬЕВ

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой целлюлозно-бумажных и деревообрабатывающих производств лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
servas@psu.karelia.ru

ГЕННАДИЙ НИКОЛАЕВИЧ КОЛЕСНИКОВ

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

НИКОЛАЙ ГЕННАДЬЕВИЧ ПАНОВ

кандидат технических наук, преподаватель кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
tmir@psu.karelia.ru

ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ КОПАРЕВ

аспирант кафедры целлюлозно-бумажных и деревообрабатывающих производств лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
cbd@psu.karelia.ru

**МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ ДРЕВЕСНОСТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ
ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО ПЛАСТИ***

Древесностружечные плиты (ДСтП) состоят из измельченной древесины. Для консолидации частиц используются фенолформальдегидные или другие менее токсичные смолы. Многими исследователями были изучены вопросы прочности ДСтП в зависимости от плотности материала плиты, от состава клеевых композиций и других факторов. Однако влияние гранулометрического состава измельченной древесины, используемой для изготовления ДСтП, при растяжении перпендикулярно пласти остается недостаточно изученным. Существует проблема прогнозирования сравнительной прочности ДСтП в зависимости от распределения крупности частиц. В данной статье предложена методика сравнительной оценки прочности ДСтП при растяжении перпендикулярно пласти в зависимости от гранулометрического состава древесных частиц. Материал ДСтП моделируется как набор частиц в форме эллипсоидов. Сила материала определяется как сила связи в точках контакта эллипсоидов. Предложен критерий сравнительной прочности древесностружечных плит в зависимости от гранулометрического состава. Модель и критерий не противоречат экспериментальным данным. По результатам исследования подтверждена возможность использования низкосортной древесины для изготовления ДСтП. Возместить недостаток прочности низкосортной древесины можно путем увеличения доли мелких частиц в материале плиты.

Ключевые слова: измельченная древесина, гранулометрический состав, прочность при растяжении перпендикулярно пласти

Древесностружечные плиты, как известно, состоят из частиц измельченной древесины, консолидированных с помощью связующего, в качестве которого используют фенолформальдегидные или менее токсичные смолы [1], [9]. К настоящему времени исследованы возможности совершенствования технологии ДСтП [8], соотношение плотности и прочности [7], влияние модификаторов клеевого раствора [3], [4], [6] и другие аспекты [5], [11]. К недостаточно

изученным относятся задачи о влиянии фракционного состава частиц измельченной древесины, используемой для изготовления ДСтП, на их прочностные свойства. Из всего комплекса появляющихся в этой связи вопросов в данной статье рассматривается методика сравнительной оценки прочности ДСтП при растяжении перпендикулярно пласти. Стандартные методы определения предела прочности базируются на механических испытаниях образцов ДСтП [2], [10].



Рис. 1. Фрагменты плиты после разрушения

Однако остается актуальной задача прогнозирования прочности плит в зависимости от гранулометрического состава измельченной древесины.

Гранулометрический состав измельченной древесины, очевидно, влияет на структуру материала плиты, которая, в свою очередь, определяет прочность при разрушении. Чтобы повысить прочность плиты, в частности при использовании измельченной низкачественной древесины, используют модификаторы стружечно-клеевых композиций [3]. Получаемые при этом результаты не всегда подтверждают эффективность модификации. На это обстоятельство обращается внимание в статье [6], в которой сформулировано предположение о том, что прочность ДСтП на основе модифицированной стружечно-клеевой композиции зависит от структуры материала плиты: если материал имеет четко выраженную гетерогенную структуру, то его прочность меньше по сравнению с материалом, имеющим квазигомогенную структуру. Для проверки этого предположения и получения количественных оценок необходима соответствующая математическая модель разрушения. Обратимся к интерпретации выполненных экспериментов [6].

Два фрагмента плиты, разрушенной в экспериментах при растяжении перпендикулярно пласти по стандартной методике [2], представлены на рис. 1.

Предположим, что все частицы имеют форму эллипсоидов с полуосями a , b , c (рис. 1–3). Рассмотрим возможный механизм контактного взаимодействия двух условных слоев древесных частиц, которые разделены поверхностью разрушения плиты. Эти два слоя в поперечном сечении плиты схематично показаны на рис. 3. В сечении плиты на рис. 3 каждая частица одного слоя имеет в предполагаемой поверхности разрушения две точки контакта с частицами дру-

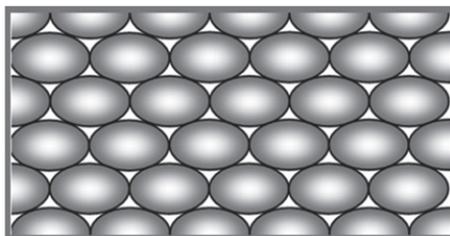


Рис. 2. Модель фрагмента плиты до разрушения

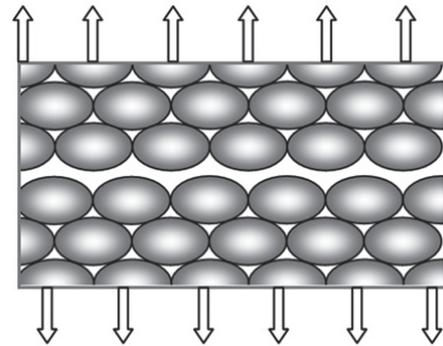


Рис. 3. Модель разрушенного фрагмента

го слоя. Это двухмерный случай. В рассматриваемом далее трехмерном случае каждая частица будет иметь в предполагаемой поверхности разрушения как минимум три точки контакта с частицами другого слоя.

Пусть n – количество частиц одного слоя, контактирующих в точках предполагаемой поверхности разрушения с частицами другого слоя. Тогда в трехмерном случае минимальное число контактов в указанной поверхности $N_k = 3n$.

Рассмотрим некоторый фрагмент плиты площадью A , в котором количество частиц одного слоя по рис. 3 равно n . Пусть A_1 – площадь проекции одной частицы на срединную плоскость плиты, причем $A_1 \ll A$. Тогда в трехмерном случае площадь проекции всех частиц одного слоя по рис. 4 равна nA_1 . Примем во внимание пустоты между частицами и введем в рассмотрение безразмерный коэффициент заполнения p , который по своему геометрическому смыслу принимает значения $0 < p < 1$. Приближенно коэффициент заполнения p можно определить следующим образом. Пусть проекции всех частиц имеют форму эллипса с полуосями a и b . Тогда площадь проекции одной частицы $A_1 = \pi ab$. Предположим далее, что проекция каждой частицы вписана в прямоугольник со сторонами $2a$ и $2b$. Тогда

$$p = \pi ab / 4ab = 0,785. \quad (1)$$

Приближенно считаем, что значения коэффициента заполнения p одинаковы как для прямоугольника, так и для всей площади A .

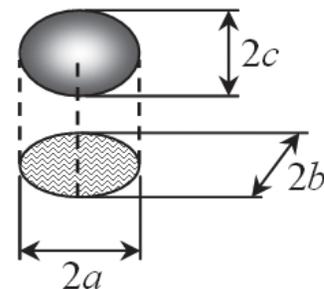


Рис. 4. Проекция модельной частицы на горизонтальную плоскость

По геометрическому смыслу задачи

$$pA = nA_1. \quad (2)$$

Тогда число частиц в одном слое по рис. 3

$$n = pA/A_1, \quad (3)$$

а минимальное число контактов этих частиц

$$N_k = 3n = 3pA/A_1. \quad (4)$$

С учетом равенства (1) перепишем формулу (4), учитывая, что $A_1 = \pi ab$:

$$N_k = 3 \cdot 0,785A / \pi ab = 0,75A / ab. \quad (5)$$

Очевидно, чем больше количество контактов частиц одного слоя, соприкасающихся в точках предполагаемой поверхности разрушения с частицами другого слоя (рис. 3), тем больше прочность плиты. Эта закономерность следует из формулы (5).

Формула (5) получена в предположении, что объем исследуемой плиты существенно превышает объем наиболее крупной древесной частицы. Это означает, что величина A в формуле (5) должна быть достаточно большой. Пусть $A = 100 \text{ мм}^2$.

Формула (5) получена в предположении, что все частицы одинаковы. Однако используемые для изготовления плит древесные частицы неодинаковы по своим размерам. При этом для крупных частиц количество контактов меньше, чем для мелких. В целом суммарное количество контактов в плоскости разрушения можно рассматривать как параметр прочности при растяжении перпендикулярно пласти плиты.

Можно прогнозировать, что поверхность разрушения пройдет через окрестности тех областей в объеме плиты, в которых число контактов минимально. Такой прогноз будет приближенным, поскольку предполагает, что прочность всех контактов одинакова.

Предлагаемый параметр прочности плиты обозначим как R . Пусть C_i – массовая доля (концентрация) частиц фракции i , $N_k^{(i)}$ – количество контактов частиц данной фракции по формуле (7), m – количество фракций. Тогда

$$R = \sum_{i=1}^m C_i N_k^{(i)}. \quad (6)$$

Оценка прочности в виде (6) является приближенной и не позволяет составить представление о прочности отдельно взятой плиты. Однако параметр (6) может быть рекомендован для сравнительной оценки прочности двух и более плит.

Формула (5) получена для дискретного случая, когда количество фракций равно m . Размеры же стружки являются непрерывными величинами. Введем коэффициент α , определяющий соотношение осей эллипсоида $\alpha = a/b$, тогда число контактов с учетом (5)

$$N_k = 0,75A / \alpha a^2. \quad (7)$$

Пусть $f(a)$ – плотность распределения длины древесной частицы a . Тогда $C_i = \int_{a_{i-1}}^{a_i} f(a) da \approx f(a_i) \Delta a$, где $\Delta a = a_i - a_{i-1}$, или $\Delta a = (a_{\max} - a_{\min})/m$, a_{\min} и a_{\max} – наименьший и наибольший размеры стружки соответственно. Если $\Delta a \rightarrow 0 (m \rightarrow \infty)$, то

$$R = \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} N_k(a, \alpha) f(a) da. \quad (8)$$

С учетом (7) при $\alpha = \text{const}$ получим:

$$R = 0,75 \frac{A}{\alpha} \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} \frac{f(a)}{a^2} da. \quad (9)$$

Выражения (7) и (9) показывают, что с уменьшением размеров частиц количество контактов между ними увеличивается. Это приводит к повышению прочности.

Рассмотрим применение формулы (9) для сравнительной оценки прочности среднего и наружных слоев древесно-стружечной плит, экспериментально исследованных в работе [6].

В табл. 1 и 2 приведены данные [6] о фракционном составе древесных частиц, использованных для изготовления среднего и наружных слоев ДСтП, а также результаты вычислений по (5) и (9). Сравнивая показатели прочности материала среднего (874) и наружного (6459) слоя плиты, можно прогнозировать, что закономерно разрушится средний слой. Этот прогноз подтвержден экспериментами [3], [4], [6].

Важно подчеркнуть, что предлагаемый показатель прочности (9) вычисляется в расчете на единицу площади и пригоден только для сравнительной оценки прочности плит. На необходимость сравнительной оценки прочности плит в зависимости от качества измельченной древесины указывается в ряде работ, например в [8]. В статье [5] показана актуальность исследова-

Таблица 1
Влияние фракций древесных частиц на прочность среднего слоя плиты

| Номер фракции, i | $2a$, мм | $2b$, мм | N_k при $A = 100 \text{ мм}^2$ | Массовая доля (%) и концентрация частиц (в скобках) | Вклад фракции i в прочность R | Относительный вклад фракции i в прочность плиты (%) |
|--------------------|-----------|-----------|----------------------------------|---|-----------------------------------|---|
| 1 | 5 | 3,5 | 17,2 | 24,9 (0,249) | 4,3 | 0,5 |
| 2 | 3,15 | 2,1 | 45,2 | 17,3 (0,173) | 7,8 | 0,9 |
| 3 | 2 | 1,1 | 34,1 | 29,8 (0,298) | 10,2 | 1,2 |
| 4 | 1 | 0,6 | 500 | 21,9 (0,219) | 109,5 | 12,5 |
| 5 | 0,5 | 0,3 | 2000 | 4,1 (0,041) | 82,0 | 9,4 |
| 6 | 0,2 | 0,1 | 15 000 | 1,2 (0,012) | 180,0 | 20,6 |
| 7 | 0,1 | 0,05 | 60 000 | 0,8 (0,008) | 480,0 | 54,9 |
| Итого | | | | 100 (1) | 874 | 100 |

Таблица 2
Влияние фракций древесных частиц на прочность наружного слоя плиты

| Номер фракции, <i>i</i> | 2 <i>a</i> , мм | 2 <i>b</i> , мм | <i>N_k</i> при <i>A</i> = 100 мм ² | Массовая доля (%) и концентрация частиц (в скобках) | Вклад фракции <i>i</i> в прочность <i>R</i> | Относительный вклад фракции <i>i</i> в прочность плиты (%) |
|-------------------------|-----------------|-----------------|---|---|---|--|
| 1 | 5 | 3,5 | 17,2 | 0 | 0,0 | 0,0 |
| 2 | 3,15 | 2,1 | 45,2 | 0 | 0,0 | 0,0 |
| 3 | 2 | 1,1 | 34,1 | 0,2 (0,002) | 0,07 | 0,0 |
| 4 | 1 | 0,6 | 500 | 12,5 (0,125) | 62,5 | 1,0 |
| 5 | 0,5 | 0,3 | 2000 | 44,4 (0,444) | 888 | 13,7 |
| 6 | 0,2 | 0,1 | 15 000 | 32,6 (0,326) | 4890 | 75,7 |
| 7 | 0,1 | 0,05 | 60 000 | 10,3 (0,103) | 618 | 9,6 |
| Итого | | | | 100 (1) | 6459 | 100 |

ний по совершенствованию технологии производства ДСтП и обосновывается необходимость расширения номенклатуры сырьевой базы за счет рационального использования низкокачественной древесины и обоснования составов стружечно-клеевых композиций [1]. Однако для достижения этой цели необходимы методики прогнозирования прочности плит в зависимости от фракционного состава измельченной древесины. Один из возможных критериев прочности в виде (9) предложен в данной работе. Вычисления могут быть выполнены в табличной форме с применением стандартных инструментов Microsoft Office Excel, по аналогии с приведенными выше табл. 1 и 2.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 10632–2007. Плиты древесностружечные. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2007. 10 с.
- ГОСТ 10636–88. Плиты древесностружечные. Методы определения предела прочности при растяжении перпендикулярно пласти плиты. М.: Изд-во стандартов, 1990. 6 с.
- Панов Н. Г., Питухин А. В., Рожков С. С., Цветков В. Е., Санаев В. Г., Фирюлина О. В. Древесностружечные плиты на основе карбамидоформальдегидной смолы, модифицированной наноразмерным шунгитом // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2012. № 2. С. 135–138.
- Панов Н. Г., Рожков С. С., Питухин А. В. Повышение водостойкости трехслойных древесно-стружечных плит на основе карбамидоформальдегидной смолы при введении наноразмерного шунгитового наполнителя в связующее // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2011. № 8 (121). С. 88–91.
- Плотникова Г. П., Денисов С. В. Оптимизация технологических параметров в производстве древесностружечных плит на основе маломольных смол с использованием стружки из отходов некондиционной древесины // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2010. № 8. С. 10–14.
- Питухин А. В., Панов Н. Г., Колесников Г. Н., Васильев С. Б. Влияние добавки нанопорошка шунгита в клеевой раствор для изготовления трехслойных древесностружечных плит на их физико-механические свойства // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4 [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.science-education.ru/104–6886
- Разиньков Е. М. Обоснование возможности получения древесно-стружечных плит пониженной плотности // Лесотехнический журнал. 2011. № 4. С. 55–59.
- Разиньков Е. М., Ищенко Т. Л. Разработка режимов охлаждения древесностружечных плит на основе малотоксичных смол // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 76. С. 433–442.
- Чубинский А. Н., Брутян К. Г. Формирование древесно-стружечных плит пониженной токсичности // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2009. Вып. 186. С. 156–162.
- EN 319. «Particleboards and fibreboards – determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board» / Austrian Standards Institute. Vienna, 1993.
- Veigel S., Rathke J., Weigl M., Gindl-Altmutter W. Particle Board and Oriented Strand Board Prepared with Nanocellulose-Reinforced Adhesive // Journal of Nanomaterials. Vol. 2012. Available at: http://www.hindawi.com/journals/jnm/2012/158503/

Результаты сравнительной оценки прочности ДСтП в зависимости от фракционного состава с использованием предложенного критерия подтверждают сформулированное в работе [6] предположение о том, что если материал имеет четко выраженную гетерогенную структуру, то его прочность при растяжении перпендикулярно пласти меньше по сравнению с материалом, имеющим квазигомогенную структуру.

Влияние фракционного состава древесных частиц на прочность ДСтП при изгибе предполагается определить в дальнейших исследованиях. Итоги выполненного исследования дают основания для следующих выводов.

1. С применением экспериментальных данных предложена и обоснована методика сравнительной оценки прочности ДСтП при растяжении перпендикулярно пласти плиты. Методика может быть рекомендована для прогнозирования влияния фракционного состава частиц измельченной древесины на прочность плит.

2. В качестве материала для ДСтП можно использовать низкокачественную древесину. При этом компенсировать относительно небольшое сопротивление частиц измельченной низкокачественной древесины можно за счет увеличения доли мелких частиц, а для прогнозирования прочности плит в зависимости от фракционного состава измельченной древесины использовать предложенный критерий.

3. Установлено, что вклад наиболее крупных частиц в прочность плиты при растяжении перпендикулярно пласти существенно меньше вклада мелких частиц.

Pitukhin A. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Vasil'ev S. B., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Kolesnikov G. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Panov N. G., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Koparev V. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

PARTICLEBOARDS' DESTRUCTION MODEL IN TENSILE STRENGTH PERPENDICULAR TO SAWN WOOD FACE

Particle boards (PB), as it is known, consist of chopped wood. Phenol-formaldehyde or other less toxic resins are used for consolidation of the particles. Numerous researchers studied the problem of the particle boards' strength in correlation with their density, adhesive components, and other factors. Though the influence of the particle size composition and distribution when manufacturing particle boards at tensile strength perpendicular to the sawn wood face remains insufficiently investigated. The problem of forecasting comparative strength of PBs in correlation with the size distribution of the particles persists. The work provides a methodology for comparative assessment of PBs strength in tension perpendicular to the sawn wood face. PBs material is modeled as a set of particles in the form of ellipsoids. The strength of material is determined as the strength of the bond at the contact points of ellipsoids. The destruction model of PB, as well as the criterion for determining comparative strength of the particle boards depending on the particle size distribution are proposed. This model and the criterion are consistent with experimental data. Based on the results of the study it was concluded that the use of the low-grade wood for PBs manufacture is admissible. The strength deficiency of the low-grade wood can be compensated by the increase of the fine particles' quality.

Key words: chopped wood; particle size distribution; durability at stretching perpendicular to sawn wood face

REFERENCES

1. GOST 10632–2007. *Plity drevesnostruzhechnye. Tekhnicheskie usloviya* [Wood-chipboards. Specification]. Moscow, Izd-vo standartov, 2007. 10 p.
2. GOST 10636–88. *Metody opredeleniya predela prochnosti pri rastyazhenii perpendikulyarno plasti plity* [Wood-chipboards. Plity drevesnostruzhechnye. Detection methods of ultimate resistance under perpendicular traction of chipboard's battens]. Moscow, Izd-vo standartov, 1990. 6 p.
3. Panov N. G., Pitukhin A. B., Rozhkov S. S., Tsvetkov V. E., Sanaev V. G., Firyulina O. V. *Drevesno-struzhechnye plity na osnove karbamidoformal'degidnoy smoly, modifitsirovannoy nanorazmernym shungitom* [Wood-chipboards based on amino-formaldehyde resin modified by nano-sized shungite]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forest messenger MSFU]. 2012. № 2 (85). P. 135–139.
4. Panov N. G., Rozhkov S. S., Pitukhin A. V. *Waterproofing of triplex wood-chipboards based on amino-formaldehyde resin by injection of nano-sized shungite in coupler* [Povysheniye vodostoykosti trekhsloynnykh drevesno-struzhechnykh plit na osnove karbamidoformal'degidnoy smoly pri vvedenii nanorazmernogo shungitovogo napolnitelya v svyazuyushchee]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"*. Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences. 2011. № 8 (121). P. 85–88.
5. Plotnikova G. P., Denisov S. V. *Optimization of technological parameters in production of wood-shaving plates on the basis of low-molar pitches with using spills from waste of sub-standard wood* [Optimizatsiya tekhnologicheskikh parametrov v proizvodstve drevesnostruzhechnykh plit na osnove malomol'nykh smol s ispol'zovaniem struzhki iz otkhodov nekonditsionnoy drevesiny]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2010. № 8. P. 10–14.
6. Pitukhin A. V., Panov N. G., Kolesnikov G. N., Vasil'ev S. B. *Influence of nano-sized shungite additive in adhesive solution for producing triplex wood-chipboards on mechanical-and-physical properties* [Vliyanie dobavki nanoporoshka shungita v kleevoy rastvor dlya izgotovleniya trekhsloynnykh drevesno-struzhechnykh plit na ikh fiziko-mekhanicheskie svoystva]. *Sovremennye problemny nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2012. № 4. Available at: <http://www.science-education.ru/104-6886>
7. Razin'kov E. M. *Justification of possibility of receiving wood-shaving plates of the lowered density* [Obosnovanie vozmozhnosti polucheniya drevesno-struzhechnykh plit ponizhennoy plotnosti]. *Lesotekhnicheskiy zhurnal*. 2011. № 4. P. 55–59.
8. Razin'kov E. M., Ishchenko T. L. *Elaboration of the regimes of cooling of shaving boards made from small-toxic resins* [Razrabotka rezhimov okhlazhdeniya drevesnostruzhechnykh plit na osnove malotoksichnykh smol]. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2012. № 76. P. 433–442.
9. Chubinskiy A. N., Brutyan K. G. *Formation of wood-chipboards with hypotoxicity* [Formirovaniye drevesno-struzhechnykh plit ponizhennoy toksichnosti]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [News of Saint-Petersburg forest engineering academy]. 2009. Is. 186. P. 156–163.
10. EN 319. "Particleboards and fiberboards – determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board" / Austrian Standards Institute, Vienna, 1993.
11. Veigel S., Rathke J., Weigl M., Gindl-Altmatter W. *Particle Board and Oriented Strand Board Prepared with Nanocellulose-Reinforced Adhesive* // *Journal of Nanomaterials*. Vol. 2012. Available at: <http://www.hindawi.com/journals/jnm/2012/158503/>

Поступила в редакцию 20.06.2013

АРТЕМ ВИКТОРОВИЧ СКАБИН

аспирант кафедры теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
artb00g@gmail.com

АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ РОГОВ

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
rogov@psu.karelia.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПОЗНАВАНИЯ СИМВОЛОВ*

Описывается математическая модель распознавания символов при расшифровке исторических рукописных стенограмм. В качестве объекта исследования взяты исторические стенограммы XIX века. Приводится описание математической модели, основанной на Байесовском подходе. Описывается метод оценки точности распознавания символа и алгоритм решения трудозатратной задачи построения матриц большой размерности для вычисления оценки вероятности вхождения фрагмента в текст. Приводятся результаты оценки точности распознавания для обучающей выборки и оценки вероятности появления пяти наиболее встречающихся в тексте слов. Описывается алгоритм для реализации предложенной математической модели в информационной системе для распознавания исторических рукописных документов.

Ключевые слова: математическая модель, распознавание символа, рукописные документы, Байесовский подход

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание при введении в научный оборот рукописных документов уделяется их оцифровке, которая подразумевает не только сканирование или фотографирование, но и перевод на машинный язык. Существует большое количество программ для оцифровки документов, но часть из них работает только с печатным текстом либо же в системе реального времени. В данной статье рассматривается математическая модель распознавания рукописных стенографических символов, в качестве начальных данных используются стенографические записи Анны Григорьевны Сниткиной, обучавшейся по учебнику Ольхина [3]. Данная модель будет использована в создаваемой информационной системе по расшифровке исторических стенограмм.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПОЗНАВАНИЯ СИМВОЛА

Обозначим через x_1, \dots, x_n последовательность стенографических символов. К сожалению, очень часто стенографические символы определяются неоднозначно. Для символа x_k обозначим через $x_1^k, \dots, x_{m_k}^k$ множество его возможных распознаваний. Каждому распознанному символу определяются его возможные трактовки $y_1^{k_1}, \dots, y_{m_k}^{k_1}$. Тогда распознанный текст примет вид $y_{j_1}^{i_1}, \dots, y_{j_n}^{i_n}$. Ставится задача найти такой набор индексов, чтобы вероятность правильного распознавания была максимальной.

$$P(y_{j_1}^{i_1} \dots y_{j_n}^{i_n}) = \max P(y_{j_1}^{i_1} \dots y_{j_n}^{i_n}),$$
 где максимум берется по всем $1 \leq i_1 \leq l_1, 1 \leq j_1 \leq m_{i_1}, \dots, 1 \leq i_n \leq l_n, 1 \leq j_n \leq m_{i_n}$. Оценим вероятность $P(y_{j_1}^{i_1} \dots y_{j_n}^{i_n})$.

На основании формулы Байеса она равна

$$P(y_{j_1}^{i_1} \dots y_{j_n}^{i_n}) = P(y_{j_1}^{i_1}) \dots P\left(y_{j_n}^{i_n} \left| y_{j_1}^{i_1} \dots y_{j_{n-1}}^{i_{n-1}} \right.\right). \quad (1)$$

Оценка k -го ($k > 3$) сомножителя в правой части формулы (1) имеет вид:

$$P\left(y_{j_k}^{i_k} \left| y_{j_1}^{i_1} \dots y_{j_{k-1}}^{i_{k-1}} \right.\right) = aP(x_{i_k}^k) + \quad (2)$$

$$+ (1-a)P\left(y_{j_k}^{i_k} \left| y_{j_{k-3}}^{i_{k-3}} \dots y_{j_{k-1}}^{i_{k-1}} \right.\right).$$

Оценка k -го сомножителя при $k \leq 3$ производится аналогично. Коэффициент a настраивается в зависимости от качества распознавания стенограммы.

ОЦЕНКА ПЕРВОГО СЛАГАЕМОГО МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Первое слагаемое в правой части формулы (2) характеризует точность распознавания стенографического символа. Оно вычисляется как:

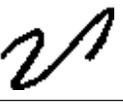
$$P(x_{i_k}^k) = e^{-\alpha_i P(x_{i_k}^k, y_i^{i_k})^{\beta_i}}, \quad (3)$$

где $P(x_k^i, y_i)$ – это расстояние от текущего символа до эталона y_i класса символов. Для каждого класса находим $\rho_{\text{точ}}^i$ – минимальное расстояние от эталона класса до элементов из другого класса и $\rho_{\text{пол}}^i$ – максимальное расстояние от эталона класса до элементов класса. На наших данных оказалось, что $\rho_{\text{точ}}^i < \rho_{\text{пол}}^i$. Параметры формулы (3) подбираются как решение следующей системы:

$$\begin{cases} \frac{2}{3} = e^{-\alpha_i} (\rho_{\text{точ}}^i)^{\beta_i} \\ \frac{1}{3} = e^{-\alpha_i} (\rho_{\text{пол}}^i)^{\beta_i} \end{cases}$$

В табл. 1 представлены результаты поиска расстояний для обучающей выборки.

Таблица 1
Расчет коэффициентов для символов обучающей выборки

| Символ | | | α | β |
|--|-----|------|----------|----------|
|  | 400 | 1200 | 0,001766 | 0,907297 |
|  | 400 | 1000 | 0,00059 | 1,08782 |
|  | 500 | 1000 | 0,000053 | 1,4380 |

ОЦЕНКА ВТОРОГО СЛАГАЕМОГО МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Второе слагаемое математической модели (2) является вероятностью появления данного фрагмента в тексте. Она оценивается как

$$P\left(y_{j_k}^{k_i} \mid y_{j_{k-3}}^{(k-3)j_{k-3}} \dots y_{j_{k-1}}^{(k-1)j_{k-1}}\right) = \frac{N\left(y_{j_{k-3}}^{(k-3)j_{k-3}} \dots y_{j_k}^{k_i}\right)}{N\left(y_{j_{k-3}}^{(k-3)j_{k-3}} \dots y_{j_{k-1}}^{(k-1)j_{k-1}}\right) + 1} \quad (4)$$

где $N\left(y_{j_{k-3}}^{(k-3)j_{k-3}} \dots y_{j_k}^{k_i}\right)$ – частота появления фрагмента текста $y_{j_{k-3}}^{(k-3)j_{k-3}} \dots y_{j_k}^{k_i}$. Данные числовые характеристики вычисляются на основе аналогичных произведений, а лучше принадлежащих одному автору. Приведем пример вычисления вероятности на основании произведений Ф. М. Достоевского. Для вычисления было использовано 28 произведений общим количеством слов более 80 тысяч.

Для вычисления оценки вероятности (4) строились пятерки слов $y_{j_{k-5}}^{(k-5)j_{k-5}} \dots y_{j_k}^{k_i}$, так как они дают более точное указание авторства, нежели пары или тройки. Для вычисления таких вероятностей необходимо было построить

матрицы вероятностей встречи данного слова после всех возможных четверок слов в данных произведениях. Учитывая, что общее количество слов порядка 80 тысяч, оценок значений вероятностей включения данных четверки и пятерки в тексте будет порядка 512 триллионов. Однако, несмотря на то что большое количество из всех возможных пятерок слов не встречаются в тексте и матрица пятерок будет сильно разреженной, ее хранение и построение довольно трудозатратно.

Для построения данной матрицы использовался следующий алгоритм:

1. Пронумеровать все слова, используемые в тексте, так, чтобы они получили следующие координаты: идентификатор текста, в котором встречается данное слово, порядковый номер предложения в тексте, содержащего данное слово, и порядковый номер слова в данном предложении. В нашем случае была использована база знаний Smalt [2], в которой данная операция была произведена раньше.

2. Далее строятся всевозможные пятерки слов $N\left(y_{j_{k-3}}^{(k-3)j_{k-3}} \dots y_{j_k}^{k_i}\right)$ с таким условием, что у слов в данном словосочетании равны идентификаторы текста и предложения, а порядковые номера в словосочетании идут по возрастанию.

3. Из полученных пятерок выбираются уникальные и высчитывается количество включения их в текст. В 28 рассматриваемых произведениях из 80 тысяч слов было составлено порядка 69 тысяч уникальных пятерок слов.

4. Для тех пятерок, которые не были построены, можно считать, что вероятность включения их в текст равна 0.

Этот алгоритм обладает хорошей скоростью построения данных матриц, и позволяет избежать избыточности данных, вызванной сильной разреженностью матриц. В табл. 2 приведены оценки вероятности наиболее часто встречающихся пятерок слов в текстах автора.

Таблица 2
Частота и вероятность появления пятерок слов

| Пятерка слов | Частота появления | Оценка вероятности |
|--|-------------------|--------------------|
| Не смотря на то что | 11 | 0,8461 |
| Ни съ того ни съ | 3 | 0,75 |
| Корпорація студентовъ какъ особое званіе | 2 | 0,66 |
| Теплѣй челоуѣчеству нежели отъ словѣ | 2 | 0,66 |
| Этихъ ошибокъ этихъ примѣровъ всякаго | 2 | 0,66 |

РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Разрабатываемая информационная среда для дешифровки исторических стенограмм будет предлагать различные варианты распознавания текста. Более подробно о разрабатываемой системе и ее отдельных модулях говорится в работах [1], [4], [5]. После того как пользователь системы выделил символы, система разбила их на строки, выделив надстрочные и подстрочные символы, происходит расшифровка стенограммы согласно следующему алгоритму.

1. Обозначим символ, подвергаемый дешифровке, через S_i . Процесс дешифровки происходит со строкой, в которой находится текущий символ, слева направо, то есть все символы левее искомого уже дешифрованы. Обозначим как l длину строки, в которой находится искомый символ.

2. Пусть k – количество символов левее искомого в рассматриваемой строке. Если $k < 5$, то при расшифровке используется группа символов из k . Иначе рассматриваются пятерки слов.

3. Обозначим $y_i^1, y_i^2, \dots, y_i^j$ – возможные расшифровки символа S_i . Исходя из всех возможных комбинаций расшифровок $\{y_{l-k}^{j1}, y_{l-k+1}^{j2}, \dots, y_l^{jk}\}$ вероятность появления данного фрагмента в тексте рассчитывается по формуле (4).

4. Используя все вероятности, полученные в пункте 3, и оценки вероятностей, полученных в пункте 9, находим максимальную вероятность правильной расшифровки по формуле (2), умножив при этом второе слагаемое на вероятность того, к какому типу (основной, подстрочный, надстрочный) относится данный символ.

5. Пользователю предлагаются различные варианты дешифровки символа, упорядоченные по убыванию оценки вероятности их появления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разрабатываемая информационная система по дешифровке стенограмм в данный момент проходит опытную проверку. После ее завершения будет разработан интернет-ресурс.

* 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. Гиппиев М. Б., Жуков А. В., Рогов А. А., Скабин А. В. Распознавание строк в стенографических документах // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 5 (49).
2. Котов А. А., Некрасов М. Ю., Седов А. В., Рогов А. А. Информационная система для создания размеченных корпусов малой размерности // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки»*. 2012. № 8 (129). Т. 1. С. 108–112.
3. Ольхин П. Руководство к русской стенографии. СПб.: Тип. доктора М. Хана, 1866. 187 с.
4. Рогов А. А., Скабин А. В., Штеркель И. А. Автоматизированная информационная система распознавания исторических рукописных документов // *Информационная среда ВУЗА XXI века*. Куопио, 2012.
5. Скабин А. В., Рогов А. А. Бинаризация и выделение символов исторической стенограммы // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки»*. 2013. № 4 (133). С. 110–115.

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

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

MATHEMATICAL MODEL OF CHARACTER RECOGNITION

This article describes a mathematical model of character recognition for interpretation of historical handwritten documents. Historical shorthand records of the XIX century are taken as objects. The article describes a mathematical model based on the Bayesian approach. A method for estimating the accuracy of character recognition, algorithm solutions, and labor-intensive task of building high dimensional matrices to calculate the estimates of the probability of entering fragments in to the test is described. The results of estimating the accuracy of recognition for the training sample and estimating the probability of occurrence of the five most frequently used words in the test are given. An algorithm to implement the proposed mathematical model of the information system for the recognition of handwritten historical documents is described.

Key words: mathematical model, character recognition, handwritten documents, the Bayesian approach

REFERENCES

1. Gippiyev M. B., Zhukov A. V., Rogov A. A., Skabin A. V. Recognition of lines in the historical handwritten documents [Распознавание строк в стенографических документах]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2013. № 5 (49).
2. Kotov A. A., Nekrasov M. Yu., Sedov A. V., Rogov A. A. Information system for marked small dimension corpus' development [Informatsionnaya sistema dlya sozdaniya razmechennykh korpusov maloy razmernosti]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennyye i tekhnicheskkiye nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2012. № 8 (129). Vol. 1. P. 108–112.
3. Ol'khin P. *Rukovodstvo k russkoy stenografii* [Guide to the Russian shorthand]. St. Petersburg, Tip. doktora M. Khana, 1866.
4. Rogov A. A., Skabin A. V., Shterkel' I. A. The automated information system of recognition of handwritten historical documents [Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema raspoznavaniya istoricheskikh rukopisnykh dokumentov]. *Informatsionnaya sreda VUZA XXI veka*. Kuopio, 2012.
5. Skabin A. V., Rogov A. A. Binarization and isolation of historical manuscripts' symbols [Binarizatsiya i vydelenie simvolov istoricheskoy stenogrammy]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennyye i tekhnicheskkiye nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2013. № 4 (133). P. 110–115.

Поступила в редакцию 16.07.2013

ЕЛЕНА ПАВЛОВНА БОРМАТОВА

кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
bormat@psu.karelia.ru

МАКСИМ ПАВЛОВИЧ ДАВЫДОВ

магистрант математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
mdbon@mail.ru

ONE-DIMENSIONAL GOVERNING EQUATIONS FOR THE CREEP UNDER HYDROGEN DIFFUSION FLOW

Saturation with hydrogen of some metals, in particular α -iron, directly in the loading process can cause a great increase of their deformation response. The study is aimed at the macroscopic description of the phenomenon. The constructed governing equations are based on the concept of the equation of state with internal parameters. The modeled experiment lies in the saturation of a cylindrical specimen with hydrogen from the electrolyte, loaded torque. The analysis of both the literature and the experimental data justified the applicability of the linear boundary conditions of the first and third kinds. This made it possible to use the analytical solutions in the form of Fourier series of Bessel functions for the classical diffusion equation. It turned out that the scatter of the diffusivity, reported by different authors, can result in a significantly different interpretation of the experiments. For the most common value of D of the order $10^{-9}\text{m}^2\text{s}^{-1}$, the calculated time for the complete saturation of the specimen was approximately a few minutes, which diverged from the characteristic times of the experiment. The explanation could have been either a lower value of the diffusivity, or the presence of the so-called "traps". Including into the model the limited capacity traps with the irreversible capture has also enabled us to explain the presence of a noticeable incubation period. From the time dependences of the concentration and its derivatives, the authors concluded that the hydrogen concentration should be the first to be considered as the parameter of the state. For this end, in the creep power law the stress exponent was kept constant but the creep coefficient was assumed to be dependent on the hydrogen concentration as well as on the accumulated plastic strain. The latter dependence was justified by the gradual strain rate deceleration for the loading below the macroscopic yield stress. The numerical results have demonstrated the principal possibility of the macroscopic modeling of the deformation synergistic effects under hydrogen absorption.

Key words: Creep, Diffusion of Hydrogen, Diffusivity, Governing Equations, Synergy Effects, α -Iron

INTRODUCTION

Simulation of the interaction of hydrogen with metals is an important issue in view of the prospects of hydrogen power engineering. There are many studies related to the consequences of undesirable but often unavoidable presence of hydrogen in metals. But it is also known that the high diffusivity of hydrogen atoms in certain transition metals can lead to devastating consequences directly in the process of the hydrogen saturation of loaded metal. Hence it is important to predict the mechanical behavior and assess a lifetime of the constructions under combined effect of stresses and hydrogen flux. For these calculations, the governing equations of the mechanics of solids are necessary to describe the stress-strain state of metal under this type of loading. The study is the first step towards a macroscopic modeling of loaded metals deformational behavior under the effect of hydrogen diffusion flux.

The experiments carried out since the 60-s of the last century have shown that the saturation of metals and alloys with hydrogen directly in the de-

formation process can cause some phenomena that did not exist during the deformation of metals, previously saturated with hydrogen. A comprehensive review of related publications is given in [13]. The basic feature of these effects is the synergistic nature of the phenomena: the deformations caused by the joint action of inhomogeneous stress field and hydrogen flux may be greater by orders of magnitude than those that occur under the influence of each of these factors separately. The physical nature of these phenomena is not the issue of our study. We only note that such effects are, by assumption, the result of a specific state of the material occurring under the super equilibrium concentration of hydrogen in microdomains of metal together with inhomogeneous stress field. The relevant discussion can be found in [13].

A triad of mechanical after-effects has been studied in the experiments: creep under a constant stress applied; relaxation of the stress and the reverse mechanical after-effect. To be specific, we focused on the first of these effects. Iron was selected for

investigation because the effect of pre-introduction of hydrogen on deformation properties of this material has been studied in detail.

The purposes of the modeling were to determine some calculable macroscopic parameters affecting the process and propose the equations usable to predict the appearance of synergistic deformation effect in the metal under the above loading. To this end, we, firstly, examined the experiments which were to be modeled. Being based on this analysis, the concentration of hydrogen and related quantities were calculated from the classical diffusion equation. After that, a more complicated diffusion equation together with a constitutive equation for creep was used for simulating the process.

EXPERIMENTAL BACKGROUND

Some details about the experiments which were modeled in this paper can be found in [7], [14] and the references cited therein. The specimens of Armco iron was annealed in vacuum at 600 °C for one hour. The form of the specimens was wire $8 \cdot 10^{-4}$ m in diameter and $8 \cdot 10^{-2}$ m in working length. Hydrogen was being introduced from the electrolyte into the specimen being under the torsional loading. The densities of the cathode current were varied within the range of 50–1000 A/m². The deformation was measured by an installation based on the principle of inverted torsional pendulum.

The creep of iron in torsion has been studied for the following loading modes: (a) loading below the macroscopic elastic limit, (b) the specimen unloaded after plastic deformation is subjected to repeated loading below the yield point of the underformed specimen, (c) on attainment of the prescribed level of plastic strains, the specimen is partially unloaded to stresses $\tau \approx 0,9 \tau_s$.

Since in actual structures the design stresses are usually well below the yield point, case (a) was chosen for simulating. The typical dependence corresponding to this loading model is as follows: the period of deformation acceleration is followed by the period with the strain rate gradually decreasing, and eventually the deformation stops rising. The following features in the behavior of the material which are important for our further modeling were identified [6], [7], [13], [14]:

- The deformation process is active only when hydrogen is fed and it stops immediately when the current is switched off.
- A necessary condition for plastic deformation development is the presence of tangential stresses. In this case the synergistic effect of plastic deformation is observed in loading both below and above the macroscopic yield point.
- The strain rate of the after-effect, all other things being equal, is determined by the rate of saturation. There is a critical value of the cathode current, below which the effects are not clearly visible. The composition of the electrolyte as well as the shape of the anode

affect the kinetics of the process, but there is a limiting deformation for the metal with a specified thermomechanical prehistory.

- The observed mechanical instability is not due to the discontinuity of the material upon saturation with hydrogen.
- The active process of creep deformation is preceded by some incubation period. This period decreases with applied load or with hydrogen introduction rate increase. For a sufficiently high intensity of the introduction the incubation period does not depend on the stresses.
- Synergistic effects are observed only in the metals with a sufficiently high (no less than $10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$) diffusivity (except for zirconium). Alloying iron with the elements which reduce the solubility and diffusivity of hydrogen leads to decreasing the deformational effects.

From these regularities, it follows that the parameters of state for pure torsion at a fixed temperature could be: the hydrogen concentration, the concentration gradient, the rate of the change in concentration and the amount of the accumulated plastic strain. It is to be investigated which of these variables have the greatest impact on the deformation behavior and should be included in the constitutive equation.

SIMULATION OF THE DIFFUSION PROCESS IN THE ELECTROLYTIC HYDROGEN ABSORPTION

The problem of the diffusion coefficient choice

The main parameter of the material which determines the hydrogen saturation rate is the diffusion coefficient, or diffusivity. There are many various values of a low temperature hydrogen diffusivity in α -iron reported by different research groups. The lack of agreement among them, even if the same electrochemical permeation technology was used, is very well known [10]. There are a few reasons for this disagreement. Firstly, the hydrogen permeability of a specimen which is saturated with hydrogen electrolytically is the characteristics which is difficult to reproduce. The kinetics of the process is influenced by the specificity of the electrolyte, the surface layer of the specimen and the cathode processes. Besides, some of these parameters are often difficult to control [2]. For example, it is shown in [11] that variations in the charging current density and the electrolyte can very well explain the variations in the reported values of diffusivity. Secondly, diffusivity is a function of trap density and the magnitude of the trap depth [12]. The third avowed reason is the surface problems [10]. In addition, the structure of the metal is changing under the process of saturation [2]. From the mathematical point of view, such a discrepancy in the diffusivity values indicates the ill-posedness of the inverse problem. It means that small deviations in the row data can lead to large variations in the solutions. The study [17] on this issue showed that estimation of hydrogen transfer pa-

rameters and identification of the type of boundary conditions should be performed simultaneously.

In the experiments under consideration the diffusivity of the material had not been determined previously as this is a problem which should be solved separately. That is why in the simulation the values of diffusivity which were determined by an electrochemical hydrogen permeation method under the same temperature ([8], [11]) were used. One can also find the values collected from different researchers in [10].

The Process with the Cathode Current Switched on

Taking into account the dimensions of the specimen given above we ignored the changes of any parameters along its length. In the polar coordinates with the independence of all the values on the angle the classical equation for Flick's diffusion is:

$$\frac{\partial c(t,r)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rD(r) \frac{\partial c(t,r)}{\partial r} \right), \quad 0 \leq r < R, \quad t > 0. \quad (1)$$

Here $c(t, r)$ is concentration of hydrogen atoms at the points with radius r at time t , D – diffusivity, R – radius of the specimen. Generally the value of the D does not remain permanent during the process. For example, the results of [11] suggest a positive concentration dependence of hydrogen diffusivity in Armco iron. The research [16] indicates the dependence of diffusivity on the gradient of shear stress. But in this first study the value was assumed to be constant, so (1) is simplified:

$$\frac{\partial c(t,r)}{\partial t} = D \cdot \left(\frac{\partial^2 c(t,r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c(t,r)}{\partial r} \right). \quad (2)$$

Since before the experiment the specimen was dehydrogenated, the initial condition is

$$c(0, r) = 0, \quad 0 \leq r < R. \quad (3)$$

The important problem was to formulate the boundary condition properly. Hydrogen penetration in metals is the sequence of the successive processes occurring both on the surface of the metal and inside it. It includes adsorption, absorption, dissolution, desorption and diffusion. The most general form of the boundary conditions takes into account all these processes [9]. But adding any term describing the corresponding process into the equation requires the knowledge of the relevant constant (parameter). To get these parameters one needs to have data from some other experiments with the same material. On the other hand, not all of these processes can be equally important in each specific case. Since any direct measurements of the surface concentration or flux of hydrogen are impossible, it is only indirect information that enables us to draw conclusions about the influence of the surface processes on the diffusion. According to the results of the experiments [7], [13], [14] there exists some characteristic delay time t^* for the creep to start. For sufficiently high intensities of hydrogenation, in particular, for $i_c = 1000 \text{ A/m}^2$ this time does not depend on the stress level. According to [2], such intensity corre-

sponds to a pressure higher than 10 MPa. This suggests that at this level of the cathode current density, the high pressure suppresses desorption, and in the volume of the metal adjacent to the surface the maximum concentration of hydrogen atoms c_0 sets almost immediately. Therefore, in this case we can reasonably write the boundary condition as follows:

$$c(t, R) = c_0, \quad t > 0. \quad (4)$$

By using the technique of separation of variables [15] one obtains the solution of the problem (2)–(4) in the form of a Fourier series:

$$c(t,r) = c_0 \left[1 - 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^{(0)} J_1(\mu_n^{(0)})} \cdot J_0 \left(\frac{\mu_n^{(0)} r}{R} \right) \cdot \exp \left(-\frac{D \mu_n^{(0)2}}{R^2} t \right) \right]. \quad (5)$$

Here $J_0(x)$, $J_1(x)$ – Bessel function of the first kind of zero and first orders, and $\mu_n^{(0)}$ – the positive successive roots of $J_0(x)$.

Values of diffusivity at room temperature given in [9] vary from $5 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ to $8 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, and this is the most comprehensive range of the value we could find in the literature. (But the greater part of the experimental results is in the region $D \approx 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). One can verify numerically that for these orders of magnitude all the troubles connected with summation (5) lie in the region $t < 10 \text{ s}$. By “troubles” we mean a saw tooth curve for $c_r(t) \equiv c(t, r)$ for the values of r in the vicinity of R . Consequently, for the numerical values of the parameters we deal with, the use of analytical solutions for larger values of t is quite acceptable.

Fig. 1, reproduced from [13], presents the growth of creep shear deformations at $i_c = 1000 \text{ A/m}^2$ with the stress level $\tau = 180 \text{ MPa}$. (The author also reports that without hydrogenation at the given stress level the value of deformation, observed during 60 minutes, was invisible in the scale of the graph.) The curves substantiate that an active deformation process starts a few minutes after the beginning of saturation. So it was reasonable to follow the changing of the concentration during this time interval.

Fig. 2 demonstrates the distribution of a relative concentration $c(t, r)/c_0$ along the radius for different values of diffusivities after 60s of saturation, computed according (5). For $D = (1,8-7) \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

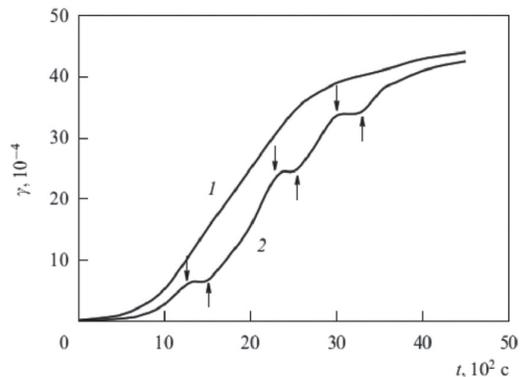


Fig. 1. Creep deformation (10^{-4}) in Armco iron: 1) continuous hydrogenation; 2) alternating switch on and switch off the cathode current. Reproduced from [13]

(the value was taken from [11] for Armco iron annealed in vacuum at 800 °C for 8 hours) hydrogen concentration in the cross section of the specimen reaches its limit values approximately in one minute. There are no gradients of concentration after this moment. It suggests that the actual value of diffusivity is less than this value. However, it is emphasized in [13] that the higher is the diffusivity, the more is the effect, and there is no effect for metals with low diffusivity. But in our opinion, it is unlikely that any processes take place in the material after saturation. Otherwise, we would have had the effect in the material, previously saturated with hydrogen. It is also unlikely that there exists some surface process the durability of which does not depend on the current density. So the logical conclusion is that if equation (2) is valid, the macroscopic diffusivity for this material is lower than the value mentioned above.

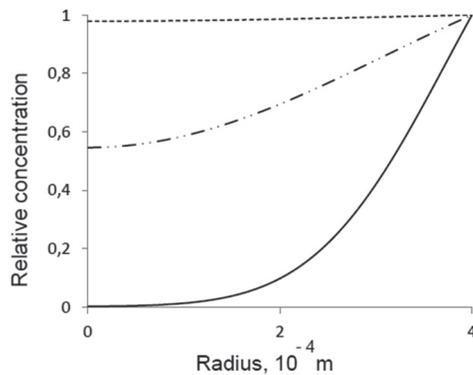


Fig. 2. Distribution of relative concentrations at $t = 60s$:
 (---) $D = 2 \cdot 10^{-9} m^2s^{-1}$, (- · - ·) $D = 5,8 \cdot 10^{-10} m^2s^{-1}$,
 (—) $D = 10^{-10} m^2s^{-1}$

For $D = 5,8 \cdot 10^{-10} m^2s^{-1}$ (the value is from [8] for pure iron, there is no information about heat treatment) the specimen is saturated in approximately five minutes. So we expect that this value of diffusivity is also too large for the investigated material. It is only the values near $D \approx 1 \cdot 10^{-10} m^2s^{-1}$ that enable us to explain the curves in Fig. 1. In this case the $c(t, r)$ for the values of r in the vicinity of R reaches the saturation in a few minutes, and the whole specimen is saturated in nearly thirty minutes, when deformation no longer increases (Fig. 2). But as it was mentioned earlier, due to the surface processes the real values of concentrations are somewhat less, so the diffusivity from [8] could be true.

In [18], [19] a model for electrolytic permeability method, considering absorption and desorption processes, is proposed. Assuming the surface concentration to be constant, the authors have modified the general form of boundary condition to a linear one. The values of diffusivity, obtained from this model, are practically independent of sample thickness and surface treatment, confirming the correctness of the boundary conditions. The desorption rate constant and the absorption parameter have also been calculated there. Hence, for the smaller values of the current

density, the use of the boundary conditions, proposed in [19] instead of the condition (4), would be appropriate. Fig. 3a shows the changes in gradient at successive times. The values were obtained by differentiation of formula (5) with respect to r , constant factor was not taken into account. As expected, the major changes take place in the subsurface layer where the gradient decreases more than five times within the first five minutes. Such a drastic change in the gradient could, in principle, be the driving force of the process. Fig. 3b demonstrates the distribution of derivatives of (5) with respect to t , constant factor is also not taken into account. The hump of curve is characteristic of all similar processes ([17]) and can be derived from (5). The moving of this “hump” along the radius would also describe the phenomenon. The results, given above, lead to conclusion that the concentration of the hydrogen, as well as its derivatives in the subsurface layer, could be accepted as the parameters of the state in the governing equations. Finally, we note that the series (5) converges so fast that for $t > 100s$ it is sufficient to use only the first term of the series.

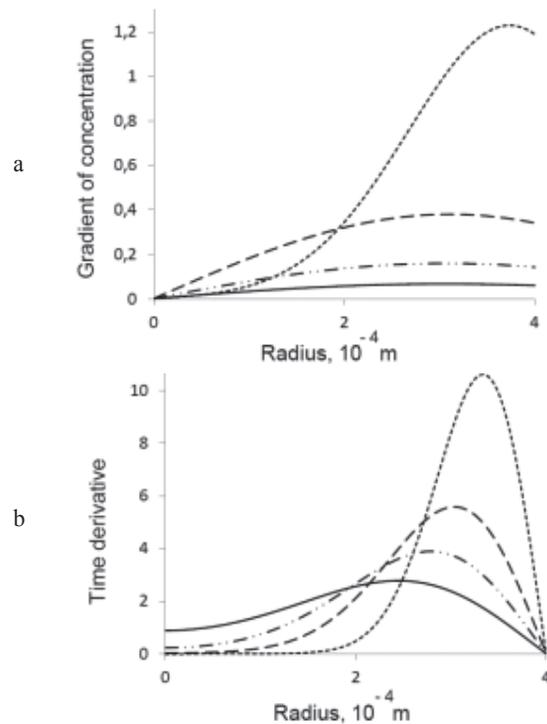


Fig. 3. Distribution of concentration gradients (a) and time derivatives of $c(t, x)$ (b) for $D = 1 \cdot 10^{-10} m^2s^{-1}$:
 (---) $t = 60s$, (—) $t = 300s$, (- · - ·) $t = 540$, (—) $780s$

The Process with the Cathode Current Switched Off

The experiments show that after the cathode current is switched off, the creep deformation stops almost immediately. So we should follow the changes in the distribution of concentration along the radius of the specimen after this moment. Let t_1 be the time when the cathode current was switched off. To avoid confusion, we denote $f_1(r) = c(t_1, r)$ where $c(t_1, r)$ is calculated by (5) with $t = t_1$. So the initial condition for the diffusion equation in this case is

$$c(0, r) = f_1(r). \quad (6)$$

If desorption is neglected, no hydrogen leaves the specimen and the boundary condition for (2) is

$$\left. \frac{\partial c}{\partial r} \right|_{r=R} = 0. \quad (7)$$

The solution of the problem (2), (6), (7) obtained with the same separation of variables technique is:

$$c(t, r) = \phi_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n \cdot J_0\left(\frac{\mu_n^{(1)} r}{R}\right) \cdot \exp\left(-\frac{D\mu_n^{(1)2} t}{R^2}\right), \quad (8)$$

where ϕ_0 and ϕ_n are given by the expressions:

$$\phi_0 = \frac{2}{R^2} \int_0^R r \cdot f_1(r) dr, \quad \phi_n = \frac{2}{R^2 J_0^2(\mu_n^{(1)})} \int_0^R r \cdot f_1(r) \cdot J_0\left(\frac{\mu_n^{(1)} r}{R}\right) dr$$

and $\mu_n^{(1)}$ are the positive successive roots of $J_1(x)$.

Fig. 4a demonstrates the changes in concentrations at successive times calculated from (8) for $t_1 = 780$ s. The presence of the intersection point follows from the properties of the series (8): in the points with the radius $r = R\mu_n^{(1)} / \mu_1^{(1)}$ the first term of the series vanishes, and $\mu_n^{(1)2}$ provides a rapid decrease of the exponent in the remaining terms of the series. Although the concentration in the near-boundary region decreases after the current is switched off, the small value of the change did not enable us to simulate further the effects when cathode current was alternatively switched on and off. That is why the linear boundary condition of the third kind, accordingly [19], was accepted in our study:

$$\left(D \frac{\partial c}{\partial r} + kc \right)_{r=R} = 0, \quad t > 0. \quad (9)$$

The solution of the problem (2), (6), (9) is:

$$c(t, r) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n \cdot J_0\left(\frac{\mu_n^{(2)} r}{R}\right) \cdot \exp\left(-\frac{D\mu_n^{(2)2} t}{R^2}\right), \quad (10)$$

where ϕ_n are given by the expressions:

$$\phi_n = \frac{2\mu_n^{(2)2}}{R^2 [\mu_n^{(2)2} + k^2 R^2] \cdot J_0^2(\mu_n^{(2)})} \int_0^R r \cdot f_1(r) \cdot J_0\left(\frac{\mu_n^{(2)} r}{R}\right) dr$$

and $\mu_n^{(2)}$ are the successive positive roots of the equation $\mu \cdot J_0(\mu) + kR J_1(\mu) = 0$.

Although the desorption rate constant k should depend on charging current density, as well as on electrolyte and material properties, it is unlikely equal to zero, even if the current is switched off, it is much more likely that for this case it is larger than when some current is applied. That is why the order of the value in (10) was taken from [19]. The results of these calculations have provided a more rapid decrease of the concentration (Fig. 4b), so they were used in simulating hereinafter.

The Process with the Cathode Current Switched On and Off Alternately

We also applied the formulas (5) and (10) one by one successively for successive times. The corre-

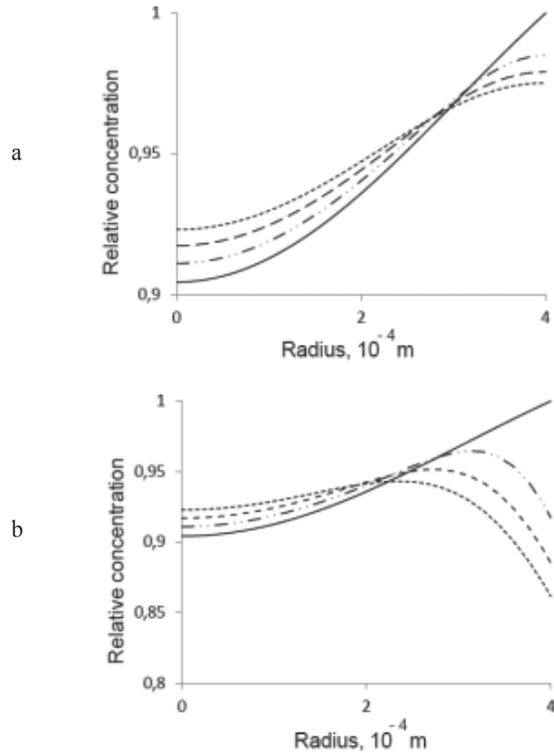


Fig. 4. Distribution of relative concentrations for $D = 1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ after current is switched off, for boundary condition of first (a) and third (b) kinds:
(—) $t = 0$ s, (····) $t = 20$ s, (---) $t = 40$ s, (- · - ·) $t = 60$ s

sponding changes in the initial condition (3) are obvious. As a result, we got a picture of the changes in the concentrations in the near-boundary region (not presented). The concentration in the surface layer was changing in a stepwise manner; the step height was gradually reduced. In our opinion, it is the concentration in the near-boundary region that is likely to be the critical value for the process.

The Trapping Effect

Having supposed the validity of the diffusion model (2)–(4), we were unable to simulate clearly the existence of an incubation period. It is widely acknowledged that the trapping effect is one of the main causes for the delay of penetration, so the governing equation to describe the trapping should be added to Flick's second law. On the local equilibrium assumption the two equations are reduced to one with effective diffusivity [12]. But having no preliminary knowledge about the traps we suppose using this approach is incorrect. The different forms of the equations for various types of traps are presented in [1], [5]. Since the object of the paper was only the qualitative simulation, we tried to keep the number of the unknown parameters as small as possible. That is why we used the following diffusion model with irreversible capture and limited capacity of the traps:

$$\begin{cases} \frac{\partial c(t, r)}{\partial t} = D \cdot \left(\frac{\partial^2 c(t, r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c(t, r)}{\partial r} \right) - \beta \left(\frac{\bar{w} - w(t, r)}{\bar{w}} \right) \cdot c(t, r) \\ \frac{\partial w(t, r)}{\partial t} = \beta \left(\frac{\bar{w} - w(t, r)}{\bar{w}} \right) \cdot c(t, r) \end{cases}, \quad 0 \leq r < R, \quad t > 0. \quad (11)$$

where $w(t, r)$ is the concentration of hydrogen in the traps, \bar{w} – the capacity of the traps, β – the unknown coefficient. The initial condition

$$w(0, r) = 0 \quad (12)$$

is to be added to (3).

We supposed the linear dependence of traps capacity on the radius, because the number of the traps can depend on the plastic deformation which has the greatest value near the edge. Since the objective of the study was to obtain the governing equations of mechanics of solids, it is noteworthy that the concept of microstructure is alien in principle to the mechanics of the solids. Thus, by “traps” one can mean any internal state variable which is governed by the equations above.

THE COUPLED SYSTEM OF THE GOVERNING EQUATIONS

When a material is subjected to a stress that is below its yield stress, it deforms commonly only elastically. However, provided the temperature is relatively high, plastic deformation can occur even when the stress is lower than the yield stress. This deformation is time-dependent and known as creep. In our case, the similar phenomenon is observed having been caused not by temperature but by diffusion flux of hydrogen.

A creep elongation curve for the time dependence of the deformation has typically the three stages: 1) the stage of primary or reduced creep, 2) the stage of stationary creep, 3) the stage of accelerated creep. At the end of the third stage, creep rupture of the specimen occurs. In practice, steady-state creep often dominates in the creep behavior because the duration of this stage is usually much greater than of the first and third ones; therefore, most studies focus primarily on the second stage of the creep curve (although some unified nonlinear models for all stages of creep have also been suggested).

The applied stress provides a driving force for any creep mechanisms. When the stress is increased, the rate of deformation also increases. In the case of uni-axial stretching, the power creep law is often accepted:

$$\dot{\varepsilon} = \alpha_1 \sigma^n, \quad (13)$$

([3], [4]) where $\dot{\varepsilon}$ is the creep strain rate, σ – applied stress, α_1 and n are the constants. The stress exponent n depends on the creep mechanism, for dislocation creep it is usually in the range 3–8. The constant α_1 depends on the temperature, and it is determined from the experiments, too. Some other dependencies are also used instead of (13), but all of them have an empirical nature, the specific choice depends on the convenience of use.

Let us consider the steady-state creep of the cylinder of radius R under the torque with the magnitude M . Assume the cross sections remain plane, as in the case of elastic loading. In this case the angular

creep strain γ is connected with the relative angle of torsion $\theta = \theta(t)$ as follows [4]:

$$\gamma(r) = r \cdot \theta. \quad (14)$$

It is shown in [4] that for a steady torsion creep one can as well use the power law like (13):

$$\dot{\gamma} = \alpha \tau^n. \quad (15)$$

Here $\dot{\gamma}$ is the angular creep strain rate, τ – the resulting tangential stress, $\alpha = 3^{(n+1)/2} \alpha_1$. The tangential stresses are connected with the torque:

$$M = 2\pi \int_0^R \tau(r) \cdot r^2 dr. \quad (16)$$

From (14)–(16) one gets:

$$\tau(r) = M \cdot I \cdot r^{1/n}, \quad (17)$$

where $I = 2\pi n (3n - 1)^{-1} R^{(3n+1)/n}$ is the resulted polar moment of inertia. But since the experiments show that in our case the dependence $\gamma(t)$ is far from a linear one (Fig. 1), we cannot use the steady-state law (15) directly.

Suppose, for simplicity that α is the only constant in (15) that is changeable under the diffusion and probably under the deformations, so the creep law is:

$$\dot{\gamma}(t, r) = \alpha(t, r) \cdot \tau^n(t, r) \quad (18)$$

(the dependence of $\alpha = \alpha(t, r)$ is not a direct one). Still assume the cross sections remain plane and θ does not depend on r , so (14) is valid for the total angle strain γ_{total} . The increment of this value $\Delta\gamma_{total}$ during the time interval $(t, t + \Delta t)$ is the sum of the increments of the creep and elastic strains:

$$\Delta\gamma_{total} = \Delta\gamma + G^{-1} \Delta\tau, \quad (19)$$

$\Delta\gamma_c$, $\Delta\tau$ – the increments of creep strain and tangential stress, respectively, G – shear modulus. Dividing by $\Delta\tau$ and letting Δt tend to zero, one gets the similar equation for the rates. Substituting the rates from (14) and (18), gives:

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = G(\dot{\theta} \cdot r - \alpha(t, r) \cdot \tau^n(r, t)), \quad 0 \leq r \leq R, \quad t > 0. \quad (20)$$

To close the equation we use the equilibrium condition (16). By differentiating (16), the torque is constant, and using the result together with (19), after transformations one obtains:

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = G \left[4R^{-4} \int_0^R \alpha(t, r) \tau^n(r, t) r^2 dr - \alpha(t, r) \tau^n(t, r) \right]. \quad (21)$$

The initial condition for (21) is the elastic stress distribution:

$$\tau(0, r) = G\theta_{el} r, \quad (22)$$

where θ_{el} is the initial elastic torsion angle.

As the creep strain grows considerably under the hydrogen flux, we choose the power dependence upon concentration for a creep coefficient. Since

there exists the maximum creep strain θ_{max} that can be attained for the specimen with a specified thermomechanical prehistory, the creep coefficient was taken in the form:

$$\alpha(t, r) = \alpha_0 \left(\frac{(c(t, r) - c_s)^+}{c_s} \right)^k \left(\frac{\theta_{max} - \theta(t)}{\theta_{max}} \right)^m \tau^n(t, r). \quad (23)$$

Here c_s is the critical concentration at which the effect starts, α_0 – the value for the metal without hydrogen saturation, the sign plus means that if the difference is less than zero, the value in brackets is taken for zero.

The model for the mechanics of the solids includes equilibrium equations, and equations of state. In our one-dimension case the two are combined in (21). The parameter in this equation depends on the concentration of hydrogen, hence diffusion equations (11) are to be included in the model. The initial and boundary conditions are (3), (12), (22) and (4) or (9).

The systems of coupled equations (2), (21) and (11), (21) were solved numerically by the explicit scheme. Although the diffusion equation has an analytical solution, it was also integrated numerically. After that, the values of the concentration were substituted into the equation (21). The derivatives were approximated with the second order of accuracy; the integral was calculated by a trapezoidal rule. The accuracy of the solution was controlled only by decreasing the time step. The parameter values are given in the Table. The results of the calculations, when the current was alternatively switched on and off, are presented in Fig. 5, where the dash line is for the model with trapping, the solid line is without trapping. The comparison of the Fig. 1 and Fig. 5 enables us to conclude that the proposed model provides a

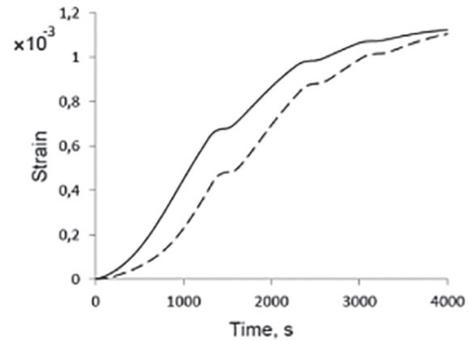


Fig. 5. Computed creep deformation at alternating switch on and switch off the cathode current: (—) without trapping, (---) with trapping

qualitative description of the synergistic effect of the creep under hydrogen absorption.

CONCLUSION

The macroscopic modeling of the interaction of hydrogen with metals requires a careful analysis of all the experimental conditions. The critical issue is the values of the penetration parameters, and especially, the value of diffusivity. A small discrepancy between the diffusivity used in calculations and the real one can result in qualitatively incorrect conclusions. The value of relative concentration of hydrogen in the near-boundary region is to be included, first of all, into the set of the state parameters. This conclusion is also consistent with the physical basis [13]. Some other related values can't not be excluded from consideration, either. The numerical results illustrate that the proposed equations can provide a qualitative description of the process.

The numerical data for simulating

| Diffusion | | Creep | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------|-----|-----|-----|----------------|-----------|
| D | k/D | G | M | α_0 | n | k | m | θ_{max} | c_s |
| $10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ | $2 \cdot 10^3 \text{ m}^{-1}$ | $8 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$ | $1,8 \cdot 10^{-2} \text{ Nm}$ | $4 \cdot 10^{-29}$ | 3 | 2/3 | 3 | $1,5 \theta_0$ | $0,8 c_0$ |

REFERENCES

1. Бекман И. Н. Феноменологическое описание диффузии в дефектных средах // Взаимодействие водорода с металлами / Ред. А. П. Захаров. М.: Наука, 1987. С. 143–177.
2. Гельд П. В., Рябов Р. А. Водород в металлах и сплавах. М.: Металлургия, 1974. 272 с.
3. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. 712 с.
4. Сапунов В. Т. Основы теории пластичности и ползучести: Учеб. пособие. М.: МИФИ, 2008. 220 с.
5. Спивак Л. В. Водород в металлах: Учеб. пособие: В 2 ч. Ч. 1. Пермь, 2011. 177 с.
6. Спивак Л. В. Водород в металлах: Учеб. пособие: В 2 ч. Ч. 2. Пермь, 2011. 223 с.
7. Спивак Л. В., Скрябина Н. Е., Кац М. Я. Водород и механическое последствие в металлах и сплавах. Пермь, 1993. 344 с.
8. Addach H., Berçot P., Rezzazi M., Wery M. Hydrogen permeation in iron at different temperatures // Mater. Lett. 2005. Vol. 59 (11). P. 1347–1351.
9. Andrew P. L., Haasz A. A. Models for hydrogen permeation in metals // J. Appl. Phys. 1992. Vol. 72 (7). P. 2749–2757.
10. Hydrogen in Metals / Ed. by G. Alefeld, J. Volkl. Vol. I. Berlin, Springer-Verlag, 1978. 321 p.
11. Nambodhiri Govindan T. K., Nanis L. Concentration dependence of hydrogen diffusion in Armco iron // Acta Mater. 1973. Vol. 21 (5). P. 663–672.
12. Oriani R. A. The diffusion and trapping in hydrogen steel // Acta Mater. 1970. Vol. 18 (1). P. 147–157.
13. Spivak L. V. Synergy effects in the deformation response of thermodynamically open metal – hydrogen systems // Physics – Uspekhi. 2008. Vol. 51 (9). P. 863–885.
14. Spivak L. V., Skryabina N. E. Intensification of deformation in metal – hydrogen systems // Materials Science. 2002. Vol. 38 (4). P. 503–513.
15. Tikhonov A. N., Samarskiy A. A. Equations of Mathematical Physics. Dover Publ., 1990. 765 p.

16. Xuan Fu-Z., Shao S.-S., Wang Z., Tu S.-T. Coupling effects of chemical stresses and external mechanical stresses on diffusion // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2009. Vol. 42. P. 1–8.
17. Zaika Yu. V., Bor mat ova E. P. Parametric identification of a hydrogen permeability model by delay times and conjugate equations // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2011. Vol. 36 (1). P. 1295–1305.
18. Zhang T.-Y., Zheng Y.-P. Effects of absorption and desorption on hydrogen permeation-I. Theoretical modeling and room temperature verification // *Acta Mater.* 1998. Vol. 46 (14). P. 5023–5033.
19. Zhang T.-Y., Zheng Y.-P., Wu Q.-Y. On the Boundary Conditions of Electrochemical Hydrogen Permeation Through Iron // *J. Electrochem. Soc.* 1999. Vol. 146 (5). P. 1741–1750.

Bor mat ova E. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Davydov M. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

ONE-DIMENSIONAL GOVERNING EQUATIONS FOR THE CREEP UNDER HYDROGEN DIFFUSION FLOW

Saturation of some metals with hydrogen, in particular α -iron, immediately in the process of loading can cause a great increase of their deformation response. The study is aimed at the macroscopic description of this phenomenon. The constructed governing equations are based on the concept of the equation of state with internal parameters. The modeled experiment involves saturation of a cylindrical specimen with hydrogen from the electrolyte, loaded torque. The analysis of both research literature and experimental data justified the applicability of the linear boundary conditions of the first and third kinds. This made it possible to use the analytical solutions in the form of Fourier series of Bessel functions for the classical diffusion equation. It turned out that the scatter of diffusivity, reported by different authors, can result in a significantly different interpretation of the experiments. For the most common value of D of the order $10^{-9} m^2 s^{-1}$, the calculated time for the complete saturation of the specimen was approximately a few minutes, which diverged from the characteristic times of the experiment. The explanation could have been either a lower value of diffusivity, or the presence of the so-called “traps”. Inclusion of the limited capacity traps with the irreversible capture into the model has also enabled us to explain the presence of a noticeable incubation period. The study did not take into account the dependencies of D on the accumulated plastic strain, the stress gradient, and concentration. From the time dependences of the concentration and its derivatives the authors concluded that the hydrogen concentration should be the first to be considered as a parameter of the state. Furthermore, the creep power index was kept constant but the creep coefficient was assumed to be dependent on hydrogen concentration as well as on the accumulated plastic strain. The latter dependence was justified by the gradual strain rate deceleration for the loading below the macroscopic yield stress. The numerical results have demonstrated the principal possibility of macroscopic modeling of deformation synergistic effects under hydrogen absorption.

Key words: creep, diffusion of hydrogen, diffusivity, governing equations, synergy effects, α -iron

REFERENCES

1. Bekman I. N. Phenomenological description of diffusion in defected environments [Fenomenologicheskoe opisaniye dif-fuzii v defektnykh sredakh]. *Vzaimodeystvie vodoroda s metallami* [Interaction of hydrogenium with metals]. Moscow, Nauka Publ., 1987. P. 143–177.
2. Gel'd P. V., Ryabov R. A. *Vodorod v metallakh i splavakh* [Hydrogen in metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1974. 272 p.
3. Rabotnov Yu. N. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Mechanics of solids]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 712 s.
4. Sapunov V. T. *Osnovy teorii plastichnosti i polzuchesti* [Foundations of the theory of plasticity and creep]. Moscow, MIFI Publ., 2008. 220 p.
5. Spivak L. V. *Vodorod v metallakh: V 2 ch.* [Hydrogen in metals: In 2 parts]. Perm', 2011. P. 1. 177 p.
6. Spivak L. V. *Vodorod v metallakh: V 2 ch.* [Hydrogen in metals: In 2 parts]. Perm', 2011. P. 2. 223 p.
7. Spivak L. V., Skryabina N. E., Kats M. Ya. *Vodorod i mekhanicheskoe posledeystvie v metallakh i splavakh* [Hydrogenium and mechanical aftereffect in metals and alloys]. Perm', 1993. 344 p.
8. Addach H., Berçot P., Rezrazi M., Wery M. Hydrogen permeation in iron at different temperatures // *Mater. Lett.* 2005. Vol. 59 (11). P. 1347–1351.
9. Andrew P. L., Haasz A. A. Models for hydrogen permeation in metals // *J. Appl. Phys.* 1992. Vol. 72 (7). P. 2749–2757.
10. *Hydrogen in Metals* / Ed. by G. Alefeld, J. Volkl. Vol. I. Berlin, Springer-Verlag, 1978. 321 p.
11. Nambodhiri Govindan T. K., Nanis L. Concentration dependence of hydrogen diffusion in Armco iron // *Acta Mater.* 1973. Vol. 21 (5). P. 663–672.
12. Oriani R. A. The diffusion and trapping in hydrogen steel // *Acta Mater.* 1970. Vol. 18 (1). P. 147–157.
13. Spivak L. V. Synergy effects in the deformation response of thermodynamically open metal – hydrogen systems // *Physics – Uspekhi*. 2008. Vol. 51 (9). P. 863–885.
14. Spivak L. V., Skryabina N. E. Intensification of deformation in metal – hydrogen systems // *Materials Science*. 2002. Vol. 38 (4). P. 503–513.
15. Tikhonov A. N., Samarskiy A. A. *Equations of Mathematical Physics*. Dover Publ., 1990. 765 p.
16. Xuan Fu-Z., Shao S.-S., Wang Z., Tu S.-T. Coupling effects of chemical stresses and external mechanical stresses on diffusion // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2009. Vol. 42. P. 1–8.
17. Zaika Yu. V., Bor mat ova E. P. Parametric identification of a hydrogen permeability model by delay times and conjugate equations // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2011. Vol. 36 (1). P. 1295–1305.
18. Zhang T.-Y., Zheng Y.-P. Effects of absorption and desorption on hydrogen permeation-I. Theoretical modeling and room temperature verification // *Acta Mater.* 1998. Vol. 46 (14). P. 5023–5033.
19. Zhang T.-Y., Zheng Y.-P., Wu Q.-Y. On the Boundary Conditions of Electrochemical Hydrogen Permeation Through Iron // *J. Electrochem. Soc.* 1999. Vol. 146 (5). P. 1741–1750.

Поступила в редакцию 14.06.2013

АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ КОСЕНКОВ

научный сотрудник Научно-исследовательского института историко-теоретических проблем народного зодчества, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
ole-kosenkov@rkmail.ru

НОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧАСОВЕН ПРЯЖИНСКИХ КАРЕЛ*

Приводится детальный сравнительный анализ часовен в деревнях Кинерма и Маньга Пряжинского района Карелии. Установлена однотипность рассматриваемых часовен, а выявленные нюансы позволили достовернее провести реконструкцию кинермской часовни с ориентацией на первоначальный архитектурный облик. На основании двух независимых друг от друга методик датирования деревянных построек уточнено время строительства часовен.

Ключевые слова: деревянное зодчество, карельские часовни, типологический анализ, датировка храмов, графическая реконструкция часовни

Деревенская часовня в Карелии представляет собой отдельно стоящее рубленое из бревен здание без алтаря, предназначенное для проведения краткого богослужения, не включающего литургию.

Часовни ставили как в деревнях, так и за их пределами – вдоль дорог, на кладбищах, в местах явления видений или чудес. Часовни, расположенные среди деревенской застройки, зачастую доминируют над ней и являются композиционными акцентами деревенского пейзажа, придавая ему черты неповторимости и эмоционально-художественной осмысленности, которые можно выразить емким понятием «духа места». Именно такую роль играют часовни в деревнях Кинерма и Маньга, находящиеся в южной части Пряжинского района Карелии.

Нам неоднократно приходилось бывать в обеих деревнях, а в 2012 году в составе русско-итальянского коллектива исследователей заниматься изучением традиционной архитектуры Пряжинского района (Ведлозерья и граничащих территорий), в том числе детально обследовать часовни в Кинерме и Маньге. Часовни Смоленской Богоматери в Кинерме и Рождества Богородицы в Маньге по разным источникам

датируются второй половиной XVIII века, имеют одинаковую функционально-планировочную организацию, но индивидуальны по своему восприятию. Поэтому часовни буквально напрашиваются на детальный сравнительный анализ.

Часовня в деревне Маньга расположена на высоком холме среди редких сосен и елей и уже издали становится хорошо заметной. Несмотря на некоторые изменения, приобретенные за свою историю, часовня, по-видимому, сохранила до наших дней свой первоначальный облик (рис. 1). Часовня представляет собой разновысокую и разноширокую постройку, состоящую из трех объемов: кафоликона (молитвенного помещения), притвора и галереи с колокольной. Кафоликон часовни представляет собой высокий стройный сруб с повалами стен и планом, близким к квадрату. Кафоликон покрыт двускатной крышей, увенчанной главкой. Притвор имеет сруб ниже и шире, чем у кафоликона, но форма его плана также очень близка к квадрату. Галерея, примыкающая к притвору, имеет с ним одинаковую ширину и высоту; оба помещения объединены общей двускатной крышей. На галерею ведут симметрично расположенные

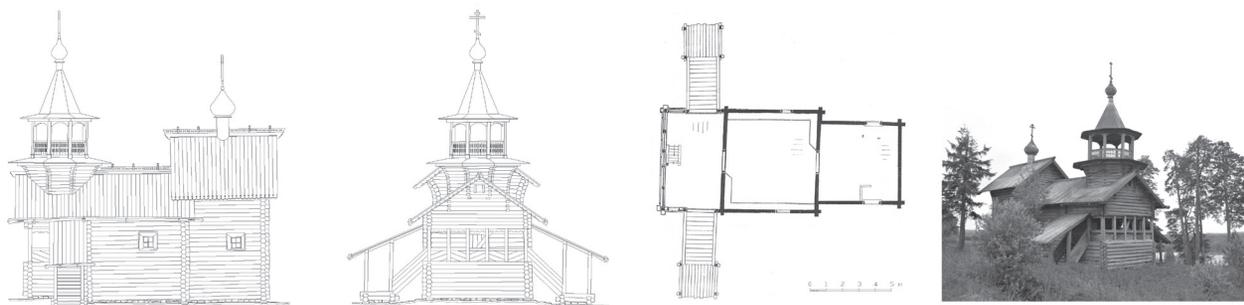


Рис. 1. Часовня Рождества Богородицы в д. Маньге Пряжинского района Карелии (по материалам ЗАО «ЛАД»: № 377-КМ, с дополнениями автора)

с двух сторон крыльца. Сверху над галереей устроена восьмиштолбная колокольня на низком восьмиугольном срубном основании с повалом стен. Колокольня завершена покрытием в виде низкого шатра-колпака (восьмигранной пирамиды) с небольшой главкой.

Вероятно, в XIX веке часовня была обшита тесом снаружи и внутри, а галерея была превращена в сени – одно крыльцо разобрали, обшили галерею тесом и устроили в ней дверной проем¹.

В ходе реставрации 1967–1968 годов, ориентированной на первоначальный архитектурный облик постройки, была снята обшивка, произведена полная переборка сруба с заменой нижних венцов, восстановлены кровли традиционной конструкции и декоративные элементы².

На сегодняшний день часовня в Маньге не используется для богослужений. За ней ухаживают жители деревни, но, несмотря на это, храм нуждается в срочном реставрационном ремонте.

Часовня Смоленской Богородицы расположена в Кинерме и занимает рядовое положение в центре деревни. Вместе с кладбищенской еловой рощей, обнесенной оградой из валунов, она является основным композиционным акцентом. Часовня состоит из объема кафоликона, покрытого двускатной крышей с главкой на коньке, и пониженного сруба притвора с примыкающей к нему галереей, объединенных общим двускатным покрытием (рис. 2). Стены кафоликона выполнены с повалом. В плане все помещения часовни равной ширины.

С южной стороны к галерее пристроено крыльцо. Снаружи часовня обшита тесом. Вероятно, это было сделано в то же время, что и на часовне в Маньге, в XIX веке. Часовня используется для проведения служб во время деревенских праздников, является объектом экскурсионного показа.

При внешней схожести двух храмов, обусловленной их однотипной трехчастной композицией, пропорции их планов имеют мало совпадений. Молитвенные помещения обеих часовен в плане почти квадратные. Пропорции же притворов сильно разнятся: в часовне в Маньге притвор квадратный в плане, превос-

ходящий по размеру молитвенное помещение; в часовне в Кинерме притвор поперечно-прямоугольной формы в плане и по площади уступает молитвенному помещению. Размеры равношироких притворам галерей в направлении запад-восток (их ширина) в обеих часовнях очень близки. Объем, образованный блокировкой притвора и галереи, в обоих случаях представляет собой в плане прямоугольник, вытянутый в продольном направлении. Однако пропорции отличаются: план часовни в Маньге вытянут в продольном направлении больше, чем часовни в Кинерме.

Что же касается высотных соотношений, то сруб кафоликона часовни в Маньге выше примерно на один метр, чем в Кинерме. Учитывая меньшие размеры плана, кафоликон часовни в Маньге производит впечатление легкой стройной формы, устремленной вверх. И наоборот, пропорции сруба кафоликона часовни в Кинерме создают ощущение более приземленного объема. Тем не менее в пропорциях поперечных сечений притворов и в западных фасадах галерей прослеживается общая закономерность. Ширина притвора и галереи часовни в Маньге больше примерно на полметра, чем в часовне в Кинерме, при этом точно так же соотносятся и высоты этих объемов. Этот факт, а также однотипность композиций часовен и однотипность их галерей, безусловно, сближают обе часовни, поскольку в силу особенностей расположения на местности основное зрительное восприятие этих храмов происходит с юго-западных направлений.

В ходе нашего обследования часовни в Кинерме были выявлены следы и фрагменты утраченных конструкций, которые позволили пролить свет на первоначальный архитектурный облик часовни. Так, оказалось, что у галереи было второе крыльцо, расположенное с северной стороны симметрично существующему ныне крыльцу, точно так же как у часовни в Маньге. С галереи на чердак была устроена лестница. А на чердаке галереи и притвора удалось обнаружить полностью сохранившееся квадратное срубное основание и несколько бревен вышележащего восьмиугольного сруба существовавшей ранее колокольни, позволяющие составить

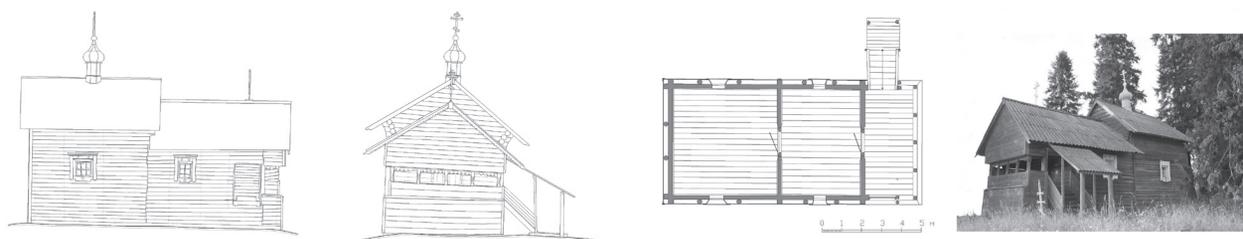


Рис. 2. Часовня Смоленской Богородицы в д. Кинерме Пряжинского района Карелии. Состояние часовни на сегодняшний день (обмеры автора)



Рис. 3. Часовня с колокольней в д. Кинерме. Покрытие колокольни разрушено большевиками. Фото Арво Ховила, июнь 1942 года³



Рис. 4. Часовня в д. Палалахта Пряжинского района Карелии. Фото М. А. Круковского, начало XX века⁴

представление об облике колокольного столпа. Восьмиугольный сруб колокольни был выполнен из бревен «в лапу», то есть концы бревен не выступали за пределы углов.

Фотографии 1940-х годов позволяют понять, какую высоту имела колокольня, за исключением покрытия, которое к тому времени уже было разрушено (рис. 3). Каким же могло быть покрытие колокольни в кинермской часовне? В первую очередь, в качестве аналога логично использовать шатер-колпак колокольни однотипной часовни в Маньге, расположенной всего в 40 км к востоку от Кинермы. Однако в этом случае становится очевидным нарушение гармоничного облика часовни в Кинерме. Дело в том, что

шатер-колпак всегда устраивался на невысоких колокольнях, как, например, в той же Маньге, соседней Коккойле и др. В Кинерме же сруб колокольни существенно выше и нуждается в более стройном и высоком покрытии.

Проанализировав сохранившиеся часовни, расположенные в округе деревни Кинермы, нам не удалось обнаружить подходящий аналог покрытия колокольни. Положительный результат принесла работа с архивными материалами. Так, в коллекциях Музея антропологии и этнографии им. Петра Великого РАН была обнаружена фотография часовни в деревне Палалахте, сделанная в начале XX века известным исследователем народной культуры М. А. Круковским⁵ (рис. 4). Деревня Палалахта находится западнее Кинермы, на расстоянии около 40 км. Храм в Палалахте имеет такой же тип трехчастной развитой композиции, как часовни в Кинерме и Маньге. Отличие заключается лишь в том, что храм в Палалахте имеет только одно крыльцо для входа на галерею, устроенное с западной стороны. На фотографии видно, что храм имеет необычно высокую колокольню, покрытую высоким шатром.

Имея данные о трех сходных храмах, можно сделать предположение: при движении с запада на восток наблюдается тенденция постепенно замещения высоких часовенных колоколен низкими, высоких шатровых покрытий – шатрами-колпаками. Часовня в Кинерме занимает промежуточное положение и по локализации, и по высоте колокольни. Поэтому мы считаем обоснованным применение на колокольне часовни в Кинерме шатра средней высоты. В итоге была сделана графическая эскизная реконструкция часовни в Кинерме с ориентацией на ее первоначальный архитектурный облик (рис. 5).

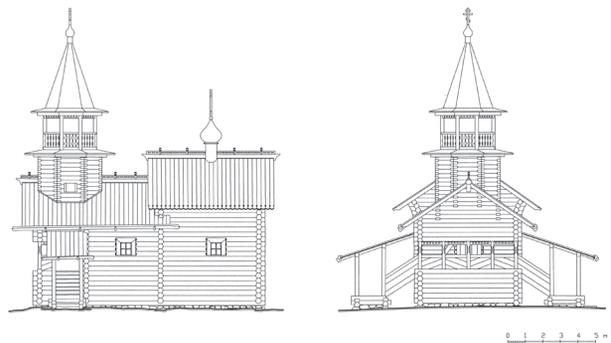


Рис. 5. Графическая реконструкция первоначального облика часовни в д. Кинерме (автор А. Ю. Косенков, 2013)

Исследования, проведенные автором, показали что часовни в Маньге и Кинерме действительно построены по одному типу, а отличия кроются только в деталях и их пропорциях. Сходство часовен должно также объясняться одним или близким временем строительства. В первую оче-

редь обратимся к методу датирования деревянных культовых построек Карелии по архитектурным признакам, разработанному академиком В. П. Орфинским [2], [3]. Основным инструментом этого метода является архитектурно-археологическая шкала – синхронистическая таблица признаков, имеющих выявленные хронологические границы. С учетом совокупности архитектурных признаков по шкале можно определить наиболее вероятный временной период, в который был построен храм. Но при этом необходимо учитывать, что архитектурно-археологическая шкала была разработана преимущественно для русских районов Карелии. Как показали изыскания Научно-исследовательского института историко-теоретических проблем народного зодчества ПетрГУ, данная шкала может применяться для карельских районов с учетом «интервала несинхронности» в связи с архаизацией архитектурных форм и приемов в деревянном зодчестве карел [1].

В нашем случае обе часовни расположены в ареале проживания карел, поэтому по совокупности архитектурных признаков (молитвенное помещение, близкое к квадрату; блокировка часовни с колокольней; стены колокольни срублены «в лапу»; устройство тесовой заборки между столбами галереи; дверные и оконные косяки сопрягаются сверху «в ус», внизу – перпендикулярно и др.) с учетом поправки на «несинхронность» время строительства обеих часовен, наиболее вероятно, относится к периоду между концом XVIII века и концом XIX века.

Дендрохронологические исследования часовни в д. Кинерме, проведенные нами в августе 2012 года совместно с древесиноведом В. А. Козловым, позволили уточнить датировку, выполненную по архитектурно-археологической

шкале. В результате было установлено, что часовня в Кинерме была построена одновременно в виде трехчастной композиции с колокольней в 1866–1868 годах.

Часовня в Маньге скорее всего немного старше, чем часовня в Кинерме, потому что несколько архитектурных признаков часовни в Маньге – разная ширина частей часовни и наличие повалов у стен колокольни – являются хронологически более ранними.

Подводя итог, отметим, что строительство трехчастных часовен с колокольней над галереей на рассматриваемой территории не было исключительным явлением. Такими были часовни в деревнях Гонганалица, Пихталахта, Нехпойла, Кангозеро, Аглаярви. При этом фрагменты и детали однотипных храмов трактовались по-разному. Отличия, которые наблюдаются в архитектуре часовен в Маньге и Кинерме, связаны с разными факторами. Так, например, большее население Маньги и число крестьянских дворов [4] вынуждали возводить храм большей вместимости, скорее всего поэтому притвор часовни был сделан больших размеров. Высотность срубов часовни в Маньге, вероятно, связана с ее расположением на вершине холма. Но при этом низкая колокольня противоречит общей идее вертикализма часовни. Видимо, это объясняется приверженностью к местным строительным традициям. В Кинерме же, наоборот, часовня, расположенная в равнинном ландшафте среди кладбищенской рощи, по своим пропорциям приземиста, но при этом она имела высокую колокольню, органично воспринимающуюся в окружении высоких елей. Связь с природой и подражание ей и в Кинерме, и в Маньге влияли на трактовку архитектурных форм, но в каждом случае это решалось индивидуально.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг., подпроект ИСЕЙ «Междисциплинарный научно-образовательный центр трансграничной коммуникации CARELIKA».

ПРИМЕЧАНИЯ

¹ Паспорт на часовню Рождества Богородицы в д. Маньга Пряжинского района РК. № 1092. Сост. В. Г. Копнин. Петрозаводск, 1988 г. // Архив ГКУ Республики Карелия «Республиканский центр по государственной охране объектов культурного наследия».

² Там же.

³ Паспорт на часовню Смоленской Богородицы в д. Кинерма Пряжинского района РК. № 871. Сост. В. Г. Копнин. Петрозаводск, 1988 г. // Архив ГКУ Республики Карелия «Республиканский центр по государственной охране объектов культурного наследия».

⁴ Часовня в д. Кинерма (Kinnermäen kylän tsasouna). Автор фото – Арво Ховила (Arvo Novila), июнь 1942 года // Фотоархив вооруженных сил Финляндии (SA-kuva-arkisto. Etulinjasta kotirintamalle 1939–1945): № 96656, № 96655 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://sa-kuva.fi/>

⁵ Часовня в д. Палалахта Пряжинского района Карелии. Автор фото – М. А. Круковский, начало XX века // Коллекция Музея антропологии и этнографии им. Петра Великого Российской академии наук. № 1363–121.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К о с е н к о в А. Ю. Часовни климовских карел // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2008. № 2 (92). С. 15–26.
2. О р ф и н с к и й В. П. Деревянное зодчество Карелии. Генезис, эволюция, национальные особенности: Дис. ... д-ра архитектуры. Т. I. М., 1975. 298 с.

3. Орфинский В. П., Яскеляйнен А. Т. Хронологическая атрибуция сооружений народного деревянного культового зодчества // Орфинский В. П., Гришина И. Е. Типология деревянного культового зодчества Русского Севера. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2004. С. 220–230.
4. Список населенных мест Российской империи. XXVII. Олонецкая губерния (По сведениям 1873 года). СПб., 1879.

Kosenkov A. Yu., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

NEW RESEARCH OF KARELIAN CHAPELS IN PRYAZHA DISTRICT

The article provides a detailed comparative analysis of the chapels located in Manga and Kinerma villages in Pryazha district of Karelia. As a result, the author revealed close similarity of the chapels and determined their characteristic features, which helped to reconstruct the chapel in Kinerma with orientation on original architectural forms. Two independent methods of dating wooden buildings helped to specify the construction time for both chapels.

Key words: Wooden architecture, Karelian chapels, typological analysis, dating of the chapels, chapels' graphic reconstruction

REFERENCES

1. Kosenkov A. Yu. Chapels of Klimovian Karelians [Chasovni klimovskikh karel]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennyye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2008. № 2 (92). P. 15–26.
2. Orfinskiy V. P. *Derevyannoe zodchestvo Karelii. Genesis, evolyutsiya, natsional'nye osobennosti. Diss. dokt. arkhitektury* [Wooden architecture of Karelia: genesis, evolution, and national features. Dr. architect. diss]. Vol. 1. Moscow, 1975. 298 p.
3. Orfinskiy V. P., Yaskelyaynen A. T. Chronological attribution of architectural folk wooden cult structures [Khronologicheskaya atributsiya sooruzheniy narodnogo derevyannogo kul'tovogo zodchestva]. Orfinskiy V. P., Grishina I. E. *Tipologiya derevyannogo kul'tovogo zodchestva Russkogo Severa* [Typology of the wooden cult architecture of North Russia]. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2004. P. 220–230.
4. *Spisok naseleennykh mest Rossiyskoy imperii. XXVII. Olonetskaya guberniya (Po svedeniyam 1873 goda)* [List of populated areas of the Russian Empire. XXVII. Olonets Province (According to 1873)]. St. Petersburg, 1879.

Поступила в редакцию 02.07.2013

СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ МОЛЬКОВ

доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики и методики преподавания физики физико-математического факультета, Карельская государственная педагогическая академия (Петрозаводск, Российская Федерация)
molkov@kspu.karelia.ru

ВАСИЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ САВИН

аспирант кафедры теоретической физики и методики преподавания физики физико-математического факультета, Карельская государственная педагогическая академия (Петрозаводск, Российская Федерация)
moped@onego.ru

INFLUENCE OF PROCESSES ON DUST PARTICLES' SURFACE ON THEIR ELECTRICAL CHARGE IN ORDERED PLASMA-DUST STRUCTURES*

The Influence of surface processes of dust particles on the value of their charge is considered. The charge, defined by the parameters of nonperturbed plasma, significantly depends on the electron emission from the dust particle surface. Secondary electron emission, electron-ion emission, thermo- and photoelectron emission were considered. It is shown that thermoemission is directly stipulated by the heat exchange between the surface of the particle and plasma components. Conditions in which thermoemission becomes essential are established. It is shown that the influence of electrons' emission decreases with the growth of the dust particle surface roughness.

Key words: dusty plasma, dusty particles, coefficient of emission, surface roughness, heat exchange

INTRODUCTION

Dust or complex plasma is the ionized gas that contains charged particles of condensed substance. These dust particles, immersed in the volume of plasma, receive an electrical charge from the stream of charged plasma particles onto their surface. The charged microparticles form the plasma form ordered dust structures. Interest in studying such structures is triggered by the prevalence of dust plasma in nature and technology and in the possibility of studying it on the basis of the fundamental phenomena of physics, such as phase shifts, oscillations, waves, and instabilities [7]. An important characteristic of dust plasma is the charge of microparticles. The charge of dust particles depends on processes of interaction of atoms, ions and plasma electrons with the surface of particles. Firm surfaces can serve as a source of electrons due to emission; the recombination of plasma electrons and ions, heat exchange, and various chemical reactions [7], [9] take place on the walls. The nature of interaction, besides the properties of the dusty particles material, significantly depends on the degree of its roughness. This work presents a quantitative analysis of the influence of the processes on the surfaces of dust particles and the influence of the degree of surface roughness on the charge of dust particles.

ELECTRON EMISSION

Electron emission includes emission of secondary electrons, ion-electron, photoemission and thermo emissions. Table 1 presents the averaged coef-

ficients of emissions \bar{r} and $\bar{\delta}$, calculated with the formulas (2), the coefficient of electron-ion potential emission γ , and the quantum exit of the photoeffect Y , used in calculations for dust particles with a smooth surface. Here $\Gamma(x)$ – the gamma function, ε_γ , ε_δ , ε_{pe} – the kinetic energy of secondary electrons at electron-ion emission, true secondary electrons, and photoelectrons; E_a , E_{ex} – the energy of ionization and excitation of resonant levels. Constants approximations for dependences of r and δ on energy of electrons $\varepsilon - A, b, \varepsilon_n, \varepsilon_m, r_m$ for dust particles from metals are given in [5]. For dust particles from dielectrics the dispersion of values of constants of approximation is significantly less. The values of constants of approximation, used by us for the dielectrics, received by data [3], are equal: $A = 0,18$, $b = 0,54$, $\varepsilon_n = 4,5$ eV, $\varepsilon_m = 4$ eV, $r_m = 0,55$. In the calculation formulas we used the temperature of electrons $\tau = T_e/T_a$ normalized to the temperature of the atoms T_a .

In many cases the surface of dust particles isn't smooth, but possesses the developed roughness which is characterized by roughness parameter $P_s = \sigma/\rho$, where σ – the mean square deviation of the surface from the average level; ρ – the correlation radius at which the deviations from the average level statistically aren't interlinked [1].

The electrons emitted by a surface of dust particles can collide repeatedly. Thus the coefficient of emission of electrons decreases. It is possible to consider this phenomenon, entering probability of a

Expressions and the calculation formulas for the coefficients of emission and energy of secondary electrons

Table 1

| Process | Emission coefficient | Calculation formula of coefficient of emission for dielectrics | Energy of secondary electrons, eV |
|---|---|--|---|
| Emission of elastic reflected electrons | $\bar{r} = 5.44 \frac{r_m \varepsilon_m^2 T_e}{(\varepsilon_m + T_e)^3}$ [7] | $\frac{1.24\tau}{(4 + 0.026\tau)^3}$ | $2T_e$ |
| Emission of real secondary electrons | $\bar{\delta} = A\Gamma(1+b) \left(1 + b + \frac{\varepsilon_n}{T_e}\right) T_e^b \times \exp\left\{-\frac{\varepsilon_n}{T_e}\right\}$ [7] | $3.48 \cdot 10^{-2} \left(1 + \frac{112}{\tau}\right) \tau^{0.54} \times \exp\left(-\frac{137}{\tau}\right)$ | $\varepsilon_\delta \sim 1 \text{ eV} \sim T_\delta$ |
| Electron-ion emission | $\gamma = 0.016(E_a - 2W_0)$ [9] | $\cong 0.22 (\text{Ne} + \text{Al}_2\text{O}_3)$ $W_0 = 3.9 \text{ eV} (\text{Al}_2\text{O}_3)$ | $\varepsilon_\gamma \sim 0.5(E_a - 2W_0) \sim T_\gamma$ |
| Photo emission | Y [9] | $\sim 10^{-1} (\text{He, Ne})$ $\sim 10^{-2} (\text{Ar, Kr, Xe})$ | $\varepsilon_{pe} \sim 0.5(E_{ex} - W_0) \sim T_{pl}$ |

departure of a particle from a rough surface without collisions P_f [4], [5]:

$$P_f = \frac{2}{\pi} \text{arctg} \frac{1}{2\sqrt{P_s}}, \quad (1)$$

Dependence P_f on P_s , calculated on a formula (1), well coordinated with experimental data on coefficients of emission from a rough surface [5].

HEAT EXCHANGE OF THE PLASMA COMPONENTS AND DUST PARTICLES

The heat exchange of heavy particles (atoms, ions) with the dusty particles surface is characterized by coefficient of accommodation equal to the ratio of energy transmitted by the particle to the wall during a collision to the maximal possible energy. For effective coefficients of accommodation of atoms and ions with the accounting of repeated collisions on a rough surface we have [4]:

$$\alpha_a = \frac{\alpha_0}{\alpha_0 + P_f(1 - \alpha_0)}, \quad \alpha_i = \frac{\alpha_0(1 + 0.5P_f)}{\alpha_0 + P_f(1 - \alpha_0)}, \quad (2)$$

where $\alpha_0 = 2,4\mu / (1 + \mu)^2$ – coefficients of accommodation for the unitary dispersion of atoms on a lattice of firm spheres [1]; $\mu = m_a/m_w$ – the ratio of the gas particle mass to the mass of an atom of surface. The kinetic energy acquired by atom after collision with a dust particle heated to temperature T_w is equal to $2\alpha_a(T_w - T_a)$, and kinetic energy lost by an ion is equal to $\alpha_i(\varepsilon_{iw} - 2T_w)$, where ε_{iw} – kinetic energy of an ion at collision with a particle surface.

INFLUENCE OF THE EMISSION OF ELECTRONS ON THE ELECTRIC CHARGE OF THE DUST PARTICLES

The charge of dust particles is determined by the equation of balance of charges, which taking into account the processes of emission of secondary and thermoelectrons looks like:

$$J_i = J_e - P_f \left[\bar{r} J_e \kappa_r + \bar{\delta} J_e \kappa_\delta + \gamma J_i \kappa_\gamma + Y J_{ph} \kappa_{pe} + J_{ih} \kappa_w \right], \quad (3)$$

where J_i, J_e, J_{ph}, J_{ih} – the flux density of ions, electrons, resonant photons and thermoelectrons; κ – the factor defined below. The density of a stream of thermoelectrons is determined by the dust particle temperature, and for its definition the equation of balance of a charge has to be solved together with the equation of balance of energy:

$$J_a \alpha_a 2(T_w - T_a) + J_{ih} P_f \kappa_w 2T_w + a_0 \sigma_0 T_w^4 = J_i \left[E_a + \alpha_i (\varepsilon_{iw} - 2T_w) - P_f \gamma \varepsilon_\gamma \kappa_\gamma \right] + J_e \left[2T_e - P_f (\bar{r} 2T_e \kappa_r + \bar{\delta} \varepsilon_\delta \kappa_\delta) \right] + J_{ph} (E_{ex} - P_f Y \varepsilon_{pe} \kappa_{pe}), \quad (4)$$

where J_a – the density of a stream of atoms; σ_0 – Stephan-Boltzmann constant; a_0 – integrated absorptive ability of a dust particle (blackness degree [8]); $T_a \cong T_i$ – temperatures of atoms (ions).

The left part of equation in (4) includes terms that account for the cooling of the dust particle by the atoms, thermoelectrons and radiation, and the right part includes terms that account for the heating of the dust particle by the ions, electrons, resonant photons and cooling by the corresponding secondary electrons. Table 2 specifies the flux densities of particles and the energies transferred to the surface of the dust particle or from its surface that were used in our calculations.

Expressions J_i and J_e for the flux density of particles also correspond to the approach of the limited orbital movement [7]. Here m_a – masses of atoms (ions) of plasma-forming gas; ϕ_w – particle potential; $e\Delta\phi$ – decrease in work function W_0 due to Schottky's effect; Q_{ex} and β_i – a rate constant of excitation of resonant levels of the atoms which split sponta-

Expressions and calculation formulas for flux densities and for energies of various types of particles

Table 2

| Particles | Flux density of particles | Calculated formula for J , $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ | Energy of particles, eV |
|-----------------|--|---|---|
| Atom | $J_a = n_a \sqrt{\frac{T_a}{2\pi m_a}}$ | $2,69 \cdot 10^6 n_a \sqrt{\mu}$ | $2T_a = 0,052$ |
| Ion | $J_i = n_0 \sqrt{\frac{T_a}{2\pi m_a}} \Phi$, $\Phi = \begin{cases} 1 - e\phi_w / T_a, & \phi_w < 0 \\ \exp[-e\phi_w / T_a], & \phi_w > 0 \end{cases}$ [4] | $2,69 \cdot 10^6 n_0 \sqrt{\mu} \Phi$, $\Phi = \begin{cases} 1 - z\tau, & z < 0 \\ e^{-z\tau}, & z > 0 \end{cases}$ | $\varepsilon_{iw} = \begin{cases} 2T_a - e\phi_w, & = \\ 2T_a & \end{cases}$ $\begin{cases} 0,026(2 - z\tau), & z < 0 \\ 0,052, & z > 0 \end{cases}$ |
| Electron | $J_e = n_0 \sqrt{\frac{T_e}{2\pi m_e}} \exp\left\{\frac{e\phi_w}{T_e}\right\}$ [4] | $2,69 \cdot 10^6 n_0 \sqrt{\tau} e^z$ | $2T_e = 0,052\tau$ |
| Photon | $J_{ph} = n_0 \sqrt{\frac{T_a}{2\pi m_a}} \frac{Q_{ex}}{\beta_i}$ | $2,69 \cdot 10^6 n_0 \sqrt{\mu} \frac{Q_{ex}}{\beta_i}$ | E_{ex} |
| Thermo-electron | $J_{th} = A_0 T_w^2 \exp\left\{\frac{W_0 - e\Delta\phi}{T_w}\right\}$ [4] | $6,75 \cdot 10^{25} \tau_w^2 \times$ $\times \exp\left\{-\frac{38,5(W_0 - e\Delta\phi)}{\tau_w}\right\}$ $e\Delta\phi = \begin{cases} 6,13 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{ z \tau}{a[\mu\text{m}]}} , & z < 0 \\ 0, & z > 0 \end{cases}$ | $2T_w = 0,052\tau_w$ |

neously, and ionization coefficient; n_a and n_0 – concentration of atoms and electrons (ions) in unexcited plasma. The value Q_{ex}/β_i ($\sim 0,1-0,3$) dependant on n_0 and T_e was determined by methods [2]. In calculation formulas we used dimensionless values $\tau_w = T_w/T_a$, $\mu = m_e/m_a$, $z = e\phi_w/T_e = eq/4\pi\epsilon_0 aT_e$; a – the radius of a dust particle; q – charge, z – normalized charge (here and below). In our calculations $T_a = 0,026$ eV (300 K).

The factor κ , included in the equations (3) and (4), is equal to 1 at the negative charge of a dust particle ($q < 0$) and is equal to $\exp\{-e\phi_w/T\}$ at the positive charge because electrons of emission experience additional delay. Temperature T takes values T_e , T_δ , T_γ , T_{ne} for different types of electron emission represented in Table 1, and T_w – for thermoelectrons.

From the comparative analysis of the terms of the equation (3) it follows that the influence of thermoemission needs to be considered, when $T_w \geq (W_0 - e\Delta\phi) / (50 - \ln n_0 [\text{cm}^{-3}])$. As an illustration of this statement, Fig. 1 presents the dependences of a charge z on the temperature of electrons τ at different values of surface particle temperature τ_w calculated according to (3) for the discharge in Ne with dust particles from Al_2O_3 ($m_w = 20,4$ u, $W_0 = 3,9$ eV). Beginning with some threshold value ($\tau_w = 5$), the influence of thermoemission on the value of the particle charge becomes essential.

In cases when the influence of thermoemission is insignificant, the charge of a dust particle

depends only on the temperature of electrons τ at non-Maxwell EDF on the effective temperature of the distribution function «tail». Fig. 2 presents dependences $z(\tau)$ which take into account three types of emission at various degrees of roughness of the dust particle surface. With the growth of the degree of roughness, the influence of emission weakens, and dependence $z(\tau)$ comes nearer to the corresponding dependence for a smooth particle without accounting for emission.

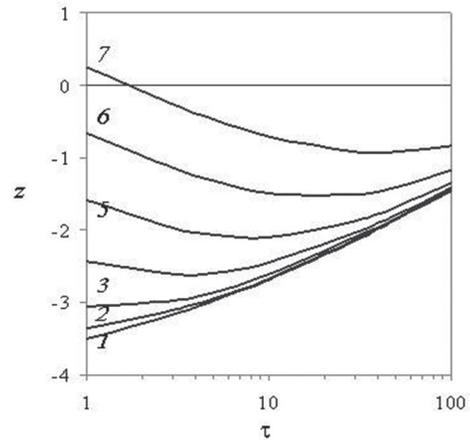


Fig. 1. Calculated dependences of a charge of a smooth dust Particle on the normalized temperature of electrons at various values of the rated temperature of this Particle's surface τ_w : 1,0 (1); 5,0 (2); 5,2 (3); 5,4 (4); 5,6 (5); 5,8 (6); 6,0 (7)

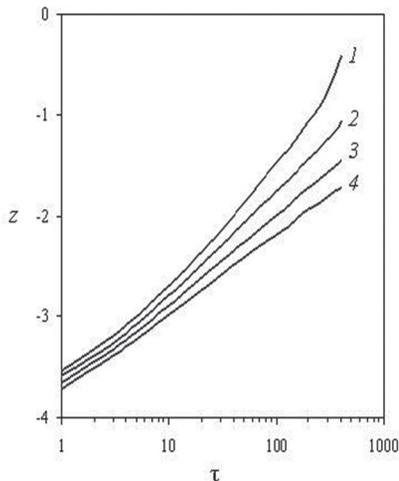


Fig. 2. Calculated dependences of the dust particle charge on temperature of electrons at various values of the degree of roughness of its surface: 0 (1) – smooth; 0,08 (2); 0,8 (3); (4) – smooth particle without accounting for emission

As the analysis of the terms of the energy balance equation (4) shows, the heating of the dust particle is carried out, generally, by ions, and cooling – by radiation and by atoms. The influence of other processes is insignificant. The charge of dust particles in the presence of thermoemission besides the temperature of electrons depends also on the concentration of electrons and atoms. With the growth n_0 the influence of thermoemission grows, and with the growth n it falls. Thus, at elevated pressures ($p \sim 10$ torr) the heating of the dust particles up to the temperatures at which thermoemission is essential does not occur. With the reduction of pressure ($p \sim 0,1$ torr) and growth T_e , starting at some threshold value, the influence of thermoemission becomes essential at small degrees of blackness ($a_0 \leq 0,1$) and rather high concentrations of the loaded particles in non perturbed plasma ($n_0 \sim 10^{10} - 10^{11} \text{ cm}^{-3}$). Fig. 3 presents dependences $z(\tau)$ for different types of

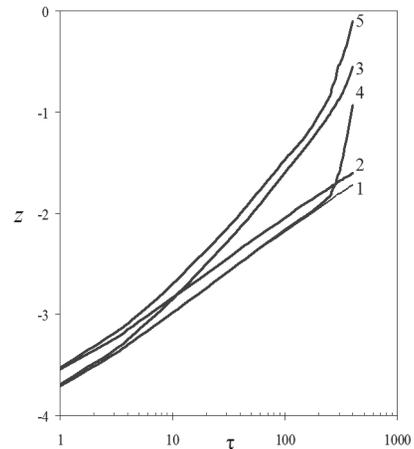


Fig. 3. Calculated dependences of the smooth dust particle charge on the temperature of electrons. (1) without accounting for emission; (2) taking into account ion – electronic and photoemissions; (3) taking into account secondary emission of electrons; 4 – only thermoemission is considered; 5 – all types of emission are considered

emission, including the thermoemission, received at the joint solution of the systems of equations (3) and (4). In cases when a_0 is close to 1, the cooling with radiation becomes noticeable and the influence of thermoemission decreases.

CONCLUSIONS

Thus, the effects of electron emission are of essential influence on the value of the dust particle charge, leading in some cases to an essential reduction of the charge in absolute value (i. e., reduction in half and more, up to the change of the value of the charge (see Fig. 1, curve 7 corresponding to $\tau_w = 6$)). Thus, the emission of electrons, dependent on the parameters of nonperturbed plasma, the material of microparticles and the type of their surface, must be taken into account in theoretical descriptions of the processes in dust plasma as well as in analyses of experimental data.

* Work is performed with support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Program «Scientific and Educational Community of Innovation Russia» through contracts № 14.B37.21.0755.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранцев Р. Г. Взаимодействие газов с поверхностями. М.: Наука, 1975. 343 с.
2. Биберман Л. М., Воробьев В. С., Якубов И. Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М.: Наука, 1982. 376 с.
3. Бронштейн И. М., Фрайман Б. С. Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969. 408 с.
4. Мольков С. И. Влияние шероховатой поверхности стенок разрядной камеры на работу газоразрядных лазеров // Сборник докладов 20-й международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация». СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. Т. 1. С. 14–25.
5. Мольков С. И. Влияние процессов на стенках капилляра на параметры плазмы положительного столба разряда низкого давления // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2012. № 2 (123). С. 88–95.
6. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 592 с.
7. Фортвов В. Е., Храпак А. Г., Храпак С. А., Молотков В. И., Петров О. Ф. Пылевая плазма // Успехи физических наук. 2004. № 5. С. 494–544.
8. Kreith F., Black W. Z. Basic Heat Transfer. Moscow: Mir Publ., 1983. 512 p.
9. Mol'kov S. I., Savin V. N. Influence of Electron Emission Processes on the Charge of Dust Particles in Ordered Plasma-dust Structures // Contributed Papers of VII International Conference Plasma Physics and Plasma Technology. Minsk, Belarus, Sept. 17–21, 2012. Minsk: Publishing Kovcheg LTD, 2012. Vol. 2. P. 790–793.

Mol'kov S. I., Karelian State Pedagogical Academy (Petrozavodsk, Russian Federation)

Savin V. N., Karelian State Pedagogical Academy (Petrozavodsk, Russian Federation)

INFLUENCE OF PROCESSES ON DUST PARTICLES' SURFACE ON THEIR ELECTRICAL CHARGE IN ORDERED PLASMA-DUST STRUCTURES

The Influence of surface processes of dust particles on the value of their charge is considered. The charge, defined by the parameters of nonperturbed plasma, significantly depends on the electron emission from the dust particle surface. Secondary electron emission, electron-ion emission, thermo- and photoelectron emission were considered. It is shown that thermoemission is directly stipulated by the heat exchange between the surface of the particle and plasma components. Conditions in which thermoemission becomes essential are established. It is shown that the influence of electrons' emission decreases with the growth of the dust particle surface roughness.

Key words: dusty plasma, dusty particles, coefficient of emission, surface roughness, heat exchange

REFERENCES

1. Barantsev R. G. *Vzaimodeystvie gazov s poverkhnostyami* [Interaction of the rarefied gases with streamline surfaces]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 343 p.
2. Bybermann L. M., Vorob'yev V. S., Yakubov V. T. *Kinetika neravnovesnoy nizkotemperaturnoy plazmy* [Kinetics of nonequilibrium low-temperature plasma]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 376 p.
3. Bronshteyn I. M., Fraymann B. S. *Vtorichnaya elektronnyaya emissiya* [Secondary electron emission]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 408 p.
4. Mol'kov S. I. Influence of the surface roughness of the discharge chamber walls on the gas-discharge lasers work [Vliyaniye sherokhovatoy poverkhnosti stenok razryadnoy kamery na rabotu gazorazryadnykh lazerov]. *Sbornik dokladov 20-y mezhdunarodnoy konferentsii "Lazery. Izmereniya. Informatsiya"* [Proceedings of Conference "Lasers, Measurements, Information"]. St. Petersburg, Russia, June 1–3, 2010. St. Petersburg, Publishing SPPU Sankt-Peterburg, 2010. Vol. 1. P. 14–25.
5. Mol'kov S. I. Influence of capillary walls' processes on plasma parameters in positive discharge column of low pressure [Vliyaniye protsessov na stenkakh kapillyara na parametry plazmy polozhitel'nogo stolba razryada nizkogo davleniya]. *Proceedings of Petrozavodsk State University Natural and Engineering Sciences* [Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo Universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"]. 2012. Vol. 2 (123). P. 88–95.
6. Rayzer Yu. P. *Fizika gazovogo razryada* [The physics of gas discharge]. Moscow, Nauka Publ., 1992. 592 p.
7. Fortov V. E., Khrapak A. G., Khrapak S. A., Molotkov V. I., Petrov O. F. Dusty plasma [Pylevaya plazma]. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences]. 2004. Vol. 5. P. 494–544.
8. Kreith F., Black W. Z. Basic heat transfer. Moscow, Mir Publ., 1983. 512 p.
9. Mol'kov S. I., Savin V. N. Influence of electron emission processes on the charge of dust particles in ordered plasma-dust structures // Contributed Papers of VII International Conference Plasma Physics and Plasma Technology. Minsk, Belarus, Sept. 17–21, 2012. Minsk, Publishing Kovcheg LTD, 2012. Vol. 2. P. 790–793.

Поступила в редакцию 14.06.2013

НИЁЛЕ СТАНИСЛАВОВНА СКОРИКОВА

инженер кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
nielik@mail.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

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

ЛЮДМИЛА АЛЕКСАНДРОВНА АЛЕШИНА

кандидат физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
aleshina@psu.karelia.ru

ЕЛЕНА ФЕДОРОВНА КУДИНА

доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела «Композиционные материалы и рециклинг полимеров», Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси (Гомель, Республика Беларусь)
kudina_mpri@tut.by

СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ КСЕРОГЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО СТЕКЛА, МОДИФИЦИРОВАННЫХ НИКЕЛЕМ, КОБАЛЬТОМ И ТИТАНОМ*

Представлены результаты рентгенографических исследований атомной структуры ксерогелей на основе жидкого стекла (ЖС), модифицированных никелем, кобальтом и титаном. Исходный образец ксерогеля был получен из водного раствора силиката натрия при дегидратации до постоянного веса при 200 °С. В качестве водного раствора щелочного силиката использовали стандартное натриевое ЖС (ГОСТ 13078, силикатный модуль $n = 2,9 \pm 0,1$ плотность $\rho = 1,45 \text{ г/см}^3$). Композиции ЖС-Ме (Ме = Со, Ni и Ti) были получены совмещением модификатора с водным раствором ЖС и последующей дегидратацией до постоянного веса при 200 °С. При изучении структуры использовался метод Уоррена – Финбака: из кривых распределения парных функций $D(r)$ были рассчитаны радиусы координационных сфер и координационные числа для всех исследованных образцов. Полученные характеристики ближнего порядка во взаимном расположении атомов могут быть использованы для формирования компьютерных моделей пространственного расположения атомов в исследованных ксерогелях. Анализ характеристик ближнего порядка показал, что при легировании ЖС Со, Ni и Ti кремний-кислородные тетраэдры сохраняются, при этом в рассматриваемых системах характер возникающего ближнего порядка носит черты расположения атомов в кристаллических фазах близкого состава, однако взаимная ориентация координационных многогранников в пространстве отличается.

Ключевые слова: жидкое стекло, ксерогель, рентгенографический анализ, ближний порядок, рентгеноаморфный

ВВЕДЕНИЕ

Материалы, находящиеся в аморфном состоянии, являются предметом многих современных теоретических и экспериментальных исследований. Особый интерес представляет высокодисперсный аморфный кремнезем, который обладает целым комплексом свойств, позволяющих широко использовать его как активный наполнитель для полимерных и смазочных материалов, сорбентов в хроматографии, а также в би-

отехнологии, медицине, фармации и сельском хозяйстве [9], [14]. На базе высокодисперсных кремнеземных порошков, синтезированных на основе жидкого стекла, создаются новые машиностроительные материалы с повышенными физико-механическими характеристиками [5], [10], [11], [15], [16]. Одним из методов кардинального изменения свойств кремнезема является его химическое модифицирование [4], [6], [17], позволяющее синтезировать порошки с новыми

свойствами. Получение материалов со строго заданными свойствами всегда связано с четким пониманием особенностей их структуры. Таким образом, изучение структурных изменений в высокодисперсных кремнеземных порошках, синтезированных на основе жидкого стекла, при модифицировании их различными добавками является актуальной научно-технической задачей. Целью работы было исследование структурных изменений образцов ксерогелей, полученных из водного раствора щелочного силиката (ВРС) при модифицировании никелем, кобальтом и титаном.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образец ксерогеля был получен из водного раствора силиката при дегидратации до постоянного веса при 200 °С. В качестве водного раствора щелочного силиката использовали стандартное натриевое жидкое стекло (ЖС, ГОСТ 13078, силикатный модуль $n = 2,9 \pm 0,1$, плотность $\rho = 1,45$ г/см³). Композиции ЖС-металл получали совмещением модификатора, в роли которого выступали соли металлов TiC₂O₅, NiSO₄ и CoSO₄, с водным раствором ЖС, после чего смеси дегидратировали, высушивали при 325–330 К, диспергировали и просеивали. Исследования атомной структуры проводили методом рентгеноструктурного анализа. Рентгенограммы получены на дифрактометрах типа ДРОН в Cu- и Mo-K_α-излучениях, монохроматизированных кристаллами пиролитического графита в первичных и отраженных лучах. Рентгенографирование образцов проводилось в геометриях на отражение и на просвет в интервале углов рассеяния 2θ от 2 до 145° с шагом по углам от 0,2 до 0,5° и временем экспозиции в каждой точке 20 с.

Полученные в эксперименте кривые распределения интенсивности рассеяния нормировались на составы: Na₂Si₃O₇, Na₂Si₃O_{10,12}Co_{0,78}S_{0,78}, Na₂Si₃O_{9,88}Ni_{0,72}S_{0,72} и Na₂Si₃O₁₁Ti_{0,8}C_{1,6}, которые были рассчитаны из данных о композициях ЖС – соли металлов. При анализе результатов эксперимента использовался метод Уоррена – Финбака.

Из нормированных экспериментальных зависимостей интенсивности рассеяния $I(S)$ от длины дифракционного вектора $S = (4\pi\sin\theta) / \lambda$ рассчитывались функции $H(S)$, являющиеся подынтегральными для расчета кривой распределения парных функций $D(r)$ и равные:

$$H(S) = S \cdot i(S) \exp(-\alpha^2 S^2) g^{-2}(S), \quad (1)$$

где $i(S)$ – интерференционная функция рассеяния, $\exp(-\alpha^2 S^2)$ – множитель затухания. Функция $g^{-2}(S)$ представляет собой фактор обострения и вводится для повышения контрастности интерференционной картины при больших значениях S . Численным интегрированием функ-

ции $H(S)$ рассчитывали кривую распределения парных функций $D(r)$:

$$D(r) = 2\pi^2 r \rho_e \sum_j Z_j + \int_0^{S_{\max}} H(S) \sin(Sr) dS, \quad (2)$$

где ρ_e – средняя электронная плотность, Z_j – атомный номер j -го элемента, входящего в состав исследуемого материала.

Экспериментальную функцию $D(r)$ можно представить в виде суммы функций парного взаимодействия атомов $P_{ij}(r)$, каждая из которых домножена на отношение координационного числа к радиусу соответствующей координационной сферы:

$$D(r) = \sum_i \sum_j \frac{N_{ij}}{r_{ij}} P_{ij}(r). \quad (3)$$

Парная функция $P_{ij}(r)$ характеризует распределение электронной плотности отдельно взятой пары атомов, находящихся на расстоянии r_{ij} друг от друга. Значения парных функций в зависимости от расстояния r рассчитываются из известных данных о функциях атомного рассеяния атомов i, j . Детально методика введения поправок в экспериментальные кривые распределения интенсивности и обоснование расчета $H(S)$ и $D(r)$ по формулам (2, 3) изложены в работах [2], [19].

Поскольку кривая распределения парных функций $D(r)$ линейно связана со значениями координационных чисел N_{ij} , то, задавая значения радиусов r_{ij} координационных сфер и их дисперсий σ_{ij} , координационные числа N_{ij} можно рассчитать методом наименьших квадратов (МНК). Дальнейший анализ структуры проводился в несколько этапов [8]:

1. Поиск кристаллических модификаций, химический состав которых соответствует химическому составу исследуемых материалов;

2. Расчет для каждой кристаллической фазы наборов радиусов координационных сфер, их дисперсий и координационных чисел;

3. Использование рассчитанных для кристаллических модификаций значений радиусов координационных сфер и их дисперсий в качестве исходных данных для расчета координационных чисел МНК из $D(r)_{\text{эксп}}$;

4. Варьирование значений радиусов и их дисперсий с одновременным расчетом (на каждом шаге) координационных чисел МНК до тех пор, пока различие между $D(r)_{\text{эксп}}$ и $D(r)_{\text{выч}}$ не станет меньше или равным погрешности в значениях $D(r)_{\text{эксп}}$ во всех точках интервала подгонки;

5. Сопоставление рассчитанных из эксперимента характеристик ближнего порядка (r_{ij} , σ_{ij} и N_{ij}) с соответствующими данными, рассчитанными для кристаллических фаз. Анализ различий между ними, интерпретация полученных результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Введение в исходную силикатную матрицу модифицирующих добавок меняет наблюдаемую картину рассеяния рентгеновских лучей: изменяется форма основного диффузного максимума и появляются дополнительные максимумы. Следует отметить, что ход кривых рассеяния, полученных от образцов, модифицированных никелем (Ni) и кобальтом (Co), подобен. На кривой рассеяния образцов с титаном (Ti) присутствуют очень слабые линии кристаллической фазы. На всех кривых появляется интенсивное рассеяние в области малых углов, которое не наблюдалось для исходного ксерогеля. Следовательно, при введении в силикатную матрицу ионов металлов возникают достаточно крупные области неоднородностей электронной плотности.

Рентгенографирование образцов с использованием разного типа излучений позволяет получить картины рассеяния в отличных друг от друга пределах значений длины дифракционного вектора S , что увеличивает информативность дифракционного эксперимента. На рис. 1 срав-

ниваются картины рассеяния образцами ЖС с интеркалированными в него ионами кобальта и титана, полученные на излучениях CuK_α и MoK_α .

На рис. 1а видно, что интенсивное рассеяние в области малых углов (рис. 1б), которое наблюдается при проведении эксперимента на излучении MoK_α , выявляется как дополнительный диффузный максимум на излучении CuK_α . Аналогичный эффект наблюдается и для системы ЖС-Ni. Данный максимум, по-видимому, обусловлен когерентным рассеянием регулярно расположенными неоднородностями электронной плотности примерно одного и того же размера. Для системы ЖС-Ti на картине рассеяния, полученной на излучении CuK_α , наблюдается перегиб при значении S , примерно соответствующем положению первого максимума на рис. 1а, и рост интенсивности рассеяния с уменьшением угла. Более детальную информацию о природе и характере распределения неоднородностей электронной плотности можно получить методом малоуглового рассеяния (МУР) [7].

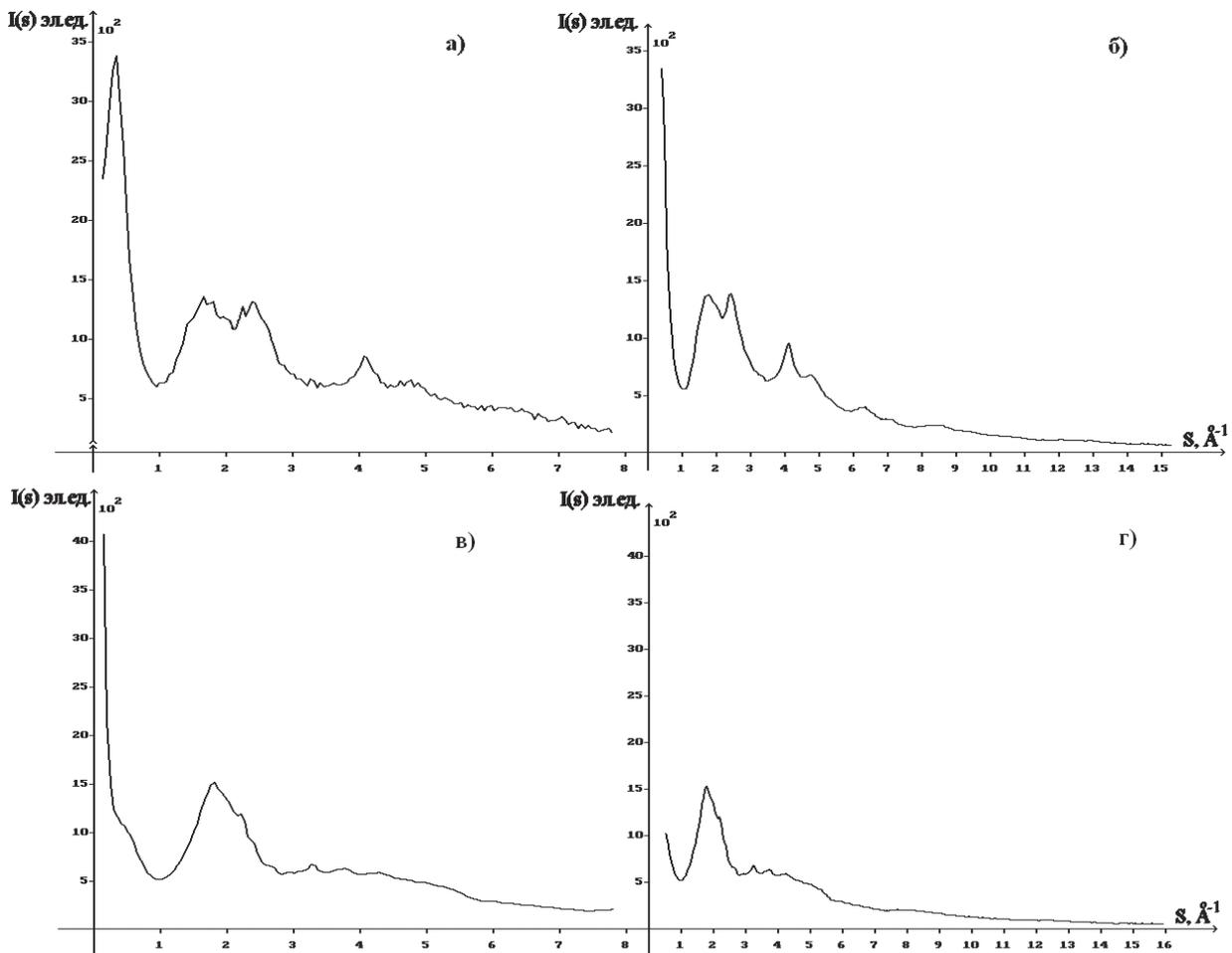


Рис. 1. Нормированные кривые распределения интенсивности рассеяния для систем ЖС-Co (излучение: а – CuK_α , б – MoK_α) и ЖС-Ti (излучение: в – CuK_α , г – MoK_α)

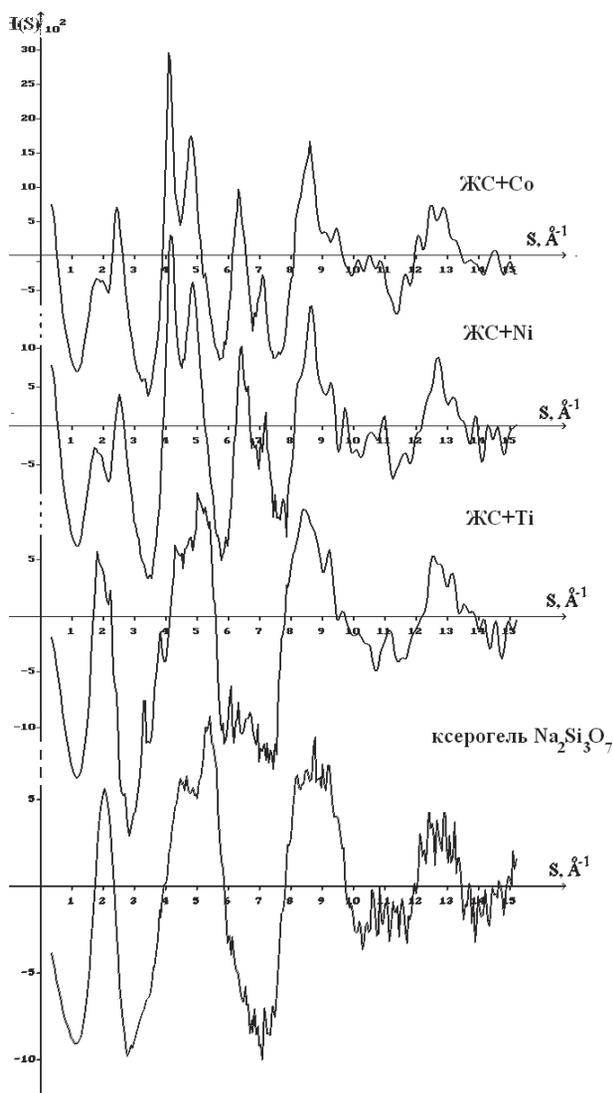


Рис. 2. S-взвешенные интерференционные функции рассеяния для образцов с интеркалированными в силикатную матрицу ионами Co, Ni, Ti в сравнении с таковыми для образца ксерогеля, полученного дегидратацией при 200 °С

На рис. 2 и 3 представлены функции $H(S)$ и $D(r)$ для образцов с интеркалированными в силикатную матрицу ионами кобальта, никеля и титана в сравнении с таковыми для образца ксерогеля, полученного дегидратацией при 200 °С.

На кривых распределения S-взвешенных интерференционных функций $H(S)$ (рис. 2) более ярко выражены различия в дифракционной картине, чем на кривых распределения $I(S)$. Как следует из рис. 2, интерференционные функции $H(S)$, полученные для образцов с Ni и Co, близки друг к другу. Кривая распределения $H(S)$ для образца с Ti ближе к таковой для исходного ксерогеля. Следовательно, характер взаимного расположения атомов в системах ЖС-Co и ЖС-Ni подобен, но отличается от упорядочения в исходном (нелегированном) ЖС. Легирование титаном изменяет кривую $H(S)$ по сравнению с $H(S)$ от

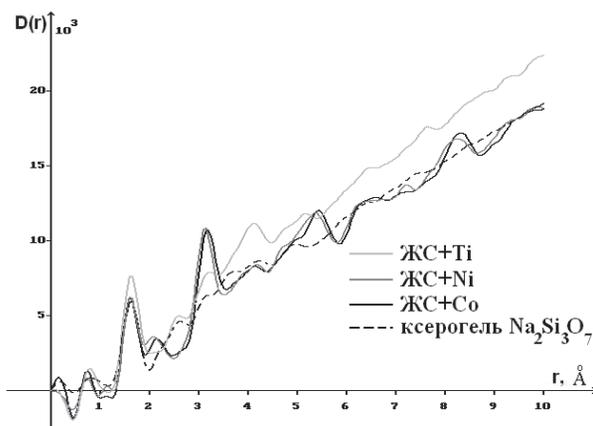


Рис. 3. Кривые распределения парных функций $D(r)$ для образцов с интеркалированными в силикатную матрицу ионами Co, Ni, Ti в сравнении с таковыми для образца ксерогеля, полученного дегидратацией при 200 °С

ЖС не столь значительно. Присутствие на кривой $H(S)$ для образца ЖС-Ti небольших узких пиков означает, что он содержит некоторое количество кристаллической фазы, идентифицировать которую из-за малого числа отражений не удалось.

Из анализа кривых распределения парных функций $D(r)$, представленных на рис. 3, видно, что первый максимум для всех образцов наблюдается при $r = 1,62 \text{ \AA}$, что отвечает среднему значению кратчайших расстояний Si-O в тетраэдрах SiO_4 . Ход зависимостей $D(r)$ отличается друг от друга, что свидетельствует о различии ближнего порядка в расположении атомов. Осцилляции на кривых $D(r)$ затухают при различных значениях r , следовательно, дальность корреляции (R_D) в расположении атомов различна: для образцов с Ti и исходного ксерогеля $R_D \sim 5 \text{ \AA}$, а для образцов с Ni и Co значение R_D почти вдвое выше ($R_D \sim 9 \text{ \AA}$). Таким образом, при интеркаляции в силикатную матрицу ионов Ni и Co размеры области ближнего упорядочения увеличиваются.

Для всех рассматриваемых образцов из кривых распределения парных функций $D(r)$ методом последовательных приближений [2] были рассчитаны радиусы r_{ij} и размытия σ_{ij} (дисперсии радиусов) координационных сфер. Координационные числа вычислялись при решении системы условных уравнений (3) методом сингулярного разложения, который оказался более устойчивым по сравнению со стандартным МНК. Результаты расчетов приведены в табл. 1–3. Погрешности в определении радиусов $\Delta r_{ij} = \pm 0,01 \text{ \AA}$ и дисперсии радиусов $\Delta \sigma_{ij} = 0,02 \text{ \AA}$.

Из табл. 1 видно, что в исходном состоянии ЖС характер ближнего упорядочения подобен порядку в кристаллической фазе $\text{Na}_2\text{Si}_3\text{O}_7$ [13]: различия в значениях радиусов координационных сфер незначительно выходят за пределы погрешности. Число ближайших кислородных

Таблица 1
Результаты расчета характеристик ближнего порядка для исходного ксерогеля в сравнении с данными, рассчитанными для кристаллической фазы $\text{Na}_2\text{Si}_3\text{O}_7$

| Тип сферы | $\text{Na}_2\text{Si}_3\text{O}_7$ [15] | | ЖС | | |
|-------------|---|----------------|--------------|--------------------|----------------------------------|
| | | | Радиус сферы | Дисперсия радиусов | Вычисл. координ. числа |
| | r_{ij} , Å | N_{ij} , ат. | r_{ij} , Å | σ_{ij} , Å | $N_{ij} \pm \Delta N_{ij}$, ат. |
| Si-O [O-Si] | 1,62 | 4,000 [1,714] | 1,62 | 0,15 | $4,0 \pm 0,2$ [1,7 ± 0,1] |
| Na-O [O-Na] | 2,44 | 5,000 [1,429] | 2,38 | 0,24 | $6,3 \pm 0,3$ [1,8 ± 0,1] |
| O-O | 2,65 | 5,140 | 2,69 | 0,10 | $6,9 \pm 0,3$ |
| Si-Si | 3,07 | 3,330 | 3,05 | 0,13 | $4,4 \pm 0,2$ |
| Na-Na | 3,39 | 0,500 | 3,36 | 0,14 | $0,5 \pm 0,1$ |

соседей, окружающих атом кремния, равно 4, то есть тетраэдры SiO_4 сохраняются. Мотив связи тетраэдров SiO_4 в ЖС и в кристаллической фазе $\text{Na}_2\text{Si}_3\text{O}_7$ одинаков: $N_{\text{O-Si}} = 1,7$ в ЖС и в кристаллической фазе $\text{Na}_2\text{Si}_3\text{O}_7$, но отличается от такового в кварце: в чистом кварце $N_{\text{O-Si}} = 2$, то есть тетраэдры SiO_4 соединяются вершинами через общий атом кислорода. Это различие обусловлено наличием в ЖС в окрестности тетраэдров SiO_4 ионов Na, стремящихся также окружить себя ионами кислорода. Однако 4-угольная пирамида NaO_5 в ЖС достраивается до октаэдра NaO_6 , то есть в ЖС ионы Na находятся в октаэдрическом окружении ($N_{\text{Na-O}} = 6,3$), и эти октаэдры NaO_6 соединяются вершинами: $N_{\text{O-Na}} = 1,8$. Характер упаковки этих структурных элементов в аморфном ЖС отличается от мотива их расположения в кристалле $\text{Na}_2\text{Si}_3\text{O}_7$ уже в силу того, что и сами элементы различны: 4-угольная пирамида NaO_5 в кристалле $\text{Na}_2\text{Si}_3\text{O}_7$ и октаэдр NaO_6 в ЖС.

При внедрении в ЖС кобальта характер ближнего порядка становится подобен таковому для кристаллической фазы $\text{Na}_2\text{CoSi}_4\text{O}_{10}$ (табл. 2). Об этом свидетельствует тот факт, что значения радиусов координационных сфер практически одинаковы. Следует отметить, что в табл. 2 и 3 для координационных сфер разного типа, имеющих одинаковые радиусы, для сравнения с экспериментом были рассчитаны средневесовые значения радиусов $\langle r_{ij} \rangle$ и суммарные координационные числа $\langle N_{ij} \rangle$ по методике, предложенной в [1].

Анализ данных, представленных в табл. 2, показывает, что кобальт, внедряясь в структуру ЖС, стремится окружить себя атомами кислорода, мешая при этом образованию кремний-кислородного каркаса из тетраэдров, подобного таковому в ЖС. Об этом свидетельствует понижение координационного числа на сфере O-Si от $N_{\text{O-Si}} = 1,7$ (табл. 1) для исходного ЖС до $N_{\text{O-Si}} = 1,1$ (табл. 2) для системы ЖС-Co. Кремний-кислородные тетраэдры при этом сохраняются ($N_{\text{Si-O}} = 3,8 \pm 0,2$).

Кислородное окружение иона Co несколько отличается от такового в кристаллической фазе $\text{Na}_2\text{CoSi}_4\text{O}_{10}$. В последней число атомов кислорода, окружающих кобальт, равно 5 ($N_{\text{Co-O}} = 5$), то есть координационный многогранник – четырехугольная пирамида. В системе ЖС-Co координационное число $N_{\text{Co-O}} = 4,5$, то есть наряду с пирамидами CoO_5 имеются тетраэдры CoO_4 .

Необходимо отметить тот факт, что координационные числа, рассчитанные из эксперимента для системы ЖС-Co вплоть до 6-й сферы, близки к данным для кристалла $\text{Na}_2\text{CoSi}_4\text{O}_{10}$, однако на 7-й сфере имеет место резкое возрастание числа атомов. Нет совпадения и на последующих двух сферах. Причина этого – изменение взаимной ориентации координационных многогранников кремния и металлов в пространстве.

Характеристики ближнего порядка, полученные для образца с Ni (табл. 2), коррелируют с данными, приведенными для образца с кобальтом, и с данными, рассчитанными для кристалла $\text{Na}_2\text{NiSi}_4\text{O}_{10}$, но, в отличие от системы ЖС-Co, в аморфной фазе ЖС-Ni так же, как и в кристалле, никель в основном окружен 5 атомами: $N_{\text{Ni-O}} = 4,9$. Тем не менее все рассмотренные выше для системы ЖС-Co особенности в поведении координационных чисел наблюдаются и в системе ЖС-Ni.

Таким образом, при внедрении в ЖС ионов Ni и Co в аморфных системах возникает ближний порядок, близкий к расположению атомов в структурных кристаллических фазах $\text{Na}_2\text{NiSi}_4\text{O}_{10}$ и $\text{Na}_2\text{CoSi}_4\text{O}_{10}$ [3] в области ближайшего окружения, но отличающийся по взаимной ориентации координационных многогранников в пространстве.

В случае модифицирования ЖС ионами Ti в системе ЖС-Ti ближний порядок становится подобен таковому для кристаллической фазы $\text{Na}_2\text{TiSi}_4\text{O}_{10}$ (табл. 3). Об этом свидетельствуют практически совпадающие значения радиусов координационных сфер.

Однако число кремниевых соседей у атома кислорода уменьшается до $N_{\text{O-Si}} = 1,2$ вместо 1,4 для кристаллической фазы $\text{Na}_2\text{TiSi}_4\text{O}_{10}$, то есть мотив взаимного расположения тетраэдров SiO_4 различен.

Увеличение числа кислородных соседей у атома кремния до 4,2, возможно, обусловлено замещением части атомов кремния в тетраэдрах атомами титана.

Кроме того, число ближайших соседних атомов кислорода у ионов титана ($N_{\text{Ti-O}} = 3,3$) вдвое ниже, чем в кристаллической модификации, в которой титан находится в октаэдрической координации. Координационное число для натрия также занижено: $N_{\text{Na-O}} = 4,1$ в системе ЖС-Ti вместо 5 в кристалле. Таким образом, несоответствие координационных чисел, определенных из эксперимента для системы ЖС-Ti, соответствующим данным для кристалла $\text{Na}_2\text{TiSi}_4\text{O}_{10}$ начинается уже с ближайшего окружения. С учетом

Таблица 2

Результаты расчета характеристик ближнего порядка для системы ЖС-М в сравнении с данными, рассчитанными для кристаллической фазы $\text{Na}_2\text{MSi}_4\text{O}_{10}$ (M = Co, Ni)

| № сферы | Объединяемые сферы | r_{ij} , Å | N_{ij} , ат. | Тип сферы | $\langle r_{ij} \rangle$, Å | $\langle N_{ij} \rangle$, ат. | r_{ij} , Å | σ_{ij} , Å | $N_{ij} \pm \Delta N_{ij}$, ат. |
|--|--------------------|--------------|----------------|-------------|------------------------------|--------------------------------|--------------|-------------------|----------------------------------|
| $\text{Na}_2\text{CoSi}_4\text{O}_{10}$ [14] | | | | | | | ЖС-Co | | |
| 1 | Si-O [O-Si] | 1,63 | 4,0 [1,6] | Si-O [O-Si] | 1,63 | 4,0 [1,6] | 1,62 | 0,08 | $3,8 \pm 0,2$ [1,1 ± 0,2] |
| 2 | Co-O | 2,04 | 5,0 | Co-O | 2,04 | 5,0 | 2,11 | 0,10 | $4,5 \pm 0,2$ |
| 3 | Na-O | 2,43 | 4,0 | Na-O | 2,43 | 4,0 | 2,43 | 0,15 | $3,3 \pm 0,1$ |
| 4 | O-O | 2,67 | 5,5 | O-O | 2,67 | 5,5 | 2,69 | 0,10 | $2,9 \pm 0,2$ |
| 5 | Na-O | 2,80 | 2,5 | Na-O | 2,80 | 2,5 | 2,80 | 0,01 | $1,8 \pm 0,1$ |
| 6 | Si-Si | 3,04 | 3,0 | Si-Si | 3,04 | 3,0 | 3,06 | 0,02 | $3,7 \pm 0,2$ |
| 7 | Co-Co | 3,23 | 1,0 | Co-Co | 3,25 | 2,49 | 3,25 | 0,23 | $12,4 \pm 0,5$ |
| | Si-Co | 3,24 | 1,25 | | | | | | |
| | Na-Si | 3,28 | 4,0 | | | | | | |
| 8 | Na-Co | 3,41 | 1,5 | Na-Co | 3,46 | 2,80 | 3,45 | 0,22 | $0,7 \pm 0,3$ |
| | Na-Na | 3,50 | 0,5 | | | | | | |
| | O-O | 3,52 | 5,1 | | | | | | |
| 9 | Co-O | 3,59 | 4,0 | Co-O | 3,63 | 12,2 | 3,64 | 0,12 | $15,1 \pm 0,7$ |
| | Na-Si | 3,61 | 3,0 | | | | | | |
| | Na-O | 3,64 | 5,0 | | | | | | |
| | Si-O | 3,66 | 7,75 | | | | | | |
| $\text{Na}_2\text{NiSi}_4\text{O}_{10}$ [14] | | | | | | | ЖС-Ni | | |
| 1 | Si-O [O-Si] | 1,61 | 4,0 [1,6] | Si-O [O-Si] | 1,61 | 4,0 [1,6] | 1,62 | 0,09 | $3,8 \pm 0,2$ [1,2 ± 0,2] |
| 2 | Ni-O | 2,07 | 5,0 | Ni-O | 2,07 | 5,0 | 2,08 | 0,11 | $5,1 \pm 0,3$ |
| 3 | Na-O | 2,46 | 4,0 | Na-O | 2,46 | 4,0 | 2,38 | 0,10 | $2,5 \pm 0,1$ |
| 4 | O-O | 2,66 | 5,5 | O-O | 2,66 | 5,5 | 2,69 | 0,12 | $3,3 \pm 0,2$ |
| 5 | Na-O | 2,75 | 2,5 | Na-O | 2,75 | 2,5 | 2,75 | 0,01 | $2,2 \pm 0,1$ |
| 6 | Si-Si | 3,05 | 3,0 | Si-Si | 3,05 | 3,0 | 3,05 | 0,01 | $3,9 \pm 0,2$ |
| 7 | Ni-Ni | 3,17 | 1,0 | Ni-Ni | 3,20 | 2,41 | 3,20 | 0,24 | $11,3 \pm 0,6$ |
| | Si-Ni | 3,19 | 1,25 | | | | | | |
| | Na-Si | 3,25 | 4,0 | | | | | | |
| 8 | Na-Ni | 3,44 | 1,5 | Na-Ni | 3,46 | 2,74 | 3,46 | 0,23 | $0,6 \pm 0,1$ |
| | O-O | 3,49 | 5,0 | | | | | | |
| | Na-Na | 3,51 | 0,5 | | | | | | |
| 9 | Ni-O | 3,55 | 4,0 | Ni-O | 3,61 | 11,9 | 3,61 | 0,12 | $14,1 \pm 0,5$ |
| | Na-Si | 3,63 | 3,0 | | | | | | |
| | Na-O | 3,63 | 5,0 | | | | | | |
| | Si-O | 3,64 | 7,75 | | | | | | |

вдвое меньшего значения дальности корреляции это означает, что беспорядок в расположении атомов в системе ЖС-Ti выше, чем в системах ЖС-Co и ЖС-Ni.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из анализа характеристик ближнего порядка, рассчитанных для ксерогелей на основе жидкого стекла, модифицированных никелем, кобальтом и титаном, следует, что при образовании систем ЖС-металл кремний-кислородные тетраэдры

сохраняются, однако их взаимная ориентация в пространстве меняется. Изменяется и координационное окружение атомов металлов по сравнению с таковым в кристаллах близкого состава.

Полученные в данной работе характеристики ближнего порядка во взаимном расположении атомов могут быть использованы для формирования компьютерных моделей пространственного расположения атомов в исследованных ксерогелях как в исходном состоянии, так и при легировании атомами различных металлов.

Таблица 3

Результаты расчета характеристик ближнего порядка для системы ЖС-Ti в сравнении с данными, рассчитанными для кристаллической фазы $\text{Na}_2\text{TiSi}_4\text{O}_{10}$

| № сферы | Объединяемые сферы | $\text{Na}_2\text{TiSi}_4\text{O}_{10}$ [20] | | | | | ЖС-Ti | | |
|---------|--------------------|--|----------------|----------------|------------------------------|--------------------------------|--------------|-------------------|------------------------------------|
| | | r_{ij} , Å | N_{ij} , ат. | Тип сферы | $\langle r_{ij} \rangle$, Å | $\langle N_{ij} \rangle$, ат. | r_{ij} , Å | σ_{ij} , Å | $N_{ij} \pm \Delta N_{ij}$, ат. |
| 1 | Si-O [O-Si] | 1,62 | 4,00 [1,45] | Si-O [O-Si] | 1,62 | 4,00 [1,45] | 1,62 | 0,01 | $4,2 \pm 0,2$ [$1,2 \pm 0,1$] |
| 2 | Ti-O | 1,97 | 6,00 | Ti-O | 1,97 | 6,00 | 1,97 | 0,01 | $3,3 \pm 0,1$ |
| 3 | Na-O | 2,46 | 5,00 | Na-O | 2,46 | 5,00 | 2,38 | 0,01 | $4,1 \pm 0,2$ |
| 4 | O-O | 2,66 | 5,82 | O-O | 2,66 | 5,82 | 2,66 | 0,01 | $5,0 \pm 0,2$ |
| 5 | Na-O | 2,72 | 2,00 | Na-O | 2,72 | 2,00 | 2,76 | 0,02 | $0,6 \pm 0,1$ |
| 6 | O-O | 2,89 | 0,73 | O-O | 2,89 | 0,73 | 2,93 | 0,01 | $0,13 \pm 0,01$ |
| 7 | Si-Si | 3,05 | 3,00 | Si-Si | 3,05 | 3,12 | 3,05 | 0,12 | $7,5 \pm 0,2$ |
| | O-O | 3,08 | 0,36 | | | | | | |
| 8 | Na-Si | 3,21 | 2,00 | Na-Ti | 3,22 | 3,37 | 3,20 | 0,01 | $0,6 \pm 0,1$ |
| | Na-Ti | 3,23 | 2,00 | | | | | | |
| | O-O | 3,27 | 0,36 | | | | | | |
| 9 | Si-Ti | 3,33 | 1,00 | Si-Ti | 3,33 | 1,00 | 3,35 | 0,01 | $1,3 \pm 0,1$ |
| 10 | Na-O | 3,46 | 1,00 | Na-Na | 3,54 | 8,28 | 3,52 | 0,03 | $14,2 \pm 0,3$ |
| | Na-Na | 3,51 | 2,00 | | | | | | |
| | Si-O | 3,56 | 6,00 | | | | | | |
| 11 | Na-Si | 3,61 | 4,00 | Na-Si | 3,61 | 5,21 | 3,61 | 0,05 | $4,0 \pm 0,2$ |
| | O-O | 3,64 | 2,91 | | | | | | |

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алешина Л. А., Ковалев-Троицкий К. Л., Макаров А. М., Никитина Е. А., Фофанов А. Д. Моделирование распределения атомов Al в ГЦК кислородной подрешетке окисла Al_2O_3 , Деп. в ВИНТИ. 1992. № 2524. В92. 16 с.
- Алешина Л. А., Фофанов А. Д. Рентгеноструктурный анализ аморфных материалов. Петрозаводск: Изд-во ПГУ, 1987. 85 с.
- Анфилов В. Н., Быков В. Н., Осипов А. А. Силикатные расплавы. М., 2005. 357 с.
- Кудина Е. Ф., Злотников И. И., Плещачевский Ю. М. Модифицирование жидкого стекла активными добавками: (обзор) // Материалы. Технологии. Инструменты. 2000. Т. 5. № 2. С. 36–40.
- Кудина Е. Ф., Плещачевский Ю. М., Буря И. А. Органосиликатные нанокompозиты: получение, структура, свойства // Вестник Фонда фундаментальных исследований. 2008. № 3. С. 16–28.
- Максимов А. И., Мошников В. А., Таиров Ю. М., Шилова О. А. Основы золь-гель-технологии нанокompозитов. СПб.: Элмор, 2008. 255 с.
- Свергун Д. И., Фейгин Л. А. Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние. М., 1986. 280 с.
- Фофанов А. Д. Структура и ближний порядок в кислород- и углерод-содержащих системах с особыми свойствами: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 1998. 32 с.
- Шилова О. А., Шилов В. В. Нанокompозиционные оксидные и гибридные органо-неорганические материалы, получаемые золь-гель методом. Синтез. Свойства. Применение // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии: Сб. науч. тр. Т. 1. Киев: Академперіодика, 2003. С. 9–83.
- Chen Yung-Chin, Tsai Chi-Che, Lee Yu-Der. Preparation and properties of silylated PTFE/SiO₂ organic-inorganic hybrids via sol-gel process // J. Polym. Sci. A. 2004. Vol. 42. № 7. P. 1789–1807.
- Davis S. R., Brough A. R., Atkinson A. Formation of silica/epoxy hybrid network polymers // J. Non-Crist. Solids. 2003. Vol. 315. № 1/2. P. 197–205.
- Durand G., Vilminot S., Richard-Plouet M., Derory A., Lambour J. P., Drillon M. Magnetic behavior of $\text{Na}_m\text{MSi}_4\text{O}_{10}$ (M=Co, Ni) compounds // Journal of Solid State Chemistry. 1997. Vol. 131. № 2. P. 335–340.
- Kahlenberg V., Marler B., Muñoz Acevedo J. C., Patarin J. Ab initio crystal structure determination of $\text{Na}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}$ from conventional powder diffraction data // Solid State Sciences. 2002. Vol. 4. P. 12.
- Kudina E. F. Synthesis and Properties of Dispersed Hybrid Materials Based on a Silicate Matrix // Glass Physics and Chemistry. 2012. Vol. 38. № 1. P. 172–179.
- Kudina E. F., Kushnerov D. N., Tyurina S. I., Chmykhova T. G. Effect of Dispersed Organic Silica on the Tribological Behavior of Greases // Journal of Friction and Wear. 2003. Vol. 24. № 5. P. 71–76.
- Kudina E. F., Pechersky G. G. Nanostructured Organosilicate Composites: Production, Properties, Application // Resin Composites: Properties, Production and Application / Ed. D. B. Song. N. Y.: Nova Science Publishers, 2011. Ch. 3. P. 101–128.
- Kudina E. F., Pleskachevskiy Yu. M. Modification of Alkali Silicate Solutions by Organic Reagents and Investigation of the Properties of the Final Products // Glass Physics and Chemistry. 2009. Vol. 35. № 4. P. 442–448.
- Peacor D. R., Buerger M. J. The determination and refinement of the structure of narsarsukite, $\text{Na}_2\text{TiOSi}_4\text{O}_{10}$ // Amer. Mineral. 1962. Vol. 47. № 5, 6. P. 539–556.
- Warren B. E. X-ray diffraction. N. Y.: Mass, 1969. 563 p.

Skorikova N. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Fofanov A. D., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Osaulenko R. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Aleshina L. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Kudina E. F., V. A. Belyi Metal Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus (Gomel, Republic of Belarus)

STRUCTURAL STATE OF XEROGELS BASED ON WATER GLASS MODIFIED BY COBALT, NICKEL, AND TITANIUM

Results of the X-ray study of the atomic structure of xerogels based on water glass (WG) modified by nickel, cobalt, and titanium are presented. The original xerogel sample was obtained from a standard sodium water glass during dehydration to constant weight at 200 °C. An aqueous solution of alkali silicate was a standard sodium water glass (WG, state standard 13078, silicate modulus $n = 2.9 \pm 0.1$, density $\rho = 1.45 \text{ g/cm}^3$). The WG-Co, WG-Ni and WG-Ti compositions were obtained by the combination of the modifier and the aqueous solution of WG during further dehydration to constant weight at 200 °C. Experimental results were processed with the use of Warren – Finbak method: using pair function curves $D(r)$ radii of coordination spheres and coordination numbers were calculated for all of the investigated samples. The obtained short-range order characteristics can be used to generate computer models of the studied xerogels with spatial arrangement of atoms. Analysis of the short-range order characteristics showed that the silicon-oxygen tetrahedra are saved in WG modified by Co, Ni and Ti. In these systems, the short-range order is similar to the atomic arrangement in crystalline phases of comparable composition, but the mutual orientation of the coordination polyhedra in space is different.

Key words: water glass, xerogels, x-ray analysis, short range order, x-ray amorphous

REFERENCES

1. Aleshina L. A., Kovalev-Troitskiy K. L., Makarov A. M., Nikitina E. A., Fofanov A. D. *Modelirovanie raspredeleniya atomov Al v GCK kislorodnoy podreshetke okisla Al_2O_3* . Dep. v VINITI [Modeling of the distribution of Al atoms in the FCC oxygen sublattice of the oxide Al_2O_3 . Dep. in VINITI]. 1992. № 2524 (92). 16 p.
2. Aleshina L. A., Fofanov A. D. *Rentgenostrukturnyy analiz amorfnykh materialov* [X-ray analysis of amorphous materials]. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 1987. 85 p.
3. Anfilogov V. N., Bykov V. N., Osipov A. A. *Silikatnye rasplavy* [Silicate melts]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 357 p.
4. Kudina E. F., Zlotnikov I. I., Pleskachevskiy Yu. M. Modification of sodium silicate of active additives: (review) [Modifitsirovanie zhidkogo stekla aktivnymi dobavkami: (obzor)]. *Materialy. Tekhnologii. Instrumenty* [Materials. Technologies. Tools]. 2000. Vol. 5. № 2. P. 36–40.
5. Kudina E. F., Pleskachevskiy Yu. M., Burya I. A. Organosilicate nanocomposites: preparation, structure, properties [Organosilikatnye nanokompozity: poluchenie, struktura, svoystva]. *Vestnik Fonda fundamental'nykh issledovaniy* [Vestnik of the Foundation for Fundamental Research]. 2008. № 3. P. 16–28.
6. Maksimov A. I., Moshnikov V. A., Tairov Yu. M., Shilova O. A. *Osnovy zol'-gel'-tehnologii nanokompozitov* [Fundamentals of sol-gel technology nanocomposites]. St. Petersburg, Elmor Publ., 2008. 255 p.
7. Svergun D. I., Fejgin L. A. Small-angle X-ray and neutron scattering. [Rentgenovskoe i neytronnoe malouglovoe rasseyaniye]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 280 p.
8. Fofanov A. D. *Struktura i blizhniy poryadok v kislorod- i uglerod-soderzhashchikh sistemakh s osobymi svoystvami. Avtoref. Dokt. fiz.-mat. nauk* [The structure and short-range order in the oxygen- and carbon-containing systems with special properties. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Moscow, 1998. 32 p.
9. Shilova O. A., Shilov V. V. Nanocomposite oxide and organo-inorganic hybrid materials obtained by sol-gel method. Synthesis. Properties. Application. [Nanokompozitsionnye oksidnye i gibridnye organo-neorganicheskie materialy, poluchayemye zol'-gel' metodom. Sintez. Svoystva. Primeneniye]. *Nanosistemy, nanomaterialy, nanotekhnologii* [Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies]. Vol. 1. Kiev, Akademperiodika Publ., 2003. P. 9–83.
10. Chen Yung-Chin, Tsai Chi-Che, Lee Yu-Der. Preparation and properties of silicate PTFE/SiO₂ organic-inorganic hybrids via sol-gel process // *J. Polym. Sci. A*. 2004. Vol. 42. № 7. P. 1789–1807.
11. Davis S. R., Brough A. R., Atkinson A. Formation of silica/epoxy hybrid network polymers // *J. Non-Crist. Solids*. 2003. Vol. 315. № 1/2. P. 197–205.
12. Durand G., Vilminot S., Richard-Plouet M., Derory A., Lambour J. P., Drillon M. Magnetic behavior of Na₂MSi₄O₁₀ (M=Co, Ni) compounds // *Journal of Solid State Chemistry*. 1997. Vol. 131. № 2. P. 335–340.
13. Kahlenberg V., Marler B., Muñoz Acevedo J. C., Patarin J. Ab initio crystal structure determination of Na₂Si₃O₇ from conventional powder diffraction data // *Solid State Sciences*. 2002. Vol. 4. P. 12.
14. Kudina E. F. Synthesis and Properties of Dispersed Hybrid Materials Based on a Silicate Matrix // *Glass Physics and Chemistry*. 2012. Vol. 38. № 1. P. 172–179.
15. Kudina E. F., Kushnerov D. N., Tyurina S. I., Chmykhova T. G. Effect of Dispersed Organic Silica on the Tribological Behavior of Greases // *Journal of Friction and Wear*. 2003. Vol. 24. № 5. P. 71–76.
16. Kudina E. F., Pechersky G. G. Nanostructured Organosilicate Composites: Production, Properties, Application // *Resin Composites: Properties, Production and Application* / Ed. D. B. Song. N. Y., Nova Science Publishers, 2011. Ch. 3. P. 101–128.
17. Kudina E. F., Pleskachevskiy Yu. M. Modification of Alkali Silicate Solutions by Organic Reagents and Investigation of the Properties of the Final Products // *Glass Physics and Chemistry*. 2009. Vol. 35. № 4. P. 442–448.
18. Peacor D. R., Buerger M. J. The determination and refinement of the structure of narsarsukite, Na₂TiSi₄O₁₀ // *Amer. Mineral*. 1962. Vol. 47. № 5, 6. P. 539–556.
19. Warren B. E. X-ray diffraction. N. Y., Mass, 1969. 563 p.

Поступила в редакцию 05.07.2013

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

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

ЕВГЕНИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ТРОШИН

студент 5-го курса физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
troshin_e_v@hotmail.com

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОМИЧЕСКОГО НАГРЕВА ДЛЯ ОЧИСТКИ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

В последние годы разработаны разнообразные методы получения углеродных нанотрубок. Обязательным этапом любого метода является очистка нанотрубок от нежелательных примесей. В настоящей работе исследуется возможность очистки нанотрубок, содержащихся в катодном осадке (депозите) аргонового дугового разряда, за счет омического нагрева. С этой целью через волокна депозита пропускался постоянный электрический ток в условиях атмосферного воздуха. Зарегистрированные вольт-амперные характеристики этого процесса имеют вид кривой с максимумом тока, соответствующим температуре поверхности волокна 650–750 °С, и последующим спадом тока при неизменном напряжении. Исследования морфологии поверхности показывают, что этот процесс сопровождается по меньшей мере частичным выжиганием аморфных и графитоподобных частиц, содержащихся в волокнах. Сравнение рентгеновских дифрактограмм образцов до и после такой очистки в какой-то мере подтверждает протекание этого процесса. При этом электросопротивление образцов увеличивается почти до 1–3 кОм. Было обнаружено, что при разности потенциалов на волокнах 3–10 В и токах 1–20 мкА наблюдаются слабые световые микровспышки, спонтанным образом перемещающиеся по поверхности волокон. Предполагается, что этот эффект обусловлен электрическими пробоями микро- и наноконденсаторов из неконтактирующих нанотрубок, образующихся внутри волокон. Обнаруженный эффект может быть использован как средство контроля качества очистки волокон за счет токопрохождения.

Ключевые слова: дуговой разряд, графит, вольт-амперная характеристика, дифрактограмма, микрофотография, микровспышки, микроразряды

ВВЕДЕНИЕ

Углеродные нанотрубки – один из самых перспективных материалов наноэлектроники. В последние годы разработаны разнообразные методы получения как многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ), так и одностенных (ОУНТ). Наиболее простым способом синтеза МУНТ является дуговой разряд с графитовыми электродами в инертном газе. В этих условиях на поверхности катода, обращенной в сторону дугового разряда, из испаренного материала анода появляется нарост (катодный депозит), содержащий частицы графитоподобного вещества, аморфного углерода и до 80 масс. % МУНТ [7]. Для получения ОУНТ в условиях дугового разряда используют составные аноды, содержащие порошки катализаторов, в качестве которых выступают, как правило, переходные металлы [8].

Очистка углеродных нанотрубок после их синтеза является обязательным этапом технологии их получения. К настоящему времени разработано множество способов очистки [1], [5]: травление в сильных кислотах, термическое окисление атмосферным кислородом, фильтрацию суспензии в водном растворе поверхностно-активных веществ, ультразвуковую обработку, промывку метанолом, высокотемпературный отжиг в вакууме. Следует заметить, однако, что МУНТ, полученные в дуговом разряде, в качестве примесей содержат только графитоподобные вещества и аморфный углерод [7]. В этом отношении они, по-видимому, являются наименее загрязненными по сравнению с нанотрубками, полученными иными методами.

Целью настоящей работы является исследование возможности очистки от примесей угле-

родных нанотрубок, содержащихся в катодном депозите, путем омического нагрева последнего на воздухе.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Катодный депозит квазицилиндрической формы синтезировался в условиях дугового разряда с графитовыми электродами в среде аргона внутри водоохлаждаемой камеры по методике, описанной в работах [6], [7]. Механическим способом с его поверхности удалялась наружная оболочка толщиной около 1 мм, не содержащая нанотрубок, после чего внутренняя волокнистая структура разделялась на отдельные протяженные фрагменты толщиной 40–50 мкм и длиной до 10 мм. Эти фрагменты волокон с помощью электропроводящего клея типа «Контактол» закреплялись на стеклянной подложке вместе с подводными медными проводами. Далее с помощью стабилизированных источников напряжения производилось снятие вольт-амперных характеристик объектов путем постепенного ступенчатого увеличения напряжения на концах волокна. В отдельных случаях с помощью оптического пирометра осуществлялся контроль температуры образцов. В процессе нагрева исследуемый образец располагался на предметном столике оптического микроскопа и изменение состояния его поверхности непрерывно контролировалось на микроскопическом уровне.

Исследование морфологии образцов и их элементного состава осуществлялось с помощью растрового электронного микроскопа «Hitachi».

Рентгеноструктурные исследования образцов на разных этапах очистки производились с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-4 (Cu K_α -излучение).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Волокна депозита состоят из беспорядочным образом ориентированных МУНТ (и, возможно, нескольких ОУНТ), объединенных в некую структуру. Кроме того, в состав волокон входят микро- и наночастицы графитоподобных веществ, заполняющие промежутки между этими объектами и обеспечивающие электрический контакт между ними. В качестве иллюстрации на рис. 1 приведена микрофотография одного из исследуемых образцов.

Как видно на приведенной микрофотографии, углеродные нанотрубки находятся достаточно далеко (на расстоянии не менее десятков нанометров) друг от друга и, следовательно, не связаны силами Ван-дер-Ваальса. Этот факт в какой-то мере противоречит работе [9], где высказывается прямо противоположное мнение, правда, относительно ОУНТ, полученных в дуговом разряде при наличии катализатора в аноде.

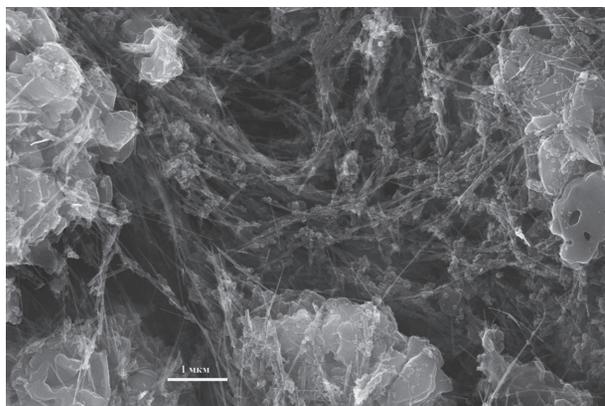


Рис. 1. Микрофотография поверхности волокна депозита в исходном состоянии

Поэтому процесс выделения многостенных нанотрубок из наших объектов заключается в основном в их очистке от графитоподобных частиц. В настоящей работе удаление графитоподобных частиц (и, возможно, аморфного углерода) осуществлялось за счет нагрева образцов теплом Джоуля – Ленца при пропускании электрического тока через образцы в условиях атмосферы. Как известно [8], в этом случае все примеси взаимодействуют с атмосферным кислородом в первую очередь с образованием при этом летучих соединений типа CO , CO_2 , и удаляются из образцов. При этом нанотрубки как более устойчивые к окислению объекты остаются практически неповрежденными. Однако в условиях достаточно длительного нагрева и высоких температур может происходить также сгорание нанотрубок, которое начинается, как правило, с разрушения «шапочек», содержащих менее устойчивые к окислению углеродные пентагоны [1].

На рис. 2 показана типичная вольт-амперная характеристика $I(U)$ волокна депозита. На начальном этапе зависимость $I(U)$ является почти параболической, то есть неомической. Поскольку на этом участке температура образца растет, то отсюда следует, что зависимость сопротивле-

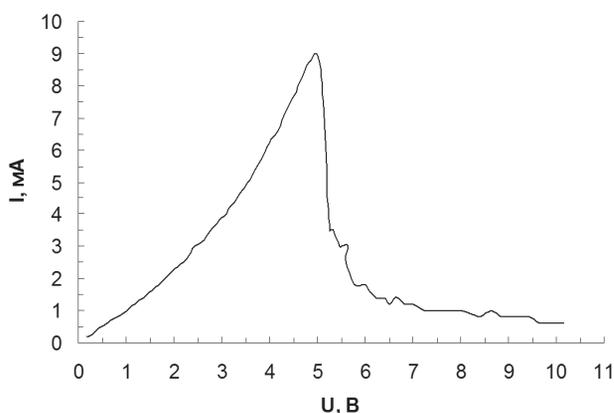


Рис. 2. Характерная вольт-амперная характеристика одного из исследуемых образцов

ния от температуры T является характерной для полупроводников: с повышением T сопротивление уменьшается и ток растет. Этот эффект в какой-то степени подтверждает наличие полупроводниковых нанотрубок в составе образцов.

В максимуме этих кривых $I(U)$ температура поверхности достигала $650\text{--}700\text{ }^\circ\text{C}$, и в этот момент начиналось достаточно резкое уменьшение тока. При этом резистивное сопротивление увеличивалось почти до $1\text{--}3\text{ кОм}$. Эта величина близка к электрическому сопротивлению ОУНТ – $R = 6,5\text{ кОм}$ [8].

С большой долей вероятности можно предположить, что в этот момент происходило частичное выгорание аморфного углерода и графитоподобных частиц, шунтирующих нанотрубки. Другими словами, контактные поверхности нанотрубок уменьшались, сопротивление образца увеличивалось. Таким образом, спад тока при постоянном напряжении свидетельствует об очистке нанотрубок в волокнах от других частиц.

Длительный нагрев на воздухе, как правило, приводил к перегоранию образцов. Критические токи, при которых происходило перегорание, лежали в пределах $80\text{--}150\text{ мкА}$.

На рис. 3 приведена микрофотография волокна депозита после очистки токопрохождением. Теперь контуры образца окружены «пухом», который можно связать с нанотрубками, и графитоподобных частиц в пределах данного образца не наблюдается.

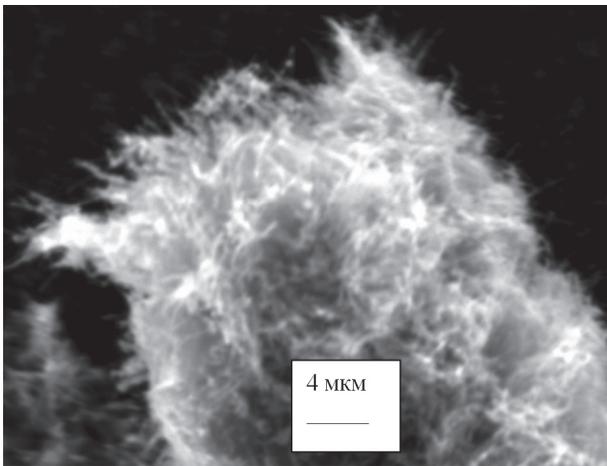


Рис. 3. Микрофотография одного из образцов волокна после очистки

На рис. 4 представлены дифрактограммы волокон катодного депозита в исходном состоянии (а) и после их термообработки токопрохождением (б). Как видно, в обоих случаях на дифрактограммах обнаруживаются максимумы, которые по своему местоположению идентифицируются с рефлексами гексагонального графита (002), (100) и (004) [10]. Следует заметить, что дифрак-

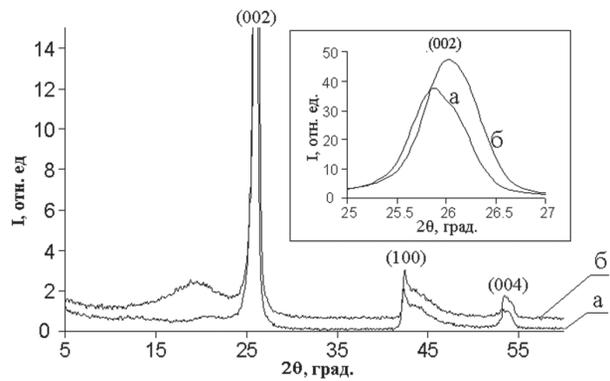


Рис. 4. Рентгеновские дифрактограммы волокон депозита: а) в исходном состоянии, б) после термообработки токопрохождением. На врезке представлен рефлекс (002) в увеличенном масштабе

тограмма очищенных МУНТ (см., например, работу [2]) идентична кривым рис. 4, то есть на ней присутствуют абсолютно те же рефлексы графита. В какой-то мере этот результат указывает на достаточно высокую концентрацию нанотрубок в исходных волокнах депозита.

На кривой «а» (см. врезку) у рефлекса (002) наблюдается «плечо» при углах 2θ , соответствующих межплоскостному расстоянию $d = 0,341\text{ нм}$, которое в точности равно межслоевому расстоянию в МУНТ [2], [8]. После термообработки (кривая «б» на врезке) интенсивность дифракционной картины несколько увеличивается и теперь максимум рефлекса (002) соответствует как раз этому значению d . Следовательно, при термообработке на воздухе в первую очередь выжигаются графитоподобные частицы, характеризующиеся увеличенным межплоскостным расстоянием.

Особенностью дифрактограмм в области углов $2\theta < 25^\circ$ (рис. 4) является наличие ярко выраженного диффузного максимума при $2\theta = 20^\circ$ только у образцов, подвергнутых термообработке токопрохождением.

После уменьшения электропроводности (соответственно, падению тока через образец) в большинстве случаев на поверхности практически всех образцов при разности потенциалов $3\text{--}10\text{ В}$ и токах $1\text{--}20\text{ мкА}$ наблюдались световые микровспышки, напоминающие микроразряды или микрозамыкания, происходящие в исследуемых волокнах депозита. Их длительность составляла менее 1 сек , линейная протяженность – менее 1 мкм . Яркость этих вспышек была достаточно слабой, так что их можно было наблюдать только с помощью оптического микроскопа.

При увеличении напряжения токопрохождение прекращалось и вспышки исчезали.

Однако если напряжение и ток поддерживались на достаточно низком уровне, то вспышки могли существовать в течение примерно десятков минут.

Кроме того, эти микровспышки не привязывались к определенной точке поверхности образцов, а наоборот, спонтанным образом перемещались по ней в пределах 5–10 мм. Одновременно с микровспышками происходили небольшие колебания тока проводимости от 1 до 5 мкА с частотой около нескольких герц. Если ток не ограничивался, то электропроводность уменьшалась практически до нуля и вспышки быстро прекращались. При этом в большинстве случаев видимого разрыва волокна не наблюдалось.

Можно предложить следующую картину явлений, происходящих при этом эффекте. После выгорания частиц графитоподобного вещества и, возможно, аморфного углерода нанотрубки, электрически связанные с подводящими проводами у противоположных концов исследуемого волокна, оказываются, по меньшей мере частично, изолированными друг от друга. Иначе говоря, после отжига на воздухе волокна превращаются в своеобразные конденсаторы, емкость которых обеспечивается достаточно протяженной поверхностью S неконтактирующих нанотрубок, находящихся на достаточно близком расстоянии L друг от друга. Очевидно, что образующаяся емкость $C \sim S/L$ и вследствие малости L она может достигать значительной величины.

Эти микроконденсаторы, в свою очередь, составлены из достаточно большого числа последовательно-параллельно соединенных нано-конденсаторов, представляющих собой несколько (в пределе всего две) изолированных нанотрубок. По мере накопления заряда на этих нано-конденсаторах происходит пробой воздуха при достаточно небольшой (единицы вольт) разности потенциалов, что обусловлено, очевидно, достаточно низковольтной туннельной эмиссией нанотрубок [4], инициирующей это явление. Эти микроразряды, происходящие на поверхности волокон, регистрируются в виде наблюдаемых микровспышек. Если считать, что пробой воз-

духа происходит при напряженности электрического поля $E = 3 \times 10^4$ В/см [3] и микропробой соответствуют разности потенциалов $U \approx 5$ В, то расстояние L между нанотрубками должно составлять не более 20 нм.

Происходящие при этом колебания тока легко связать с разрядом-зарядом этих микроконденсаторов.

Вследствие ионной бомбардировки в процессе микроразряда и протекания тока может происходить полное или по меньшей мере частичное разрушение многостенных нанотрубок, в том числе путем вытягивания из них ОУНТ. В результате условия для пробоя могут реализоваться для другой пары нанотрубок, что и обуславливает спонтанное перемещение микроразрядов по поверхности образцов.

Наличие вышеупомянутого диффузного максимума в области углов вблизи 20° на рис. 4 как раз может быть связано с образованием фрагментов разрушенных МУНТ нанотрубок и, возможно, ОУНТ в образцах в результате этого эффекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нагрев волокон депозита путем токопрохождения на воздухе приводит к выгоранию частиц аморфного и графитоподобного углерода. В результате в волокнах остаются в основном многостенные нанотрубки, между которыми отсутствует электрический контакт и, следовательно, образуется своеобразный микроконденсатор. Приложение электрического напряжения к такой структуре в условиях атмосферного воздуха приводит к микропробоям при разности потенциалов, не превышающей 10 вольт. Эти пробои проявляются в виде колебаний тока проводимости и световых микровспышек на поверхности образцов. Наблюдаемое явление в какой-то степени можно рассматривать как индикатор очистки нанотрубок, находящихся в волокнах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьева А. И. Аппаратура и методы исследования углеродных нанотрубок // УФН. 2010. Т. 180. № 3. С. 265–288.
2. Голышев А. А., Жуков А. Н., Мурадян В. Е., Шульга Ю. М., Молодец А. М. Устойчивость многостенных углеродных нанотрубок при давлениях ударного сжатия до ≈ 100 ГПа // Труды 10-й Международной конференции «Водородное материаловедение и химия углеродных наноматериалов». Судак, 2007. С. 592–595.
3. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Т. 1. М.: Госиздат, 1952.
4. Елецкий А. В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // УФН. 2002. Т. 172. № 4. С. 401–425.
5. Лобач А. С., Спицына Н. Г., Терехов С. В., Образцова Е. Д. Сравнительное изучение различных способов очистки одностенных углеродных нанотрубок // Физика твердого тела. 2002. Т. 44. № 3. С. 457–459.
6. Подгорный В. И., Куш 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.
7. Подгорный В. И., Куш 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.
8. Раков Э. Г. Нанотрубки и фуллерены. М.: Логос, 2006. 376 с.
9. Liu G., Zhao Y., Zheng K., Liu Z., Ma W., Ren Y., Xie S., Sun L. Coulomb Explosion: A Novel Approach to Separate Single-Walled Carbon Nanotubes from Their Bundle // Nano Letters. 2009. Vol. 9. № 1. P. 239–244.
10. X-ray Diffraction Data Cards. ASTM. Philadelphia.

Podgorny V. I., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Osauleiko R. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Troshin E. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

USE OF OHMIC HEATING OF CATHODE DEPOSIT FILAMENTS CONTAINING CARBON NANOTUBES FOR ADMIXTURES' EXTRACTION

Various methods of manufacturing carbon nanotubes have been developed lately. Purification of carbon nanotubes is a necessary stage of every method. In our research, cleaning of carbon nanotubes contained in a cathode deposit of argon arc discharge by means of the Ohmic heating is investigated. A direct current was sent into the deposit filament in conditions of atmospheric air. The registered volt-ampere characteristics have the form of the curve with a maximum that reaches 650–700 °C on the filament surface with subsequent current decrease at stable voltage. The surface morphology investigation shows that this process is accompanied by partial burning of amorphous and graphite-like carbon contained in filaments. The electrical resistance of specimens increases up to nearly 1–3 kOm. The X-ray diffraction comparison before and after cleaning confirms results of the experiment. It was also revealed that the increase of the specimen resistance leads to weak light micro-bursts moving across the specimen surface randomly. They appear at the voltage of 3–10 V and the current of 1–20 mA. It is suggested that this effect is conditioned by electro-discharge of some micro- and nano-condensers from carbon nanotubes that have no contact. The discovered effect may be used to control purification quality of deposit filaments by flowing current.

Key words: arc discharge, cathode deposit, multi-walled and single-walled carbon nanotubes, X-ray diffraction, electron micrograph, micro-flash, micro-discharge

REFERENCES

1. Vorob'eva A. I. Equipment and Methods of Investigation of Carbon Nanotubes [Apparatura i metody issledovaniya uglerodnykh nanotrubok]. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Physics-Uspehi (Advances in Physical Sciences)]. 2010. Vol. 180. № 3. P. 265–288.
2. Golyshev A. A., Zhukov A. N., Murayan V. E., Shul'g ha Yu. M., Molodets A. M. Multiwall Carbon Nanotubes Stability under Shock Pressures up to 100 GPa [Ustoichivost' uglerodnykh nanotrubok pri davleniyakh do 100 GPa]. *Trudy 10 Mezhdunarodoy konferentsii "Vodorodnoe materialovedenie i khimiya uglerodnykh nanomaterialov"* [Proc. 10th Int. Conf. "Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials"]. Sudak, 2007. P. 592–595.
3. Granovskiy V. L. *Elektricheskiy tok v gaze. T. 1* [Electrical current in gase. Vol. 1]. Moscow, Gosizdat Publ., 1952.
4. Eletskiy A. V. Carbon nanotubes and their emission property [Uglerodnye nanotrubki i ikh emissionnye svoystva]. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Physics-Uspehi (Advances in Physical Sciences)]. 2002. Vol. 172. № 4. P. 401–425.
5. Lobach A. S., Spitsina N. G., Terekhov S. V., Obratsova E. D. Comparative Study of Various Methods of Cleaning of Single Wall Nanotubes [Sravnitel'noe izuchenie razlichnykh sposobov ochildki odnostennykh nanotrubok]. *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State]. 2002. Vol. 44. № 3. P. 457–459.
6. Podgorny V. I., Kushch S. D., Yakovlev A. N., Belashchev B. Z. On some Results of Investigation Investigation of Carbon Fullerenes and Nanotubes Synthesis by 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.
7. Podgorny V. I., Kushch S. D., Yakovlev A. N., Blinova L. N. Investigation of Condensed Products of Graphite to be evaporated by 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.
8. Rako E. G. *Nanotrubki i fullereny* [Nanotubes and Fullerenes]. Moscow, Logos Publ., 2006. 376 p.
9. Liu G., Zhao Y., Zheng K., Liu Z., Ma W., Ren Y., Xie S., Sun L. Coulomb Explosion: A Novel Approach to Separate Single-Walled Carbon Nanotubes from Their Bundle // *Nano Letters*. 2009. Vol. 9. № 1. P. 239–244.
10. X-ray Diffraction Date Cards. ASTM. Philadelphia.

Поступила в редакцию 21.06.2013

ОЛЬГА ЯКОВЛЕВНА БЕРЕЗИНА

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
berezina@petsu.ru

ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ КИРИЕНКО

аспирант кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
kirienko@lab127.ru

ТАТЬЯНА АЛЕКСАНДРОВНА КЛОЧКОВА

магистр физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
tat-anka@mail.ru

ДАРЬЯ СЕРГЕЕВНА ЯКОВЛЕВА

старший преподаватель кафедры общей физики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
darinaj@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОПОЛЕВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ГИДРАТИРОВАННОГО ПЕНТАОКСИДА ВАНАДИЯ*

Исследуется изменение свойств тонких пленок гидратированного пентаоксида ванадия, полученных расплавленным золь-гель методом, при электрополевого воздействии. Показано, что электрополевого воздействие приводит к возникновению внутреннего электрохромного эффекта, изменяющего свойства пленки. Приведены результаты рентгенофазового анализа, электронной микроскопии, спектральные зависимости коэффициентов отражения и пропускания. Получены новые данные о структурных изменениях в пленке $V_2O_5 \cdot nH_2O$ при электрохромном эффекте. Предложен метод гидрирования пленок для ускорения окрашивания и контрастности пленки. Показано уменьшение ширины запрещенной зоны как при электрохромном окрашивании, так и при гидрировании. Полученные данные позволяют сделать вывод о механизме и особенностях протекания внутреннего электрохромного эффекта. Пленки получены на двух типах подложек: прозрачной стеклянной и гибкой подложке Каптон фирмы «ДюПонт». Результаты работы могут быть использованы при разработке прототипов электронных устройств, в том числе на гибких подложках.

Ключевые слова: электрохромный эффект, пентаоксид ванадия, золь-гель метод

Ванадий – переходный металл с переменной валентностью, образующий большое число оксидных соединений [1], [2], [3], [4], [11]. В некоторых из оксидов ванадия под воздействием температуры индуцируются кристаллографические преобразования, которые сопровождаются обратимым фазовым переходом полупроводник – металл, что, в свою очередь, приводит к изменениям оптических и электрических свойств данных материалов.

Наиболее известные и хорошо изученные оксиды ванадия – V_2O_5 и VO_2 . В диоксиде ванадия фазовый переход происходит при температуре 68 °С. Кристаллический пентаоксид ванадия – это диэлектрик с шириной запрещенной зоны $E_g = 2,5$ эВ. Пентаоксид ванадия проявляет электрохромные свойства, то есть под воздействием внешнего электрического поля происходит значительное изменение оптических свойств,

сопровожаемое изменением окраски материала [3]. Данное свойство позволяет использовать V_2O_5 для разработки электрохромных индикаторов, дисплеев, электронных переключателей, сенсоров и др. В гидратированном пентаоксиде ванадия $V_2O_5 \cdot nH_2O$ наблюдается внутренний электрохромный эффект (без контакта с электролитом) [1], [5], [8].

Пленки пентаоксида ванадия могут быть получены различными физическими и химическими методами, такими как термическое испарение, электронно-лучевое испарение, магнетронное распыление, золь-гель, электрохимическое осаждение и импульсная лазерная абляция. В представленной работе пленки гидратированного V_2O_5 получены расплавленным золь-гель методом. Достоинства данного метода заключаются в том, что он не требует дорогостоящего оборудования и им могут быть полу-

чены пленки на подложках большой площади, в том числе и гибких. В получаемых образцах гидратированного пентаоксида ванадия возникает слабая водородная связь между молекулами воды, вследствие чего пленки представляют собой слоистую структуру, образованную спутанными волокнами $V_2O_5 \cdot nH_2O$.

Целью данной работы является исследование безэлектролитного электрохромного эффекта в пленках гидратированного пентаоксида ванадия, изучение изменения структурных и оптических свойств пленок под воздействием внешнего электрического поля, а также вследствие внедрения дополнительных атомов водорода в структуру V_2O_5 .

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для получения пленок гидратированного пентаоксида ванадия порошок пентаоксида ванадия (температура плавления $T_{пл} = 680$ °С) плавил в муфельной печи, расплав нагревали до температуры 900 °С, выдерживали в течение одного часа и быстро выливали при интенсивном размешивании в дистиллированную воду при комнатной температуре. В результате получался однородный гелеобразный раствор состава $V_2O_5 \cdot nH_2O$ темно-коричневого цвета. Затем гель наносился тонким слоем на подложку двумя способами: пульверизацией (полученная толщина пленок $0,2 \div 0,3$ мкм) или контактным способом с последующим равномерным распределением геля по подложке (полученная толщина пленок $2,0 \div 2,5$ мкм). Отметим, что широко применяющийся метод центрифугирования (spin-coating) не всегда пригоден при нанесении, например, на поверхности большой площади. Образцы изготавливались на стекле и на гибкой подложке – полиимидной пленке Kapton HN толщиной 50 мкм. После нанесения геля образцы высушивались в течение 24 часов при комнатной температуре, при этом образовывалась пленка ксерогеля $V_2O_5 \cdot nH_2O$ ($n = 1,6 \div 1,8$) [1], [5].

Для электрохромного окрашивания образцы подвергались электрополовому воздействию при постоянном токе в двухэлектродной планарной системе с расстоянием между электродами $2 \div 5$ мм. При пропускании тока наблюдалось постепенно увеличивающееся красное пятно у катода.

Оптические свойства исходных и окрашенных пленок исследовались в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах частот. Спектральную зависимость коэффициентов пропускания $T(\lambda)$ в сравнении со стеклянной подложкой получали на спектрофотометре КФК-03 (рабочий диапазон длин волн $350 \div 950$ нм). Измерения коэффициента отражения $R(\lambda)$ пленок проводили с помощью специальной приставки на спектрофотометре СФ-46 (рабочий диапазон длин волн $190 \div 1100$ нм) в сравнении с коэффициен-

том отражения зеркала, для которого зависимость $R(\lambda)$ была измерена независимо.

Ширину оптической щели исследуемых пленок до и после электрополового воздействия определяли экстраполяцией зависимости $(\alpha E)^{1/2}$ от E согласно уравнению Тауца [6]:

$$(\alpha E)^{1/2} = V^{1/2} (E - E_{гТ}),$$

где $E_{гТ}$ – оптическая щель Тауца, $E = hv$ – энергия фотона, $V^{1/2}$ – наклон прямой относительно оси энергий. Данная зависимость имеет линейный характер и пересекает ось абсцисс в точке $hv = E_{гТ}$. Степень $1/2$ соответствует непрямым электронным переходам в V_2O_5 [13].

Расчет коэффициента поглощения α производился на основании полученных спектральных зависимостей коэффициентов пропускания T и отражения R по формуле [7]:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{(1-R)^2}{T} \right),$$

где d – толщина пленки, которая определялась с помощью микрометра, весовым методом, а также из оптических (интерференционных) измерений [1], [5].

Для изучения структурных изменений в окисле V_2O_5 при электрохромном окрашивании образцы рентгенографировались в симметричной геометрии на отражение на дифрактометре ДРОН-4 в автоматическом режиме. Использовалось Mo-K α -излучение (длина волны 0,7107 Å), монохроматизированное кристаллом пиролитического графита, установленного в отраженных лучах. Съемка производилась в интервале углов рассеяния 2θ от 2° до 80° . Шаг съемки составлял $0,2^\circ$ (с точностью до $0,02^\circ$), а время съемки каждой точки – 25 сек.

Изучение изменения морфологии поверхности образца при электрополовом воздействии проводилось при помощи сканирующего мультимикроскопа СММ-2000, дающего разрешение до 10 Å, в основной сканирующий блок которого устанавливалась специальная приставка для проведения измерений в режиме атомно-силового микроскопа (АСМ). Также для изучения изменений морфологии поверхности образца и его химического состава при электрополовом воздействии использовался электронно-сканирующий микроскоп Hitachi SU 1510, позволяющий получать изображение с разрешением до 3 нм. Наличие EDX детектора позволяет анализировать элементный состав образцов.

Гидрирование образцов осуществлялось их выдержкой в нагретом глицерине [4]. Нагрев вызывает разложение глицерина с образованием глицеринового альдегида и молекулярного водорода. При невозможности выхода газообразного водорода через поверхность он оказывается растворенным в жидком глицерине. Если в реакционной камере присутствует какой-либо

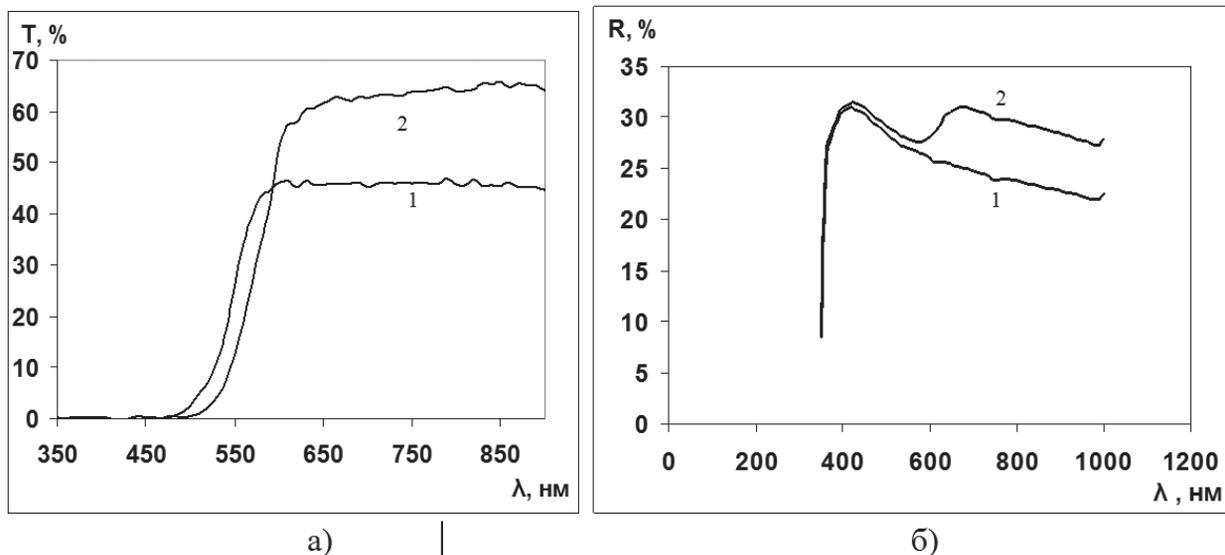


Рис. 1. а) Спектральная зависимость коэффициента пропускания пленок V_2O_5 , б) Спектры отражения пленок V_2O_5 . 1 – исходная пленка, 2 – модифицированная в результате электрополевого воздействия. Толщина пленки 2,95 мкм

катализатор распада молекулы водорода (например, пентаоксид ванадия), то в камере появится также и атомарный водород, который будет проникать в пленку V_2O_5 , распадаясь на протон и электрон. При повышении температуры равновесие сдвигается в сторону повышения концентрации молекулярного и атомарного водорода в жидком глицерине [4].

При внедрении водорода в пленку пентаоксида ванадия происходит ее окрашивание в синезеленый цвет. Время выдержки образца в глицерине составляло 20 сек при температуре 125 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1а представлены спектральные зависимости коэффициента пропускания $T(\lambda)$ для исходных и окрашенных пленок. В результате электрополевого воздействия происходит модификация спектра (рис. 1а, кривая 2): наблюдается значительное увеличение пропускания в длинноволновой области (от 45 до 65 %) и сдвиг края собственного поглощения в сторону больших длин волн. Визуально эти изменения проявляются в виде смены цвета пленки с темно-коричневого на ярко-красный.

Экстраполяция зависимостей в координатах $(ah\nu)^{1/2}$ от $(h\nu)$ на ось абсцисс показала уменьшение ширины оптической щели пленки ксерогеля V_2O_5 с $E_g = 2,30$ эВ в исходном состоянии до $E_g = 2,10$ эВ в окрашенном состоянии. Такой сдвиг может быть обусловлен деформационными искажениями ванадий-кислородного октаэдра и дегидратацией (удалением воды) при электрохромном окрашивании [1], [12].

Наблюдается небольшое (около 0,05 мкм) уменьшение толщины пленки в окрашенной области по сравнению с исходной, что может быть связано с изменениями в слоистой структуре

пленки, а именно с разрушением связующих слоев молекул воды при электрополевым воздействием [8], [2]. Известно, что межслоевое расстояние зависит от содержания H_2O и для состава $V_2O_5 \cdot 2H_2O$ равно 12 Å [9], а для $V_2O_5 \cdot 1,6H_2O$ – 11,55 Å [14]. Процесс дегидратации приводит к уменьшению межслоевого пространства и является обратимым до $n = 0,5$.

Изменения оптических свойств, вызванные внутренним электрохромным эффектом, могут быть объяснены перераспределением протонов H^+ внутри пленки. Содержащиеся в пленке молекулы воды под воздействием внешнего электрического поля могут распадаться на протоны H^+ и группу OH^- . В процессе электрополевого воздействия протоны H^+ могут мигрировать в прикатодную область и образовывать новую фазу ванадиевой бронзы состава $H_xV_2O_5$ [3], [10].

Результаты рентгенографического исследования структурных изменений в пленке $V_2O_5 \cdot nH_2O$ при электрохромном эффекте приведены на рис. 2, где показано смещение первого пика на экспериментальной кривой распределения интенсивности рассеяния для исходной пленки, окрашенной, затем отснятой через 2, 4 и 10 суток после окрашивания.

Качественно кривые полностью идентичны, то есть никаких резких структурных изменений при электрополевым воздействии в пленках не происходит. Однако максимум на кривой для окрашенной пленки смещен относительно исходного образца в сторону больших значений угла рассеяния, что свидетельствует об уменьшении межслоевого расстояния, которое составило 11,97 Å в исходном состоянии и 11,31 Å в окрашенном. Расчет величины межслоевого расстояния проводился с помощью формулы Вульфа – Брэгга, угол рассеяния 2θ определя-

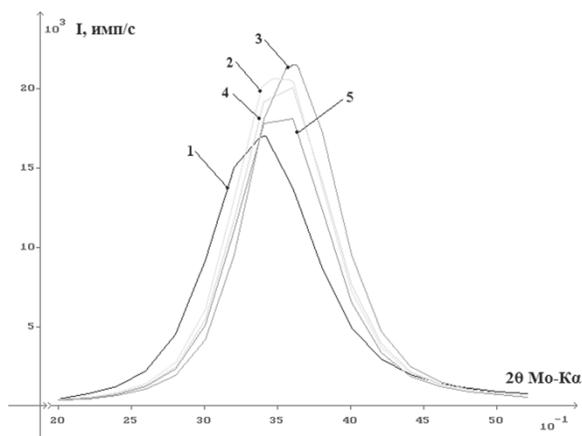


Рис. 2. Интенсивности рассеяния первого максимума на кривой распределения интенсивности для пленки пентаоксида ванадия: 1 – исходной, 2 – непосредственно после окрашивания, 3–5 – через 2, 4, 10 суток соответственно

ли на основании полученных рентгенограмм. Уменьшение межслоевого расстояния пленки V_2O_5 при окрашивании по сравнению с исходной может быть обусловлено уменьшением количества молекул воды в пленке.

С помощью атомно-силового микроскопа были получены данные о морфологии поверхности образца до и после электрополевого воздействия. В исходном образце (рис. 3а) прослеживается волокнистая структура пленки ксерогеля. Поперечный размер нитей составляет порядка $12 \div 15$ нм, а высота $\sim 2 \div 5$ нм. В результате окрашивания наблюдается значительное размытие волокон (рис. 3б). При этом поперечный размер нитей уменьшился до $4 \div 6$ нм.

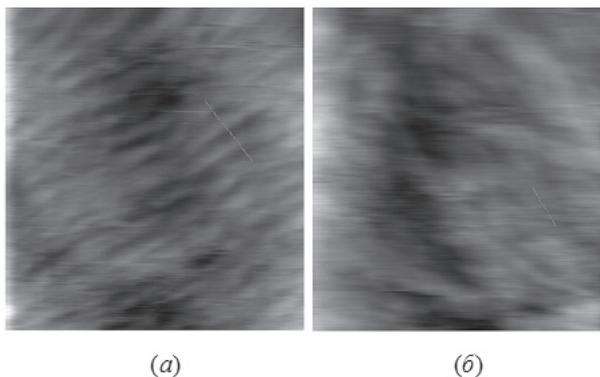


Рис. 3. АСМ изображение поверхности образца: а) до электрополевого воздействия (размер увеличенной области $193,8 \text{ нм} \times 193,8 \text{ нм}$); б) после электрополевого воздействия (размер увеличенной области $195,3 \text{ нм} \times 195,3 \text{ нм}$)

В результате изучения химического состава пленок гидратированного пентаоксида ванадия были получены данные о количестве атомов различных элементов, содержащихся в образцах. Большую часть из них для пленок, нанесенных контактным способом, составляют кислород

($62 \% \div 67 \%$) и ванадий ($30 \% \div 34 \%$), а для пленок, изготовленных с помощью пульверизатора (их толщина гораздо меньше), – кислород ($42 \% \div 54 \%$), ванадий ($12 \% \div 16 \%$) и кремний ($13 \% \div 22 \%$). Очевидно, вклад кремния обусловлен влиянием стеклянной подложки вследствие малой толщины пленок, полученных пульверизацией. Кроме того, в пленках в небольших количествах ($0,5 \% \div 6 \%$) обнаружены углерод, натрий, магний, алюминий и кальций. Исследования изменений химического состава пленок в результате электрохромного эффекта показали, что существенной разницы в количестве ванадия и кислорода в окрашенной области не наблюдается. Вероятно, в данной области может происходить локальное увеличение концентрации протонов [6] в результате их миграции в прикатодную область и образование новой фазы. Отметим, что наличие водорода данной методикой не определяется, так как водород не испускает рентгеновского излучения.

В образцах, полученных с помощью пульверизатора, отсутствует нитевидная структура поверхности, тем не менее на протекание электрохромного эффекта это не влияет, и пленка обратимо меняет окраску в прикатодной области. Также следует отметить, что в результате электрополевого воздействия у пленок таких образцов отсутствует визуальное изменение морфологии поверхности (рис. 4), в то время как у образцов, полученных контактным способом, наблюдалось размытие зернистой структуры.

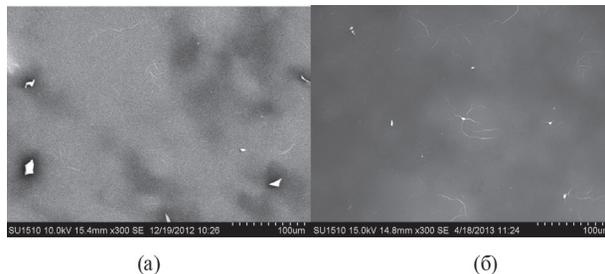


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение пленки пентаоксида ванадия, полученное распылением из пульверизатора. Увеличено в 300 раз: а) исходный образец, б) окрашенная пленка

В пленках, выдержанных в горячем глицерине (гидрированных), изменение цвета пленки в прикатодной области с сине-зеленого на ярко-красный при электрохромном эффекте происходит быстрее, а окрашенная область оказывается более контрастной и имеет больший диаметр (см. таблицу) по сравнению с пленками, не подвергавшимися воздействию глицерина.

При постоянном напряжении (100 В) сила тока на образцах постепенно падает (диапазон изменения I указан в соответствующей строке таблицы), что можно объяснить уменьшением концентрации носителей тока – ионов водоро-

Сравнение параметров электрохромного эффекта в гидрированном и исходном образце

| | Гидрированный образец | Негидрированный образец |
|--|-----------------------|-------------------------|
| Подаваемое напряжение (U), В | 100 | 100 |
| Время t образования красного пятна, мин | 5 | 10 |
| Диаметр пятна, мм | 4 | 1,5 |
| Значение тока I (мкА) | 12,3–8,4 | 5,9–1,04 |
| Образование/исчезновение пятна при приложении U противоположного знака | не исчезло | исчезло |

да при образовании окрашенного участка в результате электрохромного эффекта. В гидрированных пленках концентрация ионов водорода изначально выше, чем в негидрированных. Соответственно, и сила тока там больше.

При изменении полярности напряжения в гидрированных образцах пятно по истечении 8 мин практически не исчезало. Одновременно возникало второе пятно возле отрицательного электрода. Такое явление можно объяснить высокой концентрацией ионов водорода, миграция которых обуславливает появление пятна. В негидрированных пленках при приложении обратного напряжения происходит постепенное исчезновение прикатодного пятна.

Ширина запрещенной зоны в результате выдержки в глицерине, как и в результате электрохромного окрашивания исходной пленки, уменьшается примерно на 0,2 эВ. Сдвиг E_g определялся из оптических измерений так же, как это описано выше для негидрированных образцов. Можно предположить, что в обоих случаях изменение E_g связано с увеличением концентрации протонов: в первом случае – за счет диффузии водорода из глицерина в пленку, во втором – за счет миграции ионов водорода к отрицательному электроду. Сине-зеленый цвет гидрированных пленок может быть связан с усилением интерференционного максимума в этой области спектра (то есть в районе 500 нм), но этот вопрос нуждается в дополнительных исследованиях.

Пленки пентаоксида ванадия наносились как на стеклянные, так и на гибкие подложки Картон. Для оценки адгезии был проведен скотч-тест. В результате теста пленка пентаоксида ванадия осталась на подложках (стекло, картон), что говорит о высокой степени адгезии образцов. Для оценки прочности пленки пентаоксида ванадия на картоне был также проведен специальный тест на многократный (более 2000 раз) изгиб, который показал отсутствие в результате такого воздействия механических повреждений пленки или ее отслаивания от подложки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены новые данные об особенностях протекания внутреннего электрохромного эффекта в пленках ксерогеля пентаоксида ванадия. Показано наличие структурных деформаций в окрашенной области – уменьшение межслоевого расстояния в связи с разрушением связующих слоев молекул воды и появлением новой фазы – ванадиевой бронзы. Визуально протекающие в пленках процессы электрохромизма наблюдаются в виде размытия волокнистой структуры поверхности образца, наблюдаемой с помощью электронного микроскопа.

Предложен метод гидрирования как способ увеличения контрастности и скорости проявления окрашивания при электрохромизме. Получены образцы пленок пентаоксида ванадия на гибкой подложке (картон), выдерживающие многократный изгиб.

Результаты работы могут быть использованы для разработки физических основ приложений исследуемого явления (внутреннего электрохромного эффекта в тонкопленочном гидратированном пентаоксиде ванадия, получаемом золь-гель методом), в частности при создании оптических фильтров, индикаторных устройств, электрохромных дисплеев, в том числе гибких.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А. А. Величко, В. П. Малиненко, И. И. Голдобину за помощь в проведении некоторых экспериментов и обсуждении результатов.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг., Минобрнауки РФ, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (2009–2013)», государственные контракты № 16.740.11.0562, № 14.В37.21.0747, № 14.В37.21.1066, № 14.В37.21.0755, 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

- Березина О. Я., Казакова Е. Л., Пергамент А. Л., Сергеева О. В. Модификация электрических и оптических свойств тонких слоев гидратированного оксида ванадия при легировании водородом и вольфрамом // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. № 6 (111). С. 77–85.
- Бондаренко В., Волков В., Плешанов А. С. Гидратированные соединения ванадия // ФТТ. 1993. Т. 35. № 12. С. 3189–3195.
- Гаврилюк А. И., Чудновский Ф. А. Электрохромизм в пленках V_2O_5 // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3. Вып. 4. С. 174–177.

4. Ильинский А. В., Квашенкина О. Е., Шадрин Е. Б. Металлизация гидрированием моноклинной фазы в пленках VO₂ // ФТП. 2011. Т. 45. Вып. 9. С. 1197–1202.
5. Казакова Е. Л., Пергамент Г. Б., Стефанович Г. Б., Гаврилова Д. С. Внутренний электрохромный эффект в гидратированном пентаоксиде ванадия // Конденсированные среды и межфазные границы. 2001. Т. 3. № 2. С. 153–156.
6. Тауц Я. Оптические свойства полупроводников. М.: Мир, 1967. 74 с.
7. Уханов Ю. И. Оптические свойства полупроводников. М.: Наука, 1997. 366 с.
8. Яковлева Д. С., Малиненко В. П., Пергамент А. Л., Стефанович Г. Б. Электрические и оптические свойства тонких пленок гидратированного пентаоксида ванадия при электрохромном эффекте // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 23. С. 75–80.
9. Alonco B., Livage J. Synthesis of vanadium oxide gels from peroxovanadic acid solutions: A 51 V NMR study // J. Solid State Chem. 1999. Vol. 148. P. 16–19.
10. Badot J. C., Gourier D., Bourdeau F., Baffier N. and Tabuteau A. Electronic properties of Na_{0.33} · V₂O₅ bronze obtained by the sol-gel process // J. Solid state Chem. 1991. № 92. P. 8–17.
11. Bouzidi A., Benramdane N., Nakrela A., Mathieu C., K helifa B., Desfeux R., Da Costa A. First synthesis of vanadium oxide thin films by spray pyrolysis technique // Materials Science and Engineering. 2002. № 95. P. 141–147.
12. Livage J. Vanadium Pentoxide Gel // Chem. Mater. 1991. Vol. 3. № 4. P. 578–593.
13. Manil Kang, Sok Won Kim, Younghun Hwang, Youngho Um, Ji-Wook Ryu. Temperature dependence of the interband transition in a V₂O₅ film // Citation: AIP Advances 3, 052129 (2013).
14. Yao T., Oka Y., Yamamoto N. Layered structures of vanadium pentoxide gels // Mater. Res. Bull. 1992. Vol. 27. P. 669.

Berezina O. Ya., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Kirienko D. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Klochkova T. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Yakovleva D. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

INFLUENCE OF ELECTRIC FIELD ON PROPERTIES OF HYDRATED VANADIUM PENTOXIDE THIN FILMS

Electric field influence on the properties of hydrated vanadium pentoxide thin films obtained by sol-gel method is studied. It is shown that under the influence of electric field the films change their structural and optical properties. X-ray diffraction, high-resolution electron microscopy, and transmission spectra of the prepared and colored films are reported. New data on structural changes under electrochromic effect in the V₂O₅ · nH₂O films are obtained. The film hydration method is suggested for acceleration of coloration process. Reduction in the band gap in colored and hydrated state is shown. The experimental results reveal the mechanism and phenomenon of the internal electrochromic effect. The films are deposited on glass and flexible "DuPont" Kapton substrates. The obtained results can be used for prototyping of electronic devices, including those on flexible substrates.

Key words: electrochromic effect, vanadium pentoxide, sol-gel method

REFERENCES

1. Berezina O. Ya., Kazakova E. L., Pergament A. L., Sergeeva O. V. Modification of electric and optical properties of thin layers of the hydrated oxide of vanadium when alloying with hydrogen and tungsten [Modifikatsiya elektricheskikh i opticheskikh svoystv tonkikh sloev gidratirovannogo oksida vanadiya pri legirovanii vodorodom i vol'framom]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State university. Natural & Engineering Sciences]. 2010. № 6 (111). P. 77–85.
2. Bondarenko V., Volkov V., Pleshanova A. The hydrated compounds of vanadium [Gidratirovannye soedineniya vanadiya]. *Fizika tverdogo tela*. 1993. Vol. 35. № 12. P. 3189–3195.
3. Gavriilyuk A. I., Chudnovskiy F. A. Electrochromism in V₂O₅ films [Elektrokhromizm v plenkakh V₂O₅]. *Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*. 1977. Vol. 3. № 4. P. 174–177.
4. Il'inskiy A. V., Kвашенкина О. Е., Шадрин Е. Б. Metallization by hydrogenation of monoklinny phase in VO₂ films [Metallizatsiya gidrirovaniem monoklinnoy fazy v plenkakh VO₂]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 2011. Vol. 45. № 9. P. 1197–1202.
5. Kazakova E. L., Pergament G. B., Stefanovich G. B., Gavrilova D. S. Internal electrochromic effect in hydrated pentoxide of vanadium [Vnutrenniy elektrokhromnyy effekt v gidratirovannom pentaoksidge vanadiya]. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy*. 2001. Vol. 3. № 2. P. 153–156.
6. Tauts Ya. Optical properties of semiconductors [Opticheskie svoystva poluprovodnikov]. Moscow, 1967. 74 p.
7. U Khanov Yu. I. *Opticheskie svoystva poluprovodnikov* [Optical properties of semiconductors]. Moscow, 1997. 366 p.
8. Yakovleva D. S., Malinenko V. P., Pergament A. L., Stefanovich G. B. Elektricheskie i opticheskie svoystva tonkikh plenok gidratirovannogo pentaoksida vanadiya pri elektrokhromnom effekte [Electric and optical properties of thin films of hydrated pentoxide of vanadium under electrochromic effect]. *Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*. 2007. Vol. 33. № 23. P. 75–80.
9. Alonco B., Livage J. Synthesis of vanadium oxide gels from peroxovanadic acid solutions: A 51 V NMR study // J. Solid State Chem. 1999. Vol. 148. P. 16–19.
10. Badot J. C., Gourier D., Bourdeau F., Baffier N. and Tabuteau A. Electronic properties of Na_{0.33} · V₂O₅ bronze obtained by the sol-gel process // J. Solid state Chem. 1991. № 92. P. 8–17.
11. Bouzidi A., Benramdane N., Nakrela A., Mathieu C., K helifa B., Desfeux R., Da Costa A. First synthesis of vanadium oxide thin films by spray pyrolysis technique // Materials Science and Engineering. 2002. № 95. P. 141–147.
12. Livage J. Vanadium Pentoxide Gel // Chem. Mater. 1991. Vol. 3. № 4. P. 578–593.
13. Manil Kang, Sok Won Kim, Younghun Hwang, Youngho Um, Ji-Wook Ryu. Temperature dependence of the interband transition in a V₂O₅ film // Citation: AIP Advances 3, 052129 (2013).
14. Yao T., Oka Y., Yamamoto N. Layered structures of vanadium pentoxide gels // Mater. Res. Bull. 1992. Vol. 27. P. 669.

Поступила в редакцию 16.07.2013

ДМИТРИЙ ВАДИМОВИЧ КУЗНЕЦОВ

магистрант математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
kuznecov@cs.karelia.ru

АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ ЛЕБЕДЕВ

магистрант филологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
perevodchik88@yandex.ru

НИКОЛАЙ ДМИТРИЕВИЧ МОСКИН

кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и математического обеспечения математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
moskin@karelia.ru

АЛЕКСЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ ВАРФОЛОМЕЕВ

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теории вероятностей и анализа данных, декан математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
avarf@petrsu.ru

ТЕОРЕТИКО-ГРАФОВЫЕ МОДЕЛИ С УПОРЯДОЧЕННОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В АНАЛИЗЕ СИНТАКСИСА ПОЭТИЧЕСКИХ ТЕКСТОВ*

В статье рассматриваются теоретико-графовые модели с упорядоченной иерархической структурой и методы их сравнительного анализа. Сравнение моделей выполняется с помощью определения расстояния, основанного на известном алгоритме сравнения строк Вагнера – Фишера. При этом теоретико-графовая модель преобразуется в строковое представление, где каждой вершине ставится в соответствие ссылка на родительский элемент, уровень вложенности и тип связи с этой вершиной. Для определения степени схожести типов синтаксических связей на основе экспертных оценок филологов была построена матрица C размером 43×43 со значениями от 0 до 1. Апробация данных алгоритмов проводилась на моделях синтаксической структуры сложных предложений из творчества П. А. Вяземского и И. А. Бродского (118 текстов). В ходе исследования была обнаружена довольно заметная зависимость значений метрики от авторства предложений. Зависимость выражается сильнее при исследовании больших предложений с нетривиальной структурой.

Ключевые слова: теоретико-графовая модель, иерархическая структура, сравнение, синтаксис, текст, сложное предложение

В математике и информатике графы являются удобным механизмом представления информации. Однако во многих приложениях (например, при моделировании синтаксической структуры текстов) требуются более сложные теоретико-графовые модели, обладающие иерархической структурой. Известны иерархические графы и иерархические графовые модели, описание которых приводится в [6; 399–408], однако они не в полной мере подходят для анализа текстов. Поэтому возникает потребность в разработке новых моделей и методов их исследования.

Дадим рекурсивное определение *теоретико-графовой модели с упорядоченной иерархической структурой*: это пятерка $G = (V, W, E, \alpha, \beta)$, в которой $V = \{v_i\}_{i=1}^n$ – непустое конечное упорядоченное множество вершин; $W = \left\{ V_0 \cup \left\{ G_j \right\}_{j=1}^m \right\}$ – объединение подмножества вершин $V_0 \subseteq V$

и множества вложенных теоретико-графовых моделей $G_j = (V_j, W_j, E_j, \alpha_j, \beta_j)$, таких что V_j попарно не пересекаются и их объединение совпадает с $V \setminus V_0$; $E \subseteq W \times W$ – множество ребер; $\alpha: V \rightarrow L_V$ – функция, задающая метки вершинам; $\beta: E \rightarrow L_E$ – функция, задающая метки ребрам, где L_V и L_E – множества меток и атрибутов объектов и отношений, определенные в некоторой предметной области (номера элементов включаются в состав их меток). Таким образом, внутри теоретико-графовой модели с упорядоченными узлами существует иерархия вложенных друг в друга подструктур, причем ребра могут соединять как обычные узлы, так и вложенные подструктуры, находящиеся на данном уровне вложенности. На рис. 1 показан пример подобной модели, которая подробно описана в [10].

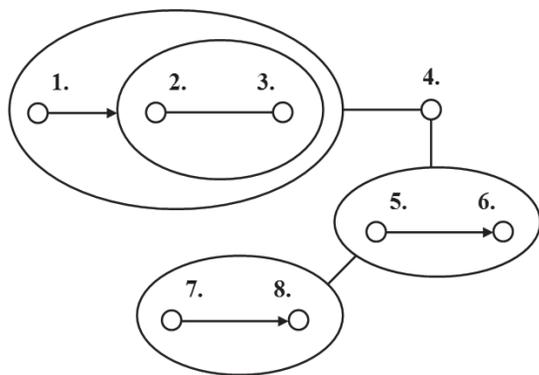


Рис. 1. Пример иерархической теоретико-графовой модели синтаксической структуры предложения «Их гений мужествен, как гений вод твоих...» [3; 83]

В данной работе рассматриваются модели синтаксической структуры многочленных сложных предложений из творчества П. А. Вяземского и И. А. Бродского. Выбор творчества этих поэтов не случаен: именно интеллектуальность поэзии, ее глубина стали отличительной чертой их творчества; стремление к выстраиванию причинно-следственных, глубинных связей, нехарактерное для лирических произведений в целом, отразилось в творчестве этих авторов. Значительную роль в оформлении интеллектуальности и сверхсодержательности поэзии П. А. Вяземского и И. А. Бродского сыграли сложные предложения.

ТЕОРЕТИКО-ГРАФОВАЯ МОДЕЛЬ СИНТАКСИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СЛОЖНОГО ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Сложное предложение в современной лингвистике является объектом пристального научного интереса. Одна из немаловажных проблем, актуальных для данной сферы исследования, – типологизация сложных предложений, описание их структуры и составляющих. Исследователи-грамматисты отмечают, что «трудности, с которыми сталкивается синтаксическая наука при решении проблем типологии сложного предложения, начинаются уже на первых этапах классификации» [8]. В связи с этим ощущается потребность в создании некоего механизма, позволяющего размечать сложные предложения с точки зрения их структуры, что облегчило бы последующий анализ, установление взаимосвязей между частями предложения, а также определение роли того или иного сложного предложения в тексте произведения или в целом в творчестве писателя. Сложные предложения в стихотворных произведениях могут рассматриваться, с одной стороны, как показатель той эпохи, к которой принадлежит творчество поэта (очевидно, что со временем синтаксическая структура текстов меняется), а с другой стороны, – как проявление идиостиля писателя [7].

В современной теории синтаксиса широко используются так называемые деревья зависимостей и деревья составляющих [4]. Одним из первых их применил А. М. Пешковский [11] для изображения сочинительных и подчинительных связей между словами. Суть деревьев зависимостей сводится к следующему: считается заданным анализ предложения, устанавливающий подчинительные связи между словами согласно правилам традиционной грамматики и грамматики зависимостей. Результаты анализа представляются в виде графов, вершины которых соответствуют словам, а дуги соединяют их в соответствии с синтаксическими связями. В терминах деревьев зависимостей можно выражать многие стилистические характеристики текстов [12].

Деревья зависимостей обычно используются в описаниях языков со свободным порядком слов (например, русского). Для описания языков с фиксированным порядком слов преимущественно используется второй тип графов – деревья составляющих [4]. При этом в предложении выделяются группы слов, функционирующие как отдельные синтаксические единицы, – составляющие. Система составляющих – это множество отрезков предложения, которое обладает тем свойством, что каждые два входящих в него отрезка либо не пересекаются, либо один из них содержится в другом. При графическом изображении система составляющих тоже приобретает вид дерева.

В качестве модели представления структуры сложного предложения нами была выбрана вертикальная структурная схема. По филологической традиции, вертикальные структурные схемы используются в рамках выполнения синтаксического разбора многочленных сложных предложений. С ее помощью можно наблюдать расположение предикативных частей, средства связи между ними, а также направление зависимостей между частями сложного предложения. Вертикальная схема удобна в силу того, что не теряется наглядность направления связей (может быть продемонстрирован уровень глубины соотношения блоков внутри многокомпонентных сложных предложений). Вертикальная схема является оптимальным вариантом для представления тех сложных предложений, которые состоят из четырех и более компонентов. В некоторых случаях в качестве компонента сложного предложения может выступать блок, который объединяет несколько тесно связанных между собой частей. Внутри такого блока при более подробном анализе также можно выстроить систему связей (рис. 2). Обозначим сочинительные связи с помощью прямых линий, подчинительные связи – с помощью стрелок, ведущих от главной части к придаточной.

¹Во мне идет с ожесточеньем
 Борьба враждебных двух начал:
²Ум не скудеет размысленьем,
³Но воли нет, ⁴но дух упал.

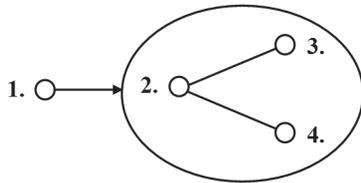


Рис. 2. Теоретико-графовая модель предложения «Во мне идет с ожесточеньем...» [3; 411]

Таким образом, теоретико-графовая модель представляет собой иерархическую структуру с несколькими уровнями вложенности. При этом типы связей делятся на три класса в зависимости от вида союза и характера отношений между частями сложного предложения:

- А. Сложносочиненные предложения (ССП);
- В. Сложноподчиненные предложения (СПП);
- С. Бессоюзные предложения (БСП).

В свою очередь, классы делятся на подклассы типов связей (18 – для ССП, 14 – для СПП и 11 – для БСП). Рассмотрим пример из творчества И. Бродского [2; 80–81], теоретико-графовая модель которого изображена на рис. 3 (слева вверху):

¹Ибо, ²когда расстаются двое,
³то, перед тем как открыты ворота,
⁴каждый берет у другого что-то
 в память о том, ⁴как их век был прожит:
⁵тело – незримость; ⁶душа, быть может,
 зренья и слух.

Здесь выделяются следующие типы связей (пятая связь соединяет две вложенные подструктуры):

- 1→2: СПП с придаточным времени (BF);
- 1→3: СПП с придаточным времени (BF);
- 3→4: СПП с придаточным изъяснительным (BC);
- 5–6: БСП со значением перечисления (CA);
- [1–4]–[5–6]: БСП со значением пояснения (CD).

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ТЕОРЕТИКО-ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ

Для сравнения и классификации теоретико-графовых моделей можно применить несколько подходов [9]. Одним из них является вычисление числовых характеристик, отражающих структурные особенности графов. В простейшем случае это параметры размерности – число вершин и ребер графа. К более сложным параметрам можно отнести параметр глубины (число уровней в дереве), параметр ширины (наибольшее

число узлов на уровне), коэффициент асимметрии (логарифм отношения количества узлов, расположенных слева от корня, к количеству узлов, расположенных справа от корня), веточный параметр (отношение числа концевых узлов к числу уровней глубины), параметр вложенности (максимальная степень вложенности структур друг в друга) и др.

Второй подход основан на введении метрики на множестве графов. Здесь задается мера, которая позволяет оценить, насколько те или иные структуры «похожи» друг на друга. В зарубежной литературе данное направление получило название «*graph matching*» [13]. К подобным способам оценки сходства графов относится мера на основе операций редактирования (*graph edit distance*). Эта мера является расширением известного правила сравнения строк Вагнера – Фишера [14]. Здесь строится минимальная последовательность операций редактирования (как правило, это добавление, удаление или переименование вершин и ребер), которая преобразует одну теоретико-графовую модель в другую. При этом на практике часто одни операции являются более значимыми по сравнению с другими, поэтому каждой операции ставится в соответствие ее положительный вес $\gamma: \Sigma \rightarrow R^+$, где Σ – множество операций редактирования. Расстояние вычисляется как минимальная по сумме весов последовательность операций редактирования, преобразующая одну модель в другую.

В данном исследовании был рассмотрен алгоритм нахождения расстояния, который является модификацией алгоритма Вагнера – Фишера нахождения расстояния между строками. Для представления графа в виде строки каждой вершине (простому предложению в составе сложного в порядке следования) ставятся в соответствие следующие параметры (рис. 3):

1. Тип связи между этим предложением и родительским (в силу древоподобной структуры такая связь всегда одна или ее нет для корневых элементов);

2. Ссылка на порядковый номер родительского элемента;

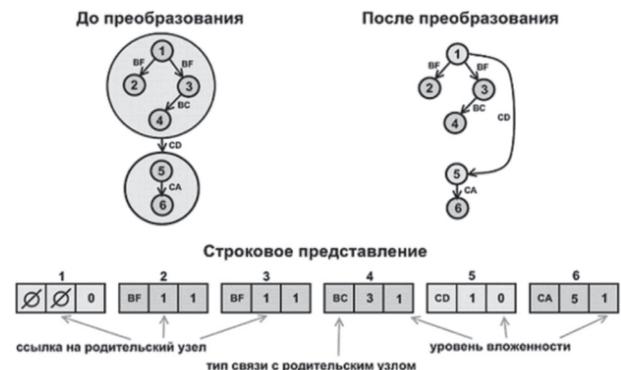


Рис. 3. Строковое представление теоретико-графовой модели

3. Уровень вложенности (равный нулю для внешних узлов структуры и увеличивающийся на единицу для всех вложенных подструктур). Вложенная подструктура на последующем уровне вложенности ведет себя как обычный узел, то есть может иметь входящие и исходящие связи; в то же время она всегда имеет корень, у которого отсутствует непосредственный родительский узел.

Таким образом, вычисление стоимости операций проводилось не только в зависимости от меток узлов, но и при помощи функций от таких параметров, как уровень вложенности и связь с другими узлами. Заметим, что операции редактирования, изменяющие уровень вложенности узлов, являются недопустимыми, что позволяет вычислять расстояния для всех уровней вложенности за одну итерацию алгоритма, без рекурсии.

Заметим, что определенное таким образом расстояние удовлетворяет условиям метрики [14]:

1. $d(G_1, G_2) \geq 0$ (неотрицательность): выполняется, поскольку сумма положительных весов является положительным числом;

2. $d(G_1, G_2) = 0 \Leftrightarrow G_1 = G_2$;

3. $d(G_1, G_2) = d(G_2, G_1)$ (симметричность): обратная последовательность операций редактирования, преобразующая G_2 в G_1 , совпадает с исходной и имеет тот же суммарный вес;

4. $d(G_1, G_2) \leq d(G_1, G_3) + d(G_3, G_2)$ (неравенство треугольника): расстояние $d(G_1, G_2)$ определяется как минимальная по стоимости последовательность операций, преобразующая структуру G_1 в структуру G_2 . Значит, любая последовательность, преобразующая структуру G_1 в G_3 , а затем G_3 в G_2 (то есть с заданным промежуточным состоянием), по определению имеет не меньшую стоимость, чем $d(G_1, G_2)$.

Алгоритм Вагнера – Фишера заключается в последовательном заполнении матрицы $m \times n$ промежуточными значениями расстояний, вычисляемых по формуле:

$$D(i, j) = \begin{cases} \max(i, j) & i = 0 \text{ или } j = 0 \\ \min(D(i, j-1)+1, D(i-1, j)+1, \\ D(i-1, j-1)+\gamma(S_1[i], S_2[j])); & i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n \end{cases}$$

где $\gamma(S_1[i], S_2[j])$ – функция стоимости замены элемента $S_1[i]$ на $S_2[j]$, и равна нулю, если эти элементы идентичны, m и n – количество простых элементов в G_1 и G_2 соответственно. В матрице шаг по i символизирует удаление элемента из первой строки, по j – вставку в первую строку, а шаг по обоим индексам одновременно символизирует замену элемента или отсутствие изменений, если элементы равны.

Для определения степени схожести типов синтаксических связей совместно с экспертами-филологами была построена матрица C разме-

ром 43×43 со значениями от 0 до 1. Вопросы, связанные с синкретизмом сложных предложений, промежуточными видами между типами и видами сложных предложений, входят в сферу интереса филологов [1], [5]. В рамках данного исследования невозможно провести полный и обстоятельный анализ трансформации между разными типами связей с привлечением большого числа примеров и контекстов, однако вместе с тем в основу таблицы коэффициентов положены определенные выводы, связанные с анализом структуры различных сложных предложений. В связи с этим были рассмотрены два вопроса: 1) трансформация одной связи в другую в пределах одного класса; 2) трансформация для связей разных классов.

Для элементов одного уровня стоимость операции редактирования мы определяем по формуле:

$$(a, b) = 1 - C[a, b] \cdot l(a, b),$$

где $C[a, b]$ – степень схожести типов синтаксических связей a и b ; $l(a, b)$ – функция со значениями от 0 до 1, принимающая значение 1, если родительский элемент не меняется (не производится перенос элемента), и значение меньше 1, если родительский элемент a не равен родительскому элементу b . В этом случае мы можем либо определить значение как 0, либо сделать его зависимым от расстояния, на которое узел переносится. Для этого была выбрана функция следующего вида:

$$l(a, b) = \text{const} \cdot |link_a - link_b|,$$

где $|link_a - link_b|$ – модуль разницы между номерами родительских узлов, а const – константа от 0 до 1 (в нашем случае взята 0,5), характеризующая гибкость данной метрики относительно переносов узлов на небольшие расстояния.

В результате исследования была построена выборка из 61 предложения из творчества П. А. Вяземского, 57 предложений И. А. Бродского и их теоретико-графовых моделей. В результате работы алгоритма была построена матрица расстояний размером 118×118 . Эту матрицу можно использовать, например, для выявления возможной зависимости расстояний между структурами предложений от авторства этих предложений. На рис. 4 представлена диаграмма средних значений и отклонений расстояний: между всеми предложениями выборки (а), только между предложениями П. А. Вяземского (б), только между предложениями И. А. Бродского (с) и перекрестное расстояние между предложениями П. А. Вяземского и И. А. Бродского (д). Здесь средние значения представлены точками в центре отрезков, характеризующих среднее отклонение расстояний.

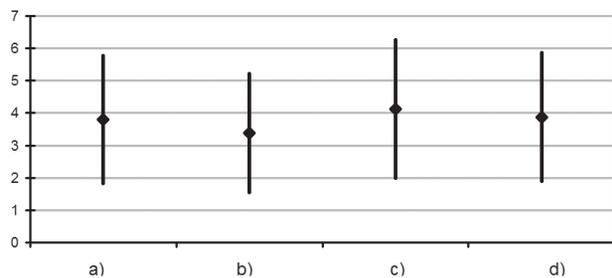


Рис. 4. Расстояния между всеми предложениями

Кроме того, было проведено исследование расстояния между предложениями с достаточно сложной структурой, которые содержали более чем 4 части. В результате получилась диаграмма, изображенная на рис. 5.

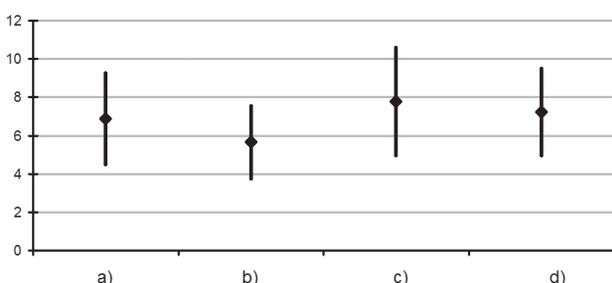


Рис. 5. Расстояния между предложениями с более чем 4 частями

Как видно, значения расстояний между предложениями в случаях (b) и (c) заметно отличаются друг от друга, причем это отличие проявляется более ярко для предложений с достаточно сложной структурой. Можно сделать предположение, что И. А. Бродский использовал более

широкий спектр синтаксических структур предложений, чем П. А. Вяземский, причем это разнообразие структур становится заметнее с увеличением степени сложности предложения. Для проверки этой гипотезы необходимо сравнить расстояния для других выборок предложений из стихотворений тех же авторов, кроме того, интерес представляет изучение других способов определения расстояний между моделями предложений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрены теоретико-графовые модели с упорядоченной иерархической структурой и методы их сравнительного анализа. Апробация алгоритмов проводилась на моделях синтаксической структуры сложных предложений из творчества П. А. Вяземского и И. А. Бродского. В ходе исследования была обнаружена заметная зависимость значений расстояний между предложениями от их авторства. Зависимость выражается сильнее при сравнении больших предложений с нетривиальной структурой. Относительно большое внутреннее расстояние между предложениями И. А. Бродского означает большее разнообразие между структурами предложений и, вероятно, говорит о разнообразии и непостоянстве авторского стиля. Относительно малое расстояние между предложениями П. А. Вяземского, напротив, говорит о большей приверженности автора к определенному стилю. В дальнейшем данное исследование планируется продолжить с привлечением других выборок предложений, а также структурных параметров теоретико-графовых моделей.

* 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. Бабайцева В. В. Переходные конструкции в синтаксисе. Воронеж: Центрально-Черноземное изд-во, 1967. 392 с.
2. Бродский И. А. Сочинения: В 4 т. СПб.: Пушкинский фонд, 1994. Т. 2. 479 с.
3. Вяземский П. А. Стихотворения. Л.: Сов. писатель, 1986. 544 с.
4. Гладкий А. В. Синтаксические структуры естественного языка. М.: Изд-во ЛКИ, 2007. 152 с.
5. Дружинина С. И. Синкретизм в системе сложноподчиненных предложений. Орел: Изд-во Орел ГАУ, 2008. 436 с.
6. Касьянов В. Н., Евстигнеев В. А. Графы в программировании: обработка, визуализация и применение. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 1104 с.
7. Коломийцева А. С. Полипредикативное сложное предложение-абзац как проявление идиостиля писателя и способ реализации текстовой категории «образ автора» // Историческая и социально-образовательная мысль. 2011. № 3. С. 108–111.
8. Мишланов В. А. Семантика и структура сложного предложения в сфере динамического синтаксиса. Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 1996. 267 с.
9. Москвин Н. Д. Теоретико-графовые модели структуры фольклорных текстов, алгоритмы поиска закономерностей и их программная реализация: Дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск, 2006. 121 с.
10. Москвин Н. Д., Лебедев А. А., Варфоломеев А. Г. Представление моделей синтаксической структуры поэзии П. А. Вяземского с помощью технологии XML // Материалы IV междунар. науч. конф. «Информационные технологии и письменное наследие – EΓManuscript-2012» (Петрозаводск, 3–8 сентября 2012 г.). Петрозаводск; Ижевск, 2012. С. 174–178.
11. Пешковский А. М. Русский синтаксис в научном освещении. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 450 с.
12. Сево И. П. Графическое представление синтаксических структур и стилистическая диагностика. Киев: Наукова думка, 1981. 192 с.
13. Bunke H. Graph matching: theoretical foundations, algorithms, and applications // Proc. Vision Interface. Montreal, 2000. P. 82–88.
14. Wagner R., Fischer M. The string-to-string correction problem // Journal of the Association for Computing Machinery. 1974. Vol. 21. № 1. P. 168–173.

Kuznetsov D. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Lebedev A. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Moskin N. D., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Varfolomeyev A. G., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

GRAPH-THEORETIC MODELS WITH ORDERED HIERARCHICAL STRUCTURE AND THEIR USE IN ANALYSIS OF POETIC TEXTS' SYNTAX

The article examines graph-theoretic models with ordered hierarchical structures and methods of their comparative analysis. A comparison of the models is carried out by the distance definition, which is based on the well known Wagner-Fischer string comparison algorithm. Here, a graph-theoretic model is converted into a string, where each node is assigned a link to the parent element, the nesting level, and type of connection with the node (this distance satisfies all metric properties). To determine the degree of similarity between different types of syntactic relations on the basis of the expert assessments of philologists the matrix C sized 43×43 with values between 0 and 1 was built. Testing of these algorithms was performed on the models of syntactic structure of complex sentences taken from the works of P. A. Vyazemskiy and I. A. Brodskiy (118 texts). Noticeable dependence between metric values and authorship of the sentences was revealed. This dependence is expressed more strongly in the analysis of large sentences with non-trivial structure.

Key words: graph-theoretic model, hierarchical structure, comparing, syntax, text, complex sentence

REFERENCES

1. Babaytseva V.V. *Perekhodnye konstruksii v sintaksise* [Transitional constructions in syntax]. Voronezh, The Central Black Earth Publ., 1967. 392 p.
2. Brodskiy I.A. *Sochineniya: V 4 t.* [Works: In 4 vol.]. St. Petersburg, Pushkin fund Publ., 1994. Vol. 2. 479 p.
3. Vyazemskiy P.A. *Stikhotvoreniya* [Poems]. Leningrad, Sovetskiy pisatel' Publ., 1986. 544 p.
4. Gladkiy A.V. *Sintaksicheskie struktury estestvennogo yazyka* [The syntactic structures of natural language]. Moscow, LKI Publ., 2007. 152 p.
5. Druzhinina S.I. *Sinkretizm v sisteme slozhnopodchinennykh predlozheniy* [Syncretism in the system of complex sentences]. Orel, Orel GAU Publ., 2008. 436 p.
6. Kasyanov V.N., Evstigneev V.A. *Grafy v programmirovanii: obrabotka, vizualizatsiya i primeneniye* [Graphs in programming: processing, visualization, and application]. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2003. 1104 p.
7. Kolomyitseva A.S. Polypredicative compound sentence-paragraph as realization of writer's idyostyle and method of realization of textual category of "author's character" [Polipredikativnoe slozhnoe predlozhenie-abzats kak proyavlenie idostilya pisatelya i sposob realizatsii tekstovoy kategorii "obraz avtora"]. *Istoricheskaya i sotsial'no-obrazovatel'naya mysl'* [Historical and social-educational idea]. 2011. № 3. P. 108–111.
8. Mishlanov V.A. *Semantika i struktura slozhnogo predlozheniya v sfere dinamicheskogo sintaksisa* [Semantics and complex sentence structure in dynamic syntax]. Perm', Perm University Publ., 1996. 267 p.
9. Moskin N.D. *Teoretiko-grafovye modeli struktury folklornykh tekstov, algoritmy poiska zakonomernostey i ikh programnaya realizatsiya. Diss. kand. tekhn. nauk* [Graph-theoretic models of the folklore texts' structure, algorithms for regularity searching and their program implementation. Cand. tech. sci. diss.]. Petrozavodsk, 2006. 121 p.
10. Moskin N.D., Lebedev A.A., Varfolomeyev A.G. Presentation of syntactic structure models of P.A. Vyazemsky poetry using XML technology [Predstavlenie modeley sintaksicheskoy struktury poezii P.A. Vyazemskogo s pomoshch'yu tekhnologii XML]. *Proceedings of the IV International conference «Informatsionnye tekhnologii i pismennoe nasledie»* [Information Technologies and Textual Heritage] – EI Manuscript-2012». (Petrozavodsk, 3–8 September 2012). Petrozavodsk; Izhevsk, 2012. P. 174–178.
11. Peshkovskiy A.M. *Russkiy sintaksis v nauchnom osveshchenii* [Russian syntax in scientific light]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2001. 450 p.
12. Sevbo I.P. *Graficheskoe predstavlenie sintaksicheskikh struktur i stilisticheskaya diagnostika* [Graphic presentation of syntactic structures and stylistic diagnosis]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1981. 192 p.
13. Bunke H. Graph matching: theoretical foundations, algorithms, and applications // *Proc. Vision Interface*. Montreal, 2000. P. 82–88.
14. Wagner R., Fischer M. The string-to-string correction problem // *Journal of the Association for Computing Machinery*. 1974. Vol. 21. № 1. P. 168–173.

Поступила в редакцию 03.06.2013

ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ КУЗНЕЦОВ

доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
kuznetcv@mail.ru

ДЕНИС ВАЛЕРЬЕВИЧ ДЕНИСОВ

аспирант кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
fic.denis@gmail.com

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕСОВ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИ РАСЧЕТЕ РЕЙТИНГА*

Рассматривается задача построения рейтинга деятельности нескольких участников на основе результатов выполнения ими нескольких количественных показателей. Обычно для получения оценок деятельности участников требуется ввести весовые коэффициенты показателей, которые зачастую предлагаются экспертами, что может приводить к разногласиям и не гарантирует объективного результата. Однако в некоторых случаях (при сопоставимых контрольных показателях) можно рассчитывать рейтинг более обоснованно. В работе предложена математическая модель для расчета объективных оценок весов показателей и расчета рейтинга участников на основе этих весов. Итоговый метод расчета весов показателей предполагает решение нелинейной задачи оптимизации. Для решения этой задачи нами был модифицирован метод наискорейшего градиентного спуска для учета условий, накладываемых в модели на решение оптимизационной задачи. Работа полученного метода продемонстрирована на примерах, наглядно показывающих возможности метода и влияние результатов участников на веса показателей.

Ключевые слова: рейтинг, объективные оценки, метод градиентного спуска

Рейтинг (сравнительная численная оценка определенного множества объектов) часто используется при подведении итогов деятельности организаций, коллективов и отдельных лиц. Такая оценка обычно рассчитывается на основе ряда контрольных показателей посредством подсуммировки их значений с определенными весовыми коэффициентами. Выбор этих коэффициентов в силу существенной разнородности показателей и ряда других трудноформализуемых обстоятельств чаще всего предоставляется экспертам, что может приводить к разногласиям между участниками конкурса или соревнования и не всегда гарантирует объективный результат. Однако в случаях сопоставимых контрольных показателей, например, при подведении итогов соревнований по программированию, в которых контрольные показатели определяются множеством решенных задач, имеется возможность более обоснованного расчета рейтинга. В работе представлена попытка формализации и решения указанной задачи.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Введем необходимые обозначения. Назовем участниками тестирования сравниваемые объекты или субъекты, их множество обозначим M ($m = |M|$). Множество показателей обозначим N ($n = |N|$) и будем считать, что известны a_{ij} – численные значения результатов тестирования каждого объекта $i \in M$ по каждому из показателей $j \in N$.

Например, при подведении итогов соревнований по программированию $a_{ij} = 1$, если задача с индексом $j \in N$ решена участником $i \in M$, и $a_{ij} = 0$ иначе. Таким образом, результаты тестирования формализуются в виде числовой, в данном случае бинарной матрицы, итоги тестирования определяются значениями ее элементов. Ограничимся именно такими матрицами.

Цель исследования заключается в поиске оценок значений x_i – искомым рейтингов участников $i \in M$. Строки и столбцы матрицы находятся в определенном отношении двойственности, в силу симметричности исходных условий. Введем также y_j – неизвестные оценки весовых показателей $j \in N$.

Тогда расчет рейтингов заключается в поиске T – способа сопоставления пары числовых векторов $x[M] \geq 0$ и $y[N] \geq 0$ произвольной числовой матрице $a[M; N]$

$$T; a[M; N] \rightarrow (x[M]; y[N]).$$

Очевидно, отображение T не может быть установлено однозначно. В частности, если $M = N = 1..m$ и $a_{ij} = 1$ для всех $i \leq j$, то, следуя здравому смыслу, в качестве рейтингов могут использоваться любые монотонно возрастающие числовые последовательности. Поэтому для построения рейтингов введем определенные предположения. Обозначим $k_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}$ – количество показателей, успешно выполненных

участником $i \in M$. $l_j = \sum_{i=1}^m a_{ij}$ – суммарный результат участников по показателю $j \in N$. Следуя общепринятой логике расчета рейтингов [3], [4], введем следующие предположения.

- Исключим из условий задачи неинформативные показатели $j \in N$: $l_j = 0$ или $l_j = m$. Действительно, тест, выполненный каждым или не выполненный ни одним участником, не предоставляет никакой информации о сравнительных результатах участников. Таким образом, будем считать, что $1 \leq l_j \leq m - 1$ для каждого $j \in N$.

- Рейтинг участника определяется взвешенной суммой его результатов по показателям $x_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} y_j$.

- $y_j > 0$, $\sum_{j=1}^m y_j = m$. Условие нормировки предотвращает чрезмерный рост весов, а неотрицательность гарантирует, что результат по показателю всегда выгодно улучшить для улучшения рейтинга участника.

$$\frac{y_j}{y_l} = f\left(\frac{k_l}{k_j}\right), \quad (1)$$

где $f(x)$ – некоторая монотонно возрастающая функция $f: [0...1] \rightarrow [0...∞)$. Это условие говорит о том, что веса показателей в каком-то смысле обратно пропорциональны сумме оценок участников по показателям. Иными словами, чем лучше выполнен в сумме показатель, тем меньше его вес. Поскольку y_j подчинены условию нормировки, логично накладывать ограничения не на сами y_j , а на их отношения друг к другу.

Можно заметить, что в таком случае требуется предполагать $y_j > 0$ и $k_j > 0$, поскольку в противном случае одна из частей равенства будет не определена. Поэтому ужесточим требование к y_j , потребовав $y_j > 0$. А для того чтобы k_j было строго положительным, введем фиктивный участник, получившего максимальный результат по каждому показателю, таким образом получим $k_j \geq 1$.

Конечно, равенство (1) может не выполняться для произвольной функции f . Выведем ограничения на функцию f , позволяющие добиться (1). Будем искать f в классе непрерывно дифференцируемых функций. Пусть $m = 3$. Будем считать, что $k_1, k_2, k_3 \in [0; ∞)$, поскольку можно считать количество участников сколь угодно большим. Из (1) следует, что

$$\frac{y_2}{y_1} = f\left(\frac{k_1}{k_2}\right), \frac{y_3}{y_1} = f\left(\frac{k_1}{k_3}\right), \frac{y_3}{y_2} = f\left(\frac{k_2}{k_3}\right).$$

Отсюда несложно видеть, что

$$f\left(\frac{k_1}{k_3}\right) = f\left(\frac{k_2}{k_3}\right) f\left(\frac{k_1}{k_2}\right). \quad (2)$$

Рассмотрим $k_1 = \lceil Bt \rceil$, $k_2 = \lceil t \rceil$, $k_3 = \lceil At \rceil$ для некоторых положительных A и B . Заметим, что в силу непрерывности функции f при $t \rightarrow \infty$ выражение (2) примет вид

$$f\left(\frac{B}{A}\right) = f\left(\frac{1}{A}\right) f(B). \quad (3)$$

Выражение (3) верно для всех A и B . Так как f дифференцируема, мы можем продифференцировать (3) по B , получая $\frac{1}{A} f\left(\frac{B}{A}\right) = f'(B) f\left(\frac{1}{A}\right)$.

Рассмотрим это выражение при $B = 1$. Обозначив $\frac{1}{A} = x$, получим уравнение

$$x f'(x) = f'(1) f(x).$$

Полагая $f'(1)$ некоторой константой C , решаем это уравнение, получая решение в виде:

$f(t) = e^{Ct} + C_1$, где C_1 – некоторая произвольная константа.

Таким образом, мы доказали

Утверждение 1. Равенство (1) в классе непрерывно дифференцируемых функций достигается тогда и только тогда, когда $f(x) = Ax + B$ для некоторых A и B .

Покажем, что в этом утверждении $B = 0$. Для этого рассмотрим (2) при $k_1 \rightarrow \infty$, в силу непрерывности f получим $f(0) = f\left(\frac{k_2}{k_3}\right) f(0)$. Отсюда

либо $f(0) = 0$ (а тогда очевидно и $B = 0$), либо

$f\left(\frac{k_2}{k_3}\right) = 1$ для любых k_2 и k_3 . Но в таком случае

мы получаем $f(x) = const$, а стало быть, все y_j равны. В силу условия нормировки мы получаем, что $y_j = 1$, а рейтинг вырождается в простую сумму результатов участника по показателям.

В случае же когда $B = 0$, мы получаем $\frac{y_j}{y_l} = A \frac{k_l}{k_j}$.

В таком случае, рассматривая эти уравнения

при $l = 1$, получаем $y_j = A \frac{k_1}{k_j} y_1$. Добавляя условие нормировки, получаем систему уравнений,

из которых находятся y_j и константа A

$$y_j = A \frac{k_j}{k_1} y_1, \forall j \in [1..m], \sum_{j=1}^m y_j = m. \quad (4)$$

Решая эту систему, получаем $A = 1$, $y_j = \frac{m k_j}{\sum k_j}$.

Система (4) была рассмотрена при $l = 1$ и не учитывает все уравнения из (1). Если проверить полученное решение, окажется, что оно не удовлетворяет (1). Стало быть, требуется другой подход.

Заметим, что в силу утверждения 1 разумным выглядит предложение ослабить ограничение (1). Будем вместо функции, в точности удовлетворяющей (1), искать функцию, наиболее

точно подходящую под заданное ограничение. Для этого воспользуемся методом наименьших квадратов, заменяя (1) на

$$\sum_{j \neq l} \left(\frac{y_j}{y_l} - f\left(\frac{k_l}{k_j}\right) \right)^2 \rightarrow \min. \quad (5)$$

Тогда для нахождения y_j требуется решить следующую оптимизационную задачу:

$$\sum_{j \neq l} \left(\frac{y_j}{y_l} - f\left(\frac{k_l}{k_j}\right) \right)^2 \rightarrow \min; \sum_{j=1}^m y_j = m; y_j > 0. \quad (6)$$

Задача (6) является классической задачей на условный экстремум, однако попытка применить метод множителей Лагранжа для ее решения оказалась неудачной, поскольку целевая функция является существенно нелинейной и выражения для ее производных оказываются весьма громоздкими. Поэтому для решения задачи (6) будем использовать численные методы. Заметим, что если для какого-то j $y_j \rightarrow 0$, то всегда существует l , такая что $y_l \neq 0$ (в силу условия нормировки и неотрицательности), а в таком случае целевая функция неограниченно возрастает за счет отношения $\frac{y_l}{y_j}$, поэтому можно предположить, что задача имеет решение.

Обозначим $F(y) = \sum \left(\frac{y_j}{y_l} - f\left(\frac{k_l}{k_j}\right) \right)^2$. Заметим,

что $F(\lambda y) = F(y)$. Это наблюдение позволяет надеяться на то, что условие нормировки в задаче является несущественным. Для доказательства рассмотрим задачу без этого условия.

$$\sum_{j \neq l} \left(\frac{y_j}{y_l} - f\left(\frac{k_l}{k_j}\right) \right)^2 \rightarrow \min; y_j > 0. \quad (7)$$

Обозначим $N(y) = \frac{my}{|y|}$. Заметим, что $N(y)$

определена на всем допустимом множестве как задачи (6), так и задачи (7).

В силу (1) задача (7) не имеет точек строгого локального минимума, поскольку $\forall \epsilon \in F((1 + \epsilon)y) = F(y)$. Поэтому решением задачи (7) мы будем называть точку нестрогого локального минимума функции F . В таком случае очевидно утверждение, что если y^* – решение (7), то и $N(y^*)$ – решение (7).

Теперь пусть y^* – решение задачи (7). Покажем, что $N(y^*)$ – решение задачи (6). Пусть это не так, и существует последовательность y_k , удовлетворяющая условиям (6), такая что $F(y_k) < F(y^*)$. Но тогда последовательность y_k удовлетворяет условиям (7), а значит $N(y^*)$ не является решением (7). Это противоречит доказанному выше. Таким образом доказана

Лемма 1 y^* является решением (7) тогда и только тогда, когда $N(y^*)$ является решением (6).

В одну сторону это утверждение уже доказано, в обратную же оно очевидно.

Таким образом, можно сконцентрироваться на исследовании задачи (7). Для решения этой задачи модифицируем метод наискорейшего градиентного спуска [2] следующим образом.

- Шаг 0. Положим $y_i^0 = 1, k = 0$.
- Шаг 1. Вычислим $v = -\nabla F(y^k)$.
- Шаг 2. Положим $\lambda = \min\left(\frac{-y_i^k}{v_i}, v_i < 0\right)$. Мо-

жет оказаться, что $\lambda = \infty$, в таком случае положим ее равной некоторой большой константе, определяемой эмпирически.

• Шаг 3. Вычислим $t^s = \operatorname{argmin}(F(y + tv), t \in [0... \lambda])$. Для вычисления t^s можно решить одномерную оптимизационную задачу методом трюичного поиска.

• Шаг 4. Положим $y^{k+1} = N(y + t^s v)$.

• Шаг 5. Если $\max_i (y_i^{k+1} - y_i^k) < \epsilon$, точка y^{k+1} объявляется приближенным решением задачи и алгоритм завершается. В противном случае полагаем $k = k + 1$ и переходим к шагу 1. В численных расчетах использовалось значение $\epsilon = 0,01$.

Приведенная выше модификация метода градиентного спуска достаточно быстро сходится на различных тестах при различных видах функции $f(x)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Приведем результаты применения предложенного метода на различных тестовых данных. Привести реальные тестовые данные не представляется возможным в силу их значительного размера.

В табл. 1 приведено сравнительное количество итераций метода на одних и тех же тестовых данных в зависимости от вида функции $f(x)$.

Таблица 1
Количество итераций метода при различных $f(x)$

| Вид $f(x)$ | Тест 1 N = M = 3 | Тест 2 N = M = 10 | Тест 3 N = M = 10 | Тест 4 N = 43, M = 11 | Тест 5 N = 107, M = 79 |
|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|
| $f(x) = x$ | 3 | 1 | 35 | 2 | 159 |
| $f(x) = x^2$ | 6 | 1 | 6 | 32 | 46 |
| $f(x) = e^x$ | 12 | 16 | 1 | 1 | 1 |
| $f(x) = \sqrt{x}$ | 1 | 1 | 8 | 16 | 18 |
| $f(x) = x\sqrt{x}$ | 4 | 1 | 1 | 14 | 28 |
| $f(x) = \sqrt[4]{x}$ | 1 | 1 | 3 | 4 | 5 |
| $f(x) = \log(x+1)$ | 1 | 1 | 5 | 9 | 11 |
| $f(x) = x \log(x+1)$ | 3 | 1 | 1 | 11 | 59 |

Табл. 2, 3 отражают результаты работы метода при $f(x) = x$ как наиболее интересные. Каждая из этих таблиц состоит из $N + 1$ строки и $M + 1$ столбца. В последней строке приведены полученные

рейтинги задач, в последнем столбце – полученные рейтинги участников. Остальная часть таблицы представляет исходные данные – результаты каждого участника по каждой задаче.

В первом тесте (табл. 2) можно заметить, что если участники решают задачи в порядке возрастания сложности, то рейтинг очевидным образом будет больше у участника, решившего больше задач. В тесте (табл. 3) отражено, как решение нетривиальных задач может значительно поднять рейтинг участника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены численные эксперименты с различными видами функции $f(x)$. Наиболее интересными, на наш взгляд, оказались результаты при линейной $f(x)$, которые приведены в таблицах. Предложенный метод расчета рейтинга достаточно быстро сходится на тестовых данных, что позволяет использовать его на практике. Остается открытым вопрос о единственности локального минимума функции F , а также об условиях, которые требуется наложить на функцию f , чтобы приведенный метод гарантированно сошелся.

*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. Кирюхин В. М., Окулов С. М. Методика решения задач по информатике. Международные олимпиады. М.: БИНОМ: Лаборатория знаний, 2007. 600 с.
2. Максимов Ю. А., Филипповская Е. А. Алгоритмы решения задач нелинейного программирования. М.: МИФИ, 1982. 52 с.
3. Miranda E., Bourque P., Abran A. Sizing User Stories Using Paired Comparisons. Information and Software Technology. 2009. № 9. P. 1327–1337.
4. Miranda E. Improving Subjective Estimations Using Paired Comparisons. Information and Software Technology. 2001. № 1. P. 87–91.
5. Verdu E., Lorenzo R., Revilla M., Regueras L. A New Learning Paradigm: Competition Supported by Technology. Madrid: Cedetel, 2010. 317 p.

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

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

METHOD FOR COMPUTING MEASURES' WEIGHTS FOR RATING COMPUTATION

The goal of the study is to construct objective estimates of several participants' activity based on the results obtained by several quantitative measures. Usually, to construct such estimates weights of measures provided by experts are introduced. This leads to disagreements and does not guarantee objective result. Though in some cases (especially when measures are comparable), we can compute rating on a more reasonable basis. This paper provides a mathematical model for computing objective weights of measures and computing participants' rating with these weights. The proposed method requires solving of non-linear optimization problem. To solve the problem we used a gradient method, which was modified to meet the requirements of our model. The method was tested on several examples. The experiment helped to illustrate the method's efficiency and effect of participants' results on measures' weights.

Key words: rating, objective estimates, gradient method

REFERENCES

1. Kiryukhin V. M., Okulov S. M. Metodika resheniya zadach po informatike. Mezhdunarodnye olimpiady [Methods of solving problems in informatics. International olympiads.] Moscow, BINOM: Laboratoriya znaniy Publ., 2007. 600 p.
2. Maksimov Yu. A., Fillipovskaya E. A. Algoritmy resheniya zadach nelineynogo programmirovaniya [Algorithms for solving non-linear programming problems] Moscow, 1982. 52 p.
3. Miranda E., Bourque P., Abran A. Sizing User Stories Using Paired Comparisons. Information and Software Technology. 2009. № 9. P. 1327–1337.
4. Miranda E. Improving Subjective Estimations Using Paired Comparisons. Information and Software Technology. 2001. № 1. P. 87–91.
5. Verdu E., Lorenzo R., Revilla M., Regueras L. A New Learning Paradigm: Competition Supported by Technology. Madrid, CEDETEL, 2010. 317 p.

Поступила в редакцию 17.06.2013

Таблица 2

Тест с верхнетреугольной матрицей результатов

| | | | |
|------|------|------|------|
| 1 | 1 | 1 | 3 |
| 0 | 1 | 1 | 1,61 |
| 0 | 0 | 1 | 0,69 |
| 1,38 | 0,92 | 0,69 | |

Таблица 3

Тест, в котором один из участников (последний) решил две задачи, не решенные более никем

| | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3,56 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,97 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,73 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,22 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,90 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,50 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,69 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,59 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,22 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2,47 |
| 0,22 | 0,91 | 0,37 | 0,47 | 0,68 | 0,91 | 1,24 | 1,24 | 1,98 | 1,98 | |



3 июля 2013 года исполнилось 60 лет доктору технических наук, доценту, советнику Российской академии архитектуры и строительных наук, заведующему кафедрой архитектуры, строительных конструкций и геотехники строительного факультета Петрозаводского государственного университета *Алексею Николаевичу Петрову*.

АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ПЕТРОВ

К 60-летию со дня рождения

А. Н. Петров родился в Республике Коми. В 1975 году окончил факультет промышленного и гражданского строительства Петрозаводского университета. После окончания аспирантуры в Научно-исследовательском институте бетона и железобетона в Москве в 1981 году А. Н. Петров успешно защитил кандидатскую диссертацию. В 2000 году там же окончил докторантуру и защитил докторскую диссертацию. Научная работа велась по теме, связанной с разработкой деформационной модели нелинейной ползучести железобетона, исследования в этом направлении А. Н. Петров продолжает и сегодня.

В Петрозаводском университете Алексей Николаевич работает более 30 лет, начинал с должности преподавателя, затем старшего преподавателя, доцента кафедры строительных конструкций. С 2003 года А. Н. Петров руководит кафедрой архитектуры, строительных конструкций и геотехники строительного факультета ПетрГУ, за этот период на кафедре была организована специализация по реставрации памятников архитектуры, открыта и работает аспирантура. За годы научной и педагогической деятельности А. Н. Петров опубликовал более 60 печатных работ, в том числе два учебных пособия по проектированию железобетонных конструкций и научную монографию «Нелинейная модель ползучести железобетона и ее приложение к расчету плосконапряженных элементов». Среди объектов, в проектировании и мониторинге возведения которых участвовал Алексей Николаевич, – многоэтажные здания АКБ Национального резервного банка РФ и Московской международной валютной биржи, комплекса ММДЦ «Москва-Сити». Был в составе бригады специалистов в обследовании зданий и сооружений, пострадавших в результате землетрясения в районе Мраморного моря (1999). А. Н. Петров является членом научного совета «Программные средства в строительстве и архитектуре», под его руководством выполнен ряд работ по грантам РФФИ и РААСН. В 2002 году А. Н. Петрову присвоено звание советника Российской академии архитектуры и строительных наук.

От всей души поздравляем Алексея Николаевича с юбилеем и желаем дальнейших успехов в научно-педагогической деятельности!

CONTENTS

BIOLOGY

- Ryzhkov L. P., Trofimov I. I.*
Some ecological and biological data on polar triglops (*Triglops nybelini*) of Barents Sea 7
- Gorbach V. V.*
Landscape differentiation of butterfly assemblages (Lepidoptera, Hesperioidea et Papilionoidea) in middle taiga of Karelia 10
- Obukhova E. S., Sidorova N. A.*
Physiological features of achromogenic species of genus *Pseudomonas* in dynamic conditions of thermal cultivation 19
- Stes'ko A. V.*
Some features of age composition of common dab (*Limanda limanda* L., 1758) of Barents Sea 22

MEDICAL SCIENCE

- Vvedenskiy V. P., Rybachkov V. V., Shubin L. B.*
Endobronchial therapy effect on status localis evolution in case of tracheobronchial tree aspiration injury 26
- Goldobin V. V., Klocheva E. G., Sirotkina O. V., Vavilova T. V., Laskovets A. B.*
Atherothrombotic and lacunar strokes in elderly patients: clinical manifestations and platelet haemostasis 30
- Zhurakhovskaya D. V., Loskutova E. E., Vinogradova I. A., P*
Health literacy assessment of pharmacists about safety and efficiency of nonsteroid anti-inflammatory drugs 36
- Markelov Yu. M., Dracheva M. S., Dorodnaya I. A.*
Drug resistance spectrum of tuberculosis mycobacteria with multiple drug resistance 40

EARTH SCIENCE

- Dmitrieva A. V.*
Geochemistry and ore mineralization of Yarozero moderately alkaline complex, Central Karelia 45

AGRICULTURAL SCIENCE

- Bolgov A. E., Chistyakova I. A., Kondratyuk E. A.*
Effectiveness of diversified livestock enterprises . . . 51
- Bakhmet O. N.*
Characteristic features of rupestrian landscape soils of Karelian White Sea coast 55
- Minin N. S., Zakharov A. Yu.*
Growth of artificial pine forests under influence of thinning 60

ENGINEERING SCIENCE

- Karpenko S. N., Petrov A. N., Evseeva A. V.*
Diagrams-isochrones of high performance concrete 65
- Pitukhin A. V., Vasil'ev S. B., Kolesnikov G. N., Panov N. G., Koparev V. S.*
Particleboards' destruction model in tensile strength perpendicular to sawn wood face 68
- Skabin A. V., Rogov A. A.*
Mathematical model of character recognition 73
- Bormatova E. P., Davydov M. P.*
One-dimensional governing equations for the creep under hydrogen diffusion flow 76
- Kosenkov A. Yu.*
New research of Karelian chapels in Pryazha district 84

PHYSICS AND MATHEMATICS

- Mol'kov S. I., Savin V. N.*
Influence of processes on dust particles' surface on their electrical charge in ordered plasma-dust structures 89
- Skorikova N. S., Fofanov A. D., Osaulenko R. N., Aleshina L. A., Kudina E. F.*
Structural state of xerogels based on water glass modified by cobalt, nickel, and titanium 94
- Podgornyy V. I., Osaulenko R. N., Troshin E. V.*
Use of ohmic heating of cathode deposit filaments containing carbon nanotubers for admixtures' extraction 102
- Berezina O. Ya., Kirienko D. A., Klochkova T. A., Yakovleva D. S.*
Influence of electric field on properties of hydrated vanadium pentoxide thin films 107
- Kuznetsov D. V., Lebedev A. A., Moskin N. D., Varfolomeyev A. G.*
Graph-theoretic models with ordered hierarchical structure and their use in analysis of poetic texts' syntax 113
- Kuznetsov V. A., Denisov D. V.*
Method for computing measures' weights for rating computation 119
- Jubilation**
To the 60th birthday anniversary of A. N. Petrov 123