

---

Министерство образования и науки  
Российской Федерации

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

№ 4 (149). Июнь, 2015

---

**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.  
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 РАН  
(Петрозаводск)
- В. Н. ЗАХАРОВ**  
доктор филологических наук,  
профессор (Москва)
- Ю. ИНОУЭ**  
профессор (Токио, Япония)
- А. С. ИСАЕВ**  
доктор биологических наук,  
профессор, академик РАН (Москва)
- М. ВОХОЗКА**  
доктор экономических наук  
(Чешские Будейовицы, Чешская Республика)
- В. М. ЛЕВИН**  
доктор физико-математических наук,  
профессор (Мехико, Мексика)
- Т. П. ЛЁННГРЕН**  
доктор философии (Тромсё, Норвегия)
- В. И. МАЕВСКИЙ**  
доктор экономических наук, профессор,  
академик РАН (Москва)
- 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)
- П. ПЕЛКОНЕН**  
доктор технических наук,  
профессор (Йоэнсуу, Финляндия)
- И. В. РОМАНОВСКИЙ**  
доктор физико-математических наук,  
профессор (Санкт-Петербург)
- Е. С. СЕНЯВСКАЯ**  
доктор исторических наук, профессор (Москва)
- К. СКВАРСКА**  
доктор философии (Прага, Чешская Республика)
- А. Ф. ТИТОВ**  
доктор биологических наук, профессор,  
член-корреспондент РАН (Петрозаводск)
- Р. М. ЮСУПОВ**  
доктор технических наук, профессор,  
член-корреспондент РАН (Санкт-Петербург)

Редакционная коллегия серии  
«Естественные и технические науки»

- О. Ю. БАРЫШЕВА**  
доктор медицинских наук  
(Петрозаводск)
- А. Е. БОЛГОВ**  
доктор сельскохозяйственных наук,  
профессор (Петрозаводск)
- В. В. ВАПИРОВ**  
доктор химических наук,  
профессор (Петрозаводск)
- Т. О. ВОЛКОВА**  
доктор биологических наук (Петрозаводск)
- Е. Ф. МАРКОВСКАЯ**  
доктор биологических наук,  
профессор (Петрозаводск)
- А. Ю. МЕЙГАЛ**  
доктор медицинских наук,  
профессор (Петрозаводск)
- Н. Н. НЕМОВА**  
доктор биологических наук,  
профессор, член-корреспондент РАН (Петрозаводск)
- Е. И. РАТЬКОВА**  
кандидат технических наук,  
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)

№ 4 (149). June, 2015

---

**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](mailto:uchzap@mail.ru)

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

---

 Editorial Council

- |   |  |
|---|--|
| <p><b>V. BOL'SHAKOV</b><br/>Doctor of Biological Sciences,<br/>Professor, the RAS Member (Ekaterinburg)</p>         | <p><b>I. MULLONEN</b><br/>Doctor of Philological Sciences, Professor (Petrozavodsk)</p>  |
| <p><b>I. DUDANOV</b><br/>Doctor of Medical Sciences, Professor,<br/>the RAS Corresponding Member (Petrozavodsk)</p> | <p><b>V. ORPHINSKIY</b><br/>Doctor of Architecture, Professor,<br/>Full Member of Russian Academy of Architectural Sciences<br/>(Petrozavodsk)</p> |
| <p><b>V. ZAKHAROV</b><br/>Doctor of Philological Sciences, Professor (Moscow)</p>                                   | <p><b>P. PELKONEN</b><br/>Doctor of Technical Sciences,<br/>Professor (Joensuu, Finland)</p>   |
| <p><b>Y. INOUE</b><br/>Professor (Tokyo, Japan)</p>   | <p><b>I. ROMANOVSKIY</b><br/>Doctor of Physical-Mathematical Sciences,<br/>Professor (St. Petersburg)</p>  |
| <p><b>A. ISAYEV</b><br/>Doctor of Biological Sciences,<br/>Professor, the RAS Member (Moscow)</p>                   | <p><b>E. SENYAVSKAYA</b><br/>Doctor of Historical Sciences,<br/>Professor (Moscow)</p>   |
| <p><b>M. VOCHOZKA</b><br/>Doctor of Economic Sciences<br/>(Ceske Budejovice, Czech Republic)</p>                    | <p><b>K. SKWARSKA</b><br/>Doctor of Philosophy<br/>(Praha, Czech Republic)</p>   |
| <p><b>V. LEVIN</b><br/>Doctor of Physical-Mathematical Sciences,<br/>Professor (Mexico, Mexico)</p>                 | <p><b>A. TITOV</b><br/>Doctor of Biological Sciences, Professor,<br/>the RAS Corresponding Member (Petrozavodsk)</p>                               |
| <p><b>T. LÖNNGREN</b><br/>Doctor of Philosophy (Tromsø, Norway)</p>   | <p><b>R. YUSUPOV</b><br/>Doctor of Technical Sciences, Professor, the RAS<br/>Corresponding Member (St. Petersburg)</p>                            |
| <p><b>V. MAEVSKIY</b><br/>Doctor of Economic Sciences, Professor (Moscow)</p>                                       |  |
| <p><b>N. MEL'NIKOV</b><br/>Doctor of Technical Sciences,<br/>Professor, the RAS Member (Apatity)</p>                |  |

 Editorial Board of the Series  
 "Natural & Engineering Sciences"

- |  |   |
|--|---|
| <p><b>O. BARYSHEVA</b><br/>Doctor of Medical Sciences<br/>(Petrozavodsk)</p>                 | <p><b>N. NEMOVA</b><br/>Doctor of Biological Sciences,<br/>Professor, the RAS Corresponding Member (Petrozavodsk)</p> |
| <p><b>A. BOLGOV</b><br/>Doctor of Agricultural Sciences,<br/>Professor (Petrozavodsk)</p>    | <p><b>E. RAT'KOVA</b><br/>Candidate of Technical Sciences,<br/>Series Executive Secretary (Petrozavodsk)</p>          |
| <p><b>V. VAPIROV</b><br/>Doctor of Chemistry,<br/>Professor (Petrozavodsk)</p>               | <p><b>A. ROGOV</b><br/>Doctor of Technical Sciences,<br/>Professor (Petrozavodsk)</p>                                 |
| <p><b>T. VOLKOVA</b><br/>Doctor of Biological Sciences (Petrozavodsk)</p>                    | <p><b>G. STEFANOVICH</b><br/>Doctor of Physical-Mathematical Sciences,<br/>Professor (Petrozavodsk)</p>               |
| <p><b>E. MARKOVSKAYA</b><br/>Doctor of Biological Sciences,<br/>Professor (Petrozavodsk)</p> | <p><b>V. SYSUN</b><br/>Doctor of Physical-Mathematical Sciences,<br/>Professor (Petrozavodsk)</p>                     |
| <p><b>A. MEYGAL</b><br/>Doctor of Medical Sciences,<br/>Professor (Petrozavodsk)</p>         | <p><b>V. SHCHIPTSOV</b><br/>Doctor of Geological-Mineralogical Sciences,<br/>Professor (Petrozavodsk)</p>             |

## СОДЕРЖАНИЕ

## БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Ивантер Э. В.*  
О сезонно-возрастных изменениях веса тела рыжей полевки (*Clethrionomys Glareolus Schreb.*) . . . . . 7
- Смирнова Л. Е., Кирилина В. М., Федин А. Н., Кривченко А. И.*  
Влияние низких концентраций аденозина и гистамина на сокращения мышцы трахеи и бронхов . . . . . 12
- Смирнов Л. П., Суховская И. В., Борвинская Е. В.*  
Этоксирезорурфин О-деэтилаза – систематическая принадлежность и функциональные особенности как фермента фазы I биотрансформации ксенобиотиков (обзор) . . . . . 18
- Дзюбук И. М., Курицын А. Е., Полина А. В.*  
Влияние режима кормления на молодь радужной форели в зимний период . . . . . 24
- Кучко Я. А., Савосин Е. С., Кучко Т. Ю.*  
Современное состояние сообществ зоопланктона и макрозообентоса Сегозера в районе размещения садкового форелевого хозяйства . . . . . 29

## МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

- Сергеев А. М., Скоромец А. А., Сергеева А. А., Коваленко А. И., Бондаренко Г. Е.*  
Клещевой энцефалит и Лайм-боррелиоз в Республике Карелия (современные аспекты клиники и эпидемиологии) . . . . . 34
- Виноградов В. В., Дуданов И. П.*  
Иммобилизация активатора плазминогена в пористую матрицу оксида алюминия для создания новых тромболитических препаратов . . . . . 37
- Антонен Е. Г., Никитина М. В., Кручек М. М., Хяникяйнен И. В.*  
Общемозговой синдром с когнитивными нарушениями при хронической ишемии мозга и их коррекция Агомелатином . . . . . 43
- Варламова Т. В., Доршакова Н. В., Каранетян Т. А.*  
Возможность оценки генетического риска развития сахарного диабета I типа у детей и подростков в Республике Карелия . . . . . 50
- Субботина Н. С., Доршакова О. В., Козловская Е. М., Белоусова Г. П.*  
Состояние вегетативной регуляции сердечного ритма при хронической недостаточности мозгового кровообращения . . . . . 55
- Усенко Г. А., Васендин Д. В., Усенко А. Г., Ницета О. В.*  
Взаимосвязь между активностью липопротеин-ассоциированной фосфолипазы А2 и содержанием липидов в крови у больных артериальной гипертензией . . . . . 61

## СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

- Глазунов Ю. Б., Мерзленко М. Д., Мельник П. Г.*  
Сравнительные особенности роста карельского климатипа сосны обыкновенной в условиях Подмосковья . . . . . 67

- Волкова А. Ю., Хуобонен М. Э.*  
Репродуктивные показатели производителей осетровых при выращивании в садках в условиях Европейского Севера . . . . . 73
- Гаврилов Т. А.*  
Повышение эффективности приготовления кормов для пушных зверей . . . . . 77

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Колесников Г. Н., Раковская М. И.*  
К обоснованию энергетического критерия очередности перехода односторонних связей механических систем из возможного состояния в действительное состояние . . . . . 80
- Девятникова Л. А., Емельянова Е. Г., Кузьменков А. А., Симонова А. А.*  
Исследование технико-экономических параметров при выборе технологии возведения ограждающих конструкций индивидуальных жилых домов . . . . . 82
- Скобцов И. Г.*  
Оценка вероятности безотказной работы системы ROPS лесозаготовительных машин с позиций механики разрушения . . . . . 90
- Ратькова Е. И., Катаров В. К., Ковалева Н. В.*  
Уплотнение оснований лесных дорог на глинистых грунтах в межсезонные периоды . . . . . 95

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Андреев В. П., Соболев П. С., Мухина Н. И.*  
Сравнение нуклеофильности n-донорных лигандов при взаимодействии с Zn-ТФП, SbCl<sub>5</sub>, BF<sub>3</sub> и йодом в апротонных растворителях . . . . . 98
- Карасев В. Ю., Штыков А. С.*  
Изучение динамики фазовых состояний плазменно-пылевых структур с помощью метода корреляционной спектроскопии . . . . . 104
- Сысун И. В., Сысун В. И., Борисков П. П.*  
Диффузионный механизм окисления никеля в проводящем канале переключательной структуры Pt/NiO/Pt . . . . . 110
- Гиптиев М. Б., Рогов А. А.*  
Экспериментальное сравнение алгоритмов классификации символов в стенографических документах . . . . . 115
- Мочалова А. В.*  
Создание и пополнение терминологических систем с помощью семантического анализатора . . . . . 122

- Информация для авторов** . . . . . 130
- Contents** . . . . . 132

**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»**

**Сведения о журнале и его архиве передаются в ОАО «Агентство „Книга-Сервис“» и размещаются на базовом интернет-ресурсе [www.rucont.ru](http://www.rucont.ru)**

**Журнал и его архив размещаются в «Университетской библиотеке онлайн» по адресу <http://biblioclub.ru>**

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

Учредитель: ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет»

Редактор С. Л. Смирнова. Корректор И. Н. Дьячкова. Переводчик Н. К. Дмитриева. Верстка С. П. Иванова

Дата выхода в свет 19.06.2015. Формат 60×90<sup>1/8</sup>. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
10 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. (1-й завод – 155 экз.). Изд. № 204

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

Адрес редакции, издателя и типографии:

185910, Республика Карелия,  
г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33

ЭРНЕСТ ВИКТОРОВИЧ ИВАНТЕР

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

*ivanter@petrsu.ru*

## О СЕЗОННО-ВОЗРАСТНЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ ВЕСА ТЕЛА РЫЖЕЙ ПОЛЕВКИ (*CLETHRIONOMYS GLAREOLUS* SCHREB.)\*

Многолетние исследования в Карелии (проанализированы показатели веса более 1200 особей рыжей полевки) выявили на протяжении жизненного цикла этого вида два характерных сезонных минимума, соответствующих критическим периодам жизни прибылых зверьков. Первый – осенний (вторая половина октября – начало ноября), когда снежный покров еще не установился, плохо защищает животных и энергетические траты их вследствие холодной погоды возрастают, второй – среднезимний (в декабре – январе), связанный с наступлением сильных и длительных холодов, но менее выраженный, очевидно, из-за хорошей снежной защиты и успешного завершения перестройки терморегуляции зверьков на зимний вариант. При этом у полевок, родившихся весной и в начале лета, период роста и развития падает на наиболее благоприятное время, отсюда и высокий темп их роста и созревания. Полевки же из поздних выводков развиваются на фоне менее благоприятных условий, поэтому рост их замедлен. Однако проявление этой закономерности может нарушаться под влиянием как экзогенных (непогода, снижение урожая кормов и др.), так и эндогенных (внутрипопуляционных) факторов.

Ключевые слова: млекопитающие, рыжая полевка, Восточная Фенноскандия, популяция, динамика численности

Проблема роста млекопитающих не раз служила предметом подробного обсуждения (достаточно ознакомиться с обзором опубликованных на эту тему работ, с исчерпывающей полнотой выполненным М. В. Миной и Г. А. Клевезаль [11]), и тем не менее вопросов по этой проблеме по-прежнему остается много больше, чем ответов. Одна из причин – недостаток специальных исследований, посвященных отдельным видам и группам животных, богатых фактологией и базирующихся на длительных полевых исследованиях. Настоящее сообщение – попытка восполнить этот пробел, по крайней мере в отношении европейской рыжей полевки – одного из самых многочисленных и широко распространенных представителей мелких млекопитающих Палеарктики.

Изучение закономерностей весового роста различных сезонно-возрастных генераций этого вида проводилось нами в процессе многолетних (1965–2013 годы) стационарных и экспедиционных исследований, охвативших значительную часть территории Восточной Фенноскандии – от Кольского полуострова и Финляндии до Карелии и Карельского перешейка Ленинградской области. Общее число проанализированных на весовые показатели животных превысило 1200 экз.

Как показывают наши данные (табл. 1, рис. 1), сезонно-возрастные изменения массы тела у рыжей полевки проявляют в условиях изученного региона закономерный характер и зависят от

времени рождения зверьков. Полевки майских и июньских выводков (ранние генерации) растут очень быстро, особенно в первые три месяца жизни. Наоборот, животные летне-осеннего рождения отличаются низким темпом весового роста. К концу осени они имеют минимальные размеры, перезимовывают в таком «минимизированном» состоянии и лишь весной следующего года, образуя группу зимовавших, резко увеличивают скорость роста («весенний скачок»).

Связь полового созревания молодых полевок разного времени рождения со скоростью их роста, помимо рисунков, иллюстрируют следующие цифры. По многолетним данным, средние размеры тела у зверьков ранних выводков в первый месяц их появления в уловах (в июне) составили 13,2 г, а у сеголеток поздних выводков (в июле) – 13,0. Следовательно, скорость роста в гнезде у них приблизительно одинаковая. Но в дальнейшем они все более различаются. На втором месяце жизни (в июле) прибылые раннего рождения имеют среднюю массу тела 19,3 г, тогда как сеголетки поздних выводков в том же возрасте (в августе) – только 14,4 г. На третьем месяце жизни у прибылых ранних выводков средняя масса тела составляет 22,2 г, поздних – 15,3 г. Если самцы и самки ранних генераций за первый месяц самостоятельной жизни по отношению к исходным показателям прибавляют 6,3 г (46,2%), то прибылые поздних выводков – только 1,4 г (10,7 %). Привес за второй месяц у ранних при-

Таблица 1

Сезонно-возрастные изменения массы тела рыжей полевки (г)

Исследованная группа	Сезон	n	lim	$M \pm t$	$\sigma$	$C_v$	
Самцы							
Прибылые	ранние	Лето	249	8,5–35,1	$18,6 \pm 0,2$	3,6	19,2
		Осень	4	12,6–17,7	$15,9 \pm 1,1$	2,3	14,5
	поздние	Лето	227	6,4–24,1	$15,6 \pm 0,2$	3,0	19,0
		Осень	118	10,0–23,9	$15,9 \pm 0,2$	2,3	14,2
		Зима	5	14,4–16,3	$15,3 \pm 0,2$	0,5	3,3
Зимовавшие		Весна	12	13,8–27,3	$21,9 \pm 0,8$	2,9	13,2
		Лето	135	18,6–33,7	$24,9 \pm 0,3$	3,1	12,3
		Осень	3	21,5–23,3	22,9	–	–
Самки							
Прибылые	ранние	Лето	153	9,0–39,0	$20,7 \pm 0,4$	5,5	26,8
		Осень	26	11,1–26,4	$20,8 \pm 0,8$	4,1	19,7
	поздние	Лето	118	8,6–26,9	$14,8 \pm 0,3$	3,1	21,1
		Осень	71	11,1–24,3	$16,1 \pm 0,3$	2,5	15,6
		Зима	10	13,6–18,5	$15,6 \pm 0,2$	0,8	5,1
Зимовавшие		Весна	10	15,2–30,2	$21,2 \pm 1,4$	4,4	20,7
		Лето	66	20,1–42,7	$29,4 \pm 0,6$	5,2	17,6
		Осень	1	27,0	27,0	–	–

былых равен 2,9 г (15%), у поздних – 1,1 г (7,6%). К третьему месяцу жизни масса тела прибылых ранних выводков составила по отношению к размерам при выходе из гнезда 168% (прирост – 9 г), а у прибылых поздних рождений – 116 г (2,3%).

Непосредственной причиной различий в темпах роста и развития зверьков разных генераций

может быть прямое воздействие среды [2], [5]. У полевок, родившихся весной, период роста падает на наиболее благоприятное время, отсюда и высокий темп их роста и созревания. Полевки же из поздних выводков развиваются на фоне менее благоприятных условий (низкие температуры, ненастье, дефицит корма), поэтому рост их замедлен. Косвенным подтверждением этого служит тот факт, что при изменении экологических условий (например, в ситуациях высокой и низкой численности) интенсивность роста и развития сеголеток меняется. В годы депрессии численности она минимальна, а в годы пика максимальна. К тому же и упитанность (а не только темпы роста и развития) у зверьков осенней генерации оказывается заметно ниже, чем у зимовавших и прибылых ранних выводков (табл. 2). С другой стороны, нельзя совершенно исключить роль генетических факторов, поскольку ранние и поздние генерации имеют разное происхождение и неодинаковый генофонд.

В последнее время в зоологической литературе появился ряд сообщений о наличии у мелких грызунов явления зимней регрессии массы тела [1], [8], [9], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29]. Однако, в отличие от эффекта Денеля, описанного у землероек, у грызунов зимняя регрессия затрагивает лишь общие размеры (массу) тела и к тому же проявляется не столь глубоко, как у бурозубок.

Изучение сезонных колебаний массы тела у рыжих полевок Карелии [2], [5] выявило два сезонных минимума, соответствующих крити-

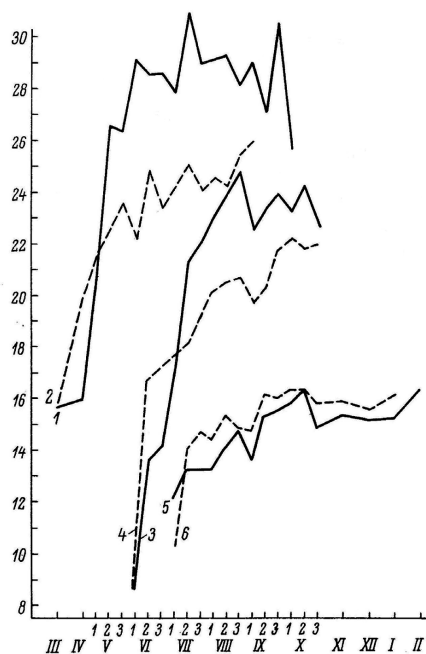


Рис. 1. Весовой рост зимовавших и прибылых рыжих полевок разного времени рождения. 1, 2 – зимовавшие самцы и самки; 3, 4 – самцы и самки ранних выводков; 5, 6 – поздних выводков. По оси абсцисс – месяцы и декады; по оси ординат – масса тела, г



**Таблица 2**  
Упитанность (отношение массы к длине тела) у самцов рыжей полевки разного возраста

Месяц	Зимовавшие	Прибылые ранних выводков	Прибылые поздних выводков
Май	0,238	–	–
Июнь	0,247	0,183	–
Июль	0,248	0,210	0,174
Август	0,252	0,224	0,170
Сентябрь	–	0,218	0,195
Октябрь	–	0,233	0,195

ческим периодам в жизни прибылых зверьков. Первый – осенний (вторая половина октября), когда снежный покров еще не установился, плохо защищает животных и энергетические траты их вследствие холодной погоды возрастают, второй – среднезимний (в декабре – январе), связанный с наступлением сильных и длительных холодов, но менее выраженный, очевидно, из-за хорошей снежной защиты и завершения перестройки терморегуляции зверьков на зимний вариант.

Как известно, наиболее распространенным объяснением предзимнего и зимнего снижения массы тела у млекопитающих является «энергетическая» гипотеза. По В. А. Межжерину, «уменьшение размеров тела к зиме и зимой, которое отмечается у ряда видов птиц и млекопитающих, можно рассматривать как движение системы к ее энергетическому оптимуму, что в условиях недостатка пищи и низких температур следует признавать целесообразным» [10; 109]. С этой точки зрения мелкие размеры и связанная с ними незрелость, очевидно, способствуют более успешному перезимовыванию зверьков, так как потребности у них меньше, а устойчивость к неблагоприятным воздействиям выше.

На адаптивный характер явления зимней регрессии массы тела указывают, в частности, закономерные географические изменения ее величины и выраженности. По данным Яна Зейды [30], в Центральной Европе рыжие полевки наиболее приспособлены к перенесению неблагоприятных условий зимы при массе 20 г, в Польше – 18 г, в Швеции – 16 г. Если присовокупить к этому наши данные по Карелии (15–16 г) и В. Г. Оленева [13] по Уралу (14–17 г), то налицо четкая географическая закономерность, согласно которой по направлению к северу вес, благоприятный для зимовки, постепенно снижается. Аналогичный феномен мы обнаружили и у землероек [3], [6]: выраженность и амплитуда предзимнего и зимнего падения массы, сокращения длины тела и уплощения черепной коробки, то есть всего, что составляет явление Денеля, также увеличиваются с юга на север.

На рис. 2, построенном на материалах десятилетнего периода работы Ладожского териологического стационара [7], показаны годовые

изменения массы тела у рыжих полевок разного возраста в летний период (июль – август). Сопоставление этих данных с уровнем численности популяции подтверждает связь размеров тела зверьков с фазами популяционного цикла. В период спада численности и депрессии (1967–1968, 1971–1972 годы) средняя масса тела грызунов была достоверно ниже, чем при нарастании плотности и максимальной численности (1966, 1969–1970, 1973 годы). Это прослеживается по всем возрастным и половым группам, но в разной степени. У зимовавших и особенно прибылых ранних генераций увеличение темпов весового роста в годы подъема численности полевок и соответствующее снижение весовых показателей в фазе депрессии проявляются наиболее четко. В то же время у полевок поздних рождений эта связь выражена слабее.

Коэффициенты вариации массы тела свидетельствуют о наличии годовой, сезонно-возрастной и половой индивидуальной изменчивости данного показателя. Наиболее вариабельны размеры тела в годы подъема численности зверьков. У самцов диапазон индивидуальной изменчивости ниже, чем у самок (коэффициенты вариации в среднем по всем возрастным группам составляют соответственно 16,5 и 21,8%, а у зимовавших – ниже, чем у молодых (14,9 против 19,2%).

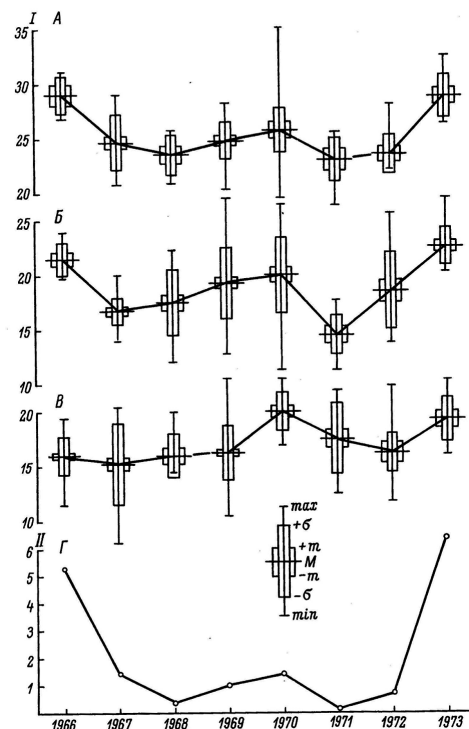


Рис. 2. Годовые изменения массы тела рыжих полевок Карелии в связи с динамикой численности популяции (по [7]). А – зимовавшие самцы; Б – прибылые самцы ранних выводков; В – поздних выводков; Г – средний уровень численности в июле – сентябре. По оси абсцисс – годы; по оси ординат: I – масса тела, г; II – численность, экз. на 100 ловушко-суток

В общем изменчивость размеров тела колеблется у рыжей полевки от 4–6 (у поздних прибылых зимой) до 21–27 % (у сеголеток ранних выводков летом). Это говорит о сравнительно небольшом диапазоне индивидуальной изменчивости

рыжих полевок по массе тела и противоречит традиционным представлениям о крайней вариативности этого показателя, препятствующей его использованию в качестве одного из морфофизиологических индикаторов.

\* Статья подготовлена в рамках Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 гг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойкова Ф. И., Бойков В. Н. Динамика изменений веса тела и основных морфофизиологических показателей у красной полевки в осенне-зимний период в Субарктике // Экология. 1972. № 2. С. 44–51.
2. Ивантер Э. В. Возрастная структура популяций грызунов и ее адаптивное значение (на примере рыжей полевки Карелии) // Фауна и экология птиц и млекопитающих таежного Северо-Запада СССР. Петрозаводск, 1978. С. 93–119.
3. Ивантер Э. В. Морфофизиологические особенности обыкновенной бурозубки (*Sorex araneus* L.) в свете ее сезонной и возрастной экологии // Вопросы экологии животных. Петрозаводск, 1974. С. 36–94.
4. Ивантер Э. В. О некоторых закономерностях сезонно-возрастных изменений веса тела в жизненном цикле обыкновенной бурозубки (*Sorex araneus* L.) // Принципы экологии. 2014. Т. 3 № 3. С. 11–16.
5. Ивантер Э. В. Популяционная экология мелких млекопитающих таежного Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1975. 247 с.
6. Ивантер Э. В., Ивантер Т. В., Колода Н. И. Явление Денеля у землероек Карелии // Научная конференция биологов Карелии. Петрозаводск, 1972. С. 182–184.
7. Ивантер Э. В., Ивантер Т. В., Туманов И. Л. Адаптивные особенности мелких млекопитающих: Эколого-морфологические и физиологические аспекты. Л.: Наука, 1985. 318 с.
8. Ильенко А. И., Зубчанинов Е. В. Круглогодичные наблюдения за мечеными рыжими полемками и лесными мышами в Подмоскowie // Зоологический журнал. 1963. Т. 42, вып. 4. С. 609–617.
9. Крыльцов А. И. Изменение веса степных пеструшек в зависимости от их пола и возраста // Зоологический журнал. 1957. Т. 36, вып. 8. С. 1239–1950.
10. Межжерин В. А. Энергетический оптимум и оптимальные размеры тела животных // Оптимальная плотность и оптимальная структура популяции животных. Свердловск, 1968. С. 107–111.
11. Мина М. В., Клевезаль Г. А. Рост животных. Анализ на уровне организма. М.: Наука, 1976. 199 с.
12. Овчинникова Н. А. Экспериментальные исследования биологических особенностей некоторых видов серых полевок и их гибридов: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Свердловск, 1970. 23 с.
13. Оленев В. Г. Сезонные изменения некоторых морфофизиологических признаков грызунов в связи с динамикой возрастной структуры популяций: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Свердловск, 1964. 26 с.
14. Пантелев П. А. Биоэнергетика мелких млекопитающих. М.: Наука, 1983. 271 с.
15. Пантелев П. А., Терехина А. Н. Зимняя регрессия массы тела у грызунов как адаптивное явление // Адаптация животных к зимним условиям. М., 1980. С. 75–83.
16. Покровский А. В. Некоторые вопросы экспериментальной экологии полевок: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Свердловск, 1963. 18 с.
17. Покровский А. В. Сезонные колебания веса тела у полевок // Труды Института биологии УВФАН СССР. Свердловск, 1966. Т. 51. С. 95–106.
18. Покровский А. В., Большаков В. Н. Экспериментальная экология полевок. М., 1979. 147 с.
19. Покровский А. В., Большаков В. Н. Экспериментальные исследования сезонных изменений веса тела, роста и развития горных полевок (*Clethrionomys, Alticola*) // Acta theriol. 1969. Vol. 14. P. 11–21.
20. Chitty D. Mortality among voles (*Microtus agrestis*) at lake Vynwy. Montgomeryshire in 1936–39 // Phil. Trans. Roy. Soc. London, 1952. Vol. 13. № 236. P. 505–552.
21. Feduk A. Seasonal changes in the water content and level in the bank vole against the background of other gross body components // Acta theriol. 1977. Vol. 22. № 26. P. 355–363.
22. Haltinger R. Morphological analysis of the Wrocław population of *Clethrionomys glareolus* (Schreber, 1780) // Acta theriol. 1965. Vol. 10. № 18–26. P. 243–272.
23. Kikusalo A. Population turnover and wintering of the bank vole, *Clethrionomys glareolus* (Schreb.), in southern and central Finland // Ann. zool. fenn. 1972. Vol. 9. № 4. P. 219–224.
24. Reichstein H. Beitrage zur Biologie eines Steppennages, *Microtus agrestis* L. (*Phaeomys*) brandti // Z. Säugetierfk. 1962. Bd 27. № 3. S. 1467–163.
25. Reichstein H. Untersuchungen zum Körperwachstum und zum Reproduktionspotential der Feldmaus, *Microtus arvalis* Pall., 1779 // Z. wiss. Zool. 1964. Bd 170. № 1–2. S. 112–122.
26. Sawicka-Kapusta K. Changes in the gross body composition and energy value on the bank voles during their postnatal development // Acta theriol. 1974. Vol. 19. № 3. P. 27–54.
27. Wasilewski W. Bania and morphologia *Clethrionomys glasredolus* Schr. // Ann. Univ. M. Curie-Sklod. Sect. C. 1952. Vol. 7. № 3. P. 119–211.
28. Wasilewski W. Untersuchungen über die morphologische Veränderlichkeit der Erdmaus (*Microtus agrestis* L. // Ann. Univ. M. Curie-Sklod. Sect. C. 1956. Vol. 9. № 6. S. 261–305.
29. Wasilewski W. Untersuchungen über die Veränderlichkeit des *Microtus oeconomus* im Bialowieza Nationalpark // Ann. Univ. M. Curie-Sklod. Sect. C. 1956. Vol. 9. № 8. S. 355–386.
30. Zeida J. Differential growth of three cohorts of the bank vole, *Clethrionomys glareolus* Schreb., 1780 // Zool. Listy. 1971. Vol. 20. № 3. P. 229–245.

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

#### ON SEASONAL AND AGE DEPENDENT WEIGHT CHANGES IN BANK VOLE (*CLETHRIONOMYS GLAREOLUS* SCHREB)

A long-term research of the bank vole inhabiting Karelia revealed two characteristic trends corresponding to the two critical life periods of the rodent in focus. The weight index of more than 1200 species of the bank vole was studied. The first season – the

autumn one (the second half of October – the beginning of November), when the snow cover is not deep yet, requires a lot of energy for survival. The second season – the winter one (December – January) is characterized by low temperatures and deep snow cover. During the second season, the thermal regulation of the rodents' body adapts to low temperatures and is well protected by deep snow cover. The bank voles born in spring and in the beginning of summer grow and develop during a more favorable period and, therefore, demonstrate higher growth rate and maturation speed. The bank voles born much later grow and develop in less favorable conditions and, therefore, demonstrate lower growth rate. However, the effect of these dependences can be diminished under the influence of both exogenous (bad weather, low level of fodder yield and etc.) and endogenous factors.

Key words: mammals, bank vole, Eastern Fennoscandia, population, population dynamics

## REFERENCES

1. Boykova F. I., Boykov V. N. Dynamics in the weight change and basic morphological features of the field vole in autumn and winter periods in Subarctic [Dinamika izmeneniy vesa tela i osnovnykh morfofiziologicheskikh pokazateley u krasnoy polevki v osenne-zimniy period v Subarktike]. *Ekologiya*. 1972. № 2. P. 44–51.
2. Ivanter E. V. Age structure of rodents' population and its adaptation features (on the example of Karelian bank vole) [Vozrastnaya struktura populyatsiy gryzunov i ee adaptivnoe znachenie (na primere ryzhey polevki Karelii)]. *Fauna i ekologiya ptits i mlekopitayushchikh taezhnogo Severo-Zapada SSSR*. Petrozavodsk, 1978. P. 93–119.
3. Ivanter E. V. Morphological features of the field vole [Morfofiziologicheskie osobennosti obyknovennoy burozubki (*Sorex araneus* L.) v svete ee sezonnoy i vozrastnoy ekologii]. *Voprosy ekologii zhivotnykh*. Petrozavodsk, 1974. P. 36–94.
4. Ivanter E. V. On some characteristic features of seasonal and age-related body weight changes in the life cycle of the field vole [O nekotorykh zakonomnostyakh sezonno-vozrastnykh izmeneniy vesa tela v zhiznennom tsikle obyknovennoy burozubki (*Sorex araneus* L.)]. *Printsipy ekologii*. 2014. Vol. 3. № 3. P. 11–16.
5. Ivanter E. V. *Populyatsionnaya ekologiya melkikh mlekopitayushchikh taezhnogo Severo-Zapada SSSR* [Population ecology of small taiga mammals of the northwestern part of the Soviet Union]. Leningrad, Nauka Publ., 1975. 247 p.
6. Ivanter E. V., Ivanter T. V., Koloda N. I. Appearance of the shrew mouse in Karelia [Yavlenie Denelya u zemlerok Karelii]. *Nauchnaya konferentsiya biologov Karelii*. Petrozavodsk, 1972. P. 182–184.
7. Ivanter E. V., Ivanter T. V., Tumanov I. L. *Adaptivnye osobennosti melkikh mlekopitayushchikh: Ekologo-morfologicheskie i fiziologicheskie aspekty* [Adaptive features of small mammals: ecologo-morphological and physiological aspects]. Leningrad, Nauka Publ., 1985. 318 p.
8. Il'enko A. I., Zubchaninova E. V. Year round observation of the field and forest rodents in Moscow region [Kruglogodichnye nablyudeniya za mechenymi ryzhimi polevkami i lesnymi myshami v Podmoskov'e]. *Zoologicheskii zhurnal*. 1963. Vol. 42. Issue 4. P. 609–617.
9. Kryl'tsov A. I. Gender and age dependent weight change in field lemmings [Izmenenie vesa stepnykh pestrushkek v zavisimosti ot ikh pola i vozrasta]. *Zoologicheskii zhurnal*. 1957. Vol. 36. Issue 8. P. 1239–1950.
10. Mezhzherin V. A. Optimal energy and body size of animals [Energeticheskiy optimum i optimal'nye razmery tela zhivotnykh]. *Optimal'naya plotnost' i optimal'naya struktura populyatsii zhivotnykh*. Sverdlovsk, 1968. P. 107–111.
11. Mina M. V., Klevezal' G. A. *Rost zhivotnykh. Analiz na urovne organizma* [Animals' growth rate. Analysis on the organism]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 199 p.
12. Ovchinnikova N. A. *Ekspiermental'nye issledovaniya biologicheskikh osobennostey nekotorykh vidov serykh polevok i ikh gibridov: Avtoref. diss. ... kand. biol. nauk* [Experimental research of biological features of some species of the field vole and their hybrids: PhD. biol. sci. diss.]. Sverdlovsk, 1970. 23 p.
13. Olenov V. G. *Sezonnye izmeneniya nekotorykh morfofiziologicheskikh priznakov gryzunov v svyazi s dinamikooy vozrastnoy struktury populyatsiy: Avtoref. diss. ... kand. biol. nauk* [Seasonal changes of some morphological features in rodents in connection with the age structure of the population: PhD. biol. sci. diss.]. Sverdlovsk, 1964. 26 p.
14. Pantelev P. A. *Bioenergetika melkikh mlekopitayushchikh* [Bioenergy of small mammals]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 271 p.
15. Pantelev P. A., Terekhina A. N. Winter regression of rodent's body weight as adaptive mechanism [Zimnyaya regressiya massy tela u gryzunov kak adaptivnoe yavlenie]. *Adaptatsiya zhivotnykh k zimnim usloviyam*. Moscow, 1980. P. 75–83.
16. Pokrovskiy A. V. *Nekotorye voprosy eksperimental'noy ekologii polevok: Avtoref. diss. ... kand. biol. nauk* [On experimental ecology of the field vole: PhD. biol. sci. diss.]. Sverdlovsk, 1963. 18 p.
17. Pokrovskiy A. V. Seasonal weight fluctuations in the field vole [Sezonnye kolebaniya vesa tela u polevok]. *Trudy Instituta biologii UVFAN SSSR*. Sverdlovsk, 1966. Vol. 51. P. 95–106.
18. Pokrovskiy A. V., Bol'shakov V. N. *Ekspiermental'naya ekologiya polevok* [Experimental ecology of the field vole]. Moscow, 1979. 147 p.
19. Pokrovskiy A. V., Bol'shakov V. N. Experimental research on seasonal body weight changes, growth and development in the mountain field vole [Ekspiermental'nye issledovaniya sezonnykh izmeneniy vesa tela, rosta i razvitiya gornyykh polevok (*Clethrionomys, Alticola*)]. *Acta theriol*. 1969. Vol. 14. P. 11–21.
20. Chitty D. Mortality among voles (*Microtus agrestis*) at lake Vynwy. Montgomeryshire in 1936–39 // *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 1952. Vol. 13. № 236. P. 505–552.
21. Fedyk A. Seasonal changes in the water content and level in the bank vole against the background of other gross body components // *Acta theriol*. 1977. Vol. 22. № 26. P. 355–363.
22. Haltinger R. Morphological analysis of the Wroclaw population of *Clethrionomys glareolus* (Schreber, 1780) // *Acta theriol*. 1965. Vol. 10. № 18–26. P. 243–272.
23. Kairusalo A. Population turnover and wintering of the bank vole, *Clethrionomys glareolus* (Schreb.), in southern and central Finland // *Ann. zool. fenn*. 1972. Vol. 9. № 4. P. 219–224.
24. Reicstein H. Beitrage zur Biologie eines Steppennages, *Microtus agrestis* L. (*Phaeomys*) brandti // *Z. Säugetierk.* 1962. Bd 27. № 3. S. 1467–163.
25. Reichstein H. Untersuchungen zum Körperwachstum und zum Reproduktionspotential der Feldmaus, *Microtus arvalis* Pall., 1779 // *Z. wiss. Zool*. 1964. Bd 170. № 1–2. S. 112–122.
26. Sawicka-Kapusta K. Changes in the gross body composition and energy value on the bank voles during their postnatal development // *Acta theriol*. 1974. Vol. 19. № 3. P. 27–54.
27. Wasilewski W. Badania and morfologia *Clethrionomys glasredolus* Schr. // *Ann. Univ. M. Curie-Sklod. Sect. C*. 1952. Vol. 7. № 3. P. 119–211.
28. Wasilewski W. Untersuchungen über die morphologische Veränderlichkeit der Erdmaus (*Microtus agrestis* L. // *Ann. Univ. M. Curie-Sklod. Sect. C*. 1956. Vol. 9. № 6. S. 261–305.
29. Wasilewski W. Untersuchungen über die Veränderlichkeit des *Microtus oeconomus* im Bialowieza Nationalpark // *Ann. Univ. M. Curie-Sklod. Sect. C*. 1956. Vol. 9. № 8. S. 355–386.
30. Zeida J. Differential growth of three cohorts of the bank vole, *Clethrionomys glareolus* Schreb., 1780 // *Zool. Listy*. 1971. Vol. 20. № 3. P. 229–245.

**ЛЮБОВЬ ЕВГЕНЬЕВНА СМИРНОВА**

старший преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности и здоровьесберегающих технологий Института физической культуры, спорта и туризма, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*lyu15041988@yandex.ru*

**ВАЛЕНТИНА МИХАЙЛОВНА КИРИЛИНА**

кандидат биологических наук, доцент, директор Института физической культуры, спорта и туризма, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*kirilina@petsu.ru*

**АНАТОЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ ФЕДИН**

доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории сравнительной физиологии дыхания, Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

*fedin\_anatoliy\_n@mail.ru*

**АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ КРИВЧЕНКО**

доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией сравнительной физиологии дыхания, Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

*office@iephb.ru*

## ВЛИЯНИЕ НИЗКИХ КОНЦЕНТРАЦИЙ АДЕНОЗИНА И ГИСТАМИНА НА СОКРАЩЕНИЯ МЫШЦЫ ТРАХЕИ И БРОНХОВ\*

Аденозин и гистамин являются важными биологически активными соединениями для клеточных структур нижних дыхательных путей. В настоящее время недостаточно изучено действие аденозина и гистамина на структуры нижних дыхательных путей в физиологически низких концентрациях, соответствующих естественному фоновому уровню организма. Нашей задачей было изучить влияние низких доз аденозина (10 мкг/мл) и гистамина (0,1 мкг/мл и 10 мкг/мл) на активность гладкой мышцы трахеи и бронхов крысы. В исследовании применялась электрическая стимуляция постганглионарных нервов и блокада гистаминовых рецепторов. При влиянии аденозина в низкой концентрации наблюдается большой дилатационный эффект, чем при действии гистамина, что связано с воздействием аденозина на различные структуры. С учетом того, что искусственно введенный в препараты трахеи и бронхов гистамин равен по концентрации эндогенно выработанному лаброцитами гистамину, следует заключить, что основной констрикторный эффект в системе нижних дыхательных путей связан с гистамином и не связан с действием аденозина или иных медиаторов тучных клеток.

Ключевые слова: аденозиновые рецепторы, гистаминовые рецепторы, дегрануляция тучных клеток, тахикинины

### ВВЕДЕНИЕ

Аденозин и гистамин являются важнейшими медиаторами тучных клеток. С учетом новых биохимических данных следует рассматривать роль этих веществ в сократительной активности гладкой мускулатуры трахеи и бронхов, а соответственно и в патогенезе распространенных обструктивных заболеваний нижних дыхательных путей, к числу которых, безусловно, относятся хроническая обструктивная болезнь легких и бронхиальная астма.

Аденозин синтезируется после активации тучных клеток и является трансмиссером поздней фазы дегрануляции. Также аденозин появляется во внеклеточных пространствах вследствие разрушения клеток. При действии различных по-

вреждающих факторов из клеток во внеклеточное пространство высвобождается АТФ. АТФ быстро превращается в АМФ при участии внеклеточной эктонуклеотиддифосфорилазы (экто-апиразы, или CD39). АМФ быстро трансформируется в аденозин при участии экто-5'-нуклеотидазы (CD73) [6]. Внеклеточный аденозин транспортируется обратно в клетки при участии нуклеозидного транспортера, такого как ENT1 [12]. Аденозин является как аутокринной, так и паракринной сигнальной молекулой и взаимодействует с трансмембранными рецепторами 4 подтипов: A<sub>1</sub>R, A<sub>2A</sub>R, A<sub>2B</sub>R и A<sub>3</sub>R. Соотношение этих рецепторов и локализация на мембранах различных клеток достаточно вариабельны [2], [11].

Наиболее хорошо изученными рецепторами системы GPCR (G-protein coupled receptors) оказались аденозиновые рецепторы A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> и A<sub>3</sub>. Рецепторы A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> и A<sub>3</sub> взаимодействуют с различными G-белками: рецепторы A<sub>1</sub> и A<sub>3</sub> – с Gi/o-белком, а рецептор A<sub>2</sub> – с Gs-белком. Кроме того, имеются данные, что все аденозиновые рецепторы могут взаимодействовать и с другими G-белками [3], [4]. Рецепторы A<sub>1</sub> и A<sub>3</sub> являются ингибиторами аденилатциклазы, а рецепторы A<sub>2</sub> – стимуляторами. После активации G-белков активируются ферменты и ионные каналы и запускается каскад сложных биохимических превращений [10]. В тучных клетках присутствуют аденозиновые рецепторы A<sub>2B</sub> и A<sub>3</sub>, которые, будучи активированными, облегчают дегрануляцию тучных клеток. Использование неселективного антагониста аденозиновых рецепторов теофиллина широко применяется при лечении астмы, хотя механизм его действия на систему GPCR до конца не ясен [4]. Гетерогенность аденозин-ассоциированных механизмов определяется прежде всего субтипом рецептора. Взаимодействие с рецепторами тучных клеток субтипа A<sub>2B</sub> приводит к высвобождению гистамина, который ведет к сокращению гладкой мускулатуры [2]. Сформулированы представления об изменении соотношения количества пуринергических рецепторов разных подтипов. В частности, K. Varani et al. показано увеличение уровней транскриптов для A<sub>2A</sub>R и A<sub>3</sub>R при снижении A<sub>2B</sub>R у больных хронической обструктивной болезнью легких [8]. В результате присоединения аденозина в качестве лиганда к рецепторам тучных клеток A<sub>1</sub> и A<sub>3</sub> активируется мембраносвязанный фермент – фосфолипаза C. В результате присоединения аденозина в качестве лиганда к рецепторам тучных клеток A<sub>2</sub> активируется аденилатциклаза. Фосфолипаза C и аденилатциклаза катализируют реакции с образованием соответственно инозитол-1,4,5-трифосфата, 1,2-диацилглицерина и цАМФ. Инозитол-1,4,5-трифосфат и цАМФ обеспечивают фосфорилирование и активацию Ca<sup>2+</sup>-связывающего белка кальмодулина, мобилизуя Ca<sup>2+</sup> из эндоплазматического ретикулума клеток в цитоплазму, в присутствии которого при участии цАМФ и 1,2-диацилглицерина активируется протеинкиназа C. Протеинкиназа C осуществляет фосфорилирование и активацию ряда других внутриклеточных ферментов, в частности Ca<sup>2+</sup>-зависимой фосфолипазы A<sub>2</sub>. При этом за счет Ca<sup>2+</sup>-индуцированного сокращения микротрубочек гранулы «подтягиваются» к плазматической мембране, а 1,2-диацилглицерин, продукты его расщепления (моноацилглицерин, лизофосфатидиловая кислота) и активации фосфолипазы A<sub>2</sub> (лизофосфатидилхолин) обуславливают слияние депонирующих гранул тучной клетки со стенкой мембраносвязанных канальцев и цитоплазматической мембраной, через которые

медиаторы гранул (первичные) и медиаторы, образующиеся при активации клеток, высвобождаются наружу. Медиаторы быстрой фазы дегрануляции воздействуют на гладкую мускулатуру, вызывая сокращение миоцитов.

Механизм влияния аденозина на рецепторы гладкой мускулатуры отличается от такового в тучных клетках. При присоединении аденозина к A<sub>1</sub>- и A<sub>3</sub>-рецепторам миоцитов запускаются механизмы ингибирования аденилатциклазы – фермента, обеспечивающего гидролиз АТФ до цАМФ с высвобождением пироглутамата. Инактивация аденилатциклазы приводит к уменьшению концентрации цАМФ в цитоплазме миоцитов. При низкой концентрации цАМФ не происходит фосфорилирования киназы легких цепей миозина, что является условием активности этого фермента. При одновременном увеличении концентрации ионов кальция в цитоплазме активируется белок цитоплазмы миоцитов – кальмодулин. Активация осуществляется за счет связывания кальмодулина с катионами кальция. Активный комплекс – кальций-кальмодулин – связывается с киназой легких цепей миозина и активирует этот фермент вследствие удаления с ингибиторного участка фермента ингибирующих его активность протеинов и фосфат-анионов. Активная киназа легких цепей миозина фосфорилирует легкую цепь миозина, вследствие чего последняя соединяется с тяжелой цепью миозина, далее миозиновые нити соединяются с нитями актина, образуя акто-миозиновый комплекс и вызывая гладко-мышечное сокращение [1].

Существуют данные о влиянии аденозина на эпителий и неадренэргические нехолинэргические чувствительные к капсаицину C-волокна. На C-волокна аденозин оказывает возбуждающее действие, вследствие чего волокна синтезируют медиаторы возбуждающего действия – тахикинины. Основным тахикинином является субстанция P (SP), которая повышает сократительную активность гладкой мускулатуры трахеи и бронхов.

Другой важнейший медиатор тучных клеток, выбрасываемый в большом количестве с самого начала дегрануляции, – гистамин – оказывает прямое действие на гладкую мускулатуру, эпителий, нейроны метасимпатических ганглиев, капсаицин-чувствительные C-волокна и сами тучные клетки. Гистамин действует на данные структуры через гистаминовые рецепторы – H<sub>1</sub> и H<sub>2</sub>. H<sub>1</sub>-рецепторы в системе нижних дыхательных путей локализованы на мембране постсинаптических нервных клеток, гладкой мускулатуре, эпителии, тучных клетках. Активация этих рецепторов приводит к увеличению продукции цАМФ и повышению концентрации внутриклеточного кальция и развитию сокращения гладкой мускулатуры трахеи и бронхов. H<sub>2</sub>-рецепторы имеют представительство на гладкой мускулатуре, эпителии и тучных клетках, восприимчивы

к низким концентрациям гистамина и опосредуют расслабление мускулатуры нижних дыхательных путей. Действие ГА через эти рецепторы реализуется при повышении внутриклеточной концентрации цАМФ. H<sub>2</sub>-рецепторы при их активации также ингибируют высвобождение серотонина, способствующего сократительной активности, и увеличивают синтез вазоактивного интестинального пептида (VIP), являющегося медиатором неадренэргической нехолинэргической системы, обеспечивающим дилатацию гладкой мускулатуры [7]. Все эти последствия активации H<sub>2</sub>-рецепторов определяют их дилатационный эффект.

При влиянии гистамина на эпителий респираторного тракта запускается синтез простагландинов (ПГЕ<sub>2</sub> и ПГЕ<sub>2α</sub>), оказывающих двойственный эффект на миоциты. ПГЕ<sub>2</sub> индуцируют снижение сократительной активности, а ПГЕ<sub>2α</sub> – ее увеличение [5].

Известно, что гистаминергические реакции гладкой мышцы опосредуются через трахеобронхиальные быстро- и медленноадаптирующиеся стретч-рецепторы, расположенные в эпителиальном и мышечном слоях. Возбуждение трахеобронхиальных стретч-рецепторов приводит к рефлекторному сокращению гладкой мускулатуры дыхательных путей и кашлевому рефлексу [7].

Таким образом, можно отметить, что действие аденозина и гистамина в нижних дыхательных путях оказывается тесно связанным. Влияние аденозина и гистамина на гладкую мышцу трахеи и бронхов опосредуется разными типами гистаминовых и аденозиновых рецепторов, которые могут быть расположены на различных структурах респираторного тракта, в том числе непосредственно на гладкомышечных клетках, чувствительных окончаниях С-волокон, дыхательном эпителии, тучных клетках. Характер реакции гладкой мышцы при этом будет определяться балансом активирующих и тормозных влияний, приходящих от рецепторных полей, локализованных на указанных структурах, и исходным состоянием гладкой мышцы. В настоящее время остаются недостаточно изученными вопросы взаимодействия аденозина и гистамина в низких концентрациях, соответствующих естественному фоновому уровню организма. Нашей задачей было изучить влияние низких доз аденозина (10 мкг/мл) и гистамина (0,1 мкг/мл и 10 мкг/мл) на активность гладкой мышцы трахеи и бронхов, связанную с эфферентными нервными структурами (постганглионарными нервными окончаниями). Также в задачи входило сопоставление эффектов аденозина и гистамина с целью установления роли каждого из этих трансммиттеров. Для этого были изучены реакции мышцы, вызванные электростимуляцией постганглионарных нервов, при действии гистамина и аденозина на фоне действия блокады H<sub>1</sub>- и H<sub>2</sub>-рецепторов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлись 20 крыс линии Вистар обоего пола с массой тела 180–250 г. Подготовленные препараты трахеи и бронхов помещались в камеры с физиологическим раствором Кребса – Хензелейта, где поддерживался необходимый уровень кислорода и температурный режим. В ходе эксперимента экзогенно в виде аппликаций вводились следующие вещества: аденозин (С = 10 мкг/мл; V = 0,2 мл) для активации тучных клеток, С-волокон и аденозиновых рецепторов гладкой мышцы; гистамин (0,1 мкг/мл; 10 мкг/мл; V = 0,2 мл) для активации гистаминовых рецепторов. Кроме искусственного введения гистамина в препараты, происходило естественное поступление гистамина в систему вследствие дегрануляции тучных клеток, вызванной аденозином. Концентрации эндогенного и экзогенного гистамина являются равными. Таким образом, сравнивая результаты серии опытов «аденозин + естественно выработанный гистамин» с результатами экспериментов по влиянию на гладкомышечные сокращения одного только гистамина, можно выявить физиологический эффект аденозина и установить его роль в сокращении гладкой мускулатуры трахеи и бронхов крысы. В ходе всех экспериментов применялось раздражение препаратов электрическим полем с помощью стимулятора ЭСЛ-2. Серебряные электроды располагались вдоль продольной стенки ванночки по обе стороны препарата. Применялась стимуляция постганглионарных нервов с частотой 30 стим./с, длительность 0,5 мсек, амплитуда 20 В, продолжительность стимуляции 10 с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### *Влияние гистамина на ответы трахеи и бронхов при блокаде H<sub>2</sub>-рецепторов*

Мы заблокировали тормозные гистаминовые H<sub>2</sub>-рецепторы блокатором циметидином. Применение 10 мкг циметидина не изменяло сокращений трахеи и бронхов, вызванных электростимуляцией постганглионарных нервов. Гистамин на фоне блокады H<sub>2</sub>-рецепторов вызывал дозозависимое усиление сокращений на бронхах – до  $109 \pm 2,2$  % при 0,1 мкг ( $P < 0,05$ ). На трахее при дозе 10 мкг повышение амплитуды сокращения достигало  $121,2 \pm 1,5$  % (рис. 1). Ответы трахеи и бронхов имели значимые различия ( $P < 0,05$ ). Увеличение сокращения в ответ на введенный гистамин является закономерным, поскольку препарат действовал в основном на оставшиеся незаблокированными H<sub>1</sub>-рецепторы, опосредующие констрикторный эффект.

### *Влияние гистамина на ответы трахеи и бронхов при блокаде H<sub>1</sub>-рецепторов*

Для блокады активирующих гистаминовых рецепторов использовали H<sub>1</sub>-антагонист супрастин. Блокада H<sub>1</sub>-рецепторов устраняла констрикторный эффект, связанный с влиянием на

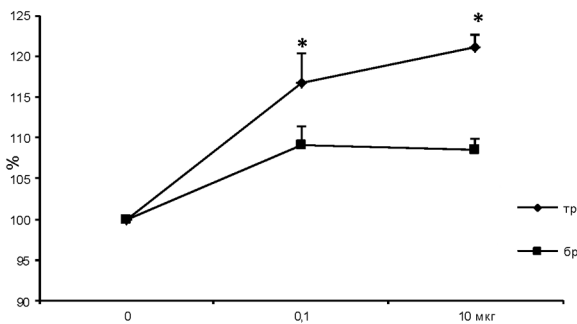


Рис. 1. Действие гистамина на сокращения гладкой мышцы трахеи и бронхов на фоне блокады H2-рецепторов. По оси абсцисс – концентрация гистамина в мкг, по оси ординат – изменения ответов в %. За 100 % принимается величина сокращений препаратов на фоне циметидина. \* – достоверные ( $P < 0,05$ ) отличия эффекта гистамина. Сокращения: «тр» – трахея, «бр» – бронхи

эти структуры гистамина, и позволяла выявить его влияние на оставшиеся незаблокированными звенья стенки респираторного тракта (H2- и H3-рецепторы). На фоне действия 100 мкг супрастина величина сокращений значительно снижалась (до  $84,2 \pm 2,5$  % на трахее и до  $87,6 \pm 2,5$  % на бронхах ( $P < 0,05$ )). Гистамин на фоне блокады H1-рецепторов также достоверно ( $P < 0,05$ ) понижал ответы трахеи и бронхов (рис. 2). Влияние гистамина на трахею носило дозозависимый характер (уменьшение ответов до  $73,6 \pm 3,4$  % при 10 мкг), на бронхах дозозависимости не наблюдалось (амплитуда сокращений составляла 91 % при обеих дозах гистамина). Ответы трахеи и бронхов на действие гистамина имели достоверные различия ( $P < 0,05$ ). Снижение сокращений респираторной мышцы связано с устранением ведущих бронхоконстрикторных акцепторов к гистамину – H1-рецепторов и его взаимодействием с рецепторами H2 и H3, опосредующими дилатацию.

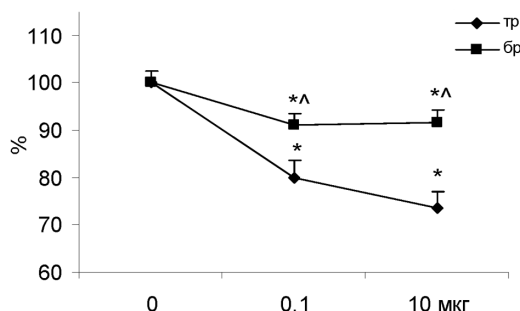


Рис. 2. Действие гистамина на сокращения гладкой мышцы трахеи и бронхов на фоне блокады H1-рецепторов. По оси абсцисс – концентрация гистамина в мкг, по оси ординат – изменения ответов в %. За 100 % принимается величина сокращений препаратов на фоне супрастина. \* – достоверные ( $P < 0,05$ ) отличия эффекта гистамина. ^ – достоверные ( $P < 0,05$ ) отличия между ответами препаратов трахеи и бронхов. Сокращения: «тр» – трахея, «бр» – бронхи

### Влияние аденозина на ответы трахеи и бронхов при блокаде H2-рецепторов

Для опытов с аденозином из респираторного тракта избирались препараты трахеи и бронхов с ганглиями (в местах бифуркации трахеи и бронхов) и без них (сегменты вне бифуркаций). Подобное разделение препаратов позволяло изучить влияние аденозина непосредственно на нейроны интрамурального метасимпатического ганглия и установить наличие или отсутствие аденозиновых рецепторов в нейрональных структурах ганглия. При блокаде H2-рецепторов циметидином на фоне постганглионарной стимуляции аденозин оказывал двухфазный эффект: сначала наблюдалось увеличение сократительных ответов гладкой мышцы, а затем – уменьшение. Ответы трахеи с ганглиями повышались до  $108,9 \pm 2,4$  % (рис. 3), что было достоверно ( $P < 0,05$ ) выше действия одного аденозина. Ответы трахеи без ганглиев повышались почти на такую же величину ( $107,1 \pm 2,6$  %) и превышали ( $P < 0,05$ ) эффект одного аденозина. Фаза снижения сокращения на этих препаратах равнялась  $102,2 \pm 3,1$  % и  $95,1 \pm 2,8$  % соответственно. При действии аденозина на фоне блокады H2-рецепторов бронхи с ганглиями и без ганглиев показывали усиление сократительных ответов ( $116,1 \pm 4,9$  и  $116,3 \pm 5,2$  % соответственно), которое было больше по величине, чем на трахее. Фаза снижения сокращения на бронхах с ганглиями составляла  $96,7 \pm 2,8$  %, на бронхах без ганглиев –  $97,4 \pm 2,4$  %. Существенных различий между препаратами трахеи и бронхов с ганглиями и без них не наблюдалось, что, вероятно,

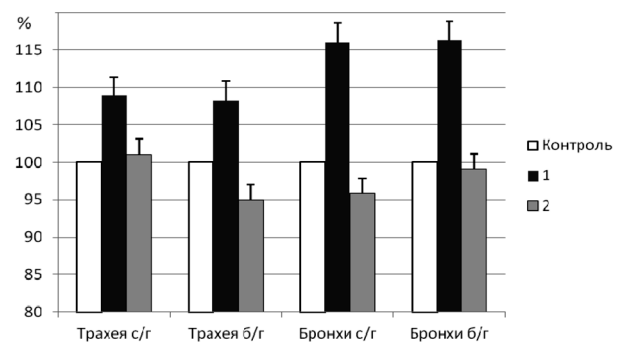


Рис. 3. Влияние блокады гистаминовых H2-рецепторов циметидином на сократительные ответы гладкой мускулатуры трахеи и бронхов, обработанных аденозином при постганглионарной стимуляции.

По оси абсцисс обозначены используемые препараты. По оси ординат обозначены изменения ответов гладкой мышцы в %. За 100 % приняты ответы гладкой мышцы, полученные при стимуляции постганглионарных нервов на фоне действия аденозина. «Трахея с/г» – трахея с ганглиями. «Трахея б/г» – трахея без ганглиев. «Бронхи с/г» – бронхи с ганглиями. «Бронхи б/г» – бронхи без ганглиев. «1» – первая фаза действия аденозина на фоне блокады H2-рецепторов циметидином. «2» – вторая фаза действия аденозина на фоне блокады H2-рецепторов циметидином. \* – достоверное ( $P < 0,05$ ) отличие от контроля

указывает на отсутствие рецепторов к аденозину в нейронах интрамуральных ганглиев.

### **Влияние аденозина на ответы трахеи и бронхов при блокаде Н1-рецепторов**

Блокада гистаминовых Н1-рецепторов супрастином на фоне постганглионарной стимуляции с применением блокады Н2-рецепторов уменьшала сократительные ответы гладкой мышцы всех используемых препаратов на применение аденозина. Ответы трахеи с ганглиями достоверно ( $P < 0,01$ ) снижались по сравнению с контролем до  $43,9 \pm 1,9$  % (рис. 4). Ответы трахеи без ганглиев снижались почти на такую же величину ( $42,1 \pm 2,2$  %). Действие аденозина при блокаде Н1-рецепторов на бронхи с ганглиями оказывало аналогичный эффект на сократительные ответы ( $42,5 \pm 1,9$ ). На бронхах без ганглиев снижение сокращения достигало  $43,3 \pm 2,1$  %. Различий между препаратами с ганглиями и без них не наблюдалось.

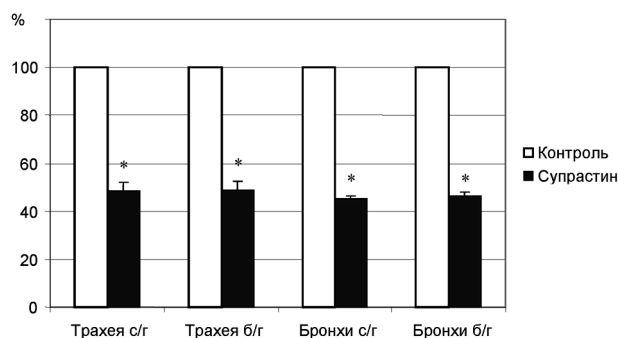


Рис. 4. Влияние блокады Н1-рецепторов супрастином на сократительные ответы ГМ трахеи и бронхов, вызванные постганглионарной стимуляцией, на фоне блокады Н2-рецепторов циметидином при аппликации аденозина.

По оси абсцисс обозначены используемые препараты. По оси ординат обозначены изменения ответов гладкой мышцы в %. За 100 % приняты ответы гладкой мышцы, полученные при постганглионарной стимуляции на фоне аппликаций аденозина. «Трахея с/г» – трахея с ганглиями. «Трахея б/г» – трахея без ганглиев. «Бронхи с/г» – бронхи с ганглиями. «Бронхи б/г» – бронхи без ганглиев. \* – достоверное ( $P < 0,05$ ) отличие от контроля

### **ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ**

При блокаде Н2-рецепторов гистамин вызывал большее увеличение ответов в препаратах трахеи с ганглиями по сравнению с действием аденозина, что может быть связано дилатационным эффектом аденозина в системе нижних дыхательных путей. Однако в препаратах бронхов констрикторный эффект гистамина, напротив, был меньше такого эффекта аденозина. Такой результат может свидетельствовать о различном качественном и количественном составе аденозиновых рецепторов в трахее и бронхах, на что указывалось в работах К. Varani и G. Vass [8], [9].

При блокаде Н1-рецепторов происходило уменьшение сокращения мышцы трахеи и бронхов как при действии гистамина, так и при действии аденозина. Однако при влиянии аденозина

наблюдался гораздо больший дилатационный эффект, чем при действии гистамина. Большая дилатационная реакция в ответ на аппликацию аденозина, вероятно, связана с более широким его действием, по сравнению с гистамином, на структуры, опосредующие дилатационный эффект. Это может быть связано с действием аденозина на А2-рецепторы гладкой мышцы, стимулирующие аденилатциклазу и приводящие к инактивации киназы легких цепей миозина, что является причиной гладкомышечного расслабления [3]. Так же аденозин мог воздействовать на С-волокна неадренэргической нехолинэргической системы, запуская высвобождение оксида азота и вазоактивного интестинального пептида, опосредующих дилатацию. Кроме вышеупомянутых воздействий аденозина нельзя исключать влияния аденозина на тучные клетки с запуском последующей дегрануляции и высвобождением низких доз эндогенного гистамина. Выработанный тучными клетками гистамин оказывает влияние на Н2-и Н3-рецепторы, опосредующие дилатацию [6]. Влияния аденозина на нейроны интрамуральных ганглиев не наблюдалось, так как различия в величинах гладкомышечного сокращения препаратов с ганглиями и без них отсутствовали. По-видимому, нейрональные структуры метасимпатического ганглия не имеют рецепторов к аденозину.

### **ВЫВОДЫ**

Основное констрикторное действие при влиянии гистамина и аденозина опосредовано активацией Н1-рецепторов, а основное дилатирующее – активацией Н2-рецепторов. Однако при влиянии аденозина в применяемой концентрации наблюдается больший дилатационный эффект, чем при действии гистамина, что связано с воздействием аденозина на различные структуры. С учетом того, что искусственно введенный в препараты трахеи и бронхов гистамин равен по концентрации (5–10 мкг/мл) эндогенно выработанному лаброцитами гистамину [5], следует заключить, что основной констрикторный эффект в системе нижних дыхательных путей связан с гистамином и не связан с действием аденозина или иных медиаторов тучных клеток, выделяемых при их частичной дегрануляции.

Таким образом, можно отметить, что действие аденозина и гистамина в нижних дыхательных путях оказывается тесно связанным. Влияние аденозина и гистамина на гладкую мышцу трахеи и бронхов опосредуется разными типами гистаминовых и аденозиновых рецепторов, которые могут быть локализованы на различных структурах респираторного тракта – в том числе непосредственно на гладкомышечных клетках, чувствительных окончаниях С-волокон, дыхательном эпителии, тучных клетках.



\* 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. Гусев Н. Б. Молекулярные механизмы мышечного сокращения // Соросовский Образовательный Журнал. 2000. Т. 6. № 8. С. 24–32.
2. Anvari F, Sharma A. K., Fernandez L. G. Tissue-derived proinflammatory effect of adenosine A2B-receptor in lung ischemia-reperfusion injury // *Thorac Cardiovasc Surg*. 2010. Vol. 140. № 4. P. 871–877.
3. Auchampach J. A., Gross G. J. Adenosine A1 receptors, KATP channels, and ischemic preconditioning in dogs // *Am. J. Physiol*. 2005. P. 264.
4. Baraldi P. G., Cacciari B., Merighi S. et al. A(3) adenosine receptor ligands: history and perspectives // *Med. Res. Rev*. 2000. P. 20.
5. Begueret H., Berger P., Vernejoux J. M., Dubuisson L., Marthan R., Tunon-De-Lara J. M. Inflammation of bronchial smooth muscle in allergic asthma // *Thorax*. 2007. Vol. 62. № 1. P. 8–15.
6. Linden A., Eltzschig Y. K. Role of pulmonary adenosine during hypoxia: extracellular generation, signaling and metabolism by surface adenosine deaminase/CD26 // *Expert Opinion on Biological Therapy*. 2007. Vol. 7. № 9. P. 1437–1447.
7. Undem B., Kollarik M. The Role of Vagal Afferent Nerves in Chronic Obstructive Pulmonary Disease // *The Proceedings of the American Thoracic Society*. 2005. Vol. 2. P. 355–360.
8. Varani K., Caramori G., Vincenzi F., Adcock I. Alteration of adenosine receptors in patients with chronic obstructive pulmonary disease // *Am. J. Respir. Crit. Care Med*. 2006. Vol. 173. P. 398–406.
9. Vass G., Horváth I. Adenosine and adenosine receptors in the pathomechanism and treatment of respiratory diseases // *Curr. Med. Chem*. 2008. Vol. 15. № 9. P. 917–922.
10. Winchilli V. M., Elswick R. K. The multivariate assessment of distributions // *J. Royal. Stat*. 2007. Vol. 7. № 1. P. 444–460.
11. Zhong H., Belardinelli L., Maa T., Zeng D. Synergy between A2B adenosine receptors and hypoxia in activating human lung fibroblasts // *Am. J. Respir. Cell. Mol. Biol*. 2005. Vol. 32. P. 2–8.
12. Zhou Y., Schneider D. J., Blackburn M. R. Adenosine signaling and the regulation of chronic lung disease // *Pharmacol. Ther*. 2009. Vol. 123. № 1. P. 105–116.

Smirnova L. E., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Kirilina V. M., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Fedin A. N., Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry of the RAS (St. Petersburg, Russian Federation)

Krivchenko A. I., Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry of the RAS (St. Petersburg, Russian Federation)

#### ADENOSINE AND HISTAMINE LOW CONCENTRATION INFLUENCE ON MUSCLE CONTRACTION IN TRACHEA AND BRONCHI

Adenosine and histamine are important and biologically active molecules of the cellular structure of the lower respiratory tract. Currently, the influence of adenosine and histamine on low airways in physiologically low concentrations is not studied. The purpose of this study was to investigate the influence of low doses of adenosine (10 mkg/ml) and histamine (0,1 mkg/ml и 10 mkg/ml) on the activity of smooth muscles of the trachea and bronchi. In the course of our research, we employed both electrical stimulations of the postganglionic nerves and blockages of histamine receptors. The study revealed that adenosine leads to a much greater dilatation effect than histamine. This effect is conditioned by the broader influence of adenosine on different structures causing dilation. We concluded that the main bronchoconstriction effect is associated with the histamine and is not conditioned by the influence of adenosine or other mediators of the mast cells.

Key words: adenosine receptors, histamine receptors, degranulation of mast cells, tachykinins

## REFERENCES

1. Gusev N. B. Molecule mechanisms of muscle contraction [Molekulyarnye mekhanizmy myshechnogo sokrashcheniya]. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal* [Sorosovsky educational journal]. 2000. Vol. 6. № 8. P. 24–32.
2. Anvari F, Sharma A. K., Fernandez L. G. Tissue-derived proinflammatory effect of adenosine A2B-receptor in lung ischemia-reperfusion injury // *Thorac Cardiovasc Surg*. 2010. Vol. 140. № 4. P. 871–877.
3. Auchampach J. A., Gross G. J. Adenosine A1 receptors, KATP channels, and ischemic preconditioning in dogs // *Am. J. Physiol*. 2005. P. 264.
4. Baraldi P. G., Cacciari B., Merighi S. et al. A(3) adenosine receptor ligands: history and perspectives // *Med. Res. Rev*. 2000. P. 20.
5. Begueret H., Berger P., Vernejoux J. M., Dubuisson L., Marthan R., Tunon-De-Lara J. M. Inflammation of bronchial smooth muscle in allergic asthma // *Thorax*. 2007. Vol. 62. № 1. P. 8–15.
6. Linden A., Eltzschig Y. K. Role of pulmonary adenosine during hypoxia: extracellular generation, signaling and metabolism by surface adenosine deaminase/CD26 // *Expert Opinion on Biological Therapy*. 2007. Vol. 7. № 9. P. 1437–1447.
7. Undem B., Kollarik M. The Role of Vagal Afferent Nerves in Chronic Obstructive Pulmonary Disease // *The Proceedings of the American Thoracic Society*. 2005. Vol. 2. P. 355–360.
8. Varani K., Caramori G., Vincenzi F., Adcock I. Alteration of adenosine receptors in patients with chronic obstructive pulmonary disease // *Am. J. Respir. Crit. Care Med*. 2006. Vol. 173. P. 398–406.
9. Vass G., Horváth I. Adenosine and adenosine receptors in the pathomechanism and treatment of respiratory diseases // *Curr. Med. Chem*. 2008. Vol. 15. № 9. P. 917–922.
10. Winchilli V. M., Elswick R. K. The multivariate assessment of distributions // *J. Royal. Stat*. 2007. Vol. 7. № 1. P. 444–460.
11. Zhong H., Belardinelli L., Maa T., Zeng D. Synergy between A2B adenosine receptors and hypoxia in activating human lung fibroblasts // *Am. J. Respir. Cell. Mol. Biol*. 2005. Vol. 32. P. 2–8.
12. Zhou Y., Schneider D. J., Blackburn M. R. Adenosine signaling and the regulation of chronic lung disease // *Pharmacol. Ther*. 2009. Vol. 123. № 1. P. 105–116.

Поступила в редакцию 22.04.2015

**ЛЕВ ПАВЛОВИЧ СМИРНОВ**

доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологической биохимии, Институт биологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*levps@rambler.ru*

**ИРИНА ВИКТОРОВНА СУХОВСКАЯ**

кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории экологической биохимии, Институт биологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*sukhovskayay@inbox.ru*

**ЕКАТЕРИНА ВИТАЛЬЕВНА БОРВИНСКАЯ**

кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории экологической биохимии, Институт биологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*katsu@inbox.ru*

## **ЭТОКСИРЕЗОРУФИН О-ДЕЭТИЛАЗА – СИСТЕМАТИЧЕСКАЯ ПРИНАДЛЕЖНОСТЬ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КАК ФЕРМЕНТА ФАЗЫ I БИОТРАНСФОРМАЦИИ КСЕНОБИОТИКОВ (ОБЗОР)\***

Этоксирезорурфин О-деэтилаза (ЭРОД) – это неспецифическая монооксигеназа (КФ 1.14.14.1), отнесенная к ферментам класса I (оксидоредуктазы). ЭРОД является представителем большого семейства гемпротеинов, обозначаемого как цитохромы P450, которые встречаются практически у всех животных и растений (исключение – облигатные анаэробы). Цитохромы P450 играют важную роль в окислении многочисленных соединений как эндогенного (стероиды, желчные кислоты, жирные кислоты, простагландины, лейкотриены, биогенные амины), так и экзогенного (лекарства, яды, компоненты промышленного загрязнения, пестициды, канцерогены, мутагены и т. п.) происхождения. Цитохромы P450 семейства I (CYP1) являются неотъемлемой частью системы биохимической защиты организма от токсичных соединений и отнесены к ферментам фазы I биотрансформации ксенобиотиков. Суммарная активность изоферментов семейства CYP1 (CYP1A1, CYP1A2 и CYP1B1) в настоящее время обозначается как активность ЭРОД. В данном обзоре в общем виде суммированы современные знания о систематической принадлежности и функционировании ЭРОД и высказано мнение о необходимости оценки вклада каждого из изоферментов в суммарную активность ЭРОД у гидробионтов при проведении экотоксикологического тестирования водной среды.

Ключевые слова: этоксирезорурфин О-деэтилаза, цитохром P450, система биотрансформации ксенобиотиков

К настоящему времени опубликовано огромное количество работ, посвященных изучению изменений активности ЭРОД в тканях животных под действием различных химических соединений. Термином ЭРОД обозначают неспецифическую монооксигеназу (КФ 1.14.14.1, оксидоредуктазы), взаимодействующую с двумя молекулами – донорами протонов путем использования молекулы кислорода (1.14), один атом которого присоединяется к восстановленному флавину или флавопротеину, а второй к какому-либо субстрату (1.14.14). Для этого фермента в литературе можно встретить и другие названия, такие как флавопротеидзависимая монооксигеназа, микросомальная монооксигеназа, монооксигеназа ксенобиотиков; арил-4-монооксигеназа; гидроксилаза циклических углеводов; микросомальный цитохром P450; флавопротеинсвязанная монооксигеназа; флавопротеиновая монооксигеназа.

Сейчас общепризнано, что ЭРОД является представителем большого семейства гемпротеинов, обозначаемого как цитохромы P450 [10]. Эти цитохромы впервые были описаны в 1958 году М. Клингенбергом и Д. Гарфинкелем [15], [19]. Название цитохром P450 было дано в 1962 году Омура и Сато [27], которые показали, что фермент в восстановленной форме связывает монооксид углерода с образованием комплекса с максимальным поглощением света при длине волны 450 нм. Это свойство объясняется тем, что в геме цитохрома P450 железо связано не только с атомами азота четырех лигандов (порфириновое кольцо). Существуют также пятый и шестой лиганды (сверху и снизу кольца гема) – атом азота гистидина и атом серы цистеина, входящие в состав полипептидной цепи белковой части цитохрома P450.

Цитохромы P450 играют важную роль в окислении многочисленных соединений как эндо-

генного (стероиды, желчные кислоты, жирные кислоты, простагландины, лейкотриены, биогенные амины), так и экзогенного (лекарства, яды, продукты промышленного загрязнения, пестициды, канцерогены, мутагены и т. п.) происхождения [16].

Цитохромы P450 найдены у всех животных и растений за исключением облигатных анаэробов. У прокариот P450 содержатся в водорастворимой фракции, тогда как у эукариот изоферменты цитохрома P450 присутствуют в мембраносвязанной форме [2]. У человека и других млекопитающих ферменты P450 представлены во всех тканях [11], каждая из которых отличается по концентрации и экспрессии индивидуальных изоформ фермента. Максимальный уровень активности обнаружен в печени, где проходят основные процессы биотрансформации и содержится наибольшее количество энзимов [28].

Необходимо учитывать тот факт, что эти энзимы являются терминальными оксидазами в мультикомпонентных цепях переноса электронов, называемых P450-содержащими монооксигеназными системами, так как лимитирующей стадией в процессе окисления является восстановление гема цитохрома P450 за счет редуктазы печени, относительно которой цитохром P450 всегда представлен в избытке.

Анализ показал, что все цитохромы P450 эволюционировали из общего анцестрального гена за период, превышающий 1,36 млрд лет [25]. Этим энзимам свойственно большое генетическое разнообразие, поэтому возникла необходимость таксономии этих белков. Была создана система цитохромов P450, включающая более 270 разных семейств генов, разделяемых по близости (гомологии) нуклеотид/аминокислотной последовательности [23]. В свою очередь, семейства подразделяют на подсемейства. Изоферменты цитохрома P450 с идентичностью аминокислотного состава более 40% объединены в семейства, а более 55% – в подсемейства. Семейства цитохромов P450 (сокращенно CYP, от Cytochrome P) принято обозначать цифрами, подсемейства – цифрами и латинской буквой (CYP 1A1). Первый символ – арабская цифра, обозначающая семейство. Второй символ – латинская буква, обозначающая подсемейство. Третий символ – арабская цифра, соответствующая номеру полипептида [24].

У человека, например, классифицировано 12 семейств генов, 20 подсемейств, более 57 активных генов [33] и 58 псевдогенов [30]. Псевдогенами называют дефектные гены, не продуцирующие функционально активные белки. Вероятно, они являются продуктом дубликации генов, у которых одна из копий дегенерировала и потеряла свою функцию [18]. Для мышей характерно наличие 102 функциональных генов P450 и 88 псевдогенов [21], [29]. У бактерий найдено 11

различных генов P450 [21]. У насекомых, например у плодовой мушки *Drosophila melanogaster*, обнаружено 83 гена P450 и 7 псевдогенов P450. 111 генов выявлено у комаров рода *Anopheles* и 46 генов у термитов [13]. У нематоды *Caenorhabditis elegans* систематизировано 80 генов. У высших растений генов P450 больше, чем у животных, – около 280 найдено у *Arabidopsis thaliana* и до 323 различных P450-белков найдено в рисе [12]. С 2008 года в Номенклатуру аллелей P450 (CYP-аллелей) согласно указаниям Комитета по номенклатуре CYP-аллелей внесено более 660 структур [33].

Иногда P450 ошибочно классифицируется как неспецифическая НАДФ-зависимая монооксигеназа (ЕС 1.14.14.1). Это связано с тем, что большинство уравнений реакций и систематические наименования в ЕС-списке ферментов P450 содержат НАДФН. Однако эти реакции действительны только для объединенных систем, состоящих из P450 и НАДФН-цитохром редуктазы (ЕС 1.6.2.4), но не для P450 как самостоятельной единицы.

Цитохромы P450 семейства 1 (CYP1) являются неотъемлемой частью системы биохимической защиты организма от токсичных соединений и вместе с алкогольдегидрогеназами, альдегиддегидрогеназами, пероксидазами, флавопротеинредуктазами, эпоксидгидролазами, эстеразами и амидазами отнесены к ферментам фазы I биотрансформации ксенобиотиков. На их долю приходится свыше 80% от общего числа энзимов, задействованных в этой фазе [34].

Из всех выявленных цитохромов P450 наибольшее внимание уделено изучению монооксигеназ подсемейства CYP1A, поскольку эти ферменты играют ключевую роль в метаболической активации ПАУ, галогенированных ПАУ и структурно сходных соединений. В состав этого подсемейства включены изоферменты CYP1A1 и CYP1A2, характеризующиеся высоким уровнем межвидовой консервативности [20]. В частности, у человека эти изозимы по аминокислотному составу идентичны на 70%.

Отличительная особенность изоферментов семейства CYP1 – способность к индукции под действием ПАУ, в том числе диоксина и 2,3,7,8-тетрахлордибензо-*p*-диоксина (TCDD). Поэтому семейство CYP1 в литературе называют «цитохром, индуцибельный ПАУ»; «диоксин-индуцибельный цитохром» или «TCDD-индуцибельный цитохром». Литературные источники утверждают, что до сих пор не известны эндогенные субстраты для изоферментов семейства CYP1 [18]. Тем не менее есть исследование [1], в котором показано, что у крыс билирубин – эндогенный продукт катаболизма гемоглобина – может выступать в роли регулятора активности CYP1A1.

Несмотря на то что CYP1A1 и CYP1A2 преимущественно метаболизируют планарные ароматические молекулы, они тем не менее различаются по субстратной селективности. CYP1A1 катализирует гидроксилирование бензпирена до бензпирен-7,8-эпоксида, который окисляется эпоксидгидролазой до бензпирен-7,8-дигидродиола. Затем CYP1A1 катализирует превращение этого интермедиата в «суперканцероген» – бензпирен-7,8-дигидродиол-9,10-эпоксид. Этот процесс получил название «биологическая активация канцерогенов» [5]. Активность CYP1A1 возрастает при воздействии ПАУ, содержащихся в жареном мясе, табачном дыме, крестоцветных овощах. Поэтому этот показатель широко применяется в медицине.

CYP1A2 катализирует в основном N-гидроксилирование ароматических аминов, таких как 4-аминобифенил, 2-нафтиламин, 2-ацетиламинофлуорен [17]. Этот изофермент также осуществляет катализ биотрансформации лекарственных препаратов, например гидроксилирование ацетаминофенона с образованием активного метаболита бензохинонимина [28]. В печени человека и многих млекопитающих активность CYP1A1 не детектируется до тех пор, пока этот орган не подвергнется воздействию индукторов синтеза фермента, но легко обнаруживается в таких тканях, как легкие или плацента. В то же время активность CYP1A2 может быть обнаружена исключительно в печени [22], [31], при этом уровень активности варьирует в очень широких пределах, размах которых может достигать 40–100-кратных значений [32].

Планарные галогенированные и негалогенированные ароматические углеводороды, такие как 3-метилхолантрен, 2-нафтофлавоин и 2,3,7,8-тетрахлордibenзо-p-диоксин (TCDD), активируют синтез ферментов семейства CYP1 в печени млекопитающих [18]. Так, у грызунов доля CYP1A1 возрастала от недетектируемого уровня до почти 40% в пересчете на общее количество CYP-ферментов. При этом зарегистрирована индукция CYP1A1 также в легких, тонком кишечнике и почках. Уровень CYP1A2 в печени, в отличие от других тканей, также увеличивался [31]. Омепразол (ингибитор протонной помпы) также индуцирует ферменты семейства CYP1A [28].

В состав семейства CYP1 входит также изофермент CYP1B1, являющийся единственным представителем подсемейства CYP1B. Рекомбинантный CYP1B1 катализирует окисление 7,12-диметилбензантрацена и гидроксилирование 17 β-эстрадиола. Активность CYP1B1 не обнаружена в печени, а детектируется в других тканях, в том числе в тимусе и адренальном кортексе [9].

Вышеописанные изоферменты катализируют O-деалкилирование 7-этоксирезорифина [26], [27]. В результате реакции из лейкосоединения

7-этоксирезорифина образуется оптически активный резорифин. По интенсивности флуоресценции образовавшегося продукта реакции судят о суммарной активности изоферментов семейства CYP1, которую в настоящее время обозначают как активность ЭРОД [3]. Стоит отметить, что они отличаются субстратной селективностью относительно гомологического ряда эфиров феноксазонов, что позволяет провести идентификацию ЭРОД-активных изоферментов [7]. Эта селективность отражена в тривиальных названиях этих белков. CYP1A1 – это истинная ЭРОД, поскольку избирательно метаболизирует 7-этоксирезорифин. CYP1A2 активен также в отношении 7-метоксирезорифина и его называют метоксирезорифин O-деметилазой. CYP1B1 идентифицируют по реакции с 7-пентоксирезорифином (пентоксирезорифин O-деалкилаза).

Активность ЭРОД – это биомаркер ответной реакции живых систем *in vivo* на воздействие планарных ПАУ и структурно родственных соединений [34]. Этот показатель отражает активность индуцибельных изоферментов, стимуляция синтеза которых осуществляется через активацию рецептора циклических углеводов (AhR) [14]. Есть согласие в научной среде, что изменение активности ЭРОД является очень чувствительным индикатором загрязнения экосистем, в том числе водных [6]. Это было показано на более чем 150 видах рыб, как задействованных в лабораторных экспериментах – симуляторах полевых условий, так и взятых непосредственно из природы и подверженных действию не только ПАУ, но множества других загрязнителей, обнаруживаемых в окружающей среде [34]. Несмотря на то что активность ЭРОД занимает ведущее место в списке индикаторов загрязнения водных экосистем, взаимосвязь между ЭРОД и последующим биологическим эффектом остается субъектом интенсивных исследований. Становится ясно, что механизм индукции цитохромов семейства CYP1 тесно связан с патологическим воздействием на организм ЭРОД-индуцирующих загрязнителей [8].

Помимо ксенобиотиков, на активность ЭРОД у рыб влияет большое число абиотических и биотических факторов, таких как температура, возраст животного, его репродуктивная фаза [4]. Поэтому для адекватной интерпретации результатов полевых исследований и правильного планирования экспериментов по использованию ЭРОД как биомаркера, необходимо учитывать эффект этих факторов.

Есть, на наш взгляд, еще один фактор, который также стоит учесть при проведении исследований. Как отмечено выше, активность ЭРОД – это вклад в O-деалкилирование 7-этоксирезорифина трех изоферментов CYP1A1, CYP1A2 и CYP1B1, соотношение между которыми определяется тканевой спецификой. Исходя из этого, при осуществлении экотоксикологических иссле-

дований важно не только оценить воздействие комплекса ксенобиотиков на весь организм, но и, во-первых, выявить наиболее чувствительную к воздействию ткань, а во-вторых, выделить наиболее токсичный компонент комплекса загрязнителей [3]. Также желательны определить вклад

каждого из изоферментов в суммарную активность ЭРОД. Это, несомненно, даст дополнительную информацию о функционировании фазы I системы биотрансформации у гидробионтов, которую можно получить, используя субстратную селективность изоферментов семейства CYP1.

\* Работа выполнена при поддержке средств федерального бюджета на выполнение государственного задания № 0221-2014-0003 и Гранта Президента РФ для гос. поддержки научных исследований, проводимых ведущими научными школами РФ. Проект: НИИ-1410.2014.4.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришанова А. Ю., Зуева Т. В. Билирубин как эндогенный посредник в активации экспрессии CYP1A1 под действием ультразвука // Вопросы медицинской химии. 2000. Т. 46. № 2. С. 117–126.
2. Ляхович В. В., Вавилин В. А., Зенков Н. К., Меньшикова Е. Б. Активированные кислородные метаболиты в монооксигеназных реакциях // Бюллетень СОРАМН. 2005. № 4. С. 7–12.
3. Юрченко В. В., Чуйко Г. М. Активность этоксирезорифин-О-деэтилазы (ЭРОД) рыб как биомаркер загрязнения водной среды стойкими органическими загрязняющими веществами // Современные проблемы физиологии и биохимии водных организмов. Петрозаводск: КарНЦРАН, 2010. Т. 1. С. 316–319.
4. Andersson T., Förlin L. Regulation of the cytochrome P450 enzyme system in fish // *Aquat. Toxicol.* 1992. Vol. 24. P. 1–20.
5. Beresford A. P. "CYP1A1: friend or foe?" // *Drug. Metab. Rev.* 1993. Vol. 25. P. 503–517.
6. Bucheli T. D., Fent K. Induction of cytochrome P450 as a biomarker for environmental contamination in aquatic ecosystems // *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 1995. Vol. 25. P. 201–268.
7. Burke M. D., Thompson S., Elcombe C. R., Halpert J., Haaparanta T., Mayer R. T. Ethoxy-, penthoxy- and benziloxypheoxazones and homologues: a series of substrates to distinguish between different induced cytochromes P-450 // *Biochemical Pharmacology.* 1985. Vol. 34. № 18. P. 3337–3345.
8. Cantrell S. M., Joy-Schleizinger J., Stegeman J. J., Tillitt D. E., Hannink M. Correlation of 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin-induced apoptotic cell death in the embryonic vasculature with embryotoxicity // *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 1998. Vol. 148. P. 24–34.
9. Chang T. K. H., Chen J., Pillay V., Ho J.-Y., Bandiera S. M. Real-time polymerase chain reaction analysis of CYP1B1 gene expression in human liver // *Toxicol. Sci.* 2003. Vol. 71. P. 11–19.
10. Degtyarenko K. N., Archakov A. I. Molecular evolution of P450 superfamily and P450-containing monooxygenase systems // *FEBS Letters.* 1993. Vol. 332. № 1. 2. P. 1–8.
11. Ding X., Kaminsky L. S. Human extrahepatic cytochromes P450: function in xenobiotic metabolism and tissue – selective chemical toxicity in the respiratory and gastrointestinal tracts // *Annu Rev Pharmacol Toxicol.* 2003. Vol. 43. P. 149–173.
12. El-garj F. M. A., Wajidi M. F. F. The Cytochrome P450s // *AsPac J. Mol. Biol. Biotechnol.* 2013. Vol. 21. P. 37–41.
13. Feyereisen R. Insect P450 enzymes // *Annual reviews of Entomology.* 1999. Vol. 44. P. 507–533.
14. Fujii-Kuriyama Y., Mimura J. Molecular mechanisms of AhR functions in the regulation of cytochrome P450 genes // *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 2005. Vol. 338. P. 311–317.
15. Garfinkel D. Studies on pig liver microsomes. I. Enzymic and pigment composition of different microsomal fractions // *Archives of Biochemistry and Biophysics.* 1958. Vol. 77. P. 493–509.
16. Gonzalez F. J. Molecular genetics of the P-450 superfamily // *Pharmacol. Ther.* 1990. Vol. 45. P. 1–38.
17. Guengerich F. P., Shimada T. Oxidation of toxic and carcinogenic chemicals by human cytochrome P-450 enzymes // *Chem. Res. Toxicol.* 1991. Vol. 4. P. 391–407.
18. Hrycaj E. G., Bandiera S. M. Cytochrome P450 enzymes. In: *Preclinical Development Handbook // ADME and Biopharmaceutical Properties* / Ed. by S. C. Gad. New Jersey, 2008. P. 627–696.
19. Klingenberg M. Pigments of rat liver microsomes // *Archives of Biochemistry and Biophysics.* 1958. Vol. 75. P. 376–386.
20. Lewis D. F. V. Cytochromes P450: Structure, Function and Mechanism. London: Taylor and Francis, 1996. 317 p.
21. Metal Ions in Life Sciences: The Ubiquitous Roles of Cytochrome P450 Proteins. 2007. Vol. 3. 210 p.
22. Nebert D. W., Dalton T. P., Okey A. B., Gonzalez F. J. Role of aryl hydrocarbon receptor-mediated induction of the CYP1 enzymes in environmental toxicity and cancer // *J. Biol. Chem.* 2004. Vol. 279. P. 23847–23850.
23. Nebert D. W., McKinnon R. A. Cytochrome P450: evolution and functional diversity // *Prog. Liver Dis.* 1994. Vol. 12. P. 63–97.
24. Nebert D., McKinnon R., Puga A. Human drug-metabolizing enzyme polymorphisms: effects on risk of toxicity and cancer // *DNA and Cell Biology.* 1996. Vol. 15. P. 273–280.
25. Nelson D. R., Kamataki T., Waxman D. J., Guengerich F. P., Estabrook R. W., Feyereisen R., Gonzalez F. J., Coon M. J., Gunsalus I. C., Gotoh O., Okuda K., Nebert D. W. The Cytochrome P450 superfamily: update on new sequences, gene mapping, accession numbers, and nomenclature // *Pharmacogenetics.* 1996. Vol. 6. P. 1–42.
26. Nerurkar P. V., Park S. S., Thomas P. E., Nims R. W., Lubet R. Methoxyresorufin and benzyloxyresorufin: substrates preferentially metabolized by cytochromes P4501A2 and 2B, respectively, in the rat and mouse // *Biochem. Pharmacol.* 1993. Vol. 46. P. 933–943.
27. Omura T., Sato R. A New Cytochrome in Liver Microsomes // *Journal of Biological Chemistry.* 1962. Vol. 237. P. 1375–1376.
28. Parkinson A. Biotransformation of xenobiotics // Klaassen C. D. (Ed.) *Casarett and Oull's Toxicology: The Basic Science of Poisons.* 6th ed. New York: McGraw Hill, 2001. P. 133–224.
29. Preissner S., Kroll K., Dunkel M., Senger C., Goldsobe G., Kuenther S., and Preissner R. SuperCYP: a comprehensive database on Cytochrome P450 enzymes including a tool for analysis of CYP-drug interactions // *Nucleic Acids Research.* 2010. 38 (Database issue): D237–D243.
30. Rodriguez-Antona C., Ingelman-Sundberg M. Cytochrome P450 pharmacogenetics and cancer // *Oncogene.* 2006. Vol. 25. P. 1679–1691.

31. Sesardic D., Cole K. J., Edwards R. J., Davies D. S., Thomas P. E., Levin W., Boobis A. R. The inducibility and catalytic activity of cytochromes P450c (P450IA1) and P450d (P450IA2) in rat tissues // *Biochem. Pharmacol.* 1990. Vol. 39. P. 499–506.
32. Shimada T., Yamazaki H., Mimura M., Inui Y., Guengerich F. P. Interindividual variations in human liver cytochrome P450 enzymes involved in the oxidation of drugs, carcinogens and toxic chemicals: studies with liver microsomes of 30 Japanese and 30 Caucasians // *J. Pharmacol. Exp. Ther.* 1994. Vol. 270. P. 414–423.
33. Sim S., Ingelman-Sundberg M. Update on Allele Nomenclature for Human Cytochromes P450 and the Human Cytochrome P450 Allele (CYP-Allele) Nomenclature Database // I. R. Phillips, E. A. Shephard and P. R. Ortiz de Montellano (Eds.). *Cytochrome P450 Protocols*. Humana Press, 2013. Vol. 987. P. 251–259.
34. Whyte J. J., Jung R. E., Schmitt C. J., Tillitt D. E. Ethoxyresorufin-O-deethylase (EROD) Activity in Fish as a Biomarker of Chemical Exposure // *Critical Reviews in Toxicology*. 2000. Vol. 30 (4). P. 347–570.

**Smirnov L. P.**, Institute of Biology, Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Sukhovskaya I. V.**, Institute of Biology, Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Borvinskaya E. V.**, Institute of Biology, Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

### ETHOXYRESORUFIN O-DEETHYLASE – SYSTEMATIC ACCESSORY AND ITS FUNCTIONAL FEATURES OF PHASE I ENZYME OF XENOBIOTICS BIOTRANSFORMATION (REVIEW)

Ethoxyresorufin o-deethylase (EROD) is nonspecific mono-oksigenaza (1.14.14.1) which belongs to the 1 class of enzymes (oxidoreductase). EROD is a representative of the big gemprotein family designated as P450 cytochrome present practically in all animal and plant cells (an exception – obligate anaerobe bacterias). P450 cytochrome plays an important role in oxidation of numerous compounds of both endogenous origin (steroids, bilious acids, fatty acids, prostaglandins, leukotrienes, biogenous amines) and exogenous origin (drugs, poisons, products of industrial pollution, pesticides, carcinogens, mutagens, etc.). P450 cytochrome is an integral part of the biochemical protection system. They are classified as enzymes of phase I of xenobiotics biotransformation. The total activity of isoenzymes of CYP1 family (CYP1A1, CYP1A2 and CYP1B1) is approached as a summarized activity of EROD. The general knowledge on the systematic inclusion and function of EROD is summarized. A necessity to assess contribution of each isoenzyme into the summarized activity in EROD is substantiated.

Key words: ethoxyresorufin o-deethylase, P450 cytochrome, system of xenobiotics biotransformation

#### REFERENCES

1. Grishanova A. Yu., Zueva T. V. Bilirubin as endogenic intermediary in the activation of CYP1A1 expression under the influence of ultrasound [Bilirubin kak endogennyy posrednik v aktivatsii ekspressii CYP1A1 pod deystviem ul'trazvuka]. *Voprosy meditsynskoy khimii* [Questions of medical chemistry] 2000. Vol. 46. № 2. P. 117–126.
2. Lyahovich V. V., Vavilin V. A., Zenkov N. K., Men'shchikova E. B. The activated oxygen metabolites in the monooxygenase reactions [Aktivirovannye kislorodnye metabolity v monooksigenaznykh reaktsiyah]. *Byulleten' SO RAMN*. [Bulletin of Siberian branch of RAMS]. 2005. № 4. C. 7–12.
3. Yurchenko V. V., Chuyko G. M. Activity of the fish ethoxyresorufin-O-deethylase (EROD) as a biomarker of water pollution by the resistant organic polluting substances [Aktivnost' etoksiresorufin-O-deetilazy (EROD) ryb kak biomarker zagryazneniy vodnoy sredy stoykimi organicheskimi zagryaznyayushchimi veshchestvami]. *Sovremennye problemy fiziologii i biokhimii vodnykh organizmov* [Current problems of physiology and biochemistry of aquatic organisms]. Petrozavodsk: KarNTS RAN. T. 1. C. 316–319.
4. Andersson T., Förlin L. Regulation of the cytochrome P450 enzyme system in fish // *Aquat. Toxicol.* 1992. Vol. 24. P. 1–20.
5. Beresford A. P. "CYP1A1: friend or foe?" // *Drug. Metab. Rev.* 1993. Vol. 25. P. 503–517.
6. Bucheli T. D., Fent K. Induction of cytochrome P450 as a biomarker for environmental contamination in aquatic ecosystems // *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 1995. Vol. 25. P. 201–268.
7. Burke M. D., Thompson S., Elcombe C. R., Halpert J., Haaparanta T., Mayer R. T. Ethoxy-, penthoxy- and benziloxypheoxazones and homologues: a series of substrates to distinguish between different induced cytochromes P-450 // *Biochemical Pharmacology*. 1985. Vol. 34. № 18. P. 3337–3345.
8. Cantrell S. M., Joy-Schleizinger J., Stegeman J. J., Tillitt D. E., Hannink M. Correlation of 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin-induced apoptotic cell death in the embryonic vasculature with embryotoxicity // *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 1998. Vol. 148. P. 24–34.
9. Chang T. K. H., Chen J., Pillay V., Ho J.-Y., Bandiera S. M. Real-time polymerase chain reaction analysis of CYP1B1 gene expression in human liver // *Toxicol. Sci.* 2003. Vol. 71. P. 11–19.
10. Degtyarenko K. N., Archakov A. I. Molecular evolution of P450 superfamily and P450-containing monooxygenase systems // *FEBS Letters*. 1993. Vol. 332. № 1. 2. P. 1–8.
11. Ding X., Kaminsky L. S. Human extrahepatic cytochromes P450: function in xenobiotic metabolism and tissue – selective chemical toxicity in the respiratory and gastrointestinal tracts // *Annu Rev Pharmacol Toxicol.* 2003. Vol. 43. P. 149–173.
12. El-garj F. M. A., Wajidi M. F. F. The Cytochrome P450s // *AsPac J. Mol. Biol. Biotechnol.* 2013. Vol. 21. P. 37–41.
13. Feyereisen R. Insect P450 enzymes // *Annual reviews of Entomology*. 1999. Vol. 44. P. 507–533.
14. Fujii-Kuriyama Y., Mimura J. Molecular mechanisms of AhR functions in the regulation of cytochrome P450 genes // *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 2005. Vol. 338. P. 311–317.
15. Garfinkel D. Studies on pig liver microsomes. I. Enzymic and pigment composition of different microsomal fractions // *Archives of Biochemistry and Biophysics*. 1958. Vol. 77. P. 493–509.
16. Gonzalez F. J. Molecular genetics of the P-450 superfamily // *Pharmacol. Ther.* 1990. Vol. 45. P. 1–38.
17. Guengerich F. P., Shimada T. Oxidation of toxic and carcinogenic chemicals by human cytochrome P-450 enzymes // *Chem. Res. Toxicol.* 1991. Vol. 4. P. 391–407.

18. Hrycaj E. G., Bandiera S. M. Cytochrome P450 enzymes. In: Preclinical Development Handbook // ADME and Biopharmaceutical Properties / Ed. by S. C. Gad. New Jersey, 2008. P. 627–696.
19. Klingenberg M. Pigments of rat liver microsomes // Archives of Biochemistry and Biophysics. 1958. Vol. 75. P. 376–386.
20. Lewis D. F. V. Cytochromes P450: Structure, Function and Mechanism. London: Taylor and Francis, 1996. 317 p.
21. Metal Ions in Life Sciences: The Ubiquitous Roles of Cytochrome P450 Proteins. 2007. Vol. 3. 210 p.
22. Nebert D. W., Dalton T. P., Okey A. B., Gonzalez F. J. Role of aryl hydrocarbon receptor-mediated induction of the CYP1 enzymes in environmental toxicity and cancer // J. Biol. Chem. 2004. Vol. 279. P. 23847–23850.
23. Nebert D. W., McKinnon R. A. Cytochrome P450: evolution and functional diversity // Prog. Liver Dis. 1994. Vol. 12. P. 63–97.
24. Nebert D., McKinnon R., Puga A. Human drug-metabolizing enzyme polymorphisms: effects on risk of toxicity and cancer // DNA and Cell Biology. 1996. Vol. 15. P. 273–280.
25. Nelson D. R., Kamataki T., Waxman D. J., Guengerich F. P., Estabrook R. W., Feyereisen R., Gonzalez F. J., Coon M. J., Gunsalus I. C., Gotoh O., Okuda K., Nebert D. W. The Cytochrome P450 superfamily: update on new sequences, gene mapping, accession numbers, and nomenclature // Pharmacogenetics. 1996. Vol. 6. P. 1–42.
26. Nerurkar P. V., Park S. S., Thomas P. E., Nims R. W., Lubet R. Methoxyresorufin and benzyloxyresorufin: substrates preferentially metabolized by cytochromes P4501A2 and 2B, respectively, in the rat and mouse // Biochem. Pharmacol. 1993. Vol. 46. P. 933–943.
27. Omura T., Sato R. A New Cytochrome in Liver Microsomes // Journal of Biological Chemistry. 1962. Vol. 237. P. 1375–1376.
28. Parkinson A. Biotransformation of xenobiotics // Klaassen C. D. (Ed.) Casarett and Cullen's Toxicology: The Basic Science of Poisons. 6th ed. New York: McGraw Hill, 2001. P. 133–224.
29. Preissner S., Kroll K., Dunkel M., Senger C., Goldsobel G., Kuenther S., and Preissner R. SuperCYP: a comprehensive database on Cytochrome P450 enzymes including a tool for analysis of CYP-drug interactions // Nucleic Acids Research. 2010. 38 (Database issue): D237–D243.
30. Rodriguez-Antona C., Ingelman-Sundberg M. Cytochrome P450 pharmacogenetics and cancer // Oncogene. 2006. Vol. 25. P. 1679–1691.
31. Sesardic D., Cole K. J., Edwards R. J., Davies D. S., Thomas P. E., Levin W., Boobis A. R. The inducibility and catalytic activity of cytochromes P450c (P450IA1) and P450d (P450IA2) in rat tissues // Biochem. Pharmacol. 1990. Vol. 39. P. 499–506.
32. Shimada T., Yamazaki H., Mimura M., Inui Y., Guengerich F. P. Interindividual variations in human liver cytochrome P450 enzymes involved in the oxidation of drugs, carcinogens and toxic chemicals: studies with liver microsomes of 30 Japanese and 30 Caucasians // J. Pharmacol. Exp. Ther. 1994. Vol. 270. P. 414–423.
33. Sim S., Ingelman-Sundberg M. Update on Allele Nomenclature for Human Cytochromes P450 and the Human Cytochrome P450 Allele (CYP-Allele) Nomenclature Database // I. R. Phillips, E. A. Shephard and P. R. Ortiz de Montellano (Eds.). Cytochrome P450 Protocols. Humana Press, 2013. Vol. 987. P. 251–259.
34. Whyte J. J., Jung R. E., Schmitt C. J., Tillitt D. E. Ethoxyresorufin-O-deethylase (EROD) Activity in Fish as a Biomarker of Chemical Exposure // Critical Reviews in Toxicology. 2000. Vol. 30 (4). P. 347–570.

*Поступила в редакцию 10.03.2015*

**ИРИНА МИХАЙЛОВНА ДЗЮБУК**

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

**АНТОН ЕВГЕНЬЕВИЧ КУРИЦЫН**

кандидат биологических наук, ихтиолог лаборатории экологических проблем Севера, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*akuri@rambler.ru*

**АЛИНА ВИКТОРОВНА ПОЛИНА**

специалист лаборатории экологических проблем Севера, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*ikrup@petrsu.ru*

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА КОРМЛЕНИЯ НА МОЛОДЬ РАДУЖНОЙ ФОРЕЛИ  
В ЗИМНИЙ ПЕРИОД\***

Представлены новые результаты морфофизиологического исследования молоди радужной форели (*Oncorhynchus mykiss* Wal.), выращиваемой в садках на Ладожском озере при разных режимах кормления в зимний период. Не выявлено различий по массе и размерам тела между молодь при режимах кормления 1 раз в 7 дней и 1 раз в 3 дня. Состояние и индексы внутренних органов (сердца, селезенки, жабр, печени, желудка и кишечника) свидетельствовали о нормальном развитии молоди форели в зимний период при разных режимах кормления. При садковом выращивании молоди радужной форели (возраста около 1 года) в зимний период при температуре воды менее 2 °С возможно использовать режим кормления 1 раз в 7 дней. Это позволит повысить рентабельность производства на садковом хозяйстве.

Ключевые слова: садковое рыбоводство, радужная форель, молодь, выращивание, рост, режим кормления, Ладожское озеро

**ВВЕДЕНИЕ**

Приоритетным направлением, включенным в программу агропромышленного комплекса России, является аквакультура. На Европейском Севере, в том числе в Республике Карелия, перспективное направление развития аквакультуры – садковое рыбоводство [5].

Эффективность садкового рыбоводства определяется результатами последовательного осуществления технологических процессов. Одним из этапов производства рыбной продукции является выращивание посадочного материала. Важное значение на этом этапе имеет сбалансированность питания для молоди (состав корма, величина рациона, режим кормления и доступность гранул). Правильно подобранные корма и технологии кормления – основополагающий фактор успеха в форелеводстве [6].

Кормление форели осуществляется согласно нормам, предложенным производителями комбикормов, а величина рациона определяется по специальным таблицам с учетом навески рыбы и температуры воды. При выращивании посадочного материала радужной форели важен и режим ее кормления. Этому посвящены работы многих

исследователей [1], [3], [7], [10]. Было выявлено, что основным фактором для нормирования этого процесса является температура воды [8]. Частота кормления молоди зависит также от массы выращиваемой рыбы. Чем меньше размер и масса рыбы, тем чаще ее следует кормить [6].

J. L. White, B. C. Harvey приводят некоторые данные о режимах кормления радужной форели в зимний период [11], однако методики кормления форели в садках при низких температурах воды (ниже 2 °С) не разработаны. Определение такого режима представляет как теоретический, так и практический интерес. Возникает необходимость научно обосновать режимы кормления рыб при низких температурах воды (зимой), обеспечивающие их нормальное развитие. Также важен поиск путей сокращения затрат рыбоводных хозяйств на приобретение корма при сохранении и (или) увеличении объемов выращивания рыбы.

Цель исследований – определить наиболее эффективный режим кормления молоди радужной форели по оценке морфофизиологического состояния посадочного материала, выращиваемого в садках в период низких температур воды.



## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на полносистемном садковом хозяйстве, расположенном на Ладожском озере, с февраля по май 2012 года. Объектом изучения была молодь радужной форели (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum, 1792), размещенная в двух садках. К началу эксперимента возраст рыб был 10 месяцев. Количество особей в первом садке составляло 52,6 тыс. шт., индивидуальный вес рыб в среднем равнялся 58,0 г, во втором садке – 64 тыс. шт. и 57,0 г соответственно.

В течение 27 суток до начала эксперимента молодь радужной форели не кормили вследствие образования ледяного покрова на озере. Температура воды в период исследований составляла в среднем 2 °С.

В ходе исследования испытывалось 2 режима кормления: в первом садке молодь кормили 1 раз в 7 дней, во втором садке – 1 раз в 3 дня. Использовали корма одного производителя. Корм содержал 42 % сырого протеина и 29–32 % сырого жира при общей энергии 23–26 МДж/кг. Нормы кормления соответствовали температуре воды и массе тела выращиваемых рыб.

Ежемесячно отлавливалось в садках по 25 экземпляров. Исследовали размерно-весовые параметры, морфофизиологические и гематологические показатели посадочного материала радужной форели при различных режимах кормления. В процессе работы использовали стандартные широко применяемые методики [4]. Полученные результаты обработаны статистически [2].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В начале эксперимента состояние молоди, на котором не отразилось кратковременное голодание в период формирования ледового покрова на водоеме, оценивалось как нормальное. Такое состояние отмечалось у рыб на протяжении всего периода исследования. Окраска тела была характерной для рыб этого возраста и условий выращивания. Не было выявлено внешних признаков каких-либо заболеваний, нарушений чешуйного покрова, кровоизлияний и наличия излишков слизи на кожном покрове молоди. Жабры были нормального, красноватого цвета, без излишков слизи. У молоди форели из обоих садков было отмечено нормальное развитие челюстей, позвоночника (без искривлений) и мышц. В период с февраля по апрель не было выявлено особей с некрозом плавников. Однако в мае наблюдали у единичных особей из обоих садков повреждение хвостового плавника. Это, вероятно, связано с многофакторным воздействием на иммунную систему форели к концу зимнего периода [9].

Анализ результатов исследования роста молоди радужной форели показал, что линейные размеры и масса рыб в обоих садках при разных режимах кормления достоверно не изменялись

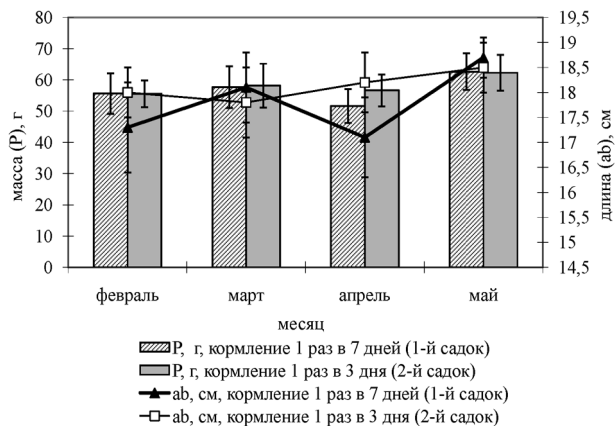


Рис. 1. Размерно-весовая характеристика молоди радужной форели при разных режимах кормления

на протяжении всего периода (рис. 1). Хотя абсолютные приросты длины и массы тела у рыб за период исследования составили в первом садке (1 раз в 7 дней) 1,4 см и 7,0 г, во втором (1 раз в 3 дня) – 0,5 см и 6,7 г соответственно. Достоверных различий по массе и длине рыб из разных садков не выявлено.

Состояние внутренних органов (сердца, селезенки, жабр, печени, желудка и кишечника) является важным маркером здоровья рыб. В ходе исследований было отмечено нормальное положение, форма и окраска внутренних органов форели. Ожирения сердца не выявлено, структура ткани печени и селезенки плотная, почки без тканевых разрастаний.

Индекс сердца, энергетического органа, в основном был стабилен и составлял 1,5–1,9 % у рыб в первом садке (кормление 1 раз в 7 дней) и 1,6–1,8 % во втором садке (кормление 1 раз в 3 дня). Некоторое снижение индекса у рыб в обоих садках произошло с февраля по апрель (рис. 2). К маю эти величины стали увеличиваться, что свидетельствует о закономерном изменении активности поведения форели, усилении уровня метаболизма и усвоения корма при увеличении нормы кормления в этот период.

В результате анализа данных была выявлена лабильность относительного веса селезенки молоди форели в пределах 1,2–2,1 % (кормление 1 раз в 7 дней) и 1,2–2,0 % (кормление 1 раз в 3 дня). Для рыб из обоих садков было достоверно выявлено снижение индекса селезенки в апреле (см. рис. 2), что связано со снижением уровня кроветворения в период зимовки и свидетельствует о нормальных адаптационных способностях выращиваемых рыб. В мае произошло закономерное увеличение относительного веса селезенки у молоди из первого садка (кормление 1 раз в 7 дней) до  $2,1 \pm 0,3$  %, следовательно, и уровня кроветворения.

Интенсивность кроветворения в обоих вариантах опытов была в нормативных пределах.

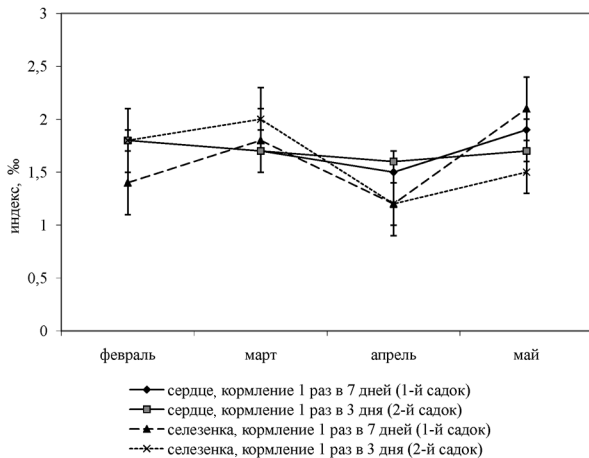


Рис. 2. Индексы сердца и селезенки молоди радужной форели при разных режимах кормления

Количество незрелых форм эритроцитов (нормобластов) составляло 4,8–9,2 % от общего содержания красных клеток. Лейкоцитарная формула спокойная: содержание фагоцитов (моноцитов и нейтрофилов) не превышало 12,0 %. Это подтверждает результаты визуальных исследований о нормальном состоянии молоди в обоих садках.

Индексы жабр были в пределах нормы – 23,5–28,3 % (кормление 1 раз в 7 дней) и 22,5–26,2 % (кормление 1 раз в 3 дня), что свидетельствует о нормальном функционировании дыхательной системы молоди форели в этот период. Достоверных различий по этому показателю между особями из разных садков выявлено не было.

Относительный вес печени рыб зависит от интенсивности питания и физиологического состояния особей. На протяжении исследований он колебался от 11,4 до 12,8 % (кормление 1 раз в 7 дней) и от 11,6 до 15,8 % (кормление 1 раз в 3 дня) (рис. 3). В марте достоверно больше индекс печени был у молоди из второго садка (кормление 1 раз в 3 дня), хотя в апреле и мае рыбы из разных садков уже не различались по данному показателю.

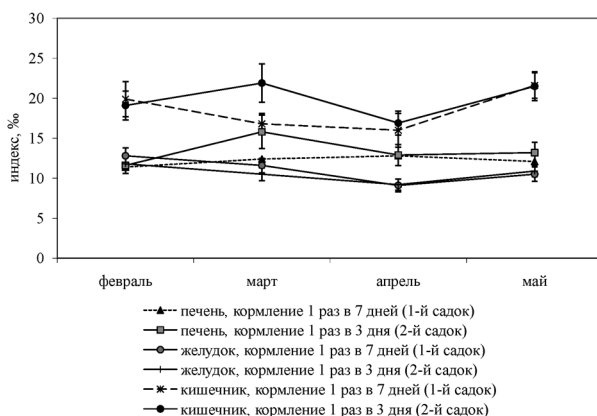


Рис. 3. Индексы печени, желудка и кишечника молоди радужной форели при разных режимах кормления

Индексы желудка и кишечника представляют интерес в отношении физиологической возможности организма обеспечить рост рыбы необходимым количеством питательных веществ. Относительный вес желудка и кишечника форели в опытах составлял 9,1–12,8 % и 16,0–21,6 % (кормление 1 раз в 7 дней) и 9,2–11,8 % и 16,9–21,9 % (кормление 1 раз в 3 дня) соответственно (см. рис. 3). В марте был выявлен более высокий индекс кишечника у рыб из второго садка (кормление 1 раз в 3 дня), который соответствовал высокому индексу печени. В целом весовые показатели кишечника свидетельствуют о достаточно развитом желудочно-кишечном тракте форели, которая полностью обеспечивает нормальное функционирование организма при низких температурах воды в условиях обоих режимов кормления.

Содержание полостного жира у молоди радужной форели в период исследования было в пределах 6,0–19,9 % при кормлении 1 раз в 7 дней и 5,8–25,9 % при режиме кормления 1 раз в 3 дня. Выявлено закономерное снижение индекса полостного жира с февраля по май в первом садке (кормление 1 раз в 7 дней) в 1,7 раза и во втором садке (кормление 1 раз в 3 дня) в 1,3 раза. В ходе исследований было отмечено, что в марте содержание полостного жира у молоди форели при режиме кормления 1 раз в 3 дня достоверно больше, чем у рыб при режиме 1 раз в 7 дней (рис. 4). В апреле произошло резкое снижение его для рыб из обоих садков. В мае этот показатель у молоди из обоих садков был сходным и биологически допустимым. Жир в форме отложений (запасного или резервного) тратился экономно форелью из обоих садков, что свидетельствует о достатке поступающей пищи при режиме кормления 1 раз в неделю.

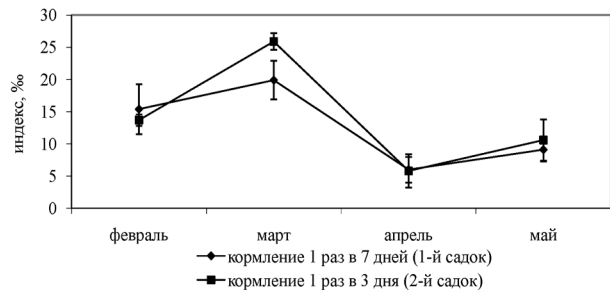


Рис. 4. Относительное содержание полостного жира у молоди радужной форели при разных режимах кормления

Выживаемость молоди радужной форели на протяжении периода исследований была высокой в обоих садках – 98,2 % (кормление 1 раз в 3 дня) и 98,7 % (кормление 1 раз в 7 дней).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов морфофизиологических исследований молоди радужной форели в садках

в зимний период показал, что состояние молоди не зависит от выбранного режима кормления – 1 раз в 7 дней и 1 раз в 3 дня. Выявленный в мае незначительный некроз плавников у молоди из обоих садков не является следствием разных режимов кормления. Достоверных различий по массе и длине рыб из разных садков при разных режимах кормления не выявлено.

При пониженных температурах воды обмен веществ выращиваемых рыб значительно снижен, а усвоенная часть пищи расходуется на поддержание жизненных функций организма. В этот период достаточно использовать низкокалорийные форелевые корма с содержанием сырого протеина 38–40 %. Применяемые нами корма были более калорийными. Известно, что при недостаточном поступлении питательных веществ в внесенным кормом энергетические траты организма рыб происходят за счет жировых запасов. Анализ результатов наших исследований показал, что при разных режимах кормления у рыб имелась возможность использовать резервные жировые отложения.

Форма, положение и окраска внутренних органов также свидетельствовали о нормальном состоянии молоди форели в зимний период при

разных режимах кормления. В марте были отмечены более высокие индексы печени, кишечника и полостного жира у рыб при кормлении 1 раз в 3 дня, что отражает большую интенсивность питания у них в этот период. В мае достоверно больший индекс селезенки был у рыб из первого садка при разовом режиме кормления в 7 дней, что связано с повышением уровня кроветворения у них после периода зимовки и свидетельствует о нормальных адаптационных способностях молоди. Выявленные изменения индексов органов показывают, что к концу зимнего периода (с увеличением длины светового дня) норма кормления годовиков форели может быть увеличена на 10–15 % в соответствии с возросшими физиологическими потребностями.

Таким образом, выполненные исследования подтверждают, что для выращивания молоди радужной форели при низкой температуре воды (2 °С) в зимний период возможно использовать режим кормления 1 раз в 7 дней. Это позволит снизить расход кормов при сохранении нормальных показателей физиологического состояния форели и повысить рентабельность производства на рыбоводном садковом хозяйстве.

\* 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 м ы г и н Е. А. Совершенствование комбикормов для рыб // Комбикорма. 2009. № 2. С. 67–70.
2. И в а н т е р Э. В., К о р о с о в А. В. Элементарная биометрия: Учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2010. 104 с.
3. О с т р о у м о в а И. Н. Биологические основы кормления рыб. 2-е изд. СПб.: Изд-во ФГБНУ ГосНИОРХ, 2012. 564 с.
4. Р ы ж к о в Л. П., Д з ю б у к И. М., К у ч к о Т. Ю. Ихтиологические исследования на водоемах: Учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2013. 72 с.
5. Р ы ж к о в Л. П., Д з ю б у к И. М. Садковое рыбоводство в естественных водоемах: прошлое, настоящее, будущее // Рыбохозяйственные водоемы России. Фундаментальные и прикладные исследования: Материалы междунар. науч. конф., посвящ. 100-летию ГосНИОРХ (6–10 октября 2014 г.). СПб.: Изд-во ГосНИОРХ, 2014. С. 1306–1312.
6. Р ы ж к о в Л. П., Д з ю б у к И. М., К о р е н е в О. Н., П о л и н а А. В. Нормирование выращивания посадочного материала радужной форели в садках: Учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2014. 41 с.
7. B a i l e y J., A l a n ä r ä A. Effect of feed portion size on growth of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum), reared at different temperatures // Aquaculture. 2006. № 253. P. 728–730.
8. J o b l i n g M. Fish Bioenergetics. London: Chapman & Hall, 1994. 309 p.
9. L a t r e m o u i l l e D. N. Fin erosion in aquaculture and natural environments // Rev. Fish. Sci. 2003. № 11. P. 315–335.
10. R a n t a T. and P i r h o n e n J. Effect of tank size on food intake and growth in individually held juvenile rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum) // Aquaculture Research. 2006. № 37. P. 1381–1385.
11. W h i t e J. L., H a r v e y B. C. Winter Feeding Success of Stream Trout under Different Streamflow and Turbidity Conditions // Transactions of the American Fisheries Society. 2007. № 136. P. 1187–1192.

**Dzyubuk I. M.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

**Kuritsyn A. E.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

**Polina A. V.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

#### EFFECT OF WINTER FEEDING FREQUENCY ON CAGED JUVENILE RAINBOW TROUT GROWTH

New research results of the morphological study on Ladoga Lake juvenile rainbow trout grown in cages under different winter feeding regimes are presented in the article. No differences in the mass and body size of the juveniles grown under different feeding schedules (1 time in 7 days and 1 time in 3 days) were revealed. The state and index of the rainbow trout internal organs (heart,

spleen, gills, liver, stomach and intestines) speak of the fish normal development during winter season in conditions of different feeding schedules. It was concluded that the effective growth of the caged rainbow trout is possible at the water temperature less than 2 °C during winter season with once-a-week feeding schedule. Such feeding regime is facilitative in the increase of the cage farm profitability.

Key words: fish cage culture, rainbow trout, young, growing, growth, feeding regime, Lake Ladoga

#### REFERENCES

1. Gamygin E. A. Improvement of food for fish [Sovershenstvovanie kombikormov dlya ryb]. *Kombikorma*. 2009. № 2. P. 67–70.
2. Ivanter E. V., Korosov A. V. *Vvedenie v kolichestvennyuyu biologiyu: Uchebnoe posobie* [Introduction to quantitative biology. Textbook for students of biol. specialty]. Petrozavodsk, Petrozavodsk State University Publ., 2010. 104 p.
3. Ostroumova I. N. *Biologicheskie osnovy kormleniya ryb* [Biological basics of fish feeding]. St. Petersburg, GosNIORKh Publ., 2012. 564 p.
4. Ryzhkov L. P., Dzyubuk I. M., Kuchko T. Yu. *Ikhtiologicheskie issledovaniya na vodoemakh: Uchebnoe posobie* [Ichthyologic research on reservoirs. Textbook]. Petrozavodsk, Petrozavodsk State University Publ., 2013. 72 p.
5. Ryzhkov L. P., Dzyubuk I. M. Cage culture in natural waters: the past, present and future [Sadkovoje rybovodstvo v estestvennykh vodoemakh: proshloe, nastoyashchee, budushchee]. *Rybokhozyaystvennye vodoemy Rossii. Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: Materialy mezhdunar. nauch. konf., posvyashch. 100-letiyu GosNIORKh (6–10 oktyabrya 2014 g.)* [Fishery waters of Russia. Basic and applied research: Proceedings of Intern. scientific. conf. devoted. 100 anniversary GosNIORKh (6–10 October 2014)]. St. Petersburg, GosNIORKh Publ., 2014. P. 1306–1312.
6. Ryzhkov L. P., Dzyubuk I. M., Korenev O. N., Polina A. V. *Normirovanie vyrashchivaniya posadochnogo materiala raduzhnoy foreli v sadkakh: Uchebnoe posobie* [Rationing in growing planting material of rainbow trout in cages. Textbook]. Petrozavodsk, Petrozavodsk State University Publ., 2014. 41 p.
7. Bailey J., Alanärä A. Effect of feed portion size on growth of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum), reared at different temperatures // *Aquaculture*. 2006. № 253. P. 728–730.
8. Jobling M. *Fish Bioenergetics*. London: Chapman & Hall, 1994. 309 p.
9. Latremouille D. N. Fin erosion in aquaculture and natural environments // *Rev. Fish. Sci.* 2003. № 11. P. 315–335.
10. Ranta T. and Pirhonen J. Effect of tank size on food intake and growth in individually held juvenile rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum) // *Aquaculture Research*. 2006. № 37. P. 1381–1385.
11. White J. L., Harvey B. C. Winter Feeding Success of Stream Trout under Different Streamflow and Turbidity Conditions // *Transactions of the American Fisheries Society*. 2007. № 136. P. 1187–1192.

Поступила в редакцию 18.11.2014

**ЯРОСЛАВ АЛЕКСАНДРОВИЧ КУЧКО**

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологии рыб и водных беспозвоночных, Институт биологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*y-kuchko@mail.ru*

**ЕВГЕНИЙ СЕРГЕЕВИЧ САВОСИН**

кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории экологии рыб и водных беспозвоночных, Институт биологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*szenya@list.ru*

**ТАМАРА ЮРЬЕВНА КУЧКО**

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

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СООБЩЕСТВ ЗООПЛАНКТОНА И МАКРОЗООБЕНТОСА СЕГОЗЕРА В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ САДКОВОГО ФОРЕЛЕВОГО ХОЗЯЙСТВА\*

Дается оценка экологической ситуации в районе размещения форелевого хозяйства на основе анализа современного состояния сообществ зоопланктона и макрозообентоса. Результаты исследований показали, что по уровню количественного развития планктонной фауны в летне-осенний период 2013 года исследованные участки озера Сегозера можно отнести к  $\alpha$ -мезотрофному (рыбоводная площадка № 5) и олиготрофному типу (рыбоводная площадка № 6). Индексы сапробности, рассчитанные по биомассе индикаторных видов зоопланктона, составили 1,47 (площадка № 5) и 1,41 (площадка № 6), что соответствует классу олигосапробных водных объектов (2-й класс качества, чистые природные воды). По уровню количественного развития макрозообентоса исследованные участки можно характеризовать как олиготрофные.

Ключевые слова: зоопланктон, макрозообентос, численность, биомасса, пресноводные экосистемы

### ВВЕДЕНИЕ

На северо-западе России основным направлением в рыбоводстве является товарное форелеводство, считающееся одной из самых перспективных и рентабельных отраслей аквакультуры. В Карелии садковым выращиванием радужной форели (*Parasalmo mykiss* Walbaum) в промышленных объемах занимаются около 40 лет. Для объективного представления о состоянии экосистемы в водоемах с садковым выращиванием молоди и товарной форели необходим постоянный мониторинг основных гидрохимических показателей воды и состояния сообществ гидробионтов. Это позволяет корректировать объем выращиваемой рыбы (и, как следствие, количество поступающих биогенных веществ) с целью предотвращения сукцессионных изменений экосистемы, приводящих к изменению трофического статуса используемого водоема.

В условиях антропогенного загрязнения межгодовая динамика гидробиологических показателей играет существенную роль при мониторинге водных объектов. Как известно, процесс эвтрофирования водоемов характеризуется из-

менениями в их экосистеме, которые по целому ряду признаков могут оцениваться не только качественно, но и количественно. Представители зоопланктона и макрозообентоса традиционно используются в качестве биологических индикаторов, применяемых при оценке качества воды. Организмы донной фауны характеризуются широким экологическим спектром, достаточно крупными размерами, приуроченностью к конкретному местообитанию, значительной продолжительностью жизни, позволяющей им аккумулировать загрязняющие вещества. Все это делает их очень удобным объектом для мониторинга пресноводных экосистем [1]. С другой стороны, короткий жизненный цикл беспозвоночных зоопланктона позволяет даже при проведении ограниченных во времени наблюдений не только определить современное состояние водоема, но и оценить возможные изменения.

Цель работы – оценить современное состояние сообществ зоопланктона и макрозообентоса озера Сегозера в условиях товарного выращивания радужной форели.

## МЕСТО ИССЛЕДОВАНИЯ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сегозеро расположено в средней части Карелии, относится к бассейну Белого моря. Координаты центра озера 63°19' с. ш., 33°44' в. д. Основные притоки – реки Селецкая и Сона (Волома). Из северо-восточной части озера вытекает река Сегежа, протекающая через Линдозеро и впадающая в Выгозерское водохранилище. Коэффициент условного водообмена равен 0,10, то есть водные массы озера полностью меняются за счет притока воды с водосбора один раз в 10 лет.

По химическому составу водные массы Сегозера относятся к гидрокарбонатному классу группы Са с очень низкой минерализацией (20–24 мг/л) и цветностью (20–26°). По нашим данным, количество растворенного в воде кислорода колебалось от 9,1 до 9,8 мг/л. Количество свободной углекислоты CO<sub>2</sub> изменялось от 1,5 до 1,9 мг/л. Величина pH варьировала в пределах 5,7–7,2, перманганатная окисляемость воды колебалась от 4,7 до 6,2 мгO<sub>2</sub>/л. Содержание биогенных элементов (фосфора и азота) находилось в пределах 0,09–0,011 мгP/л и 0,57–0,65 мгN/л соответственно.

Работа выполнялась на Сегозере, в районе острова Макконшари и севернее острова Мурдошари (рисунок) на двух рыбоводных площадках (№ 5 и 6). Эти участки эксплуатируются с 2011 года при общей проектной мощности выращивания 2400 т в год. В 2013 году на двух участках выращивалось 600 и 800 т товарной форели, то есть около 55 % от проектируемой мощности. Пробы отбирались 28–30 июня 2013 года и 3–5 октября 2013 года.

Для отбора проб зоопланктона применялся планктотометр объемом 2 л, при этом облавливались все слои воды с интервалом в 1 м с двукратной повторностью. Интегрированные пробы процеживались через планктонную сеть (диаметр ячеек 100 мкм), концентрировались до 100 мм<sup>3</sup> и фиксировались 4 % формалином. Об-

работка проб проводилась по общепринятым методикам гидробиологического мониторинга. Биомасса зоопланктона определялась расчетным методом. Индекс видового разнообразия рассчитывался по формуле Шеннона – Уивера. Оценка сапробности воды по зоопланктону проводилась по методу Пантле – Букка в модификации Сладечека [7]. Трофический статус водоема оценивался по шкале трофности для зоопланктона по методике С. П. Китаева [2]. Систематика низших ракообразных и коловраток приводилась согласно современным представлениям о таксономии планктонных беспозвоночных [6].

Количественные пробы макрозообентоса отбирались дночерпателем Экмана – Берджа с площадью захвата 250 см<sup>2</sup>. Пробы промывались через сито № 19 (ячейки 0,5 мм) и фиксировались 8 % раствором формалина. Беспозвоночных взвешивали с точностью 0,1 мг на торсионных весах. Обработка проб проводилась по общепринятым методикам [7].

Глубины в местах отбора проб колебались в пределах 10–16 м (площадка № 5) и 16–24 м (площадка № 6). Общий объем собранного материала составил 20 проб макрозообентоса и 40 проб зоопланктона.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По литературным данным, в составе планктонной фауны Сегозера насчитывается 107 таксонов, из них *Calanoida* – 5, *Cyclopoida* – 17, *Cladocera* – 56, *Rotifera* – 29 [3]. Как отмечает автор, зарегулирование стока Сегозера и превращение его в водохранилище не повлекло за собой заметных изменений видового состава и количественных показателей зоопланктона. В Сегозере, как и в других глубоководных водоемах, выделяют два комплекса планктонной фауны: холодноводный (*Limnocalanus macrurus*, *Daphnia longiremis*) и умеренно-тепловодный, достигающий наибольшего развития летом (*Heterocope appendiculata*, *Eurytemora lacustris*, *Eudiaptomus gracilis*, *Thermocyclops oithonoides*, *Mesocyclops leuckarti*, *Cyclops scutifer*, *Daphnia cristata*, *Holopedium gibberum*, *Polyphemus pediculus*). По уровню количественного развития зоопланктона Сегозеро относят к водоемам олиготрофного типа, в июле – августе 1977 года средние показатели составляли 5,7 тыс. экз./м<sup>3</sup> и 0,28 г/м<sup>3</sup> при доминировании ветвистоусых ракообразных [5]. В то же время в водоеме имеются участки (заливы, прибрежная зона), где численность зоопланктона может составлять 26,9–44,7 тыс. экз./м<sup>3</sup> при биомассе 1,0–2,3 г/м<sup>3</sup>. В осенний период (октябрь 1991 года) численность и биомасса зоопланктона колебались в пределах 3,1–6,9 тыс. экз./м<sup>3</sup> и 0,085–0,190 г/м<sup>3</sup> соответственно при преобладании веслоногих ракообразных *Eudiaptomus* и *Cyclops* [3].



Карта-схема района отбора проб:  
1 – рыбоводный участок № 5; 2 – рыбоводный участок № 6

Как известно, видовой состав зоопланктона является одним из консервативных признаков и может сохранять относительную стабильность в условиях эвтрофирования в течение десятилетий [4]. Анализ полученных нами материалов свидетельствует в пользу этой точки зрения. Список организмов зоопланктона, отмеченных в летне-осенний период 2013 года, насчитывает 27 видов (табл. 1). Из них *Rotifera* – 6 видов, *Cladocera* – 12, *Calaniformes* – 4 и *Cyclopiformes* – 5. Видовой состав зоопланктона в районе исследо-

Таблица 1  
Видовой состав зоопланктона оз. Сегозера

	Вид	28–30. 06.2013	03– 05.10. 2013
	<b>Класс <i>Eurotopatoria</i> Коловратки</b>		
1.	<i>Polyarthra dolichoptera</i> (Idelson, 1925)	–	+
2.	<i>Bipalpus hudsoni</i> (Imhof, 1891)	+	–
3.	<i>Asplanchna priodonta</i> (Gosse, 1850)	+	+
4.	<i>Kellicottia longispina</i> (Kellicott, 1879)	+	+
5.	<i>Conochilus unicornis</i> (Rousselet, 1892)	+	+
6.	<i>Keratella cochlearis</i> (Gosse, 1851)	–	+
	Класс <i>Crustacea</i> Ракообразные		
	Надотряд <i>Copepoda</i> Веслоногие раки		
	Отряд <i>Calaniformes</i>		
7.	<i>Limnocalanus macrurus</i> (Sars, 1863)	+	+
8.	<i>Heterocope appendiculata</i> (Sars, 1863)	+	–
9.	<i>Eudiaptomus gracilis</i> (Sars, 1863)	+	+
10.	<i>Eurytemora lacustris</i> (Poppe, 1887)	+	+
	Отряд <i>Cyclopiformes</i>		
11.	<i>Cyclops strenuus</i> (Fischer, 1851)	+	–
12.	<i>C. scutifer</i> (Sars, 1863)	+	+
13.	<i>Thermocyclops oithonoides</i> (Sars, 1863)	+	+
14.	<i>Mesocyclops leuckarti</i> (Claus, 1857)	+	–
15.	<i>Megacyclops viridis</i> (Jurine, 1820)	+	–
	Надотряд <i>Cladocera</i> Ветвистоусые раки		
16.	<i>Limnospina frontosa</i> (Sars, 1862)	+	–
17.	<i>Holopedium gibberum</i> (Zaddach, 1855)	+	–
18.	<i>Daphnia cristata</i> (Sars, 1862)	+	+
19.	<i>Chydorus sphaericus</i> (O. F. Muller, 1785)	+	+
20.	<i>Acroporus harpae</i> (Baird, 1834)	+	–
21.	<i>Eurycercus lamellatus</i> (O. F. Muller, 1776)	+	+
22.	<i>Bosmina (B.) longirostris</i> (Muller, 1785)	+	+
23.	<i>B. (Eubosmina) coregoni</i> (Baird, 1857)	+	+
24.	<i>B. (E.) cf. kessleri</i> (Uljanin, 1874)	+	–
25.	<i>Polyphemus pediculus</i> (L., 1761)	+	–
26.	<i>Bythotrephes brevimanus</i> (Lilljeborg, 1901)	+	–
27.	<i>Leptodora kindtii</i> (Focke, 1844)	+	–
	Всего видов	25	15

ваний (рыбоводные площадки № 5 и № 6) является типичным для пелагической части Сегозера, характеризующейся большими глубинами.

Среди коловраток наибольшей численности достигают *Asplanchna priodonta*, *Kellicottia longispina* и *Conochilus unicornis*, которые являются обычными представителями ротаторного северного планктонного комплекса. Основу пелагического планктонного комплекса ракообразных составляют широко распространенные в больших озерах Карелии представители северной фауны (*Eudiaptomus gracilis*, *Thermocyclops oithonoides*, *Daphnia cristata*, *Holopedium gibberum*, *Bosmina coregoni*), а также ряд эвритопных организмов, отличающихся широкой экологической валентностью и гетеротопностью (*Mesocyclops leuckarti*, *Chydorus sphaericus*, *Bosmina longirostris*). В придонных слоях воды отмечены мейобентические виды *Megacyclops viridis* и *Eurycercus lamellatus*. Организмы – индикаторы повышенной сапробности в пробах отсутствуют.

Количественные показатели зоопланктона по группам за летне-осенний период приведены в табл. 2.

В вегетационный летний период на обоих исследованных участках основа биомассы создается ветвистоусыми ракообразными *Cladocera* (около 60 %), главным образом *H. gibberum* и видами рр. *Bosmina* и *Daphnia*. Коловратки *Rotifera* являются субдоминантами в образовании биомассы зоопланктона, их средний удельный вес составляет 22 % в основном за счет развития *A. priodonta*. На долю циклопид (*M. leuckarti*, *Th. oithonoides*, *Cyclops scutifer*, *C. strenuus*) и калянид (*Eudiaptomus gracilis*, *Heterocope appendiculata*) приходится 15 % и 8 % соответственно. По численности доминируют ветвистоусые ракообразные (площадка № 5) и коловратки (площадка № 6). Индекс видового разнообразия, рассчитанный по биомассе, составляет 2,4 бит/экз. для площадки № 5 и 2,2 бит/экз. для площадки № 6. Индекс сапробности Пантле – Букка, рассчитанный по биомассе, составляет 1,47 для площадки № 5 (олигосапробная зона) и 1,41 для площадки № 6 (олигосапробная зона). По уровню количественных характеристик планктонной фауны в вегетационный период 2013 года участок площадки № 5 можно отнести к  $\alpha$ -мезотрофному типу с общей биомассой от 1 до 2 г/м<sup>3</sup>, участок площадки № 6 – к олиготрофному с общей биомассой до 1 г/м<sup>3</sup> [2].

Для осеннего сезона характерно обеднение видового состава (до 6–8 видов) и значительное снижение количественных показателей зоопланктона. В первую очередь из планктона выпадает большинство видов *Cladocera*. Удельный вес веслоногих ракообразных, встречающихся круглогодично (циклопиды и каляниды), возрастает до 52 %. Доля коловраток в образовании биомассы уменьшается и составляет около 9 %. Индекс видового разнообразия в осенние месяцы

Таблица 2

Количественные показатели зоопланктона оз. Сегозера в 2013 году (N – численность, тыс. экз./м<sup>3</sup>, B – биомасса, г/м<sup>3</sup>)

Группы	Месяц	Рыбоводная площадка № 5				Рыбоводная площадка № 6			
		N	%	B	%	N	%	B	%
<i>Rotifera</i>	июнь	6,13	27	0,179	14	8,28	41	0,255	30
	октябрь	0,53	22	0,001	2	0,30	28	0,004	16
<i>Cladocera</i>	июнь	7,97	35	0,827	66	5,05	25	0,424	51
	октябрь	0,27	11	0,009	13	0,12	11	0,005	21
<i>Cyclopiformes</i>	июнь	3,81	17	0,121	10	2,33	12	0,076	9
	октябрь	0,76	31	0,017	27	0,42	40	0,008	32
<i>Calaniformes</i>	июнь	2,19	9	0,112	9	1,62	8	0,078	9
	октябрь	0,72	29	0,036	56	0,12	11	0,007	30
<i>Nauplii</i>	июнь	2,83	12	0,010	1	2,73	14	0,010	1
	октябрь	0,17	7	0,001	2	0,10	10	0,001	1
Всего	июнь	22,93	100	1,249	100	20,01	100	0,843	100
	октябрь	2,45	100	0,064	100	1,06	100	0,025	100

закономерно снижается до 1,4–1,5 бит/экз. В целом зоопланктон приобретает типичные зимние черты – ограниченный видовой состав и низкие количественные показатели, что хорошо согласуется с литературными данными. Явление осеннего повышения биомассы зоопланктона, которое встречается на водоемах, испытывающих значительную биогенную нагрузку, нами не отмечено.

Сведения о зообентосе Сегозера опубликованы в ряде источников [5], [8]. В составе донной фауны были отмечены *Nematoda*, *Oligochaeta*, *Hirudinea*, *Insecta* (*Trichoptera*, *Ephemeroptera*, *Plecoptera*, *Megaloptera*, *Diptera*), *Hydrachnella*, *Gastropoda*, *Bivalvia* и комплекс нектобентических ледниковых реликтовых ракообразных (*Mysis relicta*, *Pallasiola* (*Pallasea*) *quadrispinosa*, *Monoporeia* (*Pontoporeia*) *affinis* и *Gammaracanthus lacustris*) – всего 63 таксона различного ранга. Наиболее разнообразна и обильна донная фауна прибрежного мелководья в зарослях водной растительности – до 1,67 г/м<sup>2</sup>, очень бедна в открытых участках водоема – менее 0,13 г/м<sup>2</sup>.

Средние количественные показатели зообентоса за период исследований приведены в табл. 3.

Зообентос озера характеризуется очень низкими количественными показателями. В конце июня при температуре придонного слоя воды

4–6 °С по численности и биомассе доминировали личинки хирономид (78 % и 58 % соответственно). Доля групп остальных бентосных организмов была в этот период незначительной. В пробах отмечались единичные особи *Ceratopogonidae*, *Bivalvia*, *Ostracoda*.

По сравнению с результатами изучения водоема в конце июня, в осенний период при температуре воды 3–4 °С в пробах в изобилии встречались нематоды, амфиподы не были выявлены.

В целом видовой состав зообентоса оз. Сегозера характерен для холодноводных олиготрофных водоемов бореальной зоны и представлен северными и эвритопными видами. Главную роль в составе донной фауны исследуемого водоема в летне-осенний период играют личинки хирономид. По классификации С. П. Китаева [2], Сегозеро относится к группе гаммаракантовых водоемов. В пробах были отмечены реликтовые оксифильные холодолюбивые олигосапробные ракообразные: понтопорей (*Pontoporeia affinis* Lindstrom) и мизиды (*Mysis relicta* Loven), что позволяет характеризовать исследованные участки как чистые.

Грунты на обоих исследованных участках глинисто-песчаные, типичные для пелагиали Сегозера. Отходы форелевого производства (остатки корма, фекалии) в пробах не отмечались.

Таблица 3

Средние количественные показатели зообентоса оз. Сегозера в 2013 году

Группы	Месяц	Численность, экз./м <sup>2</sup>	%	Биомасса, г/м <sup>2</sup>	%
<i>Chironomidae</i>	июнь	120	78	0,07	58
	октябрь	36	43	0,10	63
<i>Amphipoda</i>	июнь	8	5	0,01	8
<i>Nematoda</i>	октябрь	28	33	0,01	6
<i>Oligochaeta</i>	июнь	14	9	0,03	25
	октябрь	12	14	0,01	6
Прочие	июнь	12	8	0,01	9
	октябрь	8	10	0,04	25
Всего	июнь	154	100	0,12	100
	октябрь	84	100	0,16	100



Средняя биомасса макрозообентоса за период исследований на площадке № 5 составила 0,15 г/м<sup>2</sup> при численности 135 экз./м<sup>2</sup>, на площадке № 6 – 0,08 г/м<sup>2</sup> и 97 экз./м<sup>2</sup> соответственно.

## ВЫВОДЫ

Результаты исследований подтверждают стабильность видового состава и структуры сообщества зоопланктона оз. Сегозера на протяжении последних 40 лет. Доминирующий комплекс в пелагиали водоема складывается из видов-индикаторов олиго- и олигобетамезосапробных условий. По уровню количественного развития и особенностям видового состава зоопланктона в летне-

осенний период 2013 года исследованные участки Сегозера можно отнести к α-мезотрофному (площадка № 5) и олиготрофному типу (площадка № 6). Индексы сапробности составили 1,47 (площадка № 5) и 1,41 (площадка № 6), что соответствует классу олигосапробных водных объектов.

По уровню количественного развития и качественному составу макрозообентоса исследованные участки оз. Сегозера по шкале трофности можно характеризовать как олиготрофные [2]. Сравнение полученных нами результатов с литературными данными не выявило отклонений в видовом составе и количественных показателях бентофауны Сегозера.

\* Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ИБ КарНЦ РАН при финансовой поддержке программ ОБН РАН «Биологические ресурсы России: динамика в условиях глобальных климатических и антропогенных воздействий», Президиума РАН «Живая природа: современное состояние и проблемы развития», Минобрнауки РФ (ИШ-1410.2014.4; Соглашение 8101), гранта РФФИ № 12–04–00022 а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ильмаст Н. В., Китаев С. П., Кучко Я. А., Павловский С. П. Гидроэкология разнотипных озер южной Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 92 с.
- Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 395 с.
- Куликова Т. П. Зоопланктон водных объектов бассейна Белого моря. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 325 с.
- Кучко Я. А., Кучко Т. Ю. Динамика сообщества зоопланктона озера Тарасозеро в условиях длительного антропогенного загрязнения // Принципы экологии. 2014. Т. 3. № 3. С. 19–29.
- Озера Карелии: Справочник / Под ред. Н. Н. Филатова и В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
- Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1. Зоопланктон / Под ред. В. Р. Алексеева, С. Я. Цалолыхина. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 495 с.
- Практическая гидробиология. Пресноводные экосистемы / Под ред. В. Д. Федорова и В. И. Капкова. М.: ПИМ, 2006. 367 с.
- Рябинкин А. В., Кухарев В. И. Макрозообентос. Флора и фауна водных экосистем: характеристика и тенденции изменения // Инвентаризация и изучение биологического разнообразия на территории центральной Карелии (оперативно-информационные материалы). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2001. С. 189–197.

**Kuchko Ya. A.**, Institute of Biology, Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

**Savosin E. S.**, Institute of Biology, Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

**Kuchko T. Yu.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

## PRESENT CONDITION OF ZOOPLANKTON AND MACROZOOBENTHOS COMMUNITIES OF LAKE SEGOZERO IN AREAS OF TROUT FARM LOCATION

Our data analysis has shown that, according to the quantitative development of planktonic fauna in summer and autumn of 2013, the sites of the studied Segozero Lake can be classified as α-mesotrophic (site number 5) and oligotrophic types (site number 6). Saprobity indices amounted to 1,47 (site number 5) and 1,41 (site number 6), which corresponds to the class of oligosaprobic water bodies (pure natural water). According to the level of macrozoobenthos, quantitative development of investigated areas of Segozero Lake can be characterized as oligotrophic ones.

Key words: zooplankton, zoobenthos, abundance, biomass, freshwater ecosystem

## REFERENCES

- Il'mast N. V., Kitaev S. P., Kuchko Ya. A., Kuchko T. Yu., Pavlovskiy S. P. *Gidroekologiya raznotipnykh ozer yuzhnoy Karelii* [Hydroecology of different lakes of South Karelia]. Petrozavodsk, KarNTs RAN Publ., 2008. 92 p.
- Kitaev S. P. *Osnovy limnologii dlya gidrobiologov i ikhtiologov* [Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists]. Petrozavodsk, KarNTs RAN Publ., 2007. 395 p.
- Kulikova T. P. *Zooplankton vodnykh ob'ektov basseyna Belogo morya* [Zooplankton of the water bodies of the White Sea basin]. Petrozavodsk, KarNTs RAN Publ., 2010. 325 p.
- Kuchko Ya. A., Kuchko T. Yu. Dynamics of zooplankton community of Lake Tarasozero in conditions of the long-term anthropogenic pollution [Dinamika soobshchestva zooplanktona ozera Tarasozero v usloviyakh dlitel'nogo antropogenogo zagryazneniya]. *Printsipy ekologii*. 2014. Vol. 3. № 3. P. 19–29.
- Ozera Karelii: Spravochnik* [Lakes of Karelia: Handbook] / Pod red. N. N. Filatova i V. I. Kuhareva. Petrozavodsk, KarNTs RAN Publ., 2013. 464 p.
- Opredelitel' zooplanktona i zoobentosa presnykh vod Evropeyskoy Rossii. T. 1. Zooplankton* [Determinant of zooplankton and zoobenthos in freshwaters of European Russia] / Pod red. V. R. Alekseeva, S. Ya. Tsolikhina. Moscow, Tovarihschestvo nauchnykh izdaniy KMK Publ., 2010. 495 p.
- Prakticheskaya gidrobiologiya. Presnovodnye ekosistemy* [Applied Hydrobiology. Freshwater ecosystems] / Pod red. V. D. Fedorova i V. I. Kapkova. Moscow, PIM Publ., 2006. 367 p.
- Ryabinkin A. V., Kухарев V. I. Macrozoobenthos. Flora and fauna of aquatic ecosystems: characteristics and trends [Makrozoobentos. Flora i fauna vodnykh ekosistem: kharakteristika i tendentsii izmeneniya]. *Inventarizatsiya i izuchenie biologicheskogo raznoobraziya na territorii tsentral'noy Karelii (operativno-informatsionnye materialy)*. Petrozavodsk, Karel'skiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2001. P. 189–197.

**АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ СЕРГЕЕВ**

кандидат медицинских наук, заведующий неврологическим отделением, Республиканская больница им. В. А. Баранова (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*a.sergeev@bk.ru*

**АЛЕКСАНДР АНИСИМОВИЧ СКОРОМЕЦ**

доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, заведующий кафедрой неврологии и нейрохирургии с клиникой, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)  
*a.skoromets@gmail.com*

**АНГЕЛИНА АЛЕКСАНДРОВНА СЕРГЕЕВА**

врач невролог-реабилитолог, госпиталь Суннаас (Несодден, Норвегия)  
*angelina.sergeeva@hotmail.com*

**АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ КОВАЛЕНКО**

главный государственный санитарный врач по Республике Карелия, руководитель Управления Роспотребнадзора по Республике Карелия (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*sanepid@karelia.ru*

**ГАЛИНА ЕВГЕНЬЕВНА БОНДАРЕНКО**

заместитель главного государственного санитарного врача по Республике Карелия, руководителя Управления Роспотребнадзора по Республике Карелия (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*sanepid@karelia.ru*

## **КЛЕЩЕВОЙ ЭНЦЕФАЛИТ И ЛАЙМ-БОРРЕЛИОЗ В РЕСПУБЛИКЕ КАРЕЛИЯ (СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ КЛИНИКИ И ЭПИДЕМИОЛОГИИ)**

Представлены результаты 16-летнего изучения клещевых нейроинфекций в Республике Карелия: 744 случая заболевания клещевым энцефалитом и 698 пациентов с Лайм-боррелиозом. Пик заболеваемости пришелся на 2003–2004 годы. Показано, что в острый период клещевого энцефалита (три основных клинических формы) наиболее часто встречается асептический менингит, при Лайм-боррелиозе в ранний период доминировали признаки поражения периферической нервной системы. В настоящее время заболеваемость по-прежнему превышает общероссийскую в разы, что делает актуальным продолжение поисков эффективных методов диагностики, лечения и особенно профилактики этих заболеваний.

Ключевые слова: клещевой энцефалит, Лайм-боррелиоз, асептический менингит, менингоградикулит

Последние два десятилетия многие регионы России [1], [2], [3] вновь сталкиваются с высокой заболеваемостью клещевым энцефалитом (КЭ), а также иксодовым клещевым боррелиозом (Лайм-боррелиоз – ЛБ). Значительная часть Республики Карелия (РК) является эндемичной по КЭ и ЛБ. Местное население и приезжие лица являются группой риска по возможности заражения этими наиболее распространенными клещевыми инфекциями на 11 территориях РК. Эндемичными являются южная и центральная части республики, южнее 63° с. ш., хотя в последние годы расширяется ареал обитания клещей к северу [5], [6]. Среднемноголетний показатель заболеваемости КЭ за период с 1998 по 2013 год составил 7,2 на 100 тысяч населения, зарегистрировано 744 случая. Заболеваемость ЛБ в среднем составила 6,8 на 100 тысяч, всего – 698 случаев. Максимальный показатель КЭ – 15,3 на 100 ты-

сяч населения – был зарегистрирован в 2003 году, ЛБ – 11,3 в 2004 году. Первые пострадавшие от нападения клещей обратились за медицинской помощью в первой декаде апреля, последние – в третьей декаде октября. Длительность периода нападения клещей составила от 133 до 195 дней. Пик активности клещей приходится на конец мая – начало июня. До 2010 года ежегодно от 4 до 6 тысяч человек обращались в лечебно-профилактические учреждения РК по поводу присасывания клещей. В период 2011–2013 годов отмечено снижение количества обратившихся в 1,5 раза: в 2011 году – 4363 человека, 2012 – 3137, 2013 – 2950 человек. Из них ежегодно экстренную профилактику получили до 30% взрослых и более 65% детей и подростков. Максимальная вирусофорность клещей, инфицирование их возбудителями ЛБ была отмечена ежегодно в мае – июне. В РК, помимо основного пути зара-

жения КЭ и ЛБ – трансмиссивного (более 89%), регистрируются случаи заболевания, возникшие вследствие употребления непастеризованного молока коз и коров, а также приготовленных из них продуктов, не прошедших необходимую термическую обработку.

КЭ у наблюдаемых пациентов протекал в трех клинических формах: асептический менингит (у 319 пациентов – 42,8%), лихорадочная форма (у 307 человек – 41,3%) и очаговая неврологическая форма (у 118 человек – 15,9%), включавшая основные неврологические синдромы – менингоэнцефалитический (МЭ), менингоэнцефаломиелитический (МЭМ), полиомиелитический (ПМ) и менингоэнцефаломиелополирадикулонейропатический (МЭМПРН), так называемая тотальная форма. Двухволновое течение заболевания наблюдали в 73 случаях (9,8%). Специфичные IgM и IgG в сыворотке были выявлены рутинными серологическими тестами. Лабораторные исследования ликвора обнаружили плеоцитоз (в среднем цитоз составил 119/μl) и нарушение гематоэнцефалического барьера (общий белок > 630 мг/л) у всех пациентов с асептическим менингитом и очаговой неврологической формой КЭ. Среди дополнительных методов исследования только результаты ЭНМГ (признаки поражения альфамотонейрона, аксональной сенсорно-моторной дисфункции), КТ и МРТ (выраженная гидроцефалия, очаги поражения в белом веществе, таламусе и подкорковых ганглиях) у больных с очаговыми формами коррелировали с исходами заболевания. В целом у детей до 15 лет наблюдали более благоприятное течение заболевания по сравнению со взрослыми. Показатель смертности составил менее 1,1% (умерли восемь взрослых пациентов с тяжелыми очаговыми формами). У 68 пациентов (9,1%) наблюдали умеренный или тяжелый остаточный неврологический дефект, но чаще

превалировали выраженный астеноневротический синдром, вегетативная дистония (N = 93 или 12,5%).

Клещевая микст-инфекция (КЭ + ЛБ) отмечена у 54 больных (7,2%). В большинстве случаев наблюдали сочетание менингеальной формы КЭ и эритематозной формы ЛБ.

Вовлечение нервной системы наблюдали у 24,9% пациентов с боррелиозной инфекцией (n = 174). При этом в ранний период заболевания доминировали признаки поражения периферической нервной системы, клиника менингоэнцефалита.

Разница в показателях заболеваемости населения региона КЭ и ЛБ в первые годы нашего исследования (1998–2004 годы), возможно, объясняется разной степенью инфицированности переносчиков соответствующими возбудителями, а также гиподиагностикой ЛБ [4], [7]. Использование в последующие годы инновационных методов исследования, включая полимеразную цепную реакцию и выявление олигоклонального IgG в сыворотке крови и ликворе, позволило оптимизировать диагностический процесс.

Несмотря на значительную профилактическую работу (акарицидная обработка местности, информирование населения, профилактические прививки при КЭ, неспецифическая профилактика ЛБ), показатели заболеваемости основными клещевыми инфекциями на эндемичных территориях РК по-прежнему превышают аналогичные по Российской Федерации в несколько раз (по КЭ в 2,4 раза, по ЛБ – 2 раза). В этой связи необходимо настоятельно рекомендовать проведение вакцинации (при КЭ) и экстренной профилактики данных инфекций всем лицам, живущим, работающим или путешествующим в эндемичные районы РК.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иерусалимский А. П. Клещевой энцефалит. Новосибирск: Государственная медицинская академия МЗ РФ, 2001. 360 с.
2. Иерусалимский А. П. Клещевые инфекции с позиции клинициста-невролога // Журнал неврологии и психиатрии. 2006. Т. 106. № 2. С. 71–74.
3. Лобзин Ю. В., Усков А. Н. Иксодовые клещевые боррелиозы в Северо-Западном регионе России // Медицинский академический журнал. 2002. Т. 2. № 3. С. 104–114.
4. Сандугей А. В., Хрусталева О. А., Баранова Н. С., Низовцева Л. А., Пахомова Ю. А. Трудности клинической диагностики Лайм-боррелиоза // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2011. № 8 (121). С. 42–46.
5. Субботина Н. С., Петрова А. В. Клинико-диагностические особенности клещевого энцефалита в Северо-Западном регионе РФ // Нейроиммунология. 2005. Т. III. № 2. С. 18–19.
6. Субботина Н. С., Петрова А. В. Клещевой энцефалит (этиология, патогенез, эпидемиология, клиника, диагностика, лечение, профилактика): Учебно-метод. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. 92 с.
7. Сергеев А. М., Скормец А. А., Сергеева А. А., Коваленко А. И., Бондаренко Г. Е. Клещевые нейроинфекции в Республике Карелия // Нейроиммунология. 2005. Т. III. № 2. С. 18.

**Sergeev A. M.**, Republican Hospital of Karelia (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Skoromets A. A.**, First St. Petersburg State Medical University (St. Petersburg, Russian Federation)  
**Sergeeva A. A.**, Sunnaas Hospital (Nesodden, Norway)  
**Kovalenko A. I.**, Department of the Federal Oversight Service (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Bondarenko G. E.**, Department of the Federal Oversight Service (Petrozavodsk, Russian Federation)

### TICK-BORNE ENCEPHALITIS AND LYME-BORRELIOSIS IN REPUBLIC OF KARELIA (MODERN CLINICAL AND EPIDEMIOLOGICAL ASPECTS)

744 patients with tick-borne encephalitis (TBE) and 698 patients with Lyme-borreliosis (LB) during a period of 16 years (1998–2013) were analyzed. The highest incidence of these infections was registered in 2003–2004. Three TBE clinical forms (aseptic meningitis in most cases) were revealed in the acute period. The peripheral nervous system often suffered from LB early in the course of the disease. In view of the high incidence of the disease, the vaccination against TBE and emergency prophylactic treatment of these infections is recommended for all subjects living, working, and travelling in endemic districts of the Republic of Karelia.

Key words: tick-borne encephalitis, Lyme-borreliosis, aseptic meningitis, meningoradiculitis

#### REFERENCES

1. Ierusalimskiy A. P. *Kleshchevoy entsefalit* [Tick-borne encephalitis]. Novosibirsk, State Medical Academy Publ., 2001. 360 p.
2. Ierusalimskiy A. P. Tick infection as seen by clinical neurologist [Kleshchevye infektsii s pozitsii klinitsista-nevrologa]. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii*. 2006. Vol. 106. № 2. P. 71–74.
3. Lobzin Yu. V., Uskov A. N. Ixodes tick-borne borreliosis in North-West region of Russia [Iksodovye kleshchevye borreliozy v Severo-Zapadnom regione Rossii]. *Meditinskiy akademicheskij zhurnal*. 2002. Vol. 2. № 3. P. 104–114.
4. Sandugey A. V., Khrustalev O. A., Baranova N. S., Nizovtseva L. A., Pakhomova Yu. A. Difficult diagnosis: Lyme-borreliosis, characteristic features of diagnostics [Trudnosti klinicheskoy diagnostiki Laym-borreliozia]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences]. 2011. № 8 (121). P. 42–46.
5. Subbotina N. S., Petrova A. V. Clinical and diagnostic features of tick-borne encephalitis in North-West region of Russian Federation [Kliniko-diagnosticheskie osobennosti kleshchevogo entsefalita v Severo-Zapadnom regione RF]. *Neyroimmunologiya*. 2005. Vol. III. № 2. P. 18–19.
6. Subbotina N. S., Petrova A. V. *Kleshchevoy entsefalit (etiologiya, epidemiologiya, klinika, diagnostika, lechenie, profilaktika): Uchebno-metod. posobie* [Tick-borne encephalitis (etiology, pathogenesis, epidemiology, clinical aspect, diagnosis, treatment, prophylaxis): student training manual]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2007. 92 p.
7. Sergeev A. M., Skoromets A. A., Sergeeva A. A., Kovalenko A. I., Bondarenko G. E. Tick-borne neuroinfections in Republic of Karelia [Kleshchevye neyroinfektsii v Respublike Karelia]. *Neyroimmunologiya*. 2005. Vol. III. № 2. P. 18.

Поступила в редакцию 10.04.2015

**ВАСИЛИЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ ВИНОГРАДОВ**  
аспирант кафедры общей и факультетской хирургии Медицинского института, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*ortoped.ivanovo@rambler.ru*

**ИВАН ПЕТРОВИЧ ДУДАНОВ**  
доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой общей и факультетской хирургии Медицинского института, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*ipdudanov@gmail.com*

## ИММОБИЛИЗАЦИЯ АКТИВАТОРА ПЛАЗМИНОГЕНА В ПОРИСТУЮ МАТРИЦУ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НОВЫХ ТРОМБОЛИТИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ

Основным препятствием при разработке новых тромболитических систем на основе ферментов является их низкая стабильность и короткий период полувыведения (не превышающий, как правило, 2–6 мин.), который требует введения их в больших дозах для достижения необходимого эффекта и, как следствие, неизбежно приводит к значительным геморрагическим осложнениям. В данной работе мы представляем новый подход к решению этой проблемы путем разработки нового семейства парентеральных композитов для тромболитического действия. Имобилизация активатора плазминогена в пористую матрицу на основе оксида алюминия значительно увеличивает стабильность тромболитического фермента, усиливает его термическую стабильность и маскирует от иммунной системы организма.

Ключевые слова: оксид алюминия, золь-гель синтез, тромболитический препарат, активатор плазминогена

### ВВЕДЕНИЕ

Тромбоз является симптомом перекрытия русла кровяного потока вследствие образования тромба в кровеносном сосуде. Тромболитическая терапия, которая используется для растворения сгустков крови, в основном имеет дело с введением соответствующих ферментов, таких как стрептокиназа, урокиназа и активатор плазминогена тканевого типа (ТАП) [15]. Тем не менее эти тромболитические препараты неизбежно ведут к риску геморрагических осложнений из-за их неспецифической активации [5], что существенно ограничивает их реальное применение в терапии [8]. Высокая стоимость и быстрая потеря активности тромболитических ферментов стимулируют разработку новых видов систем, где фермент будет иммобилизован в биологически инертную матрицу, обеспечивающую высокую стабильность, подход субстрата и сохранение активности.

Ранее нами были разработаны методики золь-гель синтеза высокочистых нанокристаллических оксидов при помощи ультразвука [11], [14], предложена новая концепция для создания парентеральных золь-гель материалов на основе оксида алюминия [11]. В работе [13] были использованы три различных терапевтических фермента для изучения их стабильности в иммобилизованном состоянии. Результаты показывают, что введение ферментов в матрицу приводит к сдвигу температуры денатурации на 30–50 °С. Кроме того, было

установлено, что матрица оксида алюминия защищает не только от тепловой денатурации, но в определенном диапазоне температур существенно повышает активность ферментов с ростом температуры, тогда как свободные ферменты при этих температурах полностью теряют свою активность.

В данной работе мы показали, что тканевый активатор плазминогена может быть успешно иммобилизован в матрицу из оксида алюминия с сохранением тромболитической активности и повышением термической стабильности. Несмотря на то что поведение большинства ферментов уже исследовалось в золь-гель матрицах [1], [2], [12], активность тромболитических ферментов в иммобилизованном состоянии до сих пор не была исследована. Это обусловлено тем, что при проведении химической реакции реагирующему веществу необходимо пройти через сеть микропор (характерную для большинства золь-гель матриц) для достижения каталитического центра. В том случае когда один из реагентов – профермент (плазминоген), практически невозможно достичь прямой диффузии внутри пор размером менее 3 нм. Поэтому необходимо обеспечить доставку высокомолекулярной молекулы к каталитическому реакционному центру через поры большего диаметра. В данной работе получены композиты с бимодальной пористой структурой и изучены механизмы действия и активации иммобилизованных тромболитических ферментов *in vitro*.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕПАРАТЫ

Изопропоксид алюминия, плазминоген из бычьей плазмы крови (ПГ, кат. № P9156), фибриноген из бычьей плазмы крови (ФГ, кат. № F8630), тромбин из бычьей плазмы крови (ТБ, кат. № T7513), тканевый активатор плазминогена (ТАП, кат. № T5451) были получены от компании Sigma-Aldrich. Глициновый буфер (pH = 7,4) был получен из растворов глицина (0,05 M; Sigma-Aldrich) при добавлении определенного объема 1,0 M NaOH.

**Золь-гель синтез оксида алюминия.** Золь оксида алюминия получен по методике, изложенной в работе [11]: 2,2 г Al (C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>O)<sub>3</sub> добавили к 50 мл деионизированной воды при 90 °С. При этом образуется белый студенистый осадок. Перед обработкой ультразвуком осадок выдерживали при 90 °С и интенсивном перемешивании в течение 15 мин. для формирования наночастиц бемита и испарения изопропанола, образующегося в процессе гидролиза. Конечную суспензию подвергали ультразвуковой обработке в течение 2 ч. Спустя 2 ч. образовывался вязкий золь. Полученный золь охлаждали до комнатной температуры. Высушенная матрица имела площадь поверхности 153 м<sup>2</sup>/г, объем пор 0,097 см<sup>3</sup>/г и средний размер пор ~2,5 нм.

**Процедура иммобилизации ТАП в оксид алюминия.** Для иммобилизации ТАП смесь, состоящую из 50 мкл буферного раствора глицин-NaOH (pH 7,4) и 150 мкл свежеприготовленного золя оксида алюминия, помещали в кювету, а затем добавляли 20 мкл ТАП (500 U/мл). Через десять минут золь помещали в вакуумный эксикатор при комнатной температуре на 24 ч. Для удаления адсорбированных белков ТАП@оксид алюминия был промыт внутри конечной полистирольной кюветы раствором глицина объемом 1,0 мл (pH 7,4). Полная иммобилизация фермента подтверждалась отсутствием активности промывочного раствора.

**Ферментативная активность.** После промывки 1,0 мл раствора глицина (pH 7,4) биоактивный гибрид оставляли на инкубацию при 37 °С в течение 30 мин. Затем промывочный раствор был заменен смесью 1,0 мл раствора бычьего фибриногена с концентрацией 5 мг/мл и 0,5 мл раствора бычьего плазминогена (1,2 U/мл) с последующим добавлением 0,5 мл раствора тромбина (50 U/мл) в глициновом буфере (pH 7,4). После образования сгустка ферментативную активность измеряли спектроскопически путем поглощения при длине волны 340 нм и температуре 37 °С. Соответствующая кривая образования и лизиса сгустка (КОЛС) показана на рис. 1. Растущая часть кривой соответствует образованию фибринового сгустка, а нисходящая – его лизису. Промывочный раствор также тестировали на ферментативную активность пу-

тем помещения 500 мкл раствора в кювету при последующем введении тромбообразующего раствора. Чтобы скомпенсировать реакционную способность иммобилизованных ферментов, концентрация свободных ферментов была снижена в 10 раз. Кинетические кривые были интерпретированы в соответствии с указаниями работы [10], при этом в качестве стандарта принималась активность свободного ТАП.

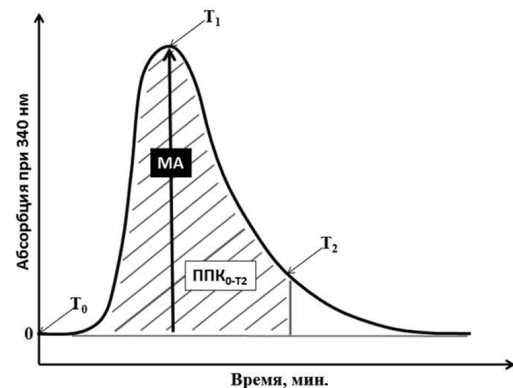


Рис. 1. Кривая образования и лизиса сгустка. Измерения включают максимальную амплитуду (МА), время до максимальной абсорбции (T<sub>1</sub>), завершение первого этапа снижения оптической плотности (T<sub>2</sub>) и площадь под кривой (ППК), из которой можно рассчитать индекс коагуляции (ИК) и фибринолитический коэффициент (ФК)

Кривая образуется во время анализа, начиная при нулевых значениях показателя поглощения (см. рис. 1) с последующим постепенным повышением оптической плотности до точки МА (достигается при T<sub>1</sub>). Первая стадия снижения оптической плотности заканчивается при T<sub>2</sub>, в точке, в которой наклон снижения оптической плотности меняется на 10 МОП/мин и завершается при возвращении оптической плотности к нулевой отметке. Параметры МА, T<sub>1</sub> и T<sub>2</sub> получают непосредственно из данных по оптической плотности. Используя ППК на протяжении начального периода анализа до T<sub>2</sub>, можно рассчитать ИК, который связывает ППК образца и стандарта (активность свободного ТАП взята в качестве стандарта), а именно:

$$ИК = \frac{(ППК_{0-T_2})_{образец}}{(ППК_{0-T_2})_{стандарт}} \times 100.$$

Также были измерены ФК. Они могут быть вычислены по соотношению времени завершения первого этапа снижения оптической плотности (T<sub>2</sub>) и времени до достижения максимального поглощения (T<sub>1</sub>) для соответствующего образца по сравнению со стандартом (с поправкой на различие в максимальном поглощении) следующим образом:

$$ФК = \frac{T_2 / T_{1образец}}{T_2 / T_{1стандарт}} \times \frac{МА_{стандарт}}{МА_{образец}} \times 100.$$

В данной работе анализ КОЛС иммобилизованного ТАП анализировали по МА,  $T_1$ ,  $T_2$ , ИК и ФК с использованием указанных выше расчетов.

**Стабильность композитного материала в модельной системе крови.** Для проверки стабильности синтезированного композита в реальной системе крови был использован концентрированный раствор Рингера. В растворе Рингера соотношения концентраций солей аналогично крови. Для этого пластиковые кюветы с композитом обрабатывались раствором Рингера и выдерживались при перемешивании в течение 30 дней. Активность иммобилизованного ТАП после испытания была сопоставлена с исходной активностью. Наблюдаемое снижение активности составило лишь 2,5%.

**Методика определения свойств.** Удельная площадь поверхности, объем пор и распределение пор по размерам определяли методом адсорбции-десорбции азота при 77 К (Quantachrome Nova 1200, серия E). Площади поверхности были рассчитаны с использованием уравнения БЭТ. Методом ВЖН были рассчитаны объемы пор и распределение пор по размерам. Распределение микропор по размерам рассчитывалось с использованием метода Дубинина – Астахова (ДА). Перед анализом образец дегазировали в течение 24 ч. при комнатной температуре. Кристаллическая фаза и кристалличность образцов были исследованы методом рентгеновской дифракции (Bruker D8 Advance) с использованием излучения Cu-K $\alpha$  с длиной волны  $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ , образцы сканировали по  $2\theta$  в диапазоне 4–75° со скоростью 0,5 градуса в минуту. Спектральный анализ ферментативной активности проводили с использованием спектрофотометра PG Instruments T80. При использовании сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, электронный микроскоп Magellan 400L сверхвысокого разрешения) конечную суспензию захваченного фермента наносили на кремниевую подложку и полностью высушивали в вакууме. Образцы для просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) были получены путем диспергирования небольшой пробы в этаноле с образованием гомогенной суспензии. Затем каплю суспензии наносили на медную сетку, покрытую углеродом, для анализа ПЭМ (FEI Tecnai G2 F20 при рабочем напряжении 200 кВ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Следует отметить, что разработанная методика получения нанокристаллического золя АЮОН в водном растворе при ультразвуковом облучении подразумевает использование почти нейтральных значений pH, которые являются комфортными для биомолекул и соответствуют диапазону, где может быть достигнута полная иммобилизация.

Среди шести кристаллических фаз оксида алюминия биосовместимой формой, применяемой в качестве адьюванта, является бемит/псевдобемит. Чтобы идентифицировать кристаллическую фазу, мы использовали метод рентгеновской дифракции. Положение максимумов на рентгенограмме как для индивидуальной матрицы, так и для композита с ТАП соответствует типичной структуре бемита. Анализ размера кристаллитов, проведенный с использованием уравнения Шерера, указывает на присутствие в полученных материалах кристаллитов со средним размером 3–4 нм.

Анализ удельной поверхности и пористости (методом адсорбции азота, с помощью уравнений БЭТ и ВЖН) был проведен в предположении типичной микро- и мезопористости образца (рис. 2). Для композита были получены следующие характеристики: площадь поверхности 175 м<sup>2</sup>/г, объем пор 0,116 см<sup>3</sup>/г, размер пор <4 нм с максимумом при 2,2 нм (по методу ДА). Следует предположить, что высвобождение фермента из матрицы оксида алюминия сильно зависит от размера белка и среднего размера пор матрицы. С этой целью опыт по высвобождению ТАП из матрицы оксида алюминия проводили в течение 30 дней в концентрированном растворе Рингера. Снижение активности было незначительным (рис. 3). Это связано с полной иммобилизацией фермента в матрицу на основе оксида алюминия удерживанием его в сетке микро- и мезопор.

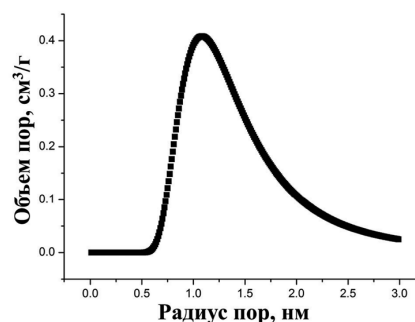


Рис. 2. Распределение пор композита по размерам, рассчитанное с использованием метода Дубинина – Астахова

Данные анализа КОЛС по методике [10]

	$T_1$ , мин.	$T_2$ , мин.	МА, ОП	ФК, %	ИК, %
Свободный ТАП (стандарт)	1,6	2,4	0,44	100	100
Промышленный раствор	3	0	0,47	0	0
Иммобилизованный ТАП	7,5	15,9	0,54	115	882
Иммобилизованный ТАП после раствора Рингера	7,6	16,9	0,55	119	883

Перед испытаниями были поставлены три вопроса: способен ли иммобилизованный фермент растворить тромб? Каковы параметры

лизиса по сравнению со свободным ферментом? Каков механизм тромболизиса при использовании гетерогенной системы?

Во-первых, на рис. 3 показано, что тромболизис с иммобилизованным ферментом возможен. Данные фибринолитической активности представлены в таблице. Из рис. 3 видно, что время тромбообразования после добавления тромбина составляет около 2 мин. Если тромболизис со свободным ферментом начинается сразу после образования сгустка при достижении максимального поглощения, то промывочный раствор (см. рис. 3) показывает лишь незначительную активность, сравнимую с неферментативным поведением.

Добавление фермента в матрицу приводит к ингибированию фибринолизиса (см. рис. 3). Наблюдается 4,7-кратное ( $T_1$ ) увеличение времени сохранения максимального поглощения. Эта величина характеризует процесс накопления активного плазмينا, поскольку лизис сгустка начинается только после того, как концентрация активного фермента достигла определенного значения [6]. Индекс коагуляции также превышает нормальное значение в 8,8 раза. Таким образом, уменьшение скорости активации плазминогена обусловлено диффузией плазминогена через пористую структуру матрицы для достижения каталитических реакционных центров, способных к формированию активаторного комплекса, который постепенно образуется в ходе реакции. Это также подтверждается значительным повышением ФК (на 15% больше, чем свободный ТАП), что объясняется как уменьшением скорости образования комплекса ТАП – плазминоген, так и снижением количества активированного плазмينا. Возможно, в этот период процесс формирования активированного плазминогена начинает ограничиваться количеством функционально активного ТАП и диффузией плазминогена к каталитическим центрам. Необходимо отметить, что в ходе испытания композита в концентрированном растворе Рингера активность практически не изменялась. После 30 дней испытаний активность иммобилизованного ТАП снизилась по сравнению с начальным состоянием лишь на 2,5%.

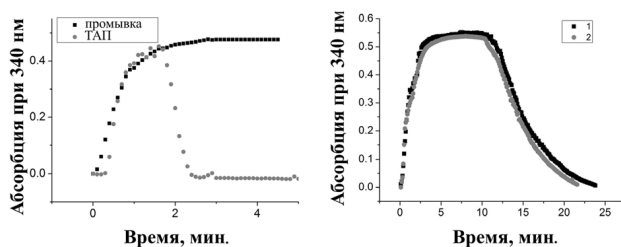


Рис. 3. КОЛС свободного ТАП и промывочного раствора по сравнению с иммобилизованным ТАП (1 – после, 2 – до опыта в растворе Рингера)

Принимая во внимание то, что размер пор для композита составляет около 2 нм и эта величина обеспечивает необходимые условия для захвата фермента внутрь пористой матрицы бемита, можно предположить, что обеспечивать доставку крупных молекул плазминогена к активным центрам фермента будет крайне сложно. Тем не менее наблюдаемая активность иммобилизованного фермента указывает на наличие пор бимодального типа. Чтобы убедиться в этом, образец был исследован методами СЭМ и ПЭМ (рис. 4).

По результатам микроскопии видно, что образец состоит из бемитовых стержней размером около  $2 \times 12$  нм, которые довольно плотно упакованы. В самом деле размер пор в материале не превышает 2–4 нм (рис. 4б), что хорошо согласуется с результатами физической адсорбции азота (см. рис. 2). В то же время отчетливо наблюдается присутствие пор гораздо большего размера ( $> 20$  нм, см. рис. 4а), которые могут обеспечить свободное перемещение больших молекул плазминогена. Таким образом, структура синтезированного композита напоминает муравейник, где каналы большего диаметра постепенно переходят в поры меньшего размера. Так как высвобождение фермента из матрицы практически не наблюдается, разумно предположить, что основная его часть контактирует с внешней средой через поры меньшего диаметра.

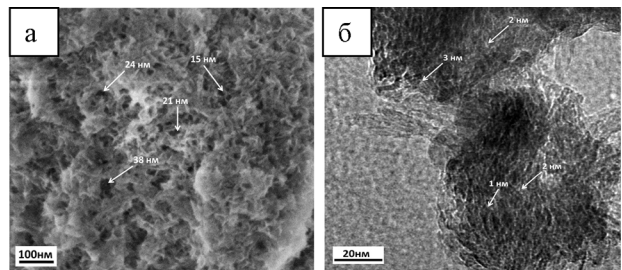


Рис. 4. Изображения СЭМ (а) и ПЭМ (б) для композита. Показано наличие бимодальной мезопористой структуры

## ДАЛЬНЕЙШЕЕ ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В качестве заключения мы хотели бы предположить механизм тромболизиса с использованием иммобилизованного тканевого активатора плазминогена (рис. 5).

Плазмин является основной фибринолитической протеазой (см. рис. 5). Плазминоген (ПГ), циркулирующий в плазме зимоген, может быть преобразован в плазмин с помощью ТАП [4], [6]. Фибрин, главный субстрат плазмينا, регулирует собственную деградацию путем связывания на своей поверхности ПГ и ТАП, локализуя и усиливая таким образом образование плазмينا. В то время как ТАП является слабым активатором ПГ в отсутствие фибрина, его каталитическая эффективность в активации ПГ усиливается по крайней мере на два порядка в присутствии фибрина [9]. Сродство между ТАП и ПГ является низким в отсутствие фибрина, но значительно увеличи-



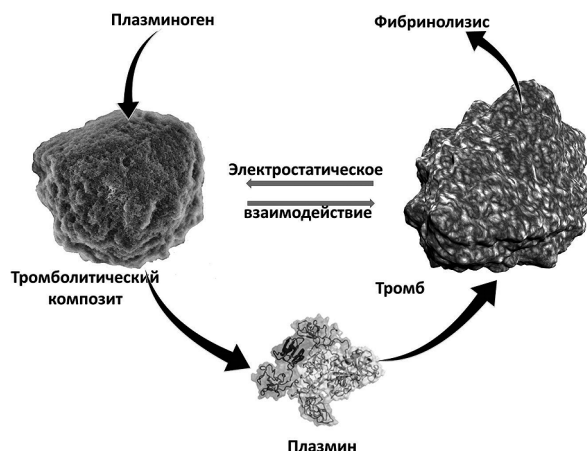


Рис. 5. Схема работы фибринолитической системы с иммобилизованным тканевым активатором плазминогена

вается в его присутствии. В нашем случае роль фибрина в улучшении сродства между ТАП и ПП берет на себя матрица оксида алюминия, которая соединяет их в одной поре. Необходимое электростатическое взаимодействие между отрицательно заряженным фибрином и оксидом алюминия (дзета-потенциал для синтезированного оксида алюминия составляет 32 мВ) является движущей силой для соединения двух компонентов. Чтобы обеспечить образование плазмина, плазмино-

ген должен проникнуть в бемитовую матрицу, содержащую активный ТАП, чего можно легко достичь при наличии пор большего диаметра (около 20 нм). При входе в такой канал плазминоген начинает гидролизироваться функциональными группами ТАП, расположенными в порах меньшего диаметра (менее 4 нм).

Поскольку свободный ТАП может легко ингибироваться [3], еще одной функцией матрицы оксида алюминия является защита ТАП от нежелательного разложения и ингибирования. Зольгель матрицы, как известно, являются идеальными кандидатами для осуществления функции защиты от температуры, химических веществ, растворителей и т. д. [7], [11].

После своего образования плазмин расщепляет фибрин, давая растворимые продукты разложения и карбоксильные концевые остатки лизина. Вследствие диффузионных ограничений образованный плазмин может быть подвержен действию ингибиторов только после выделения из матрицы, что приводит к значительному увеличению времени полураспада плазмина.

Авторы благодарны Центру нанотехнологий в Еврейском университете (г. Иерусалим, Израиль) за помощь в проведении экспериментов сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Avnir D., Braun S., Lev O., Ottolenghi M. Enzymes and Other Proteins Entrapped in Sol-Gel Materials. *Chem. Mater.* 1994. № 6. P. 1605–1614.
2. Avnir D., Coradin T., Lev O., Livage J. Recent bio-applications of sol-gel materials. *J. Mater. Chem.* 2006. № 16. P. 1013–1030.
3. Bangert K., Johnsen A. H., Christensen U., Thorsen S. Different N-terminal forms of  $\alpha$ 2-plasmin inhibitor in human plasma. *Biochem.* 1993. № 291. P. 623–625.
4. Bennett W., Paoni N., Keyt B., Botstein D., Jones A. J. S., Presta L., Wurm F. M., Zoller M. J. High resolution analysis of functional determinants on human tissue-type plasminogen activator. *J. Biol. Chem.* 1991. № 266. P. 5191–5201.
5. Bi F., Zhang J., Su Y., Tang Y. C., and Liu J. N. Chemical conjugation of urokinase to magnetic nanoparticles for targeted thrombolysis. *Biomaterials.* 2009. № 30. P. 5125–5130.
6. Cesarman-Maus G., Hajjar K. A. Molecular mechanisms of fibrinolysis. *British Journal of Haematology.* 2005. № 129. P. 307–321.
7. Frenkel-Muller H., Avnir D. Sol-gel materials as efficient enzyme protectors: preserving the activity of phosphatases under extreme pH conditions. *J. Am. Chem. Soc.* 2005. № 127. P. 8077–8081.
8. Hacke W., Kaste M., Fieschi C., Kummer R. V., Davalos A., Meier D., Larrue V., Bluhmki E., Davis S., and Donnan G. Randomised double-blind placebo-controlled trial of thrombolytic therapy with intravenous alteplase in acute ischaemic stroke. Second European-Australasian Acute Stroke Study Investigators. *Lancet.* 1998. № 352. P. 1245–1251.
9. Lijnen H. R., Collen D. Strategies for the improvement of thrombolytic agents. *Thromb Haemostas.* 1991. № 66. P. 88–110.
10. Goldenberg N. A., Hathaway W. E., Jacobson L., Manco-Johnson M. J. A new global assay of coagulation and fibrinolysis. *Thrombosis Research.* 2005. № 116. P. 345–356.
11. Rutenberg A., Vinogradov V., Avnir D. Synthesis and enhanced thermal stability of albumins@alumina: towards injectable sol-gel materials. *Chem. Commun.* 2013. № 49. P. 5636–5638.
12. Van der Worp H. B., Gijn J. van. Acute ischemic stroke. *New Eng. J. Med.* 2007. № 357. P. 572–579.
13. Vinogradov V., Avnir D. Exceptional thermal stability of therapeutical enzymes entrapped in alumina sol-gel matrices. *J. Mater. Chem. B.* 2014. № 2. P. 2868–2873.
14. Vinogradov A. V., Ermakova A. V., Butman M. F., Hey-Hawkins E., Vinogradov V. V. A facile sol-gel synthesis of impurity-free nanocrystalline titania. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2014. № 16. 10614–10619.
15. Wang M., Zhang J., Yuan Z., Yang W., Wu Q., Gu H. Targeted thrombolysis by using of magnetic mesoporous silica nanoparticles. *J. Biomed. Nanotechnol.* 2012. № 8. P. 624–632.

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

### IMMOBILISATION OF PLASMINOGEN ACTIVATOR WITHIN POROUS ALUMINA MATRIX FOR CREATION OF NEW THROMBOLYTIC MATERIALS

A major obstacle in the development of new enzyme-based thrombolytic systems is their low stability and extremely short period of half-life (usually, less than 2–6 min of the circulation half-life), which requires their administration in large doses to obtain therapeutic effects, and, therefore, inevitably leads to a significant incidence of hemorrhagic complications. Here, we point out to a potential solution of this problem by developing a new family of injectable composites for thrombolysis: plasminogen activator entrapped within alumina. In that case alumina is a pertinent drug carrier developed to prolong activity in vivo, to reduce the total administered dose of the drug necessary for the treatment, and to decrease its side effects.

Key words: alumina, sol–gel synthesis, thrombolysis, plasminogen activator

#### REFERENCES

1. Avnir D., Braun S., Lev O., Ottolenghi M. Enzymes and Other Proteins Entrapped in Sol-Gel Materials. *Chem. Mater.* 1994. № 6. P. 1605–1614.
2. Avnir D., Coradin T., Lev O., Livage J. Recent bio-applications of sol–gel materials. *J. Mater. Chem.* 2006. № 16. P. 1013–1030.
3. Bangert K., Johnsen A. H., Christensen U., Thorsen S. Different N-terminal forms of  $\alpha 2$ -plasmin inhibitor in human plasma. *Biochem.* 1993. № 291. P. 623–625.
4. Bennett W., Paoni N., Keyt B., Botstein D., Jones A. J. S., Presta L., Wurm F. M., Zoller M. J. High resolution analysis of functional determinants on human tissue-type plasminogen activator. *J. Biol. Chem.* 1991. № 266. P. 5191–5201.
5. Bi F., Zhang J., Su Y., Tang Y. C., and Liu J. N. Chemical conjugation of urokinase to magnetic nanoparticles for targeted thrombolysis. *Biomaterials.* 2009. № 30. P. 5125–5130.
6. Cesarman-Maus G., Hajjar K. A. Molecular mechanisms of fibrinolysis. *British Journal of Haematology.* 2005. № 129. P. 307–321.
7. Frenkel-Muller H., Avnir D. Sol-gel materials as efficient enzyme protectors: preserving the activity of phosphatases under extreme pH conditions. *J. Am. Chem. Soc.* 2005. № 127. P. 8077–8081.
8. Hacke W., Kaste M., Fieschi C., Kummer R. V., Davalos A., Meier D., Larrue V., Bluhmki E., Davis S., and Donnan G. Randomised double-blind placebo-controlled trial of thrombolytic therapy with intravenous alteplase in acute ischaemic stroke. Second European-Australasian Acute Stroke Study Investigators. *Lancet.* 1998. № 352. P. 1245–1251.
9. Lijnen H. R., Collen D. Strategies for the improvement of thrombolytic agents. *Thromb Haemostas.* 1991. № 66. P. 88–110.
10. Goldenberg N. A., Hathaway W. E., Jacobson L., Manco-Johnson M. J. A new global assay of coagulation and fibrinolysis. *Thrombosis Research.* 2005. № 116. P. 345–356.
11. Rutenberg A., Vinogradov V., Avnir D. Synthesis and enhanced thermal stability of albumins@alumina: towards injectable sol–gel materials. *Chem. Commun.* 2013. № 49. P. 5636–5638.
12. Van der Worp H. B., Gijn J. van. Acute ischemic stroke. *New Eng. J. Med.* 2007. № 357. P. 572–579.
13. Vinogradov V., Avnir D. Exceptional thermal stability of therapeutical enzymes entrapped in alumina sol–gel matrices. *J. Mater. Chem. B.* 2014. № 2. P. 2868–2873.
14. Vinogradov A. V., Ermakova A. V., Butman M. F., Hey-Hawkins E., Vinogradov V. V. A facile sol–gel synthesis of impurity-free nanocrystalline titania. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2014. № 16. 10614–10619.
15. Wang M., Zhang J., Yuan Z., Yang W., Wu Q., Gu H. Targeted thrombolysis by using of magnetic mesoporous silica nanoparticles. *J. Biomed. Nanotechnol.* 2012. № 8. P. 624–632.

Поступила в редакцию 11.03.2015

**ЕЛЕНА ГЕННАДЬЕВНА АНТОНЕН**

доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры неврологии, психиатрии и микробиологии Медицинского института, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*aanto@onego.ru*

**МАРИНА ВИКТОРОВНА НИКИТИНА**

врач-невролог, НУЗ «ОКБ на ст. Петрозаводск» ОАО РЖД (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*nikitina@okb10.ru*

**МАРИНА МАРЛЕНОВНА КРУЧЕК**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математического анализа математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация),  
*kruchek@psu.karelia.ru*

**ИГОРЬ ВИКТОРОВИЧ ХЯНИКЯЙНЕН**

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

**ОБЩЕМОЗГОВОЙ СИНДРОМ С КОГНИТИВНЫМИ НАРУШЕНИЯМИ ПРИ ХРОНИЧЕСКОЙ ИШЕМИИ МОЗГА И ИХ КОРРЕКЦИЯ АГОМЕЛАТИНОМ\***

Оценена эффективность препарата Агомелатин (25 мг перед сном 8 недель) при лечении больных с хронической ишемией мозга I–II стадии ( $n = 33$ ) на фоне эссенциальной артериальной гипертензии II стадии, II степени, риск II (стабильное течение на фоне рациональной комбинации гипотензивных средств, дезагреганты, статины), предъявлявших жалобы общемозгового и когнитивного характера, у которых в ходе наблюдения были диагностированы когнитивные расстройства легкой степени с признаками депрессивных и тревожных расстройств легкой и умеренной степени. Установлено, что Агомелатин улучшает качество ночного сна (на 75,8%), снижает частоту жалоб на периодическую головную боль диффузного характера, связанную с эмоциональной или физической нагрузкой (на 30%), несистемное головокружение и шаткость при ходьбе (на 21,6%), повышенную утомляемость, снижение работоспособности, чувство общего дискомфорта (на 18%) ( $p < 0,01$ ); вызывает регресс симптомов тревоги, депрессии; улучшает показатели когнитивных функций ( $p < 0,01$ ). Отмечена высокая степень зависимости между длительностью приема Агомелатина (8 недель) и улучшением клинического состояния пациентов на всех этапах исследования (по MMSE ( $r = 0,37$ ) и MoCA-тесту ( $r = 0,42$ ); госпитальной шкале тревоги ( $r = 0,93$ ) и депрессии ( $r = 0,88$ );  $p < 0,01$ ). Минимальное количество побочных эффектов, возникших в ходе терапии, в виде кратковременного астенического синдрома (в 6,3% случаев) способствует формированию высокой приверженности к проводимой терапии заболевания.

Ключевые слова: хроническая ишемия мозга, общемозговой синдром, когнитивные нарушения, депрессия, тревога, Агомелатин

**ВВЕДЕНИЕ**

Сосудистые заболевания головного мозга являются наиболее частой патологией в неврологической практике. Хроническая сосудистая мозговая недостаточность (в соответствии с МКБ-10; синонимично – хроническая ишемия мозга (ХИМ), дисциркуляторная энцефалопатия (ДЭ)) является одной из основных причин инвалидизации в пожилом возрасте из-за развития когнитивных нарушений и деменции [4]. При артериальной гипертензии (АГ) головной мозг входит в список основных органов, поражающихся при этом заболевании, – «органов-мишеней». При ХИМ происходит поражение как крупных,

так и мелких сосудов мозга, что приводит к патологическим изменениям в области подкорковых структур и глубинных отделов белого вещества головного мозга, что, в свою очередь, ведет к формированию «феномена разобщения» (нарушение связей между корковыми и подкорковыми структурами головного мозга [2], [3], [4], [9]) и обуславливает проявление основных клинических синдромов заболевания (когнитивный, эмоциональный, двигательный, вестибулярный, вегетативный) [8].

Для клинической картины ХИМ характерно наличие общемозгового синдрома, появление которого в комплексе клинических признаков ранее

рассматривалось с позиции органических изменений вещества мозга, связанных с дисциркуляторными расстройствами. Однако за этим синдромом могут скрываться не только органические, но и эмоционально-аффективные нарушения, которые также требуют коррекции [1], [10], [14], [17]. Установлено, что особенностью течения тревожных и депрессивных расстройств (особенно у пожилых пациентов) с ДЭ является преобладание соматических симптомов над психическими, что делает затруднительной дифференциальную диагностику тревожно-депрессивного расстройства и соматической патологии. Ключевым дифференциально-диагностическим критерием тревожных расстройств является полисистемность соматовегетативных проявлений [12]. Сложилось мнение, что жалобы когнитивного характера всегда являются патологическим симптомом, не важно, обусловлены ли они эмоциональными или когнитивными нарушениями, поэтому требуют коррекции. Кроме того, назначение антидепрессантов *ex juvantibus* оправдано при наличии жалобы когнитивного характера у лиц с ХИМ, в случаях когда нейропсихологическое тестирование не проводилось [6], [14].

Эффективность лечения ДЭ зависит от качества проводимой этиотропной терапии. Для лечения ДЭ широко используются препараты, улучшающие церебральную микроциркуляцию, вазоактивные препараты, в том числе венотоники, лекарственные средства, обладающие нейрометаболическими и антиоксидантными свойствами, ноотропы, пептиды, мембраностабилизирующие средства, нейротрансмиттеры или их предшественники, а также препараты, активно воздействующие на нейротрансмиттерные системы [2], [4]. В структуре терапии ДЭ проводится коррекция когнитивных, эмоционально-личностных и психотических расстройств [1], [10], [14].

При лечении депрессии в неврологической практике все чаще стали использовать селективные антидепрессанты. Антидепрессивный эффект Агомелатина сопоставим с современными антидепрессантами других групп, способствует индукции нейрогенеза, усиливает дофаминергическую и норадренергическую активность, способствует снижению уровня тревоги, нормализации циркадных ритмов, обладает хорошей переносимостью, низким перечнем побочных эффектов [7], [14], [15], [16].

Цель исследования заключалась в оценке эффективности препарата Агомелатин при лечении жалоб когнитивного характера у больных с хронической ишемией мозга на фоне эссенциальной артериальной гипертензии.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании приняли участие больные с хронической ишемией мозга (ДЭ I–II стадии,

$n = 33$ ), развившейся на фоне эссенциальной АГ II стадии, II степени, риск II, предъявлявшие общемозговые «когнитивные» жалобы, в клинической картине которых регистрировали рассеянную очаговую неврологическую симптоматику с преобладанием (или без) неврологических синдромов в одном из сосудистых бассейнов головного мозга. Клиническое представление о пациенте подтверждали результатами лабораторных (клинический анализ крови, липидный спектр, сахар крови) и нейрофункциональных методов исследования (электроэнцефалография, реоэнцефалография, триплексное сканирование брахиоцефальных и мозговых артерий (Logiq3-Expert, GE; США, 2007), электрокардиография); учитывали результаты клинических осмотров специалистов (окулист, терапевт, эндокринолог и др.) и магнитно-резонансной томографии головного мозга; нейропсихологического тестирования (шкала минимальной мозговой дисфункции – MMSE, тест Мини-ког, Монреальская шкала когнитивной оценки (MoCA-тест), госпитальная шкала тревоги и депрессии (ГШТДт, ШТДд соответственно)) [5].

Терапия эАГ была ранее скорректирована терапевтом или кардиологом, включала рациональную комбинацию гипотензивных средств, дезагреганты, статины и в течение всего периода лечения не изменялась. Исследование продолжалось 2 месяца (4 осмотра: исходный; спустя 2 недели – стационарный этап; 4, 8 недель – амбулаторный этап – 1–4-й визиты (B1–B4) соответственно). Назначали Агомелатин в дозе 25 мг однократно в сутки (за 10–15 минут до сна; отправление ко сну регулярно не позднее 22.00–24.00) после оформления добровольного информированного согласия. Пациент в любой момент мог быть выведен из исследования.

Эффективность лечения оценивалась по результатам клинического наблюдения, балльной оценки (набор шкал). В ходе исследования учитывались переносимость и безопасность препарата: использовали учет всех вновь возникающих жалоб и симптомов, изменений в клинических и лабораторных показателях (АД, ЧСС, Ps, ЭКГ, биохимических показателей крови – АлАс, АсАт, общий билирубин, щелочная фосфатаза).

Статистический анализ результатов исследования проводили с использованием пакета прикладных программ Statistica 6.0 с применением непараметрического дисперсионного анализа (метод Фридмана: проверялась нулевая гипотеза об отсутствии различий связанных групп), знакового рангового критерия Вилкоксона, непараметрического корреляционного анализа Спирмена; статистический материал нормально распределенных признаков представлен средними значениями и стандартными отклонениями ( $M \pm \sigma$ , где  $M$  – среднее арифметическое,  $\sigma$  – стандартное отклонение) признаков, распределенных различно

от нормального, – медианами и интерквартильными размахами (А (L – Н), где А – медиана, L – нижний квартиль, Н – верхний квартиль); уровень достоверности различий соответствовал  $p < 0,05$  [11].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Клиническую группу составили пациенты, получившие полный курс лечения Агомелатином. Средний возраст пациентов составил  $54,48 \pm 12,75$  года; преобладали женщины ( $n = 23$ ; 69,7%) и лица со средним образованием ( $n = 21$ ; 63,64%), состоявшие в браке ( $n = 20$ ; 60,61%). Среди пациентов число работающих и неработающих, имеющих и не имеющих инвалидность было равным. Длительность эАГ в среднем составила  $11,18 \pm 8,9$  года, хронической ишемии мозга –  $1,67 \pm 0,7$  года (средние показатели пульса –  $68,03 \pm 8,5$  удара в минуту, АДс –  $132,12 \pm 17,63$  мм рт. ст., АДд –  $82,72 \pm 7,61$  мм рт. ст.). Показатели пульса, АД, ЧСС в течение всего исследования были в пределах нормальных значений.

Исходно у всех пациентов при опросе выявляли общемозговые жалобы на нарушение формулы сна (100%), снижение памяти (100%), периодическую головную боль диффузного характера, связанную с эмоциональной или физической нагрузкой (84,9%), несистемное головокружение и шаткость при ходьбе (63,6%), шум в голове или ушах (60,6%), повышенную утомляемость, снижение работоспособности (54,5%), чувство общего дискомфорта (51,5%). Кроме того, более чем в 93,9% случаев у пациентов одновременно регистрировали 3–5 жалоб с частотой несколько раз в неделю. Среди очаговой неврологической симптоматики преобладали глазодвигательные нарушения, вегетативные, пирамидный и мозжечковый синдромы.

Исследование линейной скорости кровотока выявило ее снижение преимущественно по позвоночным артериям: справа – до 22 (см/с), слева – до 23 (см/с) (по сравнению с нормальными показателями –  $35 \pm 7$  ( $p < 0,05$ )). В зонах кровоснабжения мозговых артерий каротидного бассейна показатели линейной скорости кровотока не выходили за рамки нормальных значений, хотя приближались к нижней границе нормы. По результатам нейровизуализационного обследования у всех пациентов диагноз «ХИМ I–II ст.» был подтвержден [3], [9].

В связи с тем что пациенты предъявляли «когнитивные» жалобы, им была проведена оценка высших психических функций. По результатам скрининга когнитивных функций грубых нарушений у пациентов выявить не удалось, однако значения во всех тестах приближались к нижней границе нормальных показателей. Так, исходный балл по MMSE составил 29 (28–30) (рис. 1А), по тесту «Мини-ког» – 3 (2–3). По MoCA-тесту средний показатель составил 27 (26–28) баллов, однако

анализ состояния пациентов по визитам выявил, что при первом визите в 3,03% случаев имелось снижение показателей до 25 баллов (рис. 1Б).

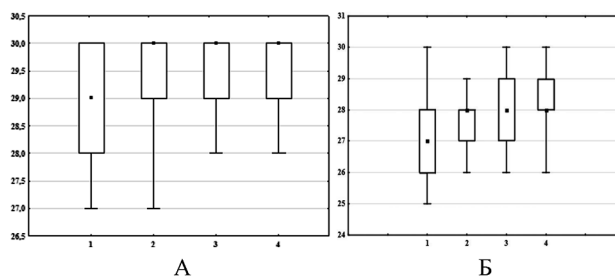


Рис. 1. Динамика показателей проведения балльной оценки мозговой дисфункции по тесту MMSE (А), MoCa-тесту (Б) на фоне терапии Агомелатином в дозе 25 мг в сутки. По оси абсцисс – 1-й (В1), 2-й (В2), 3-й (В3), 4-й (В4) визиты, достоверность отличий между визитами –  $p \leq 0,01$  (непараметрический дисперсионный анализ по Фридмену); по оси ординат – количество баллов (n); центр – медиана, «ящик» – интерквартильный размах, усы – минимальное и максимальное значения

С учетом отсутствия значимых отрицательных результатов, полученных после тестирования высших мозговых функций у пациентов с ХИМ, но наличия у них упорных, длительных жалоб когнитивного характера провели оценку нейропсихологического статуса. По результатам тестирования было установлено, что средние показатели исходного состояния пациентов соответствовали субклинически выраженной депрессии и тревоге – 10 (8–11) и 10 (8–10) баллов по ГШТДд/т соответственно. Однако анализ полученных результатов по визитам выявил, что при В1 в 30,3% случаев по шкале ГШТДд и в 18,2% случаев по шкале ГШТДт пациенты набирали 11–12 баллов, что указывало на клиническую выраженность синдромов (см. рис. 2–3).

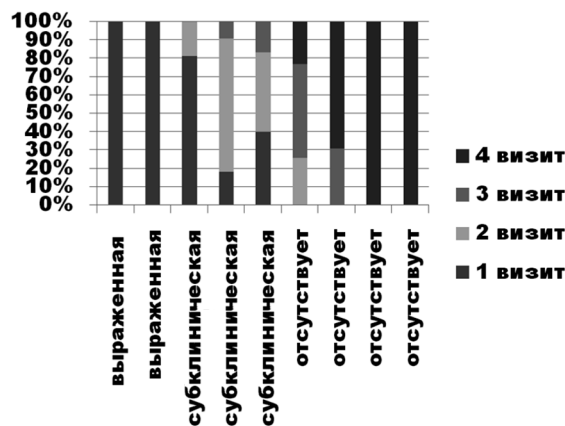


Рис. 2. Показатели уровня тревоги у больных с ХИМ I–II стадии ( $n = 33$ ), развившейся на фоне эссенциальной АГ II стадии, II степени, риск II по госпитальной шкале тревоги и депрессии (подшкала тревоги).

По оси абсцисс – степень выраженности тревоги; по оси ординат – частота встречаемости симптома в группе наблюдения (в %); достоверная разница среди показателей между 1–4-м визитами –  $p < 0,01$

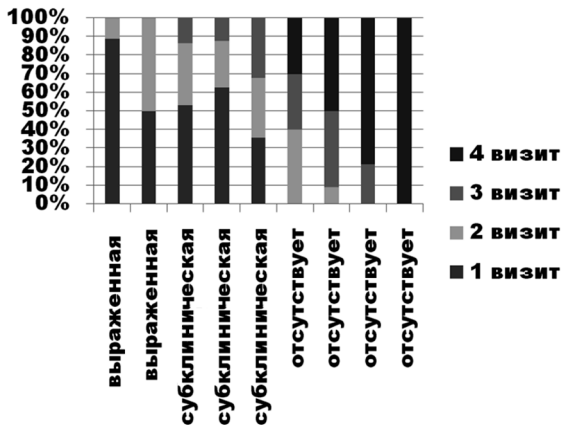


Рис. 3. Показатели уровня депрессии у больных с ХИМ I–II стадии ( $n = 33$ ), развившейся на фоне эссенциальной АГ II стадии, II степени, риск II по госпитальной шкале тревоги и депрессии (подшкала депрессии).

По оси абсцисс – степень выраженности депрессии; по оси ординат – частота встречаемости симптома в группе наблюдения (в %); достоверная разница среди показателей между 1–4-м визитами –  $p < 0,01$

Непараметрический корреляционный анализ не выявил связи между степенью выраженности ХИМ (ХИМ I ст. ( $n = 16$ ) или ХИМ II ст. ( $n = 17$ )) и длительностью и тяжестью тревоги и депрессии ( $p > 0,05$ ).

На фоне проведенного лечения Агомелатином отмечалась достоверная динамика исходных результатов. Так, уже ко 2-й неделе лечения выявили рост когнитивных функций у всех пациентов. По результатам MMSE, MoCA-тесту суммарный балл достоверно повышался от визита к визиту ( $p < 0,01$ ). Отмечена зависимость между длительностью приема Агомелатина и возрастающим уровнем баллов по MMSE и MoCA-тесту на всех этапах исследования ( $r = 0,37$  и  $r = 0,42$  соответственно;  $p < 0,01$ ). Здесь и далее  $r$  – коэффициент корреляции Спирмена. В то же время суммарный балл по тесту «Мини-ког» улучшался к В2 и В4 ( $p < 0,01$ ) (рис. 1А, Б).

На фоне терапии Агомелатином уже к В2 уменьшились жалобы на нарушение формулы сна (39,4%), а также на повышенную утомляемость, снижение работоспособности, чувство общего дискомфорта (36,4%). Спустя месяц терапии Агомелатином значимо изменилась структура общезлового синдрома: нарушение формулы сна (24,2%), снижение памяти (87,9%), периодическая головная боль диффузного характера, связанная с эмоциональной или физической нагрузкой (54,6%), несистемное головокружение и шаткость при ходьбе (42,2%), шум в голове или ушах (51,5%), повышенная утомляемость, снижение работоспособности, чувство общего дискомфорта (27,3%) ( $p < 0,01$ ). Кроме того, уменьшилась частота возникновения общезлового жалоб (один или несколько раз в месяц), а также снизилось число лиц, у которых регистрировали

3–5 жалоб одновременно (84,8% случаев) ( $p < 0,05$ ).

На фоне терапии Агомелатином суммарный балл депрессии существенно снизился ко 2-й неделе терапии ( $p < 0,01$ ), и лишь в 9,1% случаев регистрировали выраженную депрессию (рис. 2), а к концу 1-го месяца в 36,4% случаев отметили только субклиническую или легкую депрессию. Динамика наблюдения за эффективностью терапии от визита к визиту с помощью метода попарного сравнения групп дала значимые отличия в каждой паре ( $p < 0,01$ ). При оценке выраженности депрессии регресс выявленного синдрома был зарегистрирован у всех пациентов ко 2-му месяцу лечения. Отмечена зависимость между длительностью приема Агомелатина и уменьшающимся числом баллов по ГШТДд на всех этапах исследования ( $r = 0,88$ ;  $p < 0,01$ ).

У всех больных депрессия сочеталась с субклинически выраженной тревогой, причем в 81,8% случаев степень тревоги достигала 9–10 баллов по ГШТДт (рис. 2). На фоне терапии Агомелатином уровень тревоги прогрессивно снижался. Так, начиная уже со 2-го визита синдром тревоги был полностью купирован в 27,3% случаев ( $p < 0,001$ ), к концу первого месяца лечения – в 81,8% случаев, а к 8-й неделе терапии ни у одного из пациентов не регистрировали достоверно выраженных симптомов тревоги. Необходимо отметить, что продолжение терапии более одного месяца приводило к дальнейшему снижению баллов по ГШТДт в пределах нормальных значений. Попарное сравнение групп выявило значимые отличия в каждой паре ( $p < 0,01$ ). Отмечена зависимость между длительностью приема Агомелатина и уменьшающимся числом баллов по ГШТДт на всех этапах исследования ( $r = 0,93$ ;  $p < 0,01$ ).

На начальном этапе лечения Агомелатином у пациентов (в 6,3% случаев) возникли жалобы на эпизодическое несистемное головокружение и общую слабость, которые прошли самостоятельно уже к В2 и не потребовали коррекции дозы препарата либо отмены лечения. Ни один из пациентов, получавших Агомелатин, не прервал курс лечения по причине появления этих симптомов. Изменений показателей активности АлАТ, АсАТ, общего билирубина на протяжении всего периода лечения не регистрировали ( $p > 0,05$ ).

#### ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ клинического состояния у пациентов с ХИМ I–II стадии на фоне эАГ II стадии, II степени, риск II показал, что жалобы когнитивного характера были связаны у этих пациентов не столько с их когнитивным снижением, сколько с эмоциональным состоянием. Ранее было установлено, что у больных с ХИМ в 74,3% случаев выявляются расстройства тревожно-депрессивного спектра, вследствие выраженной алексии-

тимии и повышенной напряженности психологических защит [1], [10]. Кроме того, на этапах предыдущего наблюдения за пациентами с ХИМ нами было подтверждено наличие сопутствующей психической патологии в виде тревожных расстройств (по типу смешанного тревожного и депрессивного расстройства – в 24% случаев), расстройств адаптации (в виде кратковременной депрессивной реакции – в 21% случаев) и соматоформной вегетативной дисфункции (в 35% случаев) [1].

Результаты нашего исследования близки к данным, полученным в исследованиях «Камертон», «Хронос» и других по оценке эффективности, переносимости и безопасности препарата Агомелатин [7], [13], [15], [16]. Однако в других исследованиях, направленных на оценку эффективности и качества терапии Агомелатином, указаны факты статистически достоверного повышения активности АлАТ, АсАТ, общего билирубина, щелочной фосфатазы, не выходящих за пределы нормальных значений [13], [15], [16]. Кроме того, при клинической оценке препарата Агомелатин было выявлено снижение показателей ЧСС, АДс, АДд, однако авторы статьи эти изменения не связывают с влиянием препарата на гемодинамические показатели, а объясняют их возникновение качественным лечением артериальной гипертензии в период наблюдения за пациентами [13].

Несмотря на то что в начале лечения регистрировали кратковременный астенический синдром (в 6,3% случаев), все пациенты продолжили лечение Агомелатином, что указывает на высокую приверженность к проводимой терапии.

Необходимо отметить, что значительное клиническое улучшение у больных с ХИМ I–II стадии на фоне ЭАГ II стадии, II степени, риск II было достигнуто комбинированной терапией, которая включала в себя рациональную комбинацию гипотензивных средств, дезагреганты, статины и селективный антидепрессант – Агомелатин в средней дозе (25 мг в сутки, 8 недель). При этом не назначались препараты, улучшающие церебральную микроциркуляцию, вазоактивные препараты, лекарственные средства, обладающие нейрометаболическими и антиоксидантными свойствами, ноотропы, пептиды, мембранстабилизирующие средства, нейротрансмиттеры или их предшественники и другие средства, широко используемые в клинической практике для лечения ХИМ [2], [4].

## ВЫВОДЫ

1. Селективный антидепрессант Агомелатин в дозе 25 мг в сутки в течение 4 недель изменяет структуру общемозгового синдрома у лиц с ХИМ I–II стадии на фоне ЭАГ II стадии, II степени, риск II, существенно снижая частоту (до одного или нескольких

раз в месяц) возникновения (на 9,1%) жалоб на нарушение качества ночного сна (на 75,8%), периодическую головную боль диффузного характера, связанную с эмоциональной или физической нагрузкой (на 30%), несистемное головокружение и шаткость при ходьбе (на 21,6%), повышенную утомляемость, снижение работоспособности, чувство общего дискомфорта (на 18%) ( $p < 0,01$ ).

2. На фоне терапии Агомелатином в течение 4 недель когнитивные функции у лиц с ХИМ I–II стадии на фоне ЭАГ II стадии, II степени, риск II стали соответствовать нормальным значениям с сохранением положительной динамики к следующему визиту ( $p < 0,01$ ).
3. Терапия Агомелатином должна продолжаться не менее 8 недель, так как регресс симптомов легкой и умеренной степени депрессии, а также тревоги на фоне лечения наступил именно к этому периоду ( $p < 0,01$ ); кроме того, отмечена зависимость между длительностью приема (8 недель) Агомелатина и увеличивающимся числом баллов по MMSE ( $r = 0,37$ ), MoCA-тесту ( $r = 0,42$ ), а также уменьшающимся числом баллов по ГШТДт ( $r = 0,93$ ) и ГШТДд ( $r = 0,88$ ) на всех этапах исследования ( $p < 0,01$ ).
4. В структуре побочных эффектов терапии Агомелатином зарегистрирован самостоятельно проходящий астенический синдром (в 6,3% случаев).
5. Высокая эффективность и переносимость селективного антидепрессанта Агомелатина определяет высокую приверженность пациентов к лечению.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатами нашего исследования подтверждена необходимость и эффективность назначения селективных антидепрессантов для коррекции жалоб когнитивного характера у лиц с ХИМ I–II стадии с признаками субклинически выраженной депрессии и тревоги и не имеющих значимых изменений когнитивных функций, оцененных при нейропсихологическом тестировании. Выбор комбинированной терапии, которая включала бы в себя рациональную комбинацию гипотензивных средств, дезагреганты, статины и селективный антидепрессант, – именно такой направленности терапевтический подход к лечению (препараты «первого ряда») обоснован, целесообразен и экономически выгоден для лиц с ХИМ I–II стадии на фоне ЭАГ II стадии, II степени, риск II, не имеющих умеренных и грубых когнитивных расстройств, с признаками депрессивных и тревожных расстройств легкой и умеренной степени.

Проведенное исследование показало, что селективный антидепрессант Агомелатин в дозе 25 мг в сутки высоко эффективен для коррекции как общемозговых, так и жалоб когнитив-

ного характера у лиц, страдающих ХИМ I–II ст. на фоне ЭАГ ( $p < 0,01$ ). Отмечена высокая степень зависимости между длительностью приема Агомелатина (8 недель) и улучшением клинического состояния пациентов на всех этапах исследования (до  $\eta = 0,9$ ;  $p < 0,01$ ). В связи с минимальным количеством побочных эффектов, возникших в ходе терапии, в виде кратковременного астенического синдрома (в 6,3%

случаев), препарат Агомелатин способствует формированию высокой приверженности к проводимой терапии заболевания. В свою очередь, высокая эффективность, переносимость селективного антидепрессанта Агомелатина, а также приверженность пациентов к терапии этим препаратом позволяют рекомендовать его к более широкому использованию в неврологической практике.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонен Е. Г., Буркин М. М., Хяникяйнен И. В., Кручек М. М. Психопатологические расстройства у лиц с доклинической стадией недостаточности мозгового кровообращения // Психические расстройства в общей медицине. 2009. № 2. С. 10–13.
2. Антонен Е. Г., Хяникяйнен И. В., Данилов В. М., Кручек М. М. Взаимосвязь акцентуаций характера с уровнем церебральной гемоперфузии у лиц зрелого возраста в дебюте хронической ишемии мозга // Вестник неврологии, психиатрии и нейрохирургии. 2014. № 1. С. 45–54.
3. Араблинский А. В., Макоത്രова Т. А., Трусова Н. А., Левин О. С. Нейровизуализационные маркеры церебральной микроангиопатии по данным магнитно-резонансной томографии // RUSSIAN ELECTRONIC JOURNAL OF RADIOLOGY / REJR. Т. 4. № 1. 2014. С. 24–33 [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.rejr.ru (http://www.rejr.ru/volume/13/Arablinskiy.pdf).
4. Дамулин И. В., Парфенов В. А., Скоромец А. А., Яхно Н. Н. Нарушения кровообращения в головном и спинном мозге // Болезни нервной системы: Руководство для врачей / Н. Н. Яхно, Д. Р. Штульман (ред.). М., 2003. С. 231–302.
5. Захаров В. В., Вознесенская Т. Г. Нервно-психические нарушения: диагностические тесты: [Руководство]. 2-е изд. М.: МЕДпресс-информ, 2013. 315 с.
6. Захаров В. В., Яхно Н. Н. Когнитивные нарушения в пожилом и старческом возрасте: Методическое пособие для врачей. М., 2005. 71 с.
7. Иванов С. В. Вальдоксан (агомелатин) при терапии умеренных и тяжелых форм депрессии непсихотического уровня в амбулаторной и госпитальной практике (результаты российского мультицентрового исследования «Хронос») // Психиатрия и психофармакотерапия. 2009. № 6. С. 14–17.
8. Левин О. С. Дисциркуляторная энцефалопатия: анахронизм или клиническая реальность // Современная терапия в психиатрии и неврологии. 2012. № 3. С. 40–46.
9. Маркин С. П. Современный подход к диагностике и лечению хронической ишемии мозга // Русский медицинский журнал. 2010. № 6. С. 1–7.
10. Петрова Н. Н., Леонидова Л. А., Баранцевич Е. Р., Поляков И. А. Психические расстройства у неврологических больных // Журнал неврологии и психиатрии. 2006. № 7. С. 20–23.
11. Реброва О. Ю. Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ Statistica. М.: МедиаСфера, 2002. 312 с.
12. Табеева Г. Р., Азимова Ю. Э. Цереброваскулярные расстройства в пожилом возрасте: Практическое руководство для врачей // Практическая медицина. 2010. С. 1–56.
13. Яхно Н. Н., Вознесенская Т. Г. Эффективность и переносимость агомелатина (вальдоксан) при терапии легких и умеренных депрессивных расстройств в неврологической практике (результаты российского мультицентрового исследования «Камертон») // Лекарственные препараты в неврологии. 2012. № 1. С. 43–49.
14. Яхно Н. Н., Захаров В. В. Когнитивные и эмоционально-аффективные нарушения при дисциркуляторной энцефалопатии // Русский медицинский журнал. 2002. Т. 10. № 12–13. С. 539–542.
15. McAllister-Williams R. H. The use of antidepressants in clinical practice: focus on agomelatine // J. Hum. Psychopharmacol. 2010. Vol. 25, № 2. P. 95–102.
16. Montgomery S. A., Kasper S. Severe depression and antidepressants: focus on a pooled analysis of placebo-controlled studies on agomelatine // Int. Clin. Psychopharmacol. 2007. Vol. 22, № 5. P. 283–291.
17. Pantoni L. The relation between white matter lesions and cognition // J. Curr. Opin. Neurol. 2007. Vol. 20. P. 390–397.

**Antonен E. G.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Nikitina M. V.**, NUS “OCB railroad station Petrozavodsk” OAO RZHD (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Kruchek M. M.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Hyanikyaynen I. V.**, Federal Security Service of KR (Petrozavodsk, Russian Federation)

#### CEREBRAL SYNDROME WITH COGNITIVE IMPAIRMENT IN CHRONIC CEREBRAL ISCHEMIA AND ITS CORRECTION BY AGOMELATINE

Efficiency of the drug Agomelatine (25 mg at bedtime 8 weeks) employed in treating patients suffering from chronic cerebral ischemia of the I and II stages ( $n = 33$ ) is evaluated. Assessments were made against the background of essential hypertension of the II stage with the risk of the II degree (stable progress of the disease under rational combinations of antihypertensive medications). Complaints of cerebral and cognitive nature were registered. In the course of treatment, mild cognitive impairments with symptoms of depression and anxiety disorders from mild to moderate levels were registered. It was found out that agomelatine improves sleep



quality (75,8 %) and reduces frequency of periodic headache complaints. The headaches have diffuse character and are associated with emotional or physical stress (30 %). The drug also diminishes non-systemic dizziness and unsteadiness when walking (21,6 %), lessens fatigue and a feeling of general discomfort (18 %) ( $p < 0,01$ ), facilitates in regression of anxiety symptoms and depression, improves cognitive function ( $p < 0,01$ ). Prolonged courses of treatment with agomelatine (8 weeks) significantly improved clinical conditions of patients at all stages of the study: MMSE ( $r = 0,37$ ) and MoCA-test ( $r = 0,42$ ); Hospital Anxiety Scale ( $r = 0,93$ ) and depression ( $r = 0,88$ );  $p < 0,01$ . A minimum number of side effects revealed in the course of therapy, short-term asthenia (6,3 % of all cases), speaks of the high efficiency level of the drug in treatment of the disease.

Key words: chronic cerebral ischemia, cerebral syndrome, cognitive impairment, depression, anxiety, agomelatine

#### REFERENCES

1. Antonen E. G., Burkin M. M., Hyanikyaynen I. V., Danilov V. M., Kruchek M. M. Psychopathological disorders in individuals with preclinical stage of cerebrovascular insufficiency [Psikhopatologicheskie rasstroystva u lits s doklinicheskoy stadiyey nedostatochnosti mozgovogo krovoobrashcheniya]. *Psikhicheskie rasstroystva v obshchey meditsine* [J. Mental disorders in general medicine]. 2009. № 2. P. 10–13.
2. Antonen E. G., Hyanikyaynen I. V., Danilov V. M., Kruchek M. M. Interrelationships of accentuation characteristics with cerebral hemoperfusion in persons of mature age at the onset of chronic cerebral ischemia [Vzaimosvyaz' ak-tsentuatsiy kharaktera s urovnem tserebral'noy gemoperfuzii u lits zrelogo vozrasta v debyute khronicheskoy ishemii mozga]. *Vestnik nevrologii, psikiatrii i neyrokhirurgii* [J. of Neurology, Psychiatry and Neurosurgery]. 2014. № 1. P. 45–54.
3. Arablinskiy A. V., Makotrova T. A., Trusova N. A., Levin O. S. Neuroimaging markers of cerebral microangiopathy by magnetic resonance imaging [Neyrovizualizatsionnye markery tserebral'noy mikroangiopatii po dannym magnitno-rezonansnoy tomografii]. *Russian electronic journal of radiology*. 2014. Vol. 4. № 1. P. 24–33. Available at: [www.rejr.ru \(http://www.rejr.ru/volume/13/Arablinskiy.pdf\)](http://www.rejr.ru/volume/13/Arablinskiy.pdf).
4. Damulin I. V., Parfenov V. A., Skoromets A. A., Yakhno N. N. Circulatory disorders in the brain and spinal cord [Narusheniya krovoobrashcheniya v golovnom i spinnom mozge]. *Bolezni nervnoy sistemy: Rukovodstvo dlya vrachey* [Diseases of the nervous system. A guide for physicians]. N. N. Yakhno, D. R. Shtul'man (eds.). Moscow, 2003. P. 231–302.
5. Zakharov V. V., Voznesenskaya T. G. *Nervno-psikhicheskie narusheniya: diagnosticheskie testy: [Rukovodstvo]* [Neuro-psychiatric disorders: diagnostic tests: [help]]. 2nd ed. Moscow, MEDpress-inform Publ., 2013. 315 p.
6. Zakharov V. V., Yakhno N. N. *Kognitivnye narusheniya v pozhilom i starcheskom vozraste: Metodicheskoe posobie dly vrachey* [Cognitive impairment in elderly and senile age: Toolkit for physicians]. Moscow, 2005. 71 p.
7. Ivanov S. V. Valdoxane (Agomelatine) in the treatment of moderate to severe forms of depression in non-psychotic level of outpatient and hospital practice (results of a multicenter study of Russian "Chronos") [Valdoksan (agomelatin) pri terapii ymerennykh i tyzhelykh form depressiy nepsikhoticheskogo urovny v ambulatornoy i gospital'noy praktike (rezul'taty rossiyskogo multitsentrovogo issledovaniya "Chronos")]. *Psikiatriya i psikhofarmakoterapiya* [J. Psychiatrist. and Psychofarmakoter.]. 2009. № 6. P. 14–17.
8. Levin O. S. Discirculatory encephalopathy: an anachronism or a clinical reality [Distsirkulyatornaya entsefalopatiya: anakhronizm ili klinicheskaya real'nost']. *Sovremennay terapiya v psikiatrii i nevrologii* [J. Current therapy in psychiatry and neurology]. 2012. № 3. P. 40–46.
9. Markin S. P. Modern approach to diagnosis and treatment of chronic cerebral ischemia [Sovremennyy podkhod k diagnostike i lecheniy khronicheskoy ishemii mozga]. *Russkiy meditsinskiy zhurnal* [Russian Medical Journal]. 2010. № 6. P. 1–7.
10. Petrova N. N., Leonidova L. A., Barantsevich E. R., Polyakov I. A. Mental disorders in neurological patients [Psikhicheskie rasstroystva u nevrologicheskikh bol'nykh]. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii* [Journal of Neurology and Psychiatry]. 2006. № 7. P. 20–23.
11. Rebrova O. Yu. *Statisticheskyy analiz meditsinskikh dannykh. Primenenie paketa prikladnykh programm Statistika* [Statistical analysis of medical data. The use of the Statistica software package]. Moscow, Mediasphere Publ., 2002. 312 p.
12. Tabeeva G. R., Azimova Yu. E. Cerebrovascular disorders in the elderly. A Practical Guide for Physicians [Tserebrovaskulyarnye rasstroystva v pozhilom vozraste. Prakticheskoe rukovodstvo dly vrachey]. *Prakticheskay meditsina* [J. Practical Medicine]. 2010. P. 1–56.
13. Yakhno N. N., Voznesenskaya T. G. Efficacy and tolerability of agomelatine (agomelatine) in the treatment of mild and moderate depressive disorders in neurological practice (results of a multicenter study of Russian "tuning fork") [Effektivnost' i perenosimost' agomelatina (valdoksan) pri terapii legkikh i umerennykh depressivnykh rasstroystv v nevrologicheskoy praktike (Rezul'taty rossiyskogo multitsentrovogo issledovaniya "Kamerton")]. *Lekarstvennyye preparaty v nevrologii* [J. Medicines in Neurology]. 2012. № 1. P. 43–49.
14. Yakhno N. N., Zakharov V. V. Cognitive and emotional-affective disorders in vascular encephalopathy [Kognitivnye i emotsional'no-afektivnye narusheniya pri distsirkulyatornoy entsefalopatii]. *Russkiy meditsinskiy zhurnal* [Russian Medical Journal]. 2002. Vol. 10. № 12–13. P. 539–542.
15. McAllister-Williams R. H. The use of antidepressants in clinical practice: focus on agomelatine // J. Hum. Psychopharmacol. 2010. Vol. 25. № 2. P. 95–102.
16. Montgomery S. A., Kasper S. Severe depression and antidepressants: focus on a pooled analysis of placebo-controlled studies on agomelatine // Int. Clin. Psychopharmacol. 2007. Vol. 22. № 5. P. 283–291.
17. Pantoni L. The relation between white matter lesions and cognition // J. Curr. Opin. Neurol. 2007. Vol. 20. P. 390–397.

Поступила в редакцию 27.04.2015

**ТАТЬЯНА ВАЛЕНТИНОВНА ВАРЛАМОВА**

кандидат медицинских наук, доцент кафедры педиатрии и детской хирургии Медицинского института, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*varlamova@karelia.ru*

**НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА ДОРШАКОВА**

доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой семейной медицины, общественного здоровья, организации здравоохранения, безопасности жизнедеятельности и медицины катастроф Медицинского института, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*ndorshakova@mail.ru*

**ТАТЬЯНА АЛЕКСЕЕВНА КАРАПЕТЯН**

доктор медицинских наук, профессор кафедры семейной медицины, общественного здоровья, организации здравоохранения, безопасности жизнедеятельности и медицины катастроф Медицинского института, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*kara@karelia.ru*

## ВОЗМОЖНОСТЬ ОЦЕНКИ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РИСКА РАЗВИТИЯ САХАРНОГО ДИАБЕТА 1 ТИПА У ДЕТЕЙ И ПОДРОСТКОВ В РЕСПУБЛИКЕ КАРЕЛИЯ\*

Развитие сахарного диабета (СД) 1 типа определяется неблагоприятной комбинацией нормальных генов. Существует более 40 полиморфных маркеров СД 1 типа, локализованных на 20 аутосомных хромосомах и X-хромосоме. Сравнительный анализ распределения частот аллелей и генотипов выявляет популяционные различия в ассоциации с СД 1 типа этих маркеров у российской популяции больных и больных из других стран.

Ключевые слова: сахарный диабет 1 типа, система HLA, генотипирование, гаплотипы

СД 1 типа представляет собой важнейшую медико-социальную проблему во всем мире, так как является наиболее часто встречающейся эндокринной патологией у детей. В последние годы происходит значительный подъем СД 1 типа, наиболее выраженный у детей и подростков [1], [9], [12], [15], [16], [17], [20]. Заболеваемость существенно варьирует в разных странах мира, наблюдается географический градиент заболеваемости СД 1 типа с юга на север и с востока на запад [10], [20]. Самая высокая частота СД 1 типа у детей (в возрасте до 15 лет) обнаружена в Скандинавских странах, а именно в Финляндии – 63/100000 заболевших в год [15], [20].

Аналогичные процессы происходят и в российской детской популяции, отличаясь значительной вариабельностью в зависимости от региона проживания [1]. Высокая частота заболеваемости СД 1 типа детского населения в соседней с Карелией Финляндии, имеющей общие этнические и культурные корни, а также климатогеографическую близость, повышает актуальность изучения этой эндокринной патологии.

В последние два десятилетия молекулярно-генетические исследования заняли прочное место в комплексном обследовании при диагностике

ранних стадий СД 1 типа, а обнаружение новых сильных генетических маркеров СД 1 типа не только в HLA-области, но и в некоторых других локусах открывает большие перспективы на пути дальнейшего изучения патогенеза и прогнозирования заболевания [4].

Развитие СД 1 типа определяется неблагоприятной комбинацией нормальных генов, большинство из которых контролируют разные звенья аутоиммунного процесса. Известно, что примерно до 50–60 % случаев СД 1 типа обусловлено генами HLA-2 класса; еще 40 % – связаны с другими генами (инсулина, генами CTLA-4, RTRN-22 и т. д.), участвующими в координации иммунного ответа. Генетические факторы участвуют в развитии СД 1 типа не только в процессе аутоиммунной индукции, но и в течение всего периода до возникновения заболевания [7]. Молекулы HLA-2 класса экспрессируются клетками, представляющими антигены, и участвуют в связывании и экспонировании на поверхности макрофагов фрагментов различных антигенов. В дальнейшем через посредство Т-клеточного рецептора происходит распознавание антигенов и инициируется иммунный ответ. Сила сродства между разнообразными молекулами класса II

и гипотетическими диabetогенными пептидами должна определять запуск механизмов диабетической аутоиммунности [8].

Система HLA обеспечивает регуляцию иммунного ответа, осуществляя презентацию антигена Т-лимфоцитам, обучение Т- и В-лимфоцитов в отношении «своего» и «не своего», взаимодействие клеток иммунной системы организма, распознавание «своего» и «чужого» в структуре клеток, участие в реакциях «хозяин против трансплантата» и «трансплантат против хозяина», запуск, реализацию и генетический контроль иммунного ответа, обеспечение иммунной толерантности. HLA включает три класса генов:

- гены класса I (HLA-A, HLA-B, HLA-C) отличаются высоким полиморфизмом и кодируют синтез молекул HLA класса I. Сюда же относятся «неклассические» гены HLA-E, HLA-F, HLA-G, HLA-H. Молекулы генов HLA-E презентуют пептиды собственных молекул и распознаются с помощью рецептора CD94/NKG2. Клетки, лишённые молекул HLA-I (инфицированные или опухолевые), не экспрессируют HLA-E;
- гены класса II (HLA-DP, HLA-DQ, HLA-DR) контролируют синтез молекул HLA класса II;
- гены класса III кодируют молекулы врожденного иммунитета (компоненты комплемента C2, C4, лимфотоксин, белки теплового шока и др.).

Связь между генами HLA и СД 1 типа подтверждается результатами множественных популяционных исследований и семейного анализа. К настоящему времени сформирован список генов-кандидатов СД 1 типа ([http://www.tldb.org/page/Candidate Genes](http://www.tldb.org/page/Candidate%20Genes)). В геноме человека выявлены локусы, сцепленные с заболеванием, однако большая часть из них не отождествлена с какими-либо генами.

В результате широкомасштабных полногеномных скринингов выявлено более 40 полиморфных маркеров СД 1 типа, локализованных на 20 аутосомных хромосомах и X-хромосоме [13], [14]. Следует отметить, что данные анализов сцепления локусов предрасположенности к заболеванию, проведенных в разных странах, являются противоречивыми.

С изучением генетических основ СД 1 типа открываются перспективы в решении медицинских и социальных проблем, связанных с заболеванием. Программы первичной профилактики СД 1 типа проводятся в США, Канаде, Австралии, странах Западной Европы и в России [2], [11]. Так, в США действует широкомасштабная программа прогнозирования и профилактики СД 1 типа (Diabetes Prognosis and Prevention Trial Type 1). В Финляндии и на о. Сардиния в Италии, где отмечена высокая распространенность заболевания, новорожденных детей проверяют на носительство аллелей DO A1 и DQB1 [11].

Наиболее важным генетическим маркером является локус IDDM1, определяющий 35 % семейной кластеризации СД 1 типа и обладающий наивысшими значениями IS (то есть отношения риска развития заболевания у потомков больных СД 1 типа к уровню общепопуляционного риска) среди других локусов предрасположенности. Локус предрасположенности IDDM1 находится на хромосоме 6p21 и занимает область размером до 20 сантиморганид. По сравнению с другими локусами предрасположенности IDDM1 обладает максимальными значениями IS, колеблющимися в различных популяциях европеоидов от 1,7 до 4,2. Локус IDDM1 отождествляется с генами главного комплекса гистосовместимости класса II. Локусы предрасположенности к СД 1 типа были сначала определены как гаплотипы DR3 и DR4 серологическими методами.

Риск развития СД 1 типа зависит от аллелей DR/DQ системы HLA DRB1\*03-DQB1\*0201 (DR3) или DRB1\*04-DQB1\*0302 (DR4) [15]. Эпитопы HLA, наиболее сильно связанные с развитием СД 1 типа: DQB1 A(57), DQA1 V(76), DRB1 H(13), DRB1 K(71), менее значительно DPB1 YD(9,57), HLA-B C(67) и HLA-C YY(9,116). Эпитопы HLA, обеспечивающие резистентность: DQB1 D(57), DQA1 Y(80), DRB1 R(13) и DRB1 A(71) [21].

При помощи полиморфизма длины рестрикционных фрагментов и генотипирования с использованием олигонуклеотидных зондов, специфических к определенным последовательностям, было установлено, что локус HLA-DQ является наиболее вероятным кандидатом на связь с СД 1 типа. У больных СД 1 типа наряду с повышенным содержанием DR3 и DR4 отмечено снижение частоты встречаемости антигенов Dw2/DR2 и B7, что позволило говорить о них как о факторах, предохраняющих от раннего развития СД 1 типа [6].

Для генов HLA-DQA1 и DQB1 характерен полиморфизм, выражающийся во множественных аллельных вариантах вследствие варибельности нуклеотидной последовательности 2-го экзона данных генов.

Доказана различная роль в обеспечении риска развития СД 1 b-цепей, несущих в 57-м положении либо аспарагиновую кислоту (Асп57), либо другой аминокислотный остаток [22]. Генетическая роль DQ а-цепи выявлена в исследованиях популяций, относящихся к различным расам. Разную роль в предрасположенности к СД 1 типа двух наиболее общих для европейцев гаплотипов DQ2 (предрасполагающий DR3-DQ2 и нейтральный DR7-DQ2) можно объяснить различиями в строении а-цепи: гаплотипам DR3 соответствует аллель DQA1\*0501, а гаплотипам DR7 – аллель DQA1\*0201.

Белковые продукты генов DQA1 и DQB1 (а- и b-цепи) вступают друг с другом во взаимодействие, образуя гетеродимеры. Если гетеродимер

образован продуктами генов, расположенных на разных родительских хромосомах, то говорят о транс-комбинации а- и b-цепей (транс-гетеродимер); продукты генов, находящихся на одних и тех же хромосомах родителей, вступают в цис-взаимодействие. Генетический риск развития диабета зависит от числа «диабетогенных» гетеродимеров (а-Arg52+/b-Asp57-), образуемых каждым генотипом, и увеличивается с возрастанием их доли в генотипе («дозовый эффект») [8].

Полиморфизм генов главного комплекса гистосовместимости класса III также может быть связан с предрасположенностью к СД 1 типа. Эти гены кодируют компоненты С2 и С4 компонента и пропердиновый фактор В. Так, в гаплотипе А1, В8, DR3, DQ2, ассоциированном с повышенным риском развития СД 1 типа, обнаружен аллель С4А0null. В южных регионах Европы более ранний возраст дебюта заболевания связан с иным вариантом гаплотипа DR3, DQ2, который ассоциирован с А30, В18 и ВfF1 [22]. В Северной Европе данный вариант мало распространен, однако наиболее часто встречаемый гаплотип А2, В15, Сw3, DR4- содержит аллель С4В3, в свою очередь, являющуюся редкой в других гаплотипах. Этот гаплотип также связан с наивысшим риском развития заболевания.

У больных СД 1 типа детей и подростков российской популяции выделены пять предрасполагающих и три защитных гаплотипа [7]. Защитные гаплотипы в российской и европейской популяциях совпадают [18], [40]. Это следующие виды гаплотипов:

- DRB1\*15-DQA1\*102-DQB1\*602/8 (OR = 0,16);
- DRB1\*11-DQA1\*501-DQB1\*301 (OR = 0,14);
- DRB1\*13-DQA1\*103-DQB1\*602/8 (OR = 0,08).

Наиболее высокий генетический риск развития СД 1 типа определяется гетерозиготным генотипом DQA1\*0501-DQB1\*0201\DQA1\*0301-DQB1\*0302 – DQ2/DQ8.

Средний или умеренный риск определяется сочетанием гаплотипа высокого риска с другими гаплотипами (DQ2; DQ8).

Низкий генетический риск (X/X) определяется у тех лиц, которые не имеют гаплотипов высокого риска и у которых отмечается наличие защитных, нейтральных гаплотипов или гаплотипов низкого риска [5], [19].

На первом месте по силе риска гаплотип DQ8 – DRB1\*4-DQA1\*301-DQB1\*302 (OR = 4,7), характерный для Северной Европы.

На втором – специфический гаплотип для российской популяции – DRB1\*4-DQA1\*301-DQB1\*304 (OR = 4).

На третьем – гаплотип DQ2, типичный для Южной Европы, DRB1\*17-DQA1\*501-DQB1\*201 (OR = 2,7).

На четвертом – специфический для российской популяции DRB1\*16-DQA1\*102-DQB1\*502/4 (OR = 2,4).

На пятом месте – тоже предрасполагающий гаплотип, типичный для российской популяции и Европы, DRB1\*-DQA1\*101-DQB1\*501 (OR = 1,9).

Для сравнения: в Финляндии HLA-B\*39 аллель значительно повышает риск заболевания при DRB1\*04:04-DQA1\*03-DQB1\*03:02 и (DR8)-DQB1\*04 гаплотипах. Такой же эффект наблюдается на уровне генотипов, содержащих DRB1\*04:04-DQA1\*03-DQB1\*03:02 или (DR8)-DQB1\*04 гаплотипы [18].

Более ранний возраст дебюта СД 1 типа коррелирует со значительно большим количеством антигенных детерминант восприимчивости и меньших антигенных детерминант сопротивления [3].

Нарастающая заболеваемость СД 1 типа, наблюдающаяся в последние десятилетия, может быть обусловлена неблагоприятным прессингом факторов окружающей среды и возможным изменением с течением времени вклада генетических факторов в развитии СД.

Главный комплекс гистосовместимости (HLA) является одной из наиболее полиморфных генетических систем человека. Широкий полиморфизм позволяет использовать HLA-гены в антропологических, популяционно-генетических исследованиях, а также в исследованиях ассоциативных связей HLA-генов и заболеваний. В основе всех трех направлений исследований лежит изучение иммуногенетической структуры той или иной популяции, представленной особым, этнически обусловленным характером распределения частот аллельных вариантов HLA-генов, а также их комбинаций – гаплотипов, наследуемых совместно благодаря феномену неравновесного сцепления [8].

Изучение генетической предрасположенности к СД 1 типа у детей Республики Карелия является актуальным с учетом высокой распространенности и роста СД 1 типа у детей и подростков в 1,5 раза за последние 10 лет, схожести климато-географических и этнических факторов с Финляндией. При молекулярно-генетическом изучении любых многофакторных заболеваний, в том числе СД 1 типа, для расчета индивидуального прогноза и создания основанных на нем рекомендаций необходимо учитывать специфику конкретной популяции.

Результаты работы могут быть использованы при разработке основ медико-генетического консультирования больных СД 1 типа и членов их семей. Полученные данные позволят прогнозировать развитие СД 1 типа, формировать группы риска и осуществлять в них активный мониторинг.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дедов И. И., Кураева Т. Л., Петеркова В. А. Сахарный диабет у детей и подростков. М.: Гэотар-Медиа, 2008. 160 с.
2. Дедов И. И., Кураева Т. Л., Ремизов О. В. и др. Генетика сахарного диабета у детей и подростков: Пособие для врачей. М., 2003. 72 с.
3. Дедов И. И., Никонова Т. В., Смирнова О. М. и др. Роль цитокинов в регуляции иммунного ответа и механизмы гибели р-клеток при различных вариантах течения сахарного диабета типа 1 // Проблемы эндокринологии. 2005. № 3. Т. 51. С. 3–7.
4. Кураева Т. Л. Генетика сахарного диабета: история и современное состояние проблемы // Сахарный диабет. 2005. № 3. С. 14–16.
5. Кураева Т. Л., Титович Е. В., Прокофьев С. А., Петеркова В. А. Генетические и иммунологические технологии определения риска развития сахарного диабета 1 типа. Перспективы предупреждения болезни: Пособие для врачей / Под ред. академика РАН и РАМН И. И. Дедова. М., 2011. 24 с.
6. Титович Е. В., Кураева Т. Л., Иванова О. Н., Степанова С. М., Петеркова В. А., Дедов И. И. Прогнозирование сахарного диабета 1 типа в семьях больных (проспективное 16-летнее наблюдение). Акцент на будущее // Сахарный диабет. 2014. № 3. С. 83–89.
7. Чистяков Д. А., Дедов И. И. Локус генетической предрасположенности к диабету 1 типа (сообщение 1) // Сахарный диабет. 1999. № 3. С. 52–56.
8. Bodmer J. G., March S. G., Albert E. D. et al. Nomenclature for factors of the HLA system, 1996 // Eur. J. Immunogenet. 1997. Vol. 24. P. 105–151.
9. Borchers A. T., Uibo R., Gershwin M. E. The geoepidemiology of type 1 diabetes // Autoimmun. Rev. 2010. Vol. 9. № 5. P. 355–365.
10. Filippi C. M., von Herrath M. G. Viral trigger for type 1 diabetes // Diabetes. 2008. Vol. 57. P. 2863–2871.
11. Guja L., Guja C., Ionescu-Tirgoviste C. et al. Strong association of the insulin gene locus (IDDM2) with type 1 diabetes in the Romanian population // Diabetologia. 2004. Vol. 47. P. A 134.
12. Hyoty H., Taylor K. W. The role of viruses in human diabetes // Diabetologia. 2002. Vol. 45. P. 1353–1361.
13. Ilonen J., Hermann R. Novel gene associations in type 1 diabetes // Curr Diab Rep. 2010. Oct. 10(5). P. 338–344.
14. Kimpimaki T., Erkkola M., Korhonen S. et al. Short-term exclusive breastfeeding predisposes young children with increased genetic risk of type 1 diabetes to progressive beta-cell autoimmunity // Diabetologia. 2001. Vol. 44. P. 63–69.
15. Knip M. Pathogenesis of type 1 diabetes: Implications for incidence trends // Horm. Res. 2011. Vol. 76. P. 57–64.
16. Knip M., Simell O. Environmental Triggers of Type 1 Diabetes // Cold Spring Harb. Perspect. Med. 2012. Vol. 2(7). P. 38–42.
17. Liese A. D., Lawson A., Song H. R. et al. Evaluating geographic variation in type 1 and type 2 diabetes mellitus incidence in youth in four US regions // Jr. Health Place. 2010. Vol. 16. № 3. P. 547–556.
18. Mikk M. L., Kiviniemi M., Laine A. P., Härkönen T., Veijola R., Simell O., Knip M., Ilonen J. Finnish Paediatric Diabetes Register. The HLA-B\*39 allele increases type 1 diabetes risk conferred by HLA-DRB1\*04:04-DQB1\*03:02 and HLA-DRB1\*08-DQB1\*04 class II haplotypes // Hum. Immunol. 2014. Jan. 75(1). P. 65–70.
19. Morran M. P., Omen G. S., Pietropaolo M. Immunology and genetics of type 1 diabetes // Mt. Sinai J. Med. 2008. 75(4). P. 314–327.
20. Patterson C. C., Dahlquist G. G., Gyürüs E. et al. Incidence trends for childhood type 1 diabetes in Europe during 1989–2003 and predicted new cases 2005–20: a multicentre prospective registration study // Lancet. 2009. Vol. 13. № 373. P. 2027–2033.
21. Roark C. L., Anderson K. M., Simon L. J., Schuyler R. P., Aubrey M. T., Freed B. M. Multiple HLA epitopes contribute to type 1 diabetes susceptibility // Diabetes. 2014. Jan. 63(1). P. 323–331.
22. Vicario J. L., Martinez-Iaso J., Corell A. Comparison between HLA-DRB and DQ DNA sequences and classic serological markers as type 1 (insulin-dependent) diabetes mellitus predictive risk markers in the Spanish population // Diabetologia. 1992. Vol. 35. P. 475–481.

**Varlamova T. V.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

**Dorshakova N. V.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

**Karapetyan T. A.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

#### POSSIBILITIES OF GENETIC RISK ASSESSMENT OF TYPE 1 DIABETES MELLITUS IN CHILDREN AND ADOLESCENTS IN KARELIAN REPUBLIC

Development of the type 1 Diabetes is conditioned by the unfavorable combination of normal genes. There are over 40 polymorphic markers in the type 1 Diabetes, which are localized on the 20 autosomal chromosomes and X chromosome. A comparative analysis of the allele and genotype frequency distribution helped to define population differences in association with the CD 1 type markers in Russian patients and patients from other countries.

Key words: Diabetes Mellitus of type 1, system HLA, genotyping, haplotypes

#### REFERENCES

1. Dedov I. I., Kuraeva T. L., Peterkova V. A. *Sakharnyy diabet u detey i podroostkov* [Diabetes in children and adolescents]. Moscow, Geotar-Media Publ., 2008. 160 p.
2. Dedov I. I., Kuraeva T. L., Remizov O. V. i dr. *Genetika sakharnogo diabeta u detey i podroostkov: posobie dlya vrachey* [Genetics of diabetes in children and adolescents: a manual for physicians]. Moscow, 2003. 72 p.
3. Dedov I. I., Nikonova T. V., Smirnova O. M. i dr. The role of cytokines in the regulation of immune responses and mechanisms of p-cell death for different embodiments of type 1 diabetes. [Rol' tsitokinov v regulyatsii immunnogo otveta i mekhanizmy gibeli r-kletok pri razlichnykh variantakh techeniya sakharnogo diabeta tipa 1]. *Problemy endokrinologii*. 2005. № 3. Vol. 51. P. 3–7.

4. Kuraeva T. L. The genetics of diabetes: history and current status of the problem. [Genetika sakharnogo diabeta: istoriya i sovremennoe sostoyanie problem]. *Sakharnyy diabet*. 2005. №3. P. 14–16.
5. Kuraeva T. L., Titovich E. V., Prokof'ev S. A., Peterkova V. A. *Geneticheskie i immunologicheskie tekhnologii opredeleniya riska razvitiya sakharnogo diabeta 1 tipa. Perspektivy preduprezhdeniya bolezni: Posobie dlya vrachey* [Genetic and immunological techniques determine the risk of type 1 diabetes. Prospects for the prevention of disease. Manual for physicians]. Moscow, 2011. 24 p.
6. Titovich E. V., Kuraeva T. L., Ivanova O. N., Stepanova S. M., Peterkova V. A., Dedov I. I. Prediction of type 1 diabetes in the families of patients (prospective 16-year follow-up). Focus on the future [Prognozirovanie sakharnogo diabeta 1 tipa v sem'yakh bol'nykh (prospektivnoe 16-letnee nablyudenie). Aktsent na budushchee]. *Sakharnyy diabet*. 2014. № 3. P. 83–89.
7. Chistyakov D. A., Dedov I. I. The locus of a genetic predisposition to type 1 diabetes (1 message) [Lokus geneticheskoy predispozitsionnosti k diabētu 1 tipa (soobshchenie 1)]. *Sakharnyy diabet*. 1999. № 3. P. 52–56.
8. Bodmer J. G., March S. G., Albert E. D. et al. Nomenclature for factors of the HLA system, 1996 // *Eur. J. Immunogenet.* 1997. Vol. 24. P. 105–151.
9. Borchers A. T., Uibo R., Gershwin M. E. The geoepidemiology of type 1 diabetes // *Autoimmun. Rev.* 2010. Vol. 9. № 5. P. 355–365.
10. Filippi C. M., von Herrath M. G. Viral trigger for type 1 diabetes // *Diabetes*. 2008. Vol. 57. P. 2863–2871.
11. Guja L., Guja C., Ionescu-Tirgoviste C. et al. Strong association of the insulin gene locus (IDDM2) with type 1 diabetes in the Romanian population // *Diabetologia*. 2004. Vol. 47. P. A 134.
12. Hyoty H., Taylor K. W. The role of viruses in human diabetes // *Diabetologia*. 2002. Vol. 45. P. 1353–1361.
13. Ilonen J., Hermann R. Novel gene associations in type 1 diabetes // *Curr Diab Rep.* 2010. Oct. 10(5). P. 338–344.
14. Kimpimäki T., Erkkola M., Korhonen S. et al. Short-term exclusive breastfeeding predisposes young children with increased genetic risk of type 1 diabetes to progressive beta-cell autoimmunity // *Diabetologia*. 2001. Vol. 44. P. 63–69.
15. Knip M. Pathogenesis of type 1 diabetes: Implications for incidence trends // *Horm. Res.* 2011. Vol. 76. P. 57–64.
16. Knip M., Simell O. Environmental Triggers of Type 1 Diabetes // *Cold Spring Harb. Perspect. Med.* 2012. Vol. 2(7). P. 38–42.
17. Liese A. D., Lawson A., Song H. R. et al. Evaluating geographic variation in type 1 and type 2 diabetes mellitus incidence in youth in four US regions // *Jr. Health Place*. 2010. Vol. 16. № 3. P. 547–556.
18. Mikk M. L., Kiviniemi M., Laine A. P., Härkönen T., Veijola R., Simell O., Knip M., Ilonen J. Finnish Paediatric Diabetes Register. The HLA-B\*39 allele increases type 1 diabetes risk conferred by HLA-DRB1\*04:04-DQB1\*03:02 and HLA-DRB1\*08-DQB1\*04 class II haplotypes // *Hum. Immunol.* 2014. Jan. 75(1). P. 65–70.
19. Morran M. P., Omen G. S., Pietropaolo M. Immunology and genetics of type 1 diabetes // *Mt Sinai J Med.* 2008. 75(4). P. 314–327.
20. Patterson C. C., Dahlquist G. G., Gyürüs E. et al. Incidence trends for childhood type 1 diabetes in Europe during 1989–2003 and predicted new cases 2005–20: a multicentre prospective registration study // *Lancet*. 2009. Vol. 13. № 373. P. 2027–2033.
21. Roark C. L., Anderson K. M., Simon L. J., Schuyler R. P., Aubrey M. T., Freed B. M. Multiple HLA epitopes contribute to type 1 diabetes susceptibility // *Diabetes*. 2014. Jan. 63(1). P. 323–331.
22. Vicario J. L., Martinez-Iaso J., Corell A. Comparison between HLA-DRB and DQ DNA sequences and classic serological markers as type 1 (insulin-dependent) diabetes mellitus predictive risk markers in the Spanish population // *Diabetologia*. 1992. Vol. 35. P. 475–481.

Поступила в редакцию 31.03.2015

**НАТАЛЬЯ СЕРГЕЕВНА СУББОТИНА**

доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой неврологии, психиатрии и микробиологии Медицинского института, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*nataliyasubbotin@yandex.ru*

**ОЛЬГА ВАСИЛЬЕВНА ДОРШАКОВА**

кандидат медицинских наук, заведующий отделением медицинской реабилитации, Пряжинская центральная районная больница (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*dorsh@rambler.ru*

**ЕКАТЕРИНА МИХАЙЛОВНА КОЗЛОВСКАЯ**

врач-невролог, Больница скорой медицинской помощи (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*dju-dju-dju@mail.ru*

**ГАЛИНА ПАВЛОВНА БЕЛОУСОВА**

кандидат биологических наук, доцент кафедры физиологии человека и животных, патофизиологии, гистологии Медицинского института, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*gerda51@mail.ru*

## СОСТОЯНИЕ ВЕГЕТАТИВНОЙ РЕГУЛЯЦИИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА ПРИ ХРОНИЧЕСКОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТИ МОЗГОВОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ

У 70 пациентов с нарушениями мозгового кровообращения в вертебрально-базилярном бассейне вследствие стенозирующего поражения церебральных артерий анализировали состояние вегетативной регуляции сердечного ритма по данным вариационной пульсометрии. Показано, что вследствие гемодинамических нарушений развивается сдвиг вегетативной регуляции со смещением активности в сторону симпатического отдела на фоне недостаточной активности парасимпатического звена. Увеличение индекса напряжения указывает на возрастание активности центрального контура регуляции надсегментарного уровня для обеспечения мобилизации дополнительных функциональных резервов организма. У пациентов с тяжелым течением сосудистого заболевания головного мозга, осложненного острыми нарушениями мозгового кровообращения, значительное нарушение сопряженного взаимодействия между отделами вегетативной нервной системы приводит к гомеостатическим сдвигам в сторону повышения симпатического влияния на сердечно-сосудистую систему.

Ключевые слова: недостаточность мозгового кровообращения, вертебрально-базилярный бассейн, стенозирующие поражения, регуляция сердечного ритма, вариационная пульсометрия

Сосудистые заболевания головного мозга являются актуальной медицинской и социальной проблемой в связи с их широкой распространенностью, высокой инвалидизацией и летальностью больных [2]. Дисциркуляторные расстройства в вертебрально-базилярном бассейне (ВББ) составляют до 32 % от всех диагностируемых нарушений мозгового кровообращения. Ведущей причиной хронической недостаточности мозгового кровообращения (ХНМК) в ВББ в настоящее время рассматривается атеросклеротическое стенозирующее поражение магистральных артерий, в первую очередь экстракраниальных отделов позвоночных артерий [4], [6], и, как следствие, снижение перфузионного давления и реактивности церебральных артерий с последующим формированием пластических изменений структур мозга. Окклюзирующие поражения экстракраниальных отделов позвоночных артерий встречаются в 17–30 % случаев [4], [6],

[7]. Актуальность патологии ХНМК в ВББ обусловлена сложностью патогенеза и частой резистентностью больных к терапии [3], [5], [6], [9], [10], [11], вариабельностью клинической картины [8], многообразием субъективной симптоматики, сложностью инструментально-лабораторной диагностики [7], что нередко приводит к неточному диагнозу, применению дорогостоящего лечения и психологической зависимости больных от диагноза и лечения [9], [12].

Целью исследования явилось изучение состояния вегетативной регуляции сердечного ритма у пациентов с нарушением мозгового кровообращения в вертебрально-базилярном бассейне при стенозирующем поражении церебральных артерий.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Группу исследования составили 70 пациентов, из них 48,6 % (n = 34) пациентов контроль-

ной группы (условно здоровые) и 51,4 % ( $n = 36$ ) пациентов с ХНМК в ВББ при стенозирующем поражении экстракраниальных церебральных артерий (ЭА). Средний возраст пациентов составил  $53 \pm 10,9$ , с колебаниями 42–60 лет. Исследуемые были разделены на 2 группы: 1-я группа (54,3 %) – пациенты с ХНМК в ВББ (дисциркуляторная энцефалопатия (ДЭ) 2-й и 3-й стадий), перенесшие ранее острое нарушение мозгового кровообращения (ОНМК) ишемического типа. Во 2-ю группу вошли пациенты с дисциркуляторной энцефалопатией 2-й стадии без ОНМК в анамнезе – 45,7 %. Каждая группа была разделена на две подгруппы. 1-я подгруппа (49,3 %) состояла из пациентов, у которых выявлены стенозирующие поражения и патологические деформации экстракраниальных артерий (32 пациента без ОНМК в анамнезе). Пациенты 2-й подгруппы (50,7 %) с нарушением мозгового кровообращения (НМК) в ВББ без стенозирующих поражений и деформаций ЭА (перенесших ОНМК ишемического типа и пациенты без ОНМК в анамнезе). Среди атеросклеротических стенозирующих поражений с клиническими проявлениями ХНМК в ВББ чаще регистрировали односторонний стеноз внутренней сонной артерии (ВСА) средней степени (стеноз 61–74 % просвета артерии) – 26 % ( $n = 18$ ) и одностороннее стенозирующее поражение позвоночной артерии (ПА) высокой степени ( $> 75$  %) – 20,3 % ( $n = 14$ ). Методами ультразвукового исследования были экстракраниальная и транскраниальная доплерография (компьютерно-программный комплекс «Ангиодин») для анализа характеристик экстракраниального и интракраниального кровотока, триплексное сканирование (аппарат «SONOLINE G60S» SIEMENS) для оценки состояния стенки артерий и морфологического состояния атеросклеротической бляшки. Исследование общей вариабельности ритма сердца выполняли методом вариационной пульсометрии (кардиоинтервалографии) с использованием аппаратно-программного комплекса «Поли-Спектр» компании «НейроСофт» (г. Иваново), оценку вариабельности сердечного ритма проводили общепринятым способом: 1) математического ожидания динамического ряда кардиоинтервалов ( $M, c$ ), 2) моды ( $M_0, c$ ), наиболее часто встречающегося кардиоинтервала, 3) амплитуды моды ( $AM_0, \%$ ), представляющей число кардиоинтервалов, соответствующих диапазону моды, 4) вариационного размаха ( $BP, c$ ). По оценке вариабельности сердечного ритма учитывали вторичные показатели кардиоинтервалографии: 1) индекс вегетативного равновесия (ИВР, у. е.), 2) показатель адекватности процессов регуляции (ПАПР, у. е.), 3) вегетативный показатель ритма (ВПР, у. е.), 4) индекс напряжения регуляторных систем (ИН, у. е.).

При статистической обработке результатов использовали статистическую программу «STATIS-

TICA» для Windows и Microsoft Excel. Достоверность оценивали с учетом критерия хи-квадрат Пирсона (уровень значимости  $p < 0,05$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В подгруппе больных со стенозирующими поражениями ЭА чаще наблюдали сочетание артериальной гипертензии и атеросклероза сосудов головного мозга – 55,1 % с курением (44,9 %), гиперлипидемией (37,7 %) и отягощенной наследственностью (36,2 %).

Выявлена достоверная зависимость между факторами риска (курение и отягощенная наследственность по атеросклерозу и артериальной гипертензии) и стенозирующим поражением артерий головного мозга ( $p < 0,05$ ).

В связи с широкой распространенностью НМК в структуре общей заболеваемости, высокой инвалидизацией и смертностью больных актуальным является их раннее выявление и проведение профилактических мероприятий для предупреждения развития сосудистых заболеваний головного мозга [2]. В этом отношении представляется важным изучение вопросов оперативной оценки состояния вегетативной нервной системы, значительная часть структур которой находятся в зоне кровоснабжения вертебрально-базилярного сосудистого бассейна. К числу наиболее перспективных подходов в решении данной задачи следует отнести изучение вариабельности ритма сердца, поскольку заключенная в последовательном ряду интервалов R–R информация содержит сведения об автоматии сердца как о локальном свойстве конкретных возбудимых структур и отражает характер процессов, происходящих в системе управления синусового узла [1].

При анализе вариационной пульсометрии в фоновой пробе отмечают следующие особенности: частота сердечных сокращений (ЧСС) во всех группах в пределах нормы. Мода ( $M_0, c$ ) мало отличается от математического ожидания во всех группах, что указывает на нормальное распределение кардиоинтервалов и высокую стационарность исследуемого процесса.

У мужчин в контрольной группе и в группе больных с ХНМК в ВББ выявлены достоверные различия между значениями амплитуды моды ( $AM_0, \%$ ): у мужчин с ХНМК в ВББ данный показатель выше на 69,6 % ( $p < 0,001$ ), что отражает сдвиг вегетативного баланса в сторону симпатического отдела ВНС. На увеличение активности симпатического отдела ВНС также указывает рост показателя индекса вегетативного равновесия (ИВР) у мужчин с ХНМК в ВББ по сравнению с контрольной группой.

У мужчин с ХНМК при стенозирующем поражении ЭА показатель адекватности процессов регуляции (ПАПР, у. е.) увеличен на 38,9 % ( $p < 0,05$ ) по сравнению с контрольной группой, что также указывает на увеличение активности вли-



нения симпатического отдела ВНС на синусовый узел.

Индекс напряжения у мужчин контрольной группы – в пределах условной нормы, у мужчин с ХНМК в ВББ увеличен в 1,6 раза по сравнению с верхней границей нормы, что указывает на напряжение регуляторных систем уже в состоянии покоя. Индекс напряжения у мужчин с ХНМК в ВББ увеличен на 134,2 % ( $p < 0,01$ ) в сравнении с контрольной группой, что характеризует активность механизмов симпатической регуляции у больных с ХНМК и отражает степень преобладания центрального контура регуляции над автономным (табл. 1).

**Таблица 1**  
Сравнительная характеристика показателей вариационной пульсометрии у мужчин (опыт и контроль) в состоянии покоя

Показатели	Контроль (n = 14)	Опыт (n = 16)	Средняя разность		p
			^	%	
ЧСС, уд./мин	68,5 ± 4,1	71,5 ± 1,9	3	4,2	> 0,05
М, с	0,848 ± 0,022	0,909 ± 0,056	0,061	7,2	> 0,05
Мо, с	0,844 ± 0,026	0,914 ± 0,058	0,07	8,3	> 0,05
АМо, %	40,8 ± 2,9	69,2 ± 4,8	28,4	69,6	< 0,001
ВР, с	0,283 ± 0,024	0,388 ± 0,092	0,105	37,1	> 0,05
ИВР, у. е.	163,9 ± 29,5	226,9 ± 52,8	63	38,4	> 0,05
ПАПР, у. е.	49,5 ± 4,7	68,8 ± 9,1	19,3	38,9	< 0,05
ВПР, у. е.	4,6 ± 0,5	4,317 ± 0,932	0,285	6,2	> 0,05
ИН, у. е.	100,5 ± 20,6	235,4 ± 40,1	134,9	134,2	< 0,01

У женщин с ХНМК в ВББ показатель амплитуды моды (АМо, %) выше на 27,6 % ( $p < 0,01$ ) по сравнению с контрольной группой, что указывает на смещение регуляции сердечного ритма в сторону симпатического отдела. Выявлены достоверные различия между значениями индекса вегетативного равновесия (ИВР, у. е.) у женщин в контрольной группе и в группе больных с ХНМК в ВББ: данный показатель выше на 109,1 % у женщин с ХНМК ( $p < 0,01$ ), что указывает на увеличение симпатических влияний. У женщин с ХНМК показатель адекватности процессов регуляции (ПАПР, у. е.) увеличен на 28,6 % ( $p < 0,05$ ) и свидетельствует об увеличении активности симпатического звена ВНС. Также у женщин в контрольной группе и в группе больных с ХНМК в ВББ выявлена достоверная корреляция между вегетативным показателем ритма (ВПР, у. е.) ( $p < 0,05$ ): у женщин с ХНМК данный показатель увеличен на 59,5 %, что свидетельствовало о снижении активности парасимпатического отдела ВНС. Индекс напряжения у женщин с ХНМК в ВББ увеличен на 247,6 % по сравнению с контрольной группой ( $p < 0,001$ ), что также свидетельствует об активности механизмов симпатической регуляции, и в 1,7 раза данный показатель выше верхней границы нормы

у женщин с ХНМК (табл. 2). Это свидетельствует о напряжении регуляторных систем у женщин со стенозирующим поражением ЭА в состоянии покоя.

**Таблица 2**  
Сравнительная характеристика показателей вариационной пульсометрии у женщин (опыт и контроль) в состоянии покоя

Показатели	Контроль (n = 20)	Опыт (n = 20)	Средняя разность		p
			^	%	
ЧСС, уд./мин	69,6 ± 2,3	70,6 ± 1,8	1	1,4	> 0,05
М, с	0,867 ± 0,022	0,883 ± 0,027	0,016	1,8	> 0,05
Мо, с	0,864 ± 0,024	0,887 ± 0,029	0,023	2,7	> 0,05
АМо, %	45,3 ± 3,0	57,8 ± 2,7	12,5	27,6	< 0,01
ВР, с	0,463 ± 0,056	0,354 ± 0,063	0,109	23,5	> 0,05
ИВР, у. е.	125,2 ± 18,2	261,8 ± 45,4	136,6	109,1	< 0,01
ПАПР, у. е.	52,9 ± 3,8	67,1 ± 4,6	14,2	26,8	< 0,05
ВПР, у. е.	3,2 ± 0,4	5,103 ± 0,753	1,903	59,5	< 0,05
ИН, у. е.	73,1 ± 10,9	254,1 ± 29,1	181	247,6	< 0,001

При активной ортостатической пробе (АОП) у мужчин в контрольной группе происходит учащение ЧСС на 31,4 % ( $p < 0,001$ ), показатель математического ожидания уменьшается на 20,6 % ( $p < 0,001$ ). Снижение моды (Мо) произошло у мужчин в контрольной группе на 20,3 % ( $p < 0,001$ ), увеличение показателя адекватности процессов регуляции на 31,3 % ( $p < 0,01$ ). Показатели индекса вегетативного равновесия и вегетативный показатель ритма увеличились по сравнению с фоновой пробой, что указывает на доминирующее влияние симпатического отдела ВНС при АОП.

Индекс напряжения увеличился на 35 %, что является условной нормой. Данные показатели свидетельствуют об адекватной реакции ВНС на нагрузку (табл. 3).

У женщин в контрольной группе происходит учащение ЧСС на 22 % ( $p < 0,001$ ). Выявлена достоверная разница показателя математического ожидания (М, с), который уменьшается на 17,8 % ( $p < 0,01$ ). Снижение моды (Мо) у женщин произошло на 18,2 % ( $p < 0,001$ ), что свидетельствует о доминирующем влиянии симпатического отдела ВНС при АОП. Следует отметить, что у женщин в контрольной группе достоверная разность между фоновой пробой и АОП выявлена у таких показателей, как вариационный размах ( $p < 0,01$ ): уменьшение при АОП на 38,4 %, то есть уменьшается влияние парасимпатического отдела ВНС. Выявили достоверную разность индекса вегетативного равновесия ( $p < 0,05$ ) при фоновой пробе и АОП: увеличение данного показателя при АОП на 41,8 % указывает на увеличение симпатических влияний. ПАПР при АОП увеличивается на 27,9 % ( $p < 0,01$ ), ВПР возрастает на 44,7 %

**Таблица 3**  
Показатели вариационной пульсометрии при активной ортостатической пробе у мужчин (контроль)

Показатели	Контроль (n = 14)				
	Фон	АОП	^	%	P
ЧСС, уд./мин	68,5 ± 4,1	90 ± 2,1	21,5	31,4	<0,001
М, с	0,848 ± 0,022	0,673 ± 0,016	0,175	20,6	<0,001
Мо, с	0,844 ± 0,026	0,673 ± 0,017	0,171	20,3	<0,001
АМо, %	40,8 ± 2,9	47,8 ± 3,5	7	14,5	>0,05
ВР, с	0,283 ± 0,024	0,417 ± 0,093	0,134	32	>0,05
ИВР, у. е.	163,9 ± 29,5	175,6 ± 40,2	11,7	6,7	>0,05
ПАПР, у. е.	49,5 ± 4,7	72,0 ± 6,3	22,5	31,3	<0,01
ВПР, у. е.	4,6 ± 0,5	5,25 ± 1,2	0,65	12,4	>0,05
ИН, у. е.	100,5 ± 20,6	135,5 ± 34,1	35	25,8	>0,05

( $p < 0,001$ ), то есть вегетативный баланс смещается в сторону симпатической регуляции.

Индекс напряжения у женщин при АОП демонстрирует тенденцию к нарастанию на 52,8 % ( $p < 0,01$ ), но остается в пределах условной нормы (табл. 4). Данные показатели свидетельствуют о том, что у женщин контрольной группы произошла адекватная реакция вегетативной нервной системы на нагрузку.

**Таблица 4**  
Показатели вариационной пульсометрии при активной ортостатической пробе у женщин (контроль)

Показатели	Контроль (n = 20)				
	Фон	АОП	^	%	P
ЧСС, уд./мин	69,6 ± 2,3	84,9 ± 1,8	15,3	22	<0,001
М, с	0,867 ± 0,022	0,713 ± 0,016	0,154	17,8	<0,01
Мо, с	0,864 ± 0,024	0,707 ± 0,016	0,157	18,2	<0,001
АМо, %	45,32 ± 3,002	50,98 ± 3,27	5,66	11,1	>0,05
ВР, с	0,463 ± 0,056	0,285 ± 0,029	0,178	38,4	<0,01
ИВР, у. е.	125,2 ± 18,2	215,0 ± 32,8	89,8	41,8	<0,05
ПАПР, у. е.	52,9 ± 3,8	73,4 ± 5,9	20,5	27,9	<0,01
ВПР, у. е.	3,2 ± 0,4	5,8 ± 0,6	2,6	44,7	<0,001
ИН, у. е.	73,1 ± 10,9	154,9 ± 24,3	81,76	52,8	<0,01

У мужчин с ХНМК в ВББ при активной ортостатической пробе ЧСС возрастает на 12,7 % ( $p < 0,05$ ). При АОП ВПР увеличивается на 50,6 %, ИВР на 34,9 %, что указывает на увеличение активности симпатической нервной системы.

Выявлена достоверная разность индекса напряжения ( $p < 0,05$ ), он возрастает на 125,4 % при АОП. Это свидетельствует о еще большем напряжении регуляторных систем и об увеличении степени активности центрального контура регуляции над автономным (табл. 5).

**Таблица 5**  
Показатели вариационной пульсометрии при активной ортостатической пробе у мужчин (опыт)

Показатели	Опыт (n = 16)				
	Фон	АОП	^	%	P
ЧСС, уд./мин	71,5 ± 1,9	80,6 ± 5,5	9,1	12,7	$p < 0,05$
М, с	0,909 ± 0,056	0,789 ± 0,068	0,12	13,2	>0,05
Мо, с	0,914 ± 0,058	0,781 ± 0,073	0,133	14,6	>0,05
АМо, %	69,2 ± 4,8	67,8 ± 5,2	1,4	2,0	>0,05
ВР, с	0,388 ± 0,092	0,374 ± 0,070	0,014	3,6	>0,05
ИВР, у. е.	226,9 ± 52,8	306,1 ± 142,1	79,2	34,9	>0,05
ПАПР, у. е.	68,8 ± 9,1	79,2 ± 10,7	10,4	15,1	>0,05
ВПР, у. е.	4,317 ± 0,932	6,5 ± 2,6	2,183	50,6	>0,05
ИН, у. е.	235,4 ± 40,1	530,7 ± 126,4	295,3	125,4	$p < 0,05$

У женщин с хронической формой НМК в ВББ при стенозирующем поражении ЭА выявлено увеличение ЧСС при активной ортостатической пробе на 19 % ( $p < 0,01$ ), математическое ожидание уменьшается на 16,2 % ( $p < 0,01$ ), мода уменьшается на 16,8 % ( $p < 0,01$ ), ПАПР увеличивается на 25,9 % ( $p < 0,05$ ), индекс напряжения увеличивается на 78,6 % ( $p < 0,01$ ), что свидетельствует об усилении влияния симпатического отдела ВНС и возрастании активности центрального контура регуляции (надсегментарного уровня), увеличении напряжения регуляторных механизмов для обеспечения мобилизации функциональных резервов организма, то есть возрастает уровень активности регуляторных систем.

Таким образом, во всех группах в состоянии покоя конечный эффект регуляторных воздействий на синусовый узел соответствовал нормокардии. В контрольных группах у мужчин и женщин отмечается сбалансированность парасимпатического и симпатического отделов ВНС.

Раскрытие механизмов, обеспечивающих конечный эффект регуляторных воздействий на синусовый узел, у больных с ХНМК в ВББ выявило существенные сдвиги вегетативного гомеостаза в сторону симпатического отдела ВНС. Уже в покое в процесс регуляции сердечного ритма включается центральный (надсегментарный) уровень управления вследствие дисфункции сегментарного (автономного, парасимпатического) отдела, что свидетельствует о напряжении регуляторных систем в покое (при фоновой пробе). Данные изменения у больных с ХНМК в ВББ указывают на вероятность повышения явлений декомпенсации заболевания в покое.

При АОП в группах исследования конечный эффект регуляторных воздействий на синусовый узел имел свои особенности. У мужчин контроль-

ной группы при АОП конечный эффект регуляции проявлялся в более выраженной тахикардии, тогда как у мужчин с ХНМК в ВББ отмечалась умеренная тахикардия. Перестройка состояния регуляторного аппарата при АОП у мужчин контрольной группы вызывала изменения показателей в пределах гомеостатического регулирования и не требовала включения центральных уровней управления, то есть регуляция сердечного ритма осуществлялась на сегментарном (автономном) уровне.

У мужчин с ХНМК в ВББ, напротив, наблюдалась максимальная централизация регуляции (подкорковый и корковый уровни регуляции) с напряжением на пределе компенсаторных возможностей регуляторных механизмов.

В женских группах исследование АОП выявило, что конечный эффект регуляторных воздействий на синусовый узел проявляется в умеренной тахикардии. При этом у женщин контрольной группы динамика характеризовалась координированными изменениями показателей вариабельности сердечного ритма, вызывая наиболее адекватное смещение вегетативного баланса в сторону преобладания симпатического отдела ВНС.

У женщин с ХНМК в ВББ механизмы, обеспечивающие конечный эффект регуляции в динамике АОП, характеризовались нарушением со стороны как необходимой актуализации прессорных процессов, так и затруднением в мобилизации регуляторных процессов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, у больных с ХНМК в ВББ в состоянии покоя вегетативный баланс смещен в сторону симпатического отдела, на что указывает увеличение показателей АМо, ИВР, ПАПР, ИН. Увеличение показателя ВПР у женщин связано с недостаточной функцией парасимпатического отдела, вегетативных центров X пары ЧМН продолговатого мозга. Данные показатели свидетельствуют о включении в процесс регуляции сердечного ритма надсегментарного уровня (подкоркового и коркового). Увеличение индекса напряжения по сравнению с нормой в покое указывает на возрастание активности центрального контура регуляции (надсегментарного уровня) для обеспечения мобилизации дополнительных функциональных резервов организма. При ХНМК в ВББ вследствие стенозирующего поражения церебральных артерий формируется дисбаланс между парасимпатическим и симпатическим отделами ВНС со смещением активности в сторону симпатического отдела вегетативной регуляции на фоне недостаточной активности парасимпатического звена, что является причиной затруднений адаптационных процессов. Вследствие гемодинамических нарушений в ВББ развивается дисфункция парасимпатических сегментарных центров и нарушение сопряженного взаимодействия между отделами ВНС, что приводит к гомеостатическим сдвигам в сторону повышения симпатического влияния на сердечно-сосудистую систему.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баевский Р. М., Кириллов О. И., Клецкин С. З. Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе. М.: Наука, 1984. 220 с.
2. Дуданов И. П., Субботина Н. С. Стандарты комплексной реабилитации больных цереброваскулярными заболеваниями при церебральном атеросклерозе // Академический вестник СЗО РАМН. 2002. № 1. Приложение. С. 61–62.
3. Дуданов И. П., Субботина Н. С., Петровский В. И. Патоморфологическая характеристика сосудистых поражений при церебральном стенозирующем атеросклерозе // Медицинский академический журнал. 2001. № 1. Приложение 1. С. 71–72.
4. Жулёв Н. М., Лобзин В. С., Бадзгадзе Ю. Д. Мануальная и рефлексорная терапия в вертеброневрологии: Руководство для врачей. СПб.: Санкт-Петербург. гос. ин-т усовершенствования врачей, 1992. 588 с.
5. Карпов Р. С., Дудко В. А. Атеросклероз: патогенез, клиника, функциональная диагностика, лечение. Томск: STT, 1998. 672 с.
6. Лившиц Л. Я., Лутюшкина Е. Б. К лечению когнитивных нарушений у больных с хронической ишемией головного мозга // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. 2003. № 9. С. 217.
7. Скворцова В. И. Нейропротективная стратегия ишемического инсульта // Врач. 2004. № 6. С. 26–32.
8. Хлызов В. И. Клиника, диагностика и результаты хирургического лечения патологии брахиоцефальных артерий // Кардиология. 1989. № 3. С. 47–50.
9. Christensen H., Meden P., Overgaard K. The course of blood pressure in acute stroke is related to the severity of the neurological deficits // Acta Neurol Scand. 2002. № 106. P. 142–147.
10. Collins R., Peto R. et al. Blood pressure, stroke and coronary heart disease // Lancet. 1990. Vol. 335. P. 827–838.
11. Hajat C. Ethnic differences in risk factors for ischemic stroke. A European case – control study // Stroke. 2004. Vol. 35. № 7. P. 1562–1567.
12. Moore T., Eriksson P., Stegmaier D. Ischemic stroke after acute myocardial infarction. // Stroke. 1997. Vol. 28. № 4. P. 762–767.

**Subbotina N. S.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Dorshakova O. V.**, Central Regional Hospital of Pryazha (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Kozlovskaya E. M.**, Emergency Care Hospital (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Belousova G. P.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

## VEGETATIVE REGULATION OF CARDIAC RHYTHM IN CONDITIONS OF CHRONIC DEFICIENCY IN CEREBRAL CIRCULATION

The state of autonomic regulation of the heart rate was analyzed in 70 patients according to the variation pulsometry. The patients in focus were diagnosed with disorders of cerebral circulation in vertebrobasilar system due to stenotic lesions of cerebral arteries. It is shown that due to the hemodynamic imbalance the vegetative regulatory activity deviates towards sympathetic sections. The increase in tension index speaks of the increase in the central regulation activity, which in turn ensures mobilization of additional functional reserves in the organism. In patients with severe cerebrovascular diseases, complicated by an acute stroke, a significant violation of dual interaction between divisions of the autonomic nervous system leads to homeostatic shifts towards sympathetic influence on the cardiovascular system.

Key words: cerebrovascular insufficiency, vertebrobasilar system, atherosclerotic stenosis of cerebral arteries, regulation of cardiac rhythm, variation pulsometry

### REFERENCES

1. Baevskiy R. M., Kirillov O. I., Kletskin S. Z. *Matematicheskiy analiz izmeneniy serdechnogo ritma pri stresse* [Mathematical analysis of changes in heart rate during stress]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 220 p.
2. Dudanov I. P., Subbotina N. S. Complex rehabilitation standards of patients with cerebrovascular disease due to cerebral atherosclerosis [Standarty kompleksnoy reabilitatsii patsientov tserebrovaskulyarnymi zabolevaniyami pri tserebral'nom ateroskleroze]. *Akademicheskii vestnik SZO RAMN* [Medical academic journal RAMS]. 2002. № 1. Annex 1. P. 61–62.
3. Dudanov I. P., Subbotina N. S. Pathological characteristics of vascular lesions in cerebral stenotic atherosclerosis [Patomorfologicheskaya kharakteristika sosudistyykh porazheniy pri tserebral'nom stenoziruyushchem ateroskleroze]. *Meditsinskiy akademicheskii zhurnal* [Medical academic journal RAMS]. 2001. № 1. Appendix 1. P. 71–72.
4. Zhulev N. M., Lobzin V. S., Badzgaradze Yu. D. *Manual'naya i reflektornaya terapiya v vertebronevrologii: Rukovodstvo dlya vrachey* [Manual and reflex therapy vertebro-neurology: a guide for physicians]. St. Petersburg, St. Petersburg State. Inst. Perfected. Physicians Publ., 1992. 588 p.
5. Karpov R. S., Dudko V. A. *Ateroskleroz: patogenez, klinika, funktsional'naya diagnostika, lechenie* [Atherosclerosis: pathogenesis, clinical, functional diagnostics, treatment]. Tomsk, STT Publ., 1998. 672 p.
6. Livshits L. Ya., Lutoshkina E. B. On treatment of cognitive impairment in patients with chronic cerebral ischemia [K lecheniyu kognitivnykh narusheniy u bol'nykh s khronicheskoy tserebral'noy ishemiey]. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii im. S. S. Korsakova* [Journal of Neurology and Psychiatry S. S. Korsakov]. 2003. № 9. P. 217.
7. Skvortsova V. I. Neuroprotective strategy for ischemic stroke [Neyroprotektivnaya strategiya ishemicheskogo insul'ta]. *Vrach* [Doctor]. 2004. № 6. P. 26–32.
8. Khlyzov V. I. Clinic, diagnosis and results of surgical treatment of pathology brachiocephalic arteries [Klinika, diagnostika i rezultaty khirurgicheskogo licheniya brachiotsefal'nykh arteriy]. *Kardiologiya* [Cardiology]. 1989. № 3. P. 47–50.
9. Christensen H., Meden P., Overgaard K. The course of blood pressure in acute stroke is related to the severity of the neurological deficits // *Acta Neurol Scand.* 2002. № 106. P. 142–147.
10. Collins R., Peto R. et al. Blood pressure, stroke and coronary heart disease // *Lancet.* 1990. Vol. 335. P. 827–838.
11. Hajat C. Ethnic differences in risk factors for ischemic stroke. A European case – control study // *Stroke.* 2004. Vol. 35. № 7. P. 1562–1567.
12. Moe T., Eriksson P., Stegmayr D. Ischemic stroke after acute myocardial infarction. // *Stroke.* 1997. Vol. 28. № 4. P. 762–767.

Поступила в редакцию 31.03.2015

УДК 615.1/4:577.115:116.2–008.331

**ГЕННАДИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ УСЕНКО**

доктор медицинских наук, профессор кафедры госпитальной терапии и клинической фармакологии лечебного факультета, Новосибирский государственный медицинский университет (Новосибирск, Российская Федерация)  
*usenko1949@mail.ru*

**ДМИТРИЙ ВИКТОРОВИЧ ВАСЕНДИН**

кандидат медицинских наук, доцент кафедры техносферной безопасности Института кадастра и природопользования, Сибирский государственный университет геосистем и технологий (Новосибирск, Российская Федерация)  
*vasendindv@gmail.com*

**АНДРЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ УСЕНКО**

кандидат медицинских наук, врач кабинета функциональной диагностики, Новосибирский областной госпиталь № 2 ветеранов войн (Новосибирск, Российская Федерация)  
*h2vv@mail.ru*

**ОЛЕГ ВИКТОРОВИЧ НИЩЕТА**

врач-терапевт амбулатории (пос. Кудряши Новосибирской области, Российская Федерация)  
*afeuckooaa@gmail.com*

## **ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ АКТИВНОСТЬЮ ЛИПОПРОТЕИН-АССОЦИИРОВАННОЙ ФОСФОЛИПАЗЫ А2 И СОДЕРЖАНИЕМ ЛИПИДОВ В КРОВИ У БОЛЬНЫХ АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИЕЙ**

Цель работы – установить зависимость между содержанием липидов крови, уровнем осложнений и активностью липопротеин-ассоциированной фосфолипазы А2 у больных артериальной гипертензией с различными темпераментом и уровнем тревожности. Группы больных ( $n = 416$ ) и здоровых ( $n = 422$ ) мужчин ( $54,2 \pm 1,8$  года) были разделены на лиц холерического, сангвинического, флегматического и меланхолического темперамента с высокой и низкой тревожностью. Депрессия легкой степени отмечена у высокотревожных флегматиков и меланхоликов. В сыворотке крови определяли активность и массу липопротеин-ассоциированной фосфолипазы А2, содержание общего холестерина, суммарной фракции липопротеинов низкой и очень низкой плотности, а также липопротеинов высокой плотности, триглицеридов, рассчитывали индекс атерогенности и число лиц, перенесших острое нарушение мозгового кровообращения и острый инфаркт миокарда в условиях низкой приверженности больных к лечению. У высокотревожных флегматиков и меланхоликов самое низкое содержание липопротеинов высокой плотности и самое высокое среди обследуемых лиц содержание липидов атерогенных фракций (триглицериды, общий холестерин, липопротеины низкой и очень низкой плотности) сочеталось с самой высокой активностью и массой липопротеин-ассоциированной фосфолипазы А2, а также наличием самой высокой доли лиц, перенесших осложнения артериальной гипертензии. Соотношение лиц, перенесших осложнения в группах высокотревожных холериков и сангвиников, к таковым у высокотревожных флегматиков и меланхоликов составило 1 : 2.

Ключевые слова: гипертония, липопротеин-ассоциированная фосфолипаза А2, липиды, тревожность, темперамент

В целях профилактики острого инфаркта миокарда (ОИМ) и острого нарушения мозгового кровообращения (ОНМК) первостепенное значение имеет изучение показателей липидного обмена у больных артериальной гипертензией (АГ), атеросклерозом и ишемической болезнью сердца [6], [13]. Известно влияние психоэмоционального стресса на активацию факторов риска и изменение состояния процессов липидного обмена [7], [13]. С нарушением липидного обмена сочетается изменение активности липопротеин-ассоциированной фосфолипазы А2 (ЛПФЛ А2)

[2]. К нарушениям липидного обмена относят, в первую очередь, повышение уровня общего холестерина (ОХ), липопротеинов низкой (ЛПНП) и очень низкой (ЛПОНП) плотности и снижение содержания липопротеинов высокой плотности (ЛПВП) [2], [6]. ЛПФЛ А2 – гидролаза, осуществляющая гидролиз триглицеридов (ТГ), находящихся в составе хиломикрон и ЛПОНП до моноглицеридов и свободных жирных кислот [5]. Однако анализ результатов уникальных исследований ряда авторов [5], [8], [15], [17] не привел к однозначному заключению о связи между

активностью ЛПФЛ А2, содержанием липидов в крови и уровнем осложнений артериальной гипертензии.

Цель работы – установить зависимость между содержанием липидов крови, уровнем осложнений и активностью ЛПФЛ А2 у больных АГ с различным темпераментом и уровнем тревожности на фоне эмпирической антигипертензивной терапии (ЭАГТ).

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В период с 1999 по 2014 год в амбулаторных условиях обследовано 416 мужчин инженерно-технических работников в возрасте 44–62 лет (в среднем  $54,2 \pm 1,8$  года), страдающих гипертонической (эссенциальной) болезнью III стадии (ГБ-III), 3-й степени, риск 3. Наличие ГБ-III устанавливали на основании критериев, изложенных в Российских рекомендациях «Профилактика, диагностика и лечение АГ» (3-го пересмотра) [9]. У 96% из них отсутствовала сопутствующая патология. Средняя продолжительность АГ  $11,6 \pm 1,4$  года. Контролем служили 422 здоровых мужчины, совместимых по основным антропосоциальным показателям. Пациенты принимали препараты АГТ, указанные в Приказе № 254 от 22.11.2004 «Об утверждении стандарта медицинской помощи больным артериальной гипертензией» Минздравсоцразвития России. Содержание в сыворотке крови ОХ, ТГ определяли ферментными методами с применением фирменных наборов «CentrifChem-600», а содержание холестерина ЛПВП – после предварительного осаждения суммарной фракции ЛПНП и ЛПОНП на автоанализаторе «Technicon-ААII» [3]. Содержание ЛПНП рассчитывали по формуле В. Фридевальда:  $\text{ЛПНП} = \text{ОХ} - (\text{ТГ}/2,2) - \text{ЛПВП}$ , где  $\text{ТГ}/2,2 = \text{ЛПОНП}$  [16]. Массу ЛПФЛ А2 определяли с помощью PLAC-теста методом иммунотурбодиметрии в формате ELISA. Измерение активности ЛПФЛ А2 осуществляли с помощью диагностического набора PLAC Test с помощью автоматизированного тестирования [3]. В целях определения взаимосвязи между активностью ЛПФЛ А2, содержанием липидов в крови и уровнем осложнений АГ учитывали долю (%) лиц в группе, перенесших ОНМК и ОИМ. Преобладающий темперамент – холерический (Х), сангвинический (С), флегматический (Ф) и меланхолический (М) – устанавливали с использованием тестов Дж. Айзенка и А. Белова [11]; в целях исключения ошибки – 1 раз в 3 месяца. Величину реактивной и личностной тревожности определяли по тесту Ч. Спилберга в модификации Ю. Ханина [14] 1 раз в 3 месяца. Уровень низкой тревожности (НТ) не превысил  $29,6 \pm 1,5$  балла, высокой тревожности (ВТ)  $48,6 \pm 1,5$  балла. Уровень депрессивности рассчитывали по методике [1], состояние легкой депрессивности отмечено только у ВТ-меланхоликов. Им

назначали в 96% случаев коаксил (тианептин) по 12,5 мг утром и на ночь. Лицам с высокой тревожностью психоневрологи назначали анксиолитики, преимущественно сибазон (диазепам) по 2,5 мг утром и на ночь. Назначение анксиолитиков НТ-лицам противопоказано. Предыдущие исследования показали, что у Х и С (здоровых и пациентов) преобладал тонус симпатического, а у ВТ (НТ)/Ф и М – парасимпатического отдела вегетативной нервной системы. Содержание кортизола у Х и С было выше, а альдостерона и инсулина ниже, чем у ВТ (НТ)/Ф и М (как здоровых лиц, так и пациентов). ЭАГТ включала  $\beta$ -адреноблокатор + диуретик или ингибитор ангиотензинпревращающего фермента + диуретик, чаще гипотиазид. ЭАГТ названа так потому, что не направлена на блокирование симпатикотонии у Х и С и активности ренин-ангиотензин-альдостероновой системы (по альдостерону) у Ф и М, согласно различиям в психосоматическом статусе, установленным ранее [12]. Исследования, в том числе забор крови, осуществляли утром, с 8.00 до 10.00, натощак. Полученные результаты обрабатывали методами вариационной статистики с использованием прикладных программ «StafStat» США и параметрического t-критерия Стьюдента. Достоверными считали различия при  $p < 0,05$ . Результаты в таблицах представлены как  $M \pm m$ , где  $M$  – среднестатистическое значение,  $m$  – стандартная ошибка от среднего. Выбор методик, не вышедших за рамки требований Хельсинкской декларации лечения и обследования людей, был одобрен Комитетом по этике Новосибирского государственного медицинского университета от 20.11.2009, протокол № 18.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание в крови ОХ, суммарной фракции ЛПНП + ЛПОНП, ТГ, а также величина индекса атерогенности достоверно увеличивались, а содержание ЛПВП достоверно снижалось в «темпераментальном» ряду от Х к М, как у здоровых, так и пациентов: ВТ (НТ)/Х – С – Ф – М (табл. 1). У ВТ-пациентов содержание липидов атерогенных фракций (ОХ, ЛПНП + ЛПОНП) было выше, а ЛПВП ниже, чем у НТ-лиц соответствующего темперамента. У ВТ (НТ)/Ф и М пациентов содержание липидов атерогенных фракций было выше, а ЛПВП достоверно ниже, чем у ВТ (НТ)/Х и С-пациентов. Вместе с тем содержание ЛПВП у ВТ (НТ) здоровых лиц было достоверно выше, а липидов атерогенных фракций ниже, чем у ВТ (НТ)-пациентов соответствующего темперамента. Полученные данные убеждают в том, что с увеличением содержания инсулина и альдостерона на фоне превалирования активности ренин-ангиотензин-альдостероновой системы (по альдостерону) [12] сочетается склонность

к увеличению содержания липидов атерогенных фракций. К тому же высокое содержание инсулина и альдостерона у ВТ(НТ)/Ф и ВТ(НТ)/М, по сравнению с таковым у ВТ(НТ)/Х и С-пациентов, учитывая данные ряда работ [4], [10], могут потенцировать гипертрофию миокарда и медию сосудов. Вместе с тем увеличение значений индекса атерогенности от Х к М в указанном «темпераментальном» ряду может свидетельствовать о возрастании риска развития атеросклероза у ВТ-пациентов, особенно у ВТ/Ф и ВТ/М (см. табл. 1).

Активность и масса ЛПФЛ А2 достоверно увеличивались в том же «темпераментальном» ряду, что и увеличение индекса атерогенности, содержание липидов атерогенных фракций, но уменьшение содержания ЛПВП (табл. 1, 2). У ВТ-пациентов и здоровых лиц активность и масса ЛПФЛ А2 были достоверно выше, чем у НТ-пациентов и здоровых лиц соответствующего темперамента. Вместе с тем у здоровых ВТ(НТ)-лиц активность и масса ЛПФЛ А2 были достоверно ниже, чем у ВТ (НТ)-пациентов соответствующего темперамента, как и ниже склонность к атерогенезу

**Таблица 1**  
Содержание липидов в крови у ВТ и НТ-лиц с различным темпераментом на фоне ЭАГТ за период исследования с 1999 по 2014 год (p < 0,05)

		ОХС, ммоль/л		ЛПВП, ммоль/л		Суммарная фракция ЛПНП + ЛПОНП, ммоль/л		Триглицериды, ммоль/л		Индекс атерогенности, усл. ед.	
		Больные	Здоровые	Больные	Здоровые	Больные	Здоровые	Больные	Здоровые	Больные	Здоровые
Холерика	ВТ (50)	5,43 ± 0,02 706	4,90 ± 0,01 653	1,52 ± 0,002	1,75 ± 0,003	3,91 ± 0,01	1,25 ± 0,003	1,42 ± 0,004	1,07 ± 0,002	2,57 ± 0,02	1,90 ± 0,002
	НТ (50)	5,09 ± 0,02 674	4,52 ± 0,01 599	1,80 ± 0,002	2,01 ± 0,003	3,29 ± 0,01	2,51 ± 0,001	1,07 ± 0,002	0,91 ± 0,002	1,83 ± 0,02	1,25 ± 0,003
Сангвиники	ВТ (54)	5,8 ± 0,02 735	5,21 ± 0,03 603	1,36 ± 0,003	1,54 ± 0,005	4,43 ± 0,01	1,61 ± 0,002	1,60 ± 0,003	1,28 ± 0,003	3,26 ± 0,02	2,38 ± 0,002
	НТ (52)	5,29 ± 0,02 682	4,75 ± 0,01 644	1,59 ± 0,002	1,82 ± 0,005	3,70 ± 0,01	2,93 ± 0,001	1,28 ± 0,003	1,06 ± 0,003	2,33 ± 0,02	1,61 ± 0,002
Флегматики	ВТ (56)	6,15 ± 0,02 694	5,50 ± 0,03 598	1,25 ± 0,003	1,41 ± 0,004	4,90 ± 0,01	2,18 ± 0,001	1,87 ± 0,003	1,53 ± 0,003	3,92 ± 0,01	2,91 ± 0,001
	НТ (54)	5,65 ± 0,02 712	5,05 ± 0,01 698	1,42 ± 0,003	1,59 ± 0,004	4,23 ± 0,01	3,46 ± 0,001	1,53 ± 0,003	1,32 ± 0,003	3,00 ± 0,01	2,18 ± 0,001
Меланхолики	ВТ (50)	6,65 ± 0,02 684	5,90 ± 0,03 675	1,14 ± 0,002	1,27 ± 0,004	5,52 ± 0,01	2,85 ± 0,001	2,10 ± 0,003	1,74 ± 0,003	4,83 ± 0,01	3,65 ± 0,001
	НТ (50)	6,09 ± 0,02 679	5,35 ± 0,01 654	1,24 ± 0,002	1,39 ± 0,004	4,85 ± 0,01	3,96 ± 0,001	1,74 ± 0,003	1,51 ± 0,003	3,91 ± 0,01	2,85 ± 0,001

Примечания. Здесь и далее в скобках указано число лиц в группе; в знаменателе – количество исследований.

**Таблица 2**  
Активность и масса ЛПФЛА2 у ВТ и НТ-лиц с различным темпераментом на фоне ЭАГТ за период исследования с 1999 по 2014 год (p < 0,05)

	Активность, нмоль/мин/мл			Масса, нг/мл	
		Пациенты	Здоровые	Пациенты	Здоровые
Холерика	ВТ (50)	191,7 ± 1,6 380	180,7 ± 1,6 355	188,9 ± 1,6 380	171,8 ± 1,6 355
	НТ (50)	178,6 ± 1,8 327	169,6 ± 1,8 321	173,3 ± 1,8 327	161,6 ± 1,8 321
Сангвиники	ВТ (54)	201,8 ± 1,6 376	190,2 ± 1,7 345	194,8 ± 1,9 376	183,7 ± 1,7 345
	НТ (52)	189,7 ± 1,7 336	179, ± 1,8 337	183,6 ± 1,9 336	172,5 ± 1,8 337
Флегматики	ВТ (56)	210,8 ± 1,7 367	200,7 ± 1,7 337	205,2 ± 1,6 367	194,8 ± 1,7 337
	НТ (54)	199,9 ± 1,6 349	189,4 ± 1,6 339	193,7 ± 1,9 349	183,8 ± 1,6 339
Меланхолики	ВТ (50)	220,8 ± 1,6 369	209,7 ± 1,5 329	216,4 ± 1,9 369	206,3 ± 1,9 329
	НТ (50)	211,6 ± 1,8 358	200,6 ± 1,6 348	205,6 ± 1,8 358	194,2 ± 1,6 348

Таблица 3

Количество и доля (%) лиц в группе с осложнениями и отношение ОНМК/ОИМ у высоко- и низкотревожных лиц с различным темпераментом на фоне ЭАГТ за период исследования с 1999 по 2014 год ( $p < 0,05$ )

		Высокотревожные		Низкотревожные		
		Пациенты	Здоровые	Пациенты	Здоровые	
Число и доля лиц (%) с осложнениями (ОНМК + ОИМ)	Холерики	17–34,0% (50)	4–8,0% (50)	8–16,0% (50)	2–3,85% (50)	
	Сангвиники	29–55,7% (54)	9–17,7% (51)	14–28,0% (52)	4–7,7% (51)	
	Флегматики	43–74,1% (56)	14–24,1% (60)	16–30,8% (54)	4–7,4% (60)	
	Меланхолики	40–80,0% (50)	14–30,0% (50)	15–30,0% (50)	5–10,0% (50)	
Соотношение числа лиц в группе, перенесших ОНМК и ОИМ						
ОНМК/ ОИМ, усл. ед.		Высокотревожные		Низкотревожные		
		Холерики	12/5	2/2	5/3	1/1
		Сангвиники	17/2	5/4	5/9	2/2
		Флегматики	10/32	6/8	4/12	1/3
		Меланхолики	9/31	6/9	4/11	2/3
Отношение по осложнениям X + C : M + Ф		36 : 82 = 1 : 2	13 : 29 = 1 : 2,2	22 : 33 = 1 : 3	6 : 9 = 1 : 1,5	

(по величине индекса атерогенности и содержанию липидов). По сравнению с другими лицами, у пациентов групп ВТ/Ф и ВТ/М активность и масса ЛПФЛ А2 оказались самыми высокими, что сочеталось с самыми высокими значениями величин индекса атерогенности, содержания ОХ, суммарной фракции ЛПНП + ЛПОНП и ТГ. У ВТ (НТ)/Ф и М-здоровых лиц отмечена та же тенденция, но активность и масса ЛПФЛ А2, содержание липидов атерогенных фракций ниже, а содержание ЛПВП выше, чем у ВТ (НТ)/Ф и М-пациентов (см. табл. 1, 2). Различия в содержании липидов крови, а также по активности и массе ЛПФЛ А2 не имели бы принципиального значения, если бы не уровень осложнений АГ, даже в группах здоровых лиц, служивших контролем (табл. 3). Как показало исследование, с повышением активности и массы ЛПФЛ А2 сочеталось не только повышение содержания липидов атерогенных фракций, но и доля лиц в группе, перенесших ОИМ или ОНМК, особенно в ВТ-группах и тем более в группах ВТ/Ф и ВТ/М-пациентов (см. табл. 3). У последних на фоне самых высоких активности, массы ЛПФЛ А2 и содержания липидов атерогенных фракций – самый высокий уровень осложнений АГ (см. табл. 3). Отношение доли лиц с ОНМК к таковым с ОИМ показало, что ОНМК больше в группах ВТ/Х и ВТ/С, а ОИМ больше в группах ВТ/Ф и ВТ/М. Отноше-

ние осложнений (ОИМ + ОНМК) у ВТ/Х и ВТ/С к таковым у ВТ/Ф и ВТ/М составило 1: 2 (см. табл. 3). Следует отметить, что следствие гидролиза фосфолипидов (в том числе окисленных ЛПНП) – окисленные жирные кислоты и лизофосфатидилхолин. Последний является медиатором воспаления в субэнтимальном пространстве сосуда и проатерогенным фактором [8]. Возможно, этот факт способен объяснить высокую предрасположенность ВТ/Ф и ВТ/М к атеросклерозу и ОИМ и позволяет отнести их к лицам с высоким риском развития осложнений АГ на фоне проведения ЭАГТ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Активность и масса ЛПФЛ А2 достоверно повышалась в ряду ВТ (НТ)/Х – С – Ф – М.
2. С высокой активностью и массой ЛПФЛ А2 сочеталось высокое содержание липидов атерогенных фракций и доля лиц с осложнениями АГ, особенно в группах ВТ/Ф и ВТ/М-пациентов. Группы больных ВТ/Ф и ВТ/М являются группами высокого риска тяжелого течения АГ по ОИМ и ОНМК.
3. Отношение осложнений по ОИМ и ОНМК между группами ВТ/Х и ВТ/С к таковым у ВТ/Ф и ВТ/М составило 1 : 2, что указывает на опасность сочетания коронарной патологии и АГ преимущественно у ВТ/Ф и ВТ/М.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахметжанов Э. Р. Шкала депрессии. Психологические тесты. М.: Лист, 1996. 320 с.
2. Каюмова Л. Р., Якшембитова Е. Р., Воробьева Е. В., Горбунова В. Ю. Анализ возможной роли генетических факторов в определении уровня основных показателей липидного профиля сыворотки крови у жителей Республики Башкортостан // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. № 5 (3). С. 240–244.
3. Кишкун А. А. Руководство по лабораторным методам диагностики. М.: ГЭОТАР, 2007. 800 с.
4. Мухин Н. А., Фомин В. В. Ренин – мишень прямой фармакологической блокады при артериальной гипертензии // Терапевтический архив. 2009. № 8. С. 5–9.



5. Нозадзе Д. Н., Сергиенко И. В., Балахонова Т. В., Семенов А. Е., Власик Т. Н. Связь уровня липопротеин-ассоциированной фосфолипазы А2 с категориями риска развития сердечно-сосудистых заболеваний // Кардиология. 2014. № 3. С. 57–63.
6. Оганов Р. Г., Масленникова Г. Я. Демографические тенденции в Российской Федерации: вклад болезней системы кровообращения // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2012. № 1. С. 5–10.
7. Осипова И. В., Пырикова Н. В., Антропова О. Н., Комиссарова И. Н., Мирошниченко А. И. Влияние психоэмоционального стресса на факторы сердечно-сосудистых заболеваний // Кардиология. 2014. № 2. С. 42–45.
8. Полупанов А. Г., Ломтева Ю. Н., Халматов А. Н., Ческидова Н. Б., Романова Т. А., Джумагулова А. С. Липопротеин-ассоциированная фосфолипаза А2: взаимосвязь с развитием ишемического инсульта у больных эссенциальной гипертензией // Кардиология. 2014. № 6. С. 29–34.
9. Профилактика, диагностика и лечение АГ. Российские рекомендации (3-й пересмотр) // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2008. № 7. Прилож. 2. С. 5–16.
10. Соколов Е. И., Лавренова Н. Ю., Голобородова И. В. Реакция симпатико-адреналовой системы у больных ишемической болезнью сердца при эмоциональном напряжении в зависимости от типа личности // Кардиология. 2009. № 12. С. 18–23.
11. Столяренко Л. Д. Опросник Айзенка по определению темперамента. Основы психологии. Ростов-н/Д: Феникс, 1997. 736 с.
12. Усенко Г. А., Усенко А. Г., Васендин Д. В. Взаимосвязь между содержанием магния и липидов крови у больных артериальной гипертензией с различным темпераментом и тревожностью // Профилактическая и клиническая медицина. 2014. № 3 (52). С. 115–122.
13. Усенко Г. А., Усенко А. Г., Васендин Д. В., Нишета О. В., Машков С. В., Величко Н. П., Козырева Т. Ю. Липиды крови, ожирение и уровень осложнений гипертонической болезни в зависимости от психосоматических особенностей пациента и лечения // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 11: Медицина. 2014. № 1. С. 133–141.
14. Ханин Ю. Л. Исследование тревоги в спорте // Вопросы психологии. 1978. № 6. С. 94–106.
15. Ballantyne C. M., Hoogeveen R. C., Bang H., Coresh J., Folsom A. R., Heiss G., Sharrett A. R. Lipoprotein-associated phospholipase A2, high sensitivity C-reactive protein and risk for incident coronary heart disease in middle-aged men and women in the Atherosclerosis Risk in Communities (ARIC) study // Circulation. 2004. № 109. С. 837–842.
16. Friedewald W. T., Levy R. Z., Fredrikson D. S. Estimation of the concentration of low density lipoprotein cholesterol in plasma without use of the preparative ultracentrifuge // Clin. Chem. 1972. Vol. 18. P. 499–502.
17. Robins S. J., Collins D., Bloomfield H. E., Asztalos B. F. Cardiovascular events with increased lipoprotein-associated phospholipase A (2) and low high-density lipoprotein-cholesterol: the Veterans Affairs HDL Intervention Trial // Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol. 2008. № 28 (6). P. 1172–1178.

**Usenko G. A.**, Novosibirsk State Medical University (Novosibirsk, Russian Federation)  
**Vasendin D. V.**, Siberian State University Geosystems and Technology (Novosibirsk, Russian Federation)  
**Usenko A. G.**, Novosibirsk Hospital № 2 of War Veterans (Novosibirsk, Russian Federation)  
**Nishcheta O. V.**, Phisician Ambulance (Settlement Kudryashi, Novosibirsk Region, Russian Federation)

#### DEPENDENCES BETWEEN ACTIVITY OF LIPOPROTEIN-ASSOCIATED PHOSPHOLIPASE A2 AND BLOOD LIPIDS IN PATIENTS WITH ARTERIAL HYPERTENSION

The purpose of the study was to establish dependences associated with the content of blood lipids, levels of complications, and lipoprotein-associated phospholipase A2 activity in hypertensive patients with different temperament and versatile anxiety levels. A group of patients (n = 416) and healthy men (n = 422) (54,2 ± 1,8 years old) were divided into subgroups with different temperaments: choleric, sanguine, phlegmatic and melancholic temperaments with high and low anxiety levels. A depression of mild degree was revealed in high anxiety phlegmatic and melancholic patients. The serum activity and the mass of lipoprotein-associated phospholipase A2 was determined. The content of total cholesterol, total fractions of lipoproteins of low and very low-density, high-density lipoproteins, and triglycerides were identified. The atherogenic index was calculated together with the number of people suffering from an acute ischemic stroke and an acute myocardial infarction with low adherence to treatment. High anxiety phlegmatic and melancholic patients revealed the lowest content of high density lipoprotein and the highest level of atherogenic lipid fractions (triglycerides, total cholesterol, lipoproteins of low and very low density). It was combined with the high activity and high mass of lipoprotein-associated phospholipase A2. This condition was observed in the high percentage of patients suffering from hypertension. The ratio of patients with high anxiety of choleric and sanguine temperaments to those of high anxiety with phlegmatic and melancholic temperaments was 1 : 2.

Key words: hypertension, lipoprotein-associated phospholipase A2, lipids, anxiety, temperament

#### REFERENCES

1. Akhmetzhanov E. R. *Shkala depressii. Psikhologicheskie testy* [Depression Scale. Psychological tests]. Moscow, List Publ., 1996. 320 p.
2. Kayumova L. R., Yakshembitova E. R., Vorob'eva E. V., Gorbunova V. Yu. An analysis of the possible role of genetic factors in determining the level of the main lipid profile of blood serum from residents of the Republic of Bashkortostan [Analiz vozmozhnoy roli geneticheskikh faktorov v opredelenii urovnya osnovnykh pokazateley lipidnogo profilya syvorotki krovi u zhiteley Respubliki Bashkortostan]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of Samara Scientific center of RAS]. 2011. № 5 (3). P. 240–244.
3. Kishkun A. A. *Rukovodstvo po laboratornym metodam diagnostiki* [A manual of laboratory diagnostic methods]. Moscow, GEOTAR Publ., 2007. 800 p.

4. Mukhin N. A., Fomin V. V. The rennin – direct target of pharmacological blockade in hypertension [Renin – mishen' pryamoy farmakologicheskoy blokady pri arterial'noy gipertonii]. *Terapevticheskiy arkhiv* [Therapeutic archive]. 2009. № 8. P. 5–9.
5. Nozadze D. N., Sergienko I. V., Balakhonova T. V., Semenov A. E., Vlasik T. N. Dependences between levels of lipoprotein – associated phospholipase A2 with different risk categories of cardiovascular disease [Svyaz' urovnya lipoprotein-assotsirovannoy fosfolipazy A2 s kategoriyami riska razvitiya serdechno-sosudistyykh zabolovaniy]. *Kardiologiya* [Cardiology]. 2014. № 3. P. 57–63.
6. Oganov R. G., Maslennikova G. Ya. Demographic trends in the Russian Federation: the contribution of circulatory diseases [Demograficheskie tendentsii v Rossiyskoy Federatsii: vklad bolezney sistemy krovoobrashcheniya]. *Kardiovaskulyarnaya terapiya i profilaktika* [Cardiovascular therapy and prevention]. 2012. № 1. P. 5–10.
7. Osipova I. V., Pyrikova N. V., Antropova O. N., Komissarova I. N., Miroschnichenko A. I. The effect of emotional stress on factors of cardiovascular diseases [Vliyanie psikhoemotsional'nogo stressa na faktory serdechno-sosudistyykh zabolovaniy]. *Kardiologiya* [Cardiology]. 2014. № 2. P. 42–45.
8. Polupanov A. G., Lomteva Yu. N., Khamatov A. N., Cheskidova N. B., Romanova T. A., Dzhumagulova A. S. Lipoprotein-associated phospholipase A2: correlation with the development of ischemic stroke in patients with essential hypertension [Lipoprotein-assotsirovannaya fosfolipaza A2: vzaimosvyaz' s razvitiem ishemicheskogo insulta u bol'nykh essentsial'noy gipertenziiy]. *Kardiologiya* [Cardiology]. 2014. № 6. P. 29–34.
9. Prevention, diagnosis and treatment of hypertension. Russian recommendation (3rd revision) [Profilaktika, diagnostika i lechenie AG. Rossiyskie rekomendatsii (3-y peresmotr)]. *Kardiovaskulyarnaya terapiya i profilaktika* [Cardiovascular therapy and prevention]. 2008. № 7. App. 2. P. 5–16.
10. Sokolov E. I., Lavrenova N. Yu., Goloborodova I. V. The reaction of sympathetic-adrenal system in patients with coronary heart disease under emotional stress, depending on the type of personality [Reaktsiya simpatiko-adrenalovoy sistemy u bol'nykh ishemicheskoy bolezniyu serdtsa pri emotsional'nom napryazhenii v zavisimosti ot tipa lichnosti]. *Kardiologiya* [Cardiology]. 2009. № 12. P. 18–23.
11. Stolyarenko L. D. *Oprosnik Ayzenka po opredeleniyu temperamenta. Osnovy psikhologii* [Eysenck questionnaire to determine the temperament. Principles of Psychology]. Rostov on Don, Feniks Publ., 1997. 736 p.
12. Usenko G. A., Usenko A. G., Vasendin D. V. The relationship between magnesium and blood lipids in patients with arterial hypertension with different temperament and anxiety [Vzaimosvyaz' mezhdu sodержaniem magniya i lipidov krovi u bol'nykh arterial'noy gipertenziiy s razlichnym temperamentom i trevozhnost'yu]. *Profilakticheskaya i klinicheskaya meditsina* [Preventive and clinical medicine]. 2014. № 3 (52). P. 115–122.
13. Usenko G. A., Usenko A. G., Vasendin D. V., Nishcheta O. V., Mashkov S. V., Velichko N. P., Kozyreva T. Yu. Blood lipids, obesity and the incidence of complications of hypertension depending on psychosomatic of patients and their treatment [Lipidy krovi, ozhirenie i uroven' oslozhneniy gipertonicheskoy bolezni v zavisimosti ot psikhosomaticheskikh osobennostey patsienta i lecheniya]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 11: Meditsina* [Vestnik of Saint-Petersburg University. Series 11: Medicine]. 2014. № 1. P. 133–141.
14. Khanin Yu. L. The study of anxiety in sports [Issledovanie trevogi v sporte]. *Voprosy psikhologii* [Questions of psychology]. 1978. № 6. P. 94–106.
15. Ballantyne C. M., Hoogeveen R. C., Bang H., Coresh J., Folsom A. R., Heiss G., Sharrett A. R. Lipoprotein-associated phospholipase A2, high sensitivity of C-reactive protein and risk for incident coronary heart disease in middle-aged men and women in the Atherosclerosis Risk Communities (ARIC) study // *Circulation*. 2004. № 109. C. 837–842.
16. Friedewald W. T., Levy R. Z., Fredrikson D. S. Estimation of the concentration of low density lipoprotein cholesterol in plasma without the use of preparative ultracentrifuge // *Clin. Chem*. 1972. Vol. 18. P. 499–502.
17. Robins S. J., Collins D., Bloomfield H. E., Asztalos B. F. Cardiovascular events with increased lipoprotein-associated phospholipase A (2) and low high-density lipoprotein-cholesterol: the Veterans Affairs HDL Intervention Trial // *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol*. 2008. № 28 (6). P. 1172–1178.

Поступила в редакцию 02.03.2015

**ЮРИЙ БОРИСОВИЧ ГЛАЗУНОВ**

кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией лесоводства и биологической продуктивности, Институт лесоведения РАН (Московская область, Российская Федерация)  
*glazunov@ilan.ras.ru*

**МИХАИЛ ДМИТРИЕВИЧ МЕРЗЛЕНКО**

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт лесоведения РАН (Московская область, Российская Федерация)  
*md.merzlenko@mail.ru*

**ПЕТР ГРИГОРЬЕВИЧ МЕЛЬНИК**

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства, Московский государственный университет леса (Москва, Российская Федерация)  
*melnik\_petr@bk.ru*

**СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РОСТА КАРЕЛЬСКОГО КЛИМАТИПА СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В УСЛОВИЯХ ПОДМОСКОВЬЯ**

Приведены результаты сравнительного исследования роста карельского климатипа (Южнокарельский лесосеменной район) сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в географических культурах Подмосковья. Культуры созданы в 1948 году, к моменту проведения исследований их возраст составил 65 лет. Для сравнения использованы две провениенции из Московской и Владимирской областей (Московский подрайон Центрального лесосеменного района). Установлено, что карельский климатип сосны заметно отличается от местных по характеру роста. Он уступает подмосковному и владимирскому климатипам по средней высоте древостоя, но превосходит их по диаметру. В насаждении карельского происхождения отмечено преобладание лидирующих в росте деревьев, и, в отличие от местных провениенций, отсутствие сухостоя. Сохранность деревьев по отношению к первоначально высаженному количеству была наименьшей в карельском климатипе. Отмеченные различия в характере роста древостоев обусловлены более ранним и значительным естественным изреживанием в насаждении карельского происхождения. Вместе с тем по стволловому запасу древостоя в возрасте 65 лет карельский климатип не уступал местным. По совокупности характеристик роста карельского климатипа сделан вывод о его пригодности для выращивания в условиях Подмосковья, несмотря на значительную удаленность района происхождения семян.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, географические лесные культуры, климатип, провениенция, рост и состояние насаждений

**ВВЕДЕНИЕ**

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) обладает исключительно высокой адаптивной способностью. Данный вид способен существовать при различной длине светового дня, продолжительности вегетационного периода, на богатых и бедных почвах, в засушливых и переувлажненных условиях. Ареал сосны простирается от Шотландии до Дальнего Востока и от зоны лесостепи до лесотундры включительно. В пределах этого ареала сосне свойственна генетическая изменчивость, обусловленная длительной адаптацией к местным климатическим условиям. Выделяют несколько подвидов и различные формы сосны [2], [12], [13].

Изучение изменчивости наследственных свойств в географическом аспекте имеет принципиально важное значение для теории и практики лесоводства. Прежде всего актуален вопрос о возможностях искусственного расселения и пос-

ледующей адаптации к новым условиям тех или иных климатипов сосны. Считается, что семена местных популяций более предпочтительны по сравнению с инорайонными. Так, согласно «Лесосеменному районированию», предпочтение отдается семенам местных и смежных с ними популяций как наиболее адаптированных к природным условиям района [6]. Под местными понимаются семена, собранные непосредственно в пределах лесосеменного района. При этом, однако, допускается возможность перемещения семян за пределы ареала вида, там, где имеется продолжительный опыт выращивания высокопродуктивных биологически устойчивых насаждений данных видов или где они в недалеком прошлом произрастали [6].

Исследования географических культур сосны в различных регионах показывают, что инорайонные провениенции чаще бывают менее продуктивными и устойчивыми по сравнению с местными [4], [6], [9]. Вместе с тем эта тенден-

ция проявляется не всегда. В некоторых случаях провениенции, полученные из районов, весьма отдаленных от района исследований, не уступают местным по сохранности и скорости роста и даже превосходят их [8], [15], [16]. Относительная скорость роста различных провениенций в географических культурах может заметно различаться в разном возрасте [5]. Поэтому на основании исследований в молодых культурах не всегда можно сделать адекватные выводы относительно успешности роста того или иного климата в длительной перспективе. Большинство географических культур были созданы после 1960-х годов и к настоящему времени не достигли возраста приспевания [2]. Возможность перемещения семян сосны в пределах ее обширного ареала может быть определена только эмпирически, путем длительных наблюдений за ростом различных климатипов в географических культурах. Чем продолжительнее период наблюдений, тем более достоверными являются полученные результаты [7].

В данной работе рассматриваются сравнительные особенности роста карельского климатипа сосны обыкновенной в 65-летних географических культурах Подмоскovie.

#### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Географические культуры были созданы Л. Ф. Правдиным в 1948 году в Серебряноборском опытном лесничестве Института леса АН СССР, расположенном в центре Московской области, в районе с географическими координатами 55°44'40" с. ш. и 37°19'40" в. д. Тип условий местопроизрастания – В<sub>2</sub> (свежая простая субьорь). Посадка производилась двухлетними сеянцами, направление рядов с запада на восток. Семена исследуемого климатипа были получены из Олонецкого лесхоза, расположенного в Южно-карельском лесосеменном районе [6]. Рубок промежуточного пользования не было.

Расстояние от Олонца до исследуемых географических культур составило около 580 км на север и 270 км на запад. Для сравнения использовались две провениенции, относящиеся

к Московскому подрайону Центрального лесосеменного района и происходящие из Московской (Павлово-Посадский лесхоз) и Владимирской областей. Согласно таксационному районированию В. В. Загреева, Карелия относится к району основных лесов умеренного роста, тогда как Московская и Владимирская области – к району основных лесов хорошего роста [1].

Каждая провениенция была представлена в одной повторности. Количество деревьев на каждом участке составило 28, 66 и 210 для карельского, владимирского и подмосковного климатипов соответственно.

В ходе перечетов у всех деревьев измерялась длина окружности ствола на высоте 1,3 м, по которой рассчитывался диаметр, определялся класс роста и развития по Крафту. У 30–32 деревьев на каждом участке измерялись высоты, по полученным данным рассчитывались зависимости высоты от диаметра деревьев. Для измерения высот использовался электронный высотомер Vertex III с разрешением 0,1 м. Запасы древесины рассчитывались умножением средней высоты на сумму площадей сечения и на видовое число, определявшееся по формуле А. Кулешиса и Й. Кянставичуса [10].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таксационные характеристики исследуемых провениенций заметно различались. Насаждение, выращенное из семян карельского происхождения, уступало по средней высоте подмосковному и владимирскому климатипам сосны обыкновенной, однако превосходило их по среднему диаметру. В результате объем ствола среднего дерева был максимальным у карельского климатипа (табл. 1). При этом расчетное видовое число среднего дерева карельской провениенции было несколько меньшим, что косвенно указывает на больший сбег ствола. Вместе с тем четкой зависимости между коэффициентом формы ствола и соотношением высоты и диаметра дерева не обнаружено. По одному этому соотношению невозможно достоверно судить о полнодревесности деревьев [1].

Таблица 1  
Таксационная характеристика растущей части древостоев сопоставляемых провениенций в 65-летнем возрасте

высота, м	диаметр, см	Средние			Верхняя высота, м	Класс бонитета	Число деревьев, экз.га <sup>-1</sup>	Сумма площадей сечений, м <sup>2</sup> ·га <sup>-1</sup>	Запас ствольной древесины, м <sup>3</sup> ·га <sup>-1</sup>	Сохранность, %
		высота до нижней живой ветви, м	объем ствола, м <sup>3</sup>	видовое число						
Карельский климатип сосны										
25,8	27,6	17,8	0,716	0,463	27,6	I	869	52,1	622	13,9
Подмосковный климатип сосны										
26,1	25,7	18,1	0,631	0,465	27,9	Ia	938	48,7	592	23,5
Владимирский климатип сосны										
27,2	24,8	19,8	0,613	0,466	30,0	Ia	1078	52,3	662	16,2

Статистические характеристики распределения растущей части древостоя по диаметрам у исследуемых провениенций различаются весьма незначительно (табл. 2). Положительные значения коэффициентов асимметрии свидетельствуют о некотором смещении медианы распределения влево у всех трех выборок. При этом наибольшее смещение наблюдается у владимирского климатипа, а наименьшее – у карельского. Сравнительно небольшие (меньше 3) величины отношений  $A_D/m_A$  и  $E_D/m_E$  косвенно указывают на нормальное распределение. Фактическое значение критерия Шапиро – Уилка во всех трех выборках превышает табличное. Таким образом, распределение деревьев по диаметру в исследуемых насаждениях является нормальным и их сравнение статистически обоснованно.

Таблица 2

Статистические показатели распределения растущей части исследуемых провениенций по диаметрам

Показатель	Провениенция		
	карельская	подмосковная	владимирская
Диаметры (D), см:			
средний (D ср)	27,6	25,7	24,8
минимальный (D мин)	16,6	14,3	13,7
максимальный (D макс)	40,4	40,7	44,9
Ошибка D ср ( $m_D$ ), см	1,23	0,35	0,71
Стандартное отклонение ( $\delta_D$ )	6,50	5,14	5,77
Коэффициент вариации (CV, %)	23,5	20,0	23,2
Асимметрия ( $A_D$ )	0,34	0,36	0,77
Ошибка асимметрии ( $m_A$ )	0,42	0,17	0,29
$A_D/m_A$	0,79	2,13	2,66
Экссесс ( $E_D$ )	-0,73	-0,15	1,47
Ошибка эксцесса ( $m_E$ )	0,77	0,33	0,56
$E_D/m_E$	-0,79	-0,45	2,65
Критерий Шапиро – Уилка:			
фактическое значение (W)	0,96	0,99	0,96
табличное значение (p)	0,40	0,07	0,05

В карельском климатипе заметно некоторое смещение в сторону преобладания крупных деревьев, тогда как во владимирском – отстающих в росте. Московская провениенция занимает промежуточное положение (рис. 1).

Вместе с тем сравнение исследуемых провениенций по диаметрам с использованием критерия Стьюдента указывает на их принадлежность к одной генеральной совокупности при уровне значимости 0,01.

В насаждении карельского происхождения характер зависимости высот деревьев от их диаметров заметно различается по сравнению с контрольными (подмосковным и владимирским). Графики высот подмосковного и владимирского климатипов практически идентичны по форме, хотя и различаются по абсолютной величине (рис. 2).

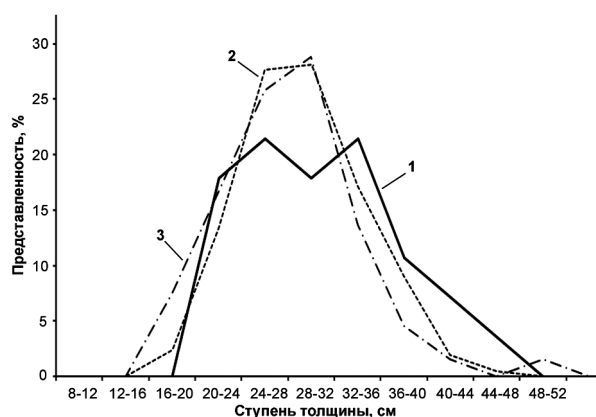


Рис. 1. Распределение деревьев по ступеням толщины. Климатипы: 1 – карельский; 2 – подмосковный; 3 – владимирский

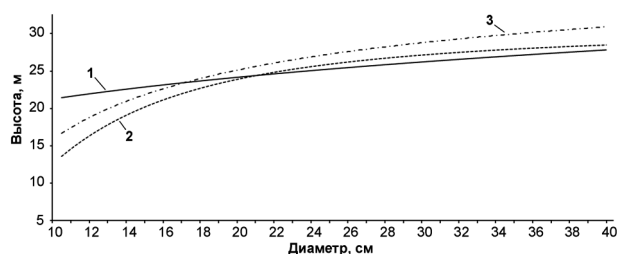


Рис. 2. Графики зависимостей высот (H) деревьев от диаметров (D). Климатипы: 1 – карельский; 2 – подмосковный; 3 – владимирский

Такой показатель, как средняя высота, отражает текущее состояние древостоя. Для оценки динамики роста и производительности более применима верхняя высота, рассчитываемая для некоторой части наиболее крупных деревьев, поскольку в отпад поступают, прежде всего, отстающие в росте деревья. Для отражения биологического потенциала популяции оптимальным является показатель средней высоты 100 самых крупных деревьев на 1 га [14]. Рассчитанная таким образом верхняя высота деревьев составила у карельского климатипа 27,6, у подмосковного – 27,9, у владимирского – 30,0 м. Таким образом, по мере увеличения возраста насаждений и отпада отстающих в росте деревьев разница средних высот карельского и владимирского климатипов, вероятнее всего, будет увеличиваться. При этом средние высоты карельского и подмосковного климатипов будут оставаться примерно одинаковыми.

Одним из комплексных показателей состояния как отдельного дерева, так и насаждения в целом является относительная высота (отношение высоты дерева к диаметру на высоте 1,3 м). Она является результатом борьбы деревьев за жизненное пространство в целом, и прежде всего за такой важный экологический фактор, как свет.

Повышенное значение относительной высоты соответствует состоянию крайнего угнетения,

за которым обычно наступает гибель дерева. В сосновых насаждениях относительная высота обычно находится в пределах 90–115. Большая величина относительной высоты указывает на ненормальное соотношение высоты и диаметра дерева. Визуально это проявляется в появлении деревьев с тонкими и вместе с тем вытянутыми стволами, что особенно характерно для деревьев низших классов Крафта.

Судя по зависимостям относительных высот от диаметров деревьев наиболее интенсивные конкурентные отношения характерны для владимирского климатипа (рис. 3). В первую очередь это является следствием повышенной густоты стояния. В карельском климатипе высокое значение  $H/D$ , соответствующее по величине такому в подмосковном и владимирском климатипах, характерно для отстающих в росте деревьев, диаметр которых не превышает 20–22 см. Для деревьев большого диаметра в карельской провениенции  $H/D$  является наименьшим.

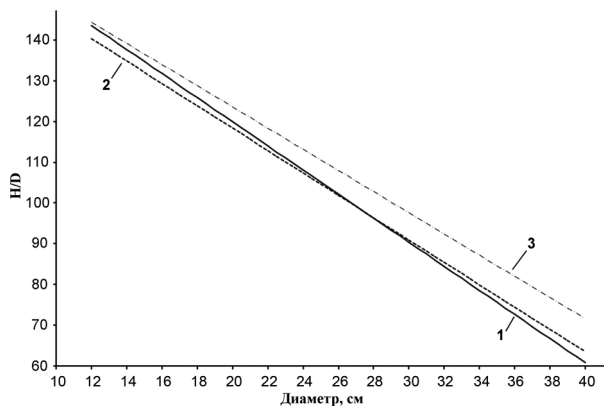


Рис. 3. Графики зависимостей относительной высоты ( $H/D$ ) от диаметра ( $D$ ) деревьев. Климатипы: 1 – карельский; 2 – подмосковный; 3 – владимирский

Сравнительно невысокая интенсивность конкурентных отношений между деревьями карельской провениенции проявляется в распределении деревьев по классам Крафта. Здесь преобладают деревья II класса, в подмосковном климатипе – III и IV, тогда как во владимирском – IV и V классов (рис. 4).

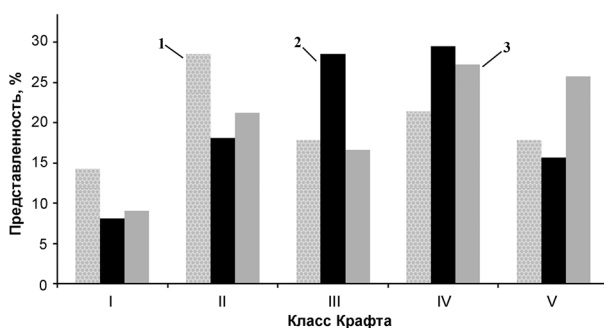


Рис. 4. Распределение деревьев по классам роста и развития Крафта. Климатипы: 1 – карельский; 2 – подмосковный; 3 – владимирский

В карельской провениенции нет усохших деревьев, тогда как в подмосковной и владимирской провениенциях количество сухостоя составило соответственно 54 и 98 деревьев на 1 га, а его запас – 26 и 20  $\text{м}^3\cdot\text{га}^{-1}$ . При этом наименьшая сохранность древостоя по отношению к первоначально высаженному количеству деревьев была в карельском климатипе (см. табл. 1).

Относительно низкая сохранность древостоя и невысокая интенсивность конкурентных отношений между деревьями, отсутствие сухостоя в 65-летнем возрасте и преобладание лидирующих деревьев указывают на то, что естественное изреживание в древостое карельского происхождения произошло раньше и было более интенсивным, чем в контрольных. При этом меньшая высота деревьев при относительно большом диаметре, вероятнее всего, обусловлена длительным периодом роста в более благоприятных условиях менее густого древостоя. Запас растущей части древостоя в карельской провениенции на момент проведения исследований не уступает такому в насаждениях подмосковного и владимирского климатипов (см. табл. 1). Следовательно, оставшиеся после изреживания деревья вполне адаптировались к климатическим условиям района исследований.

Необходимо отметить, что весьма хороший рост некоторых инорайонных провениенций в географических посадках отмечается в литературных источниках. Например, в географических культурах сосны обыкновенной, заложенных в 1977 году в условиях Богучанского лесхоза Красноярского края, пряжинская и пудожская провениенции из Карелии также входили в группу климатипов, превосходящих по росту местную сосну как на песчаной, так и на темно-серой лесной почве [3].

## ВЫВОДЫ

1. Карельский климатип сосны обыкновенной отличается по характеру роста в условиях Московской области по сравнению с местными провениенциями.
2. В 65-летнем возрасте карельский климатип не уступает местным по запасу стволовой древесины, но заметно отличается от них по соотношению высот и диаметров деревьев.
3. Естественное изреживание в карельском климатипе произошло раньше и было более интенсивным, чем в контрольных. Этим объясняется преобладание лидирующих деревьев в древостое, его меньшая высота и больший диаметр на момент проведения исследований.
4. Карельский климатип сосны обыкновенной из Олонецкого района пригоден для выращивания в условиях Подмосквья.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Загреев В. В. Географические закономерности роста и продуктивности древостоев. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 240 с.
2. Коновалов Н. А., Пугач Е. А. Основы лесной селекции и сортового семеноводства. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 176 с.
3. Кузьмина Н. А. Рост и сохранность географических культур сосны обыкновенной в Приангарье // Генетика и селекция – на службе лесу: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 28–29 июня, 1996. Воронеж, 1997. С. 172–174.
4. Кузьмина Н. А., Кузьмин С. Р. Отбор перспективных климатипов сосны обыкновенной в географических культурах в Красноярском Приангарье // Хвойные бореальной зоны. 2010. XXVI. № 1–2. С. 115–119.
5. Кузьмина Н. А., Кузьмин С. Р., Милютин Л. И. Дифференциация сосны обыкновенной по росту и выживаемости в географических культурах Приангарья // Хвойные бореальной зоны. XXII. 2004. № 1–2. С. 48–56.
6. Лесосеменное районирование основных лесобразующих пород в СССР. М., 1982. 368 с.
7. Мерзленко М. Д. Теоретические основы и практические направления изучения географических культур // Научные труды МЛТИ. 1993. Вып. 265. С. 62–67.
8. Мерзленко М. Д., Глазунов Ю. Б., Мельник П. Г. Успешность роста алтайского климатипа сосны в условиях Подмосквья // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. № 10. С. 59–65.
9. Наквасина Е. Н., Бедрицкая Т. В., Гвоздухина О. А. Селекционная оценка климатипов сосны обыкновенной в географических культурах Архангельской области // ИВУЗ «Лесной журнал». 2001. № 3. С. 27–35.
10. Общесоюзные нормативы для таксации лесов / В. В. Загреев, В. И. Сухих, А. З. Швиденко [и др.]. М.: Колос, 1992. 495 с.
11. Пальцев А. М., Мерзленко М. Д. Роль географических культур в лесокультурном деле. М.: МЛТИ, 1990. 54 с.
12. Правдин Л. Ф. Сосна обыкновенная (изменчивость, внутривидовая систематика и селекция). М.: Наука, 1964. 189 с.
13. Правдин Л. Ф., Вакуров А. Д. Рост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) разного географического происхождения в подзоне хвойно-широколиственных лесов // Сложные боры хвойно-широколиственных лесов и пути ведения лесного хозяйства в лесопарковых условиях Подмосквья. М.: Наука, 1968. С. 160–195.
14. Свалов Н. Н. Моделирование производительности и теория лесопользования. М.: Лесн. пром-сть, 1979. 216 с.
15. Abraitis R., Eriksson G. *Pinus sylvestris* L. East European populations: growth and behaviour in one Lithuanian field trial // Baltic Forestry. 1996. Vol. 2. P. 28–35.
16. Zhelev P., Lust N. Provenance study of Scots pine (*Pinus Sylvestris* L.) in Belgium // Silva Gandavensis. 1999. Vol. 64. P. 24–36.

**Glazunov Yu. B.**, Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences (Moscow region, Russian Federation)

**Merzlenko M. D.**, Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences (Moscow region, Russian Federation)

**Mel'nik P. G.**, Moscow University of Forest (Moscow, Russian Federation)

#### COMPARATIVE GROWTH CHARACTERISTICS OF KARELIAN SCOTS PINE IN CONDITIONS OF MOSCOW REGION

Results of the study on the growth features of Karelian Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) planted together with geographical cultures of Moscow region are presented. The culture in focus was developed on the territory of Karelia in 1948, and by the time of its study it reached the age of 65 years. Two provenances from Moscow and Vladimir regions were chosen for comparative study. It was found out that Karelian species significantly differ from the local ones in the character of growth. They succumb to Moscow and Vladimir species in the average height but exceed them in diameter. Plantations of Karelian trees lead in total growth and, unlike local provenances, have no dead wood. At the same time, the survival rate among trees brought from Karelia was much lower when compared to the survival rate of the species from Moscow area. Significant differences in growth characteristics of Karelian stock are conditioned by the wide natural thinning inherent to plantations of Karelian origin. However, according to the size of the stems, the growing stock of Karelian origin was not inferior to the local stock. It was concluded that Karelian Scots Pine can be successfully grown on the territory of Moscow regions despite considerable remoteness of the region from the origin of seeds.

Key words: Scotch pine, *Pinus sylvestris* L., provenance trial, climatype, provenances, growth and state of planting

#### REFERENCES

1. Zagreev V. V. *Geograficheskie zakonomernosti rosta i produktivnosti drevostoev* [Geographic patterns of growth and productivity of forest stands]. Moscow, Lesn. prom-st' Publ., 1978. 240 p.
2. Konovалov N. A., Pugach E. A. *Osnovy lesnoy selektsii i sortovogo semenovodstva* [Basics of forest breeding and varietal seed]. Moscow, Lesnaya prom-st' Publ., 1978. 176 p.
3. Kuz'mina N. A. Growth and safety of geographical cultures of Scots pine in the Angara [Rost i sokhrannost' geograficheskikh kul'tur sosny obyknovennoy v Priangar'e]. *Genetika i selektsiya – na sluzhbe lesu: Materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Voronezh, 28–29 iyunya, 1996*. Voronezh, 1997. P. 172–174.
4. Kuz'mina N. A., Kuz'min S. R. Selection of promising climatic types of Scotch pine in provenance of Krasnoyarsk Priangare [Otbor perspektivnykh klimatipov sosny obyknovennoy v geograficheskikh kul'turakh v Krasnoyarskom Priangar'e]. *Khvoynye boreal'noy zony*. 2010. XXVI. № 1–2. P. 115–119.

5. Kuz'mina N. A., Kuz'min S. R., Milyutin L. I. Differentiation of Scotch pine on the growth and survival in provenance of Priangarye [Differentsiatsiya sosny obyknovennoy po rostu i vyzhivaemosti v geograficheskikh kul'turakh Priangar'ya]. *Khvoynye boreal'noy zony*. 2004. XXII. № 1–2. P. 48–56.
6. *Lesosemennoe rayonirovanie osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod v SSSR* [Seed zoning of the main tree species in the USSR]. Moscow, 1982. 368 p.
7. Merzlenko M. D. Theoretical foundations and practical aspects of provenances study [Teoreticheskie osnovy i prakticheskie napravleniya izucheniya geograficheskikh kul'tur]. *Nauchnye trudy MLTI*. 1993. Issue 265. P. 62–67.
8. Merzlenko M. D., Glazunov Yu. B., Mel'nik P. G. Successful growth of the Altay climatic type of Scotch pine in the environment of Moscow region [Uspeshnost' rosta altayskogo klimatipa sosny v usloviyakh Podmoskov'ya]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Altai State Agrarian University]. 2014. № 10. P. 59–65.
9. Nakvasina E. N., Bedritskaya T. V., Gvozdukhina O. A. Selective assessment of Scotch pine species in provenance of the Arkhangelsk Region [Selektsionnaya otsenka klimatipov sosny obyknovennoy v geograficheskikh kul'turakh Arkhangel'skoy oblasti]. *IVUZ "Lesnoy zhurnal"* [Bulletin of higher educational institutions. Forest Journal]. 2001. № 3. P. 27–35.
10. Obshchесоюзные нормативы для таксации лесов [Union-wide standards for forest inventory] / V. V. Zagreev, V. I. Sukhikh, A. Z. Shvidenko [i dr.]. Moscow, Kolos Publ., 1992. 495 p.
11. Pal'tsev A. M., Merzlenko M. D. *Rol' geograficheskikh kul'tur v lesokul'turnom dele* [The role of provenances in forest breeding practice]. Moscow, MLTI Publ., 1990. 54 p.
12. Pravdin L. F. *Sosna obyknovennaya (izmenchivost', vnutrividovaya sistematika i selektsiya)* [Scotch pine (variability, intraspecific taxonomy and selection)]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 189 p.
13. Pravdin L. F., Vakurov A. D. Growth of Scotch pine (*Pinus silvestris* L.) of different geographical origin in the subzone of coniferous-deciduous forests [Rost sosny obyknovennoy (*Pinus silvestris* L.) raznogo geograficheskogo proiskhozhdeniya v podzone khvoyno-shirokolistvennykh lesov]. *Slozhnye bory khvoyno-shirokolistvennykh lesov i puti vedeniya lesnogo khozyaystva v lesoparkovykh usloviyakh Podmoskov'ya*. Moscow, Nauka Publ., 1968. P. 160–195.
14. Svalov N. N. *Modelirovanie proizvoditel'nosti i teoriya lesopol'zovaniya* [Simulation performance and forest management theory]. Moscow, Lesn. prom-st' Publ., 1979. 216 p.
15. Abraitis R., Eriksson G. *Pinus sylvestris* L. East European populations: growth and behaviour in one Lithuanian field trial // *Baltic Forestry*. 1996. Vol. 2. P. 28–35.
16. Zhelev P., Lust N. Provenance study of Scots pine (*Pinus Sylvestris* L.) in Belgium // *Silva Gandavensis*. 1999. Vol. 64. P. 24–36.

Поступила в редакцию 10.03.2015



**АННА ЮРЬЕВНА ВОЛКОВА**

кандидат биологических наук, доцент кафедры зоотехнии, рыбоводства и товароведения агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*golubewat@mail.ru*

**МАРИНА ЭНСИОВНА ХУОБОНЕН**

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры зоотехнии, рыбоводства и товароведения агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*marinex@mail.ru*

## РЕПРОДУКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ОСЕТРОВЫХ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ В САДКАХ В УСЛОВИЯХ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА\*

Представлены результаты анализа рыбоводно-биологических и репродуктивных показателей производителей осетровых, выращенных в садках в условиях Карелии в естественных температурных условиях. В ходе исследования изучены такие показатели производителей осетровых, как длина и масса тела, рабочая и относительная плодовитость, масса овулировавшей икры, размеры и масса ооцитов у созревших самок осетра, гаметосоматический индекс и оплодотворяемость икры. Оценка продукционных качеств самок выявила высокие значения всех репродуктивных показателей. Проведенные исследования показали, что условия северных регионов позволяют проводить работу по формированию и эксплуатации продуктивных стад осетровых. Результаты исследования могут способствовать созданию научной базы для расширения ассортимента выпускаемой в Карелии рыбоводной продукции.

Ключевые слова: осетровые, плодовитость, продуктивность, оценка качества производителей, рыбоводно-биологические показатели

### ВВЕДЕНИЕ

В связи с интенсивным развитием аквакультуры на Европейском Севере важное значение приобретает поиск новых методов культивирования гидробионтов и новых объектов выращивания. Основными объектами аквакультуры в северных регионах вполне обоснованно считаются лососевые. Объемы выращивания радужной форели только в Республике Карелия составляют около 23,6 тысячи тонн в год (см. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2013 г. Петрозаводск, 2014. 300 с.), и этот показатель продолжает расти. Но с увеличением объемов производства возникает необходимость введения в аквакультуру нашего региона дополнительных объектов выращивания, перспективных и пользующихся спросом у населения. Так, в качестве добавочных видов товарного рыбоводства в последние годы активно применяются сиговые и осетровые.

Объемы товарного выращивания осетровых в Карелии пока невысоки, однако разработана технология выращивания товарной рыбы. Экспериментальным путем, а также в условиях некоторых рыбоводных предприятий показана высокая эффективность выращивания молоди осетровых индустриальными методами в условиях естественных водоемов северных регионов [1]. Еще более перспективным направлением в товарном рыбоводстве является культивирование осетровых

с целью получения не только товарной рыбы, но и такого ценного и дорогостоящего продукта, как икра. Существующие методы получения зрелых половых продуктов от осетровых позволяют ежегодно производить икру для пищевой переработки и искусственного воспроизводства с сохранением жизни производителей рыб [6]. Поэтому следующим этапом в развитии рыбоводства в северных регионах является разработка биотехники получения зрелых производителей осетровых, а также половых продуктов для целей искусственного воспроизводства и производства пищевой икры.

Основная задача данного исследования – дать комплексную оценку репродуктивных показателей самок осетровых рыб, впервые созревших в садках в условиях Европейского Севера.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сбор экспериментального материала проходил в 2014 году на базе ООО «Рыбхоз Гонганалицкое». Это рыбоводное хозяйство расположено в акватории озера Крошнозеро и представляет собой комплекс садков, размещенных в береговой зоне. Площадь оз. Крошнозеро 8,9 км<sup>2</sup>, средняя глубина 5,7 м, наибольшая 12,6 м. Химический состав воды, а также другие лимнологические показатели удовлетворяют требованиям, предъявляемым к водоемам рыбохозяйственного значения.

В результате экспериментальных работ были проведены исследования по оценке плодовитости

самок русского, сибирского (ленского) осетра и белуги (*Acipenser gueldenstaedtii* Brandt, *acipenser baerii* Brandt, *Huso huso* Linnaeus).

Всего в апреле 2014 года было обследовано 35 особей. Целью обследования было разделение осетров по полу, выявление рыб с признаками созревания и определение стадии созревания. Диагностика пола и степени созревания осуществлялась методом проведения шуповых проб и УЗ-сканирования. По результатам исследования в группе осетровых было выявлено 22 самки и 13 самцов. В группе самок при диагностике состояния гонад было отобрано 11 особей ленского осетра и 1 самка русского осетра с 3–4-й стадией зрелости гонад. Остальные самки осетровых имели 1–2-ю стадию зрелости гонад (3 особи) или признаки резорбции (4 особи). Из 13 выявленных самцов 8 рыб имели 3–4-ю стадию зрелости, в том числе 1 белуга. Таким образом, в результате обследования были выявлены самки и самцы осетровых, пригодные для дальнейшей работы, для проведения гормонального стимулирования и получения зрелых половых продуктов.

Все исследуемые рыбы содержались в сетчатых садках в естественных температурных условиях.

Гормональное стимулирование производителей осетра, достигших 4-й стадии зрелости гонад, проводили по общепринятой методике с использованием ацетонированных препаратов гипофиза рыб в июне 2014 года. Всего было простимулировано 5 самцов и 9 самок. Операцию прижизненного получения овулировавших ооцитов проводили методом подрезания яйцевода.

Репродуктивные качества самок осетровых оценивали по:

- массе и длине рыб,
- массе овулировавшей икры (в кг и в % к живой массе самки),
- проценту оплодотворения икры,
- количеству ооцитов в 1 г икры и их массе,
- рабочей и относительной плодовитости.

Массу самок (кг), выход икры (кг) и массу ооцита (мг) определяли взвешиванием, рабочей плодовитостью каждой самки – расчетным путем: массу икры умножали на количество ооцитов в 1 г, относительную плодовитость (ОП) определяли по формуле:

$$ОП = \frac{\text{Рабочая плодовитость}}{\text{Масса самки}} \text{ тыс. шт.}$$

Индекс гаметосоматической продуктивности определяли как весовой выход овулировавших ооцитов на 1 кг живой массы рыб в %.

Статистическую обработку полученных результатов выполняли по общепринятым методикам [2].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Всего в процессе экспериментальной работы было изучено 22 самки и 13 самцов сибирского (ленского), русского осетра и белуги, содержащихся в садках Гонганалицкого РХ. В результате УЗ-сканирования из этого поголовья была отобрана группа самок и самцов осетровых, находящихся на 4-й стадии созревания гонад и пригодных для гормонального стимулирования. Из 9 простимулированных гормональными инъекциями самок русского и сибирского осетра 8 рыб ответили на стимуляцию, и от них была получена овулировавшая икра. Также гипофизарная инъекция была сделана 5 самцам сибирского осетра, из них созрело 4 особи, от которых методом сцеживания были получены половые продукты.

Рыбоводно-биологические показатели самок, от которых была получена овулировавшая икра, представлены в табл. 1. Анализ данных показал, что живая масса изучаемых рыб в среднем составила 21,6 кг, варьировала в пределах 13,7–35,0 кг ( $C_v = 30,4\%$ ). Меньшая изменчивость отмечена по длине тела – от 1,27 до 1,56 м ( $C_v = 7,12\%$ ).

Важным показателем качества самок осетровых является масса ооцита, так как большие размеры ооцита могут свидетельствовать о повышенном количестве накапливаемых в икринке питательных веществ, что очень важно для развития эмбрионов и предличинок. Также большой диаметр икринки осетра является положительным показателем пищевой ценности и высокого качества пищевой икры осетровых, что делает этот продукт более привлекательным для потребителя. При изучении размеров ооцита у исследованных самок было выявлено, что максимальная масса ооцита – 29,1 мг – была у самки ленского осетра со средними для группы показателями по живой массе и относительной плодовитости. А у самок с высокой относительной плодовитостью

Таблица 1

Рыбоводно-биологические показатели самок сибирского (ленского) осетра после гипофизарной инъекции

Показатели	Номер самки									X ± m
	47	42	71	73	78	45	74	31	35	
Масса самки, кг	16,5	20,0	16,9	17,5	22,0	26	21,5	13,7	35,0	21,01 ± 2,12
Длина самки, м	1,27	1,40	1,39	1,30	1,50	1,50	1,45	1,32	1,56	1,41 ± 0,03
Масса овулировавшей икры, кг	–*	2,40	1,95	2,50	5,86	3,60	3,46	–*	7,00	3,82 ± 0,72
Масса икры без полостной жидкости, кг	–	2,34	1,95	2,20	3,80	3,50	3,36	–	6,20	3,34 ± 0,55
Количество икринок в 1 г, шт.	–	36,7	–**	37,6	40,5	54,8	34,4	–	42,9	41,15 ± 2,99
Масса ооцита, мг	–	27,25	–	26,62	24,69	18,25	29,10	–	23,3	24,9 ± 1,56

Примечание. \* – нет ответа на гипофизарную инъекцию. \*\* – резорбция ооцитов.

(более 7 тысяч икринок на 1 кг) масса ооцитов была минимальной – 23,3 и 24,69 мг. В целом по группе исследованных самок сибирского (ленского) осетра выявлено, что средняя масса ооцита составила 24,9 мг при вариабельности признака 15,36 %. Такая масса икринки является достаточно высокой для ленского осетра, так как для самок этого вида осетровых из диких популяций (верхнее и среднее течение р. Лена) характерна относительно невысокая средняя масса ооцитов – всего 15 мг [7]. По данным А. Г. Новосадова [4], масса ооцита у самок сибирского осетра 1-го и 2-го нерестов при выращивании в индустриальных условиях (бассейны) в среднем составляет 10 мг. Большая масса ооцита у самок в нашем случае может свидетельствовать о благоприятных условиях содержания рыб. Диаметр икринки ленского осетра в исследованной группе в среднем составил 2,64 мм, варьировал в диапазоне от 2,12 до 3,2 мм. Такое значение размеров ооцитов можно оценивать как довольно высокое, что вполне согласуется с массой икринок в этой группе рыб. Это также подтверждает, что необходимо строго оценивать по всем показателям впервые нерестующих самок, особенно тех, кого планируют использовать для воспроизводства.

Очень важно при оценке репродуктивных показателей самок рыб проводить анализ индивидуальной плодовитости. При этом оценивают, как правило, рабочую и относительную плодовитость, а также такие репродуктивные качества, как масса и выход в % овулировавшей икры, количество икринок в 1 грамме и оплодотворяемость икры. Результаты оценки плодовитости самок осетра представлены в табл. 2.

Рабочая плодовитость (в ооцитах) исследованных самок сибирского и русского осетров варьировала в пределах от 82,6 до 266,1 тысячи икринок при средних значениях 149,29 тыс. икринок, вариабельность 47,44 %. Такой большой разброс значений, вероятно, связан с высокой изменчивостью живой массы (коэффициент корреляции между массой рыб и рабочей плодовитостью + 0,97;  $td = 7,9$ ). По данным А. С. Сафронова [6], рабочая плодовитость ленского осетра при 1-м нересте – 57,7 тыс. икринок, то есть в 1,8 раза ниже, чем в исследованной нами группе.

Однако использование показателя абсолютной плодовитости при оценке репродуктивных показателей самок рыб с различной живой массой не совсем корректно. При сравнении репродуктивных показателей в нашем случае более эффектив-

но оценивать показатели относительной плодовитости и гаметосоматический индекс.

Относительная плодовитость сравниваемых рыб составила в среднем по группе 6,06 тыс. икринок на 1 кг живой массы, диапазон значений этого показателя – в пределах от 4,3 до 7,6 тыс. икринок. Максимальное значение относительной плодовитости отмечено у самой крупной самки с живой массой 35 кг, также высокая относительная плодовитость – 6,9 тыс. икринок – у самки осетра с массой, близкой к среднему значению по группе, – 22 кг. Анализ полученных материалов показал, что для данной группы рыб свойственна значительная вариабельность относительной плодовитости и живой массы, что согласуется с данными многих исследований по плодовитости сибирского осетра. Селекция самок рыб по относительной плодовитости довольно часто приводит к уменьшению массы ооцита [3], поэтому при отборе рыб для воспроизводственных целей часто применяют показатель ГСИ (гаметосоматический индекс) и оценивают его связь с другими показателями плодовитости, например массой ооцита. Отмечено, что эти признаки между собой не коррелируют [3], в исследуемой группе коэффициент корреляции между массой ооцита и ГСИ составил 0,16 ( $td = 0,32$ ).

Максимальное значение индекса плодовитости (ГСИ) отмечено у самой крупной самки осетра (живая масса 35 кг), выход икры у нее составил 17,71 % от живой массы, это в 1,2 раза выше среднего значения ГСИ по исследованной группе рыб. Самый низкий ГСИ (11,7 %) отмечен у самки, имеющей наименьшую живую массу (16,5 кг). В среднем по группе самок индекс плодовитости составил 14,27 % ( $Cv = 18,16$  %), что считается достаточно высоким значением для впервые нерестующих самок осетровых. Так, по данным А. С. Сафронова [6], ГСИ у самок сибирского (ленского) осетра составлял 13,6 %. Стоит отметить, что показатель ГСИ, то есть фактический выход икры, возрастает при повторном нересте осетровых. Так как все самки осетра были впервые созревающими, можно предположить, что в дальнейшем должно произойти увеличение значений этого признака. Важное значение имеет этот показатель и при производстве икры для пищевой переработки, так как при высоких значениях ГСИ возрастает количество товарной продукции.

Икру, полученную от некоторых самок сибирского (ленского) осетра, после визуальной оценки оплодотворили, и по результатам осеменения была

Показатели плодовитости самок сибирского (ленского) осетра после гипофизарной инъекции

Таблица 2

Показатели	Номер самки									X ± m
	47	42	71	73	78	45	74	31	35	
Рабочая плодовитость, тыс. икр.	–	85,872	–	82,645	153,908	191,781	115,464	–	266,094	149,3 ± 47,4
Относительная плодовитость, икр./кг	–	4294	–	4723	6996	7376	5370	–	7603	6060 ± 587,9
Гаметосоматический индекс	–	11,70	11,54	12,57	17,27	13,46	15,63	–	17,71	14,27 ± 0,98
Оплодотворяемость, %	–	90	–	80	75	0	68	–	80	–

определена оплодотворяемость по стандартной методике. Самым высоким был показатель оплодотворяемости у самки осетра с № 42. Овулировавшая икра у этой рыбы визуально была более высокого качества, размеры ооцита также были выше средних значений по группе (27,25 мг при среднем 24,9 мг). Оплодотворяемость икры этой самки составила 90 %. Значения оплодотворяемости у других рыб были в пределах от 68 до 80 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ по изучению репродуктивных показателей самок и самцов осетровых, созревших в естественных условиях садкового хозяйства в Карелии, показал реальную возможность их использования для формирования продукционных

стад осетровых в нашем регионе. Полученные в результате работы рыбоводно-биологические и репродуктивные показатели (плодовитость, процент оплодотворения, ГСИ) у осетров, созревших в условиях садкового хозяйства в Карелии при естественных температурных режимах, сопоставимы с данными у рыб из естественных популяций, а в некоторых случаях даже превосходят их [7].

Проведенные исследования показали, что условия северных регионов позволяют проводить работу по формированию и эксплуатации продуктивных стад осетровых. Результаты исследования могут способствовать созданию научной базы для расширения ассортимента выпускаемой в Карелии рыбоводной продукции и повысить конкурентоспособность этой отрасли.

\* Статья подготовлена в рамках Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 гг.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волкова А. Ю., Болгов А. Е. Технология выращивания осетровых в садках в условиях Европейского Севера: Учеб. пособие. Петрозаводск: ПетроПресс, 2012. 16 с.
2. Карманова Е. П., Муравья Л. Н. Генетические параметры признаков отбора сельскохозяйственных животных: Учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003. 51 с.
3. Лозовский А. Р. Плодовитость осетровых рыб при прижизненном получении овулировавшей икры // Вестник Московского государственного областного университета. Сер. Естественные науки. 2006. № 6. С. 72–78.
4. Новосадов А. Г. Морфофизиологическая и продукционная характеристики гибрида сибирского осетра *Acipenser baerii* и белуги *Huso huso*: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2011. 24 с.
5. Подушка С. Б. Получение икры у осетровых с сохранением жизни производителей // Научно-технический бюллетень лаборатории ихтиологии ИНЭНКО. 1999. № 2. С. 4–19.
6. Сафронов А. С. Оценка качества производителей осетровых рыб на примере бестера, русского, сибирского осетров и гибрида между ними как объектов разведения и селекции в аквакультуре: Автореф. ... канд. биол. наук. М., 2003. 28 с.
7. Соколов Л. И., Малютин В. С. Особенности структуры популяции и характеристика производителей сибирского осетра *Acipenser baerii* Brandt р. Лены в районе нерестилищ // Вопросы ихтиологии. Т. 17. В. 2(103). 1977. С. 237–246.

Volkova A. Yu., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
 Khuobonen M. E., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

## REPRODUCTIVE INDICATORS OF CAGE GROWN STURGEON PRODUCERS IN CONDITIONS OF EUROPEAN NORTH

Results of the analysis on biological fish breeding and reproductive indicators of sturgeon producers grown in cages under natural temperature conditions of Karelian waterbodies are considered. The study examined the following indices of sturgeon producers: the length and the weight of the fish, its relative and working fecundity, the weight of ovulated eggs, the oocytes size and the weight of mature sturgeon females, the gamete-somatic index and the level of fertilization. Evaluation of the female production qualities revealed high values of all reproductive parameters. The study has shown that conditions of the northern regions are favorable for the growth and development of sturgeon shoals. The results of the study are instrumental in the development of scientifically substantiated enlargement of fish assortment produced in Karelia.

Key words: sturgeon, fertility, productivity, quality assessment of producers, fish breeding and biological indicators

## REFERENCES

1. Volkova A. Yu., Bolgov A. E. *Tekhnologiya vyrashchivaniya osetrovyykh v sadkakh v usloviyakh Evropeyskogo Severa: Uchebnoe posobie* [Technology of sturgeon cultivation in cages in conditions of the European North]. Petrozavodsk, PetroPress Publ., 2012. 16 p.
2. Karmanova E. P., Murav'ya L. N. *Geneticheskie parametry priznakov othora sel'skokhozyaystvennykh zhivotnykh: Uchebnoe posobie* [Genetic parameters for selection of farm animals]. Petrozavodsk, Izd-vo PetrGU, 2003. 51 p.
3. Lozovskiy A. R. Fertility of sturgeon with received ovulated caviar [Plodovitost' osetrovyykh ryb pri prizhiznennom poluchenii ovulirovavshey ikry]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya Estestvennye nauki*. 2006. № 6. P. 72–78.
4. Novosadov A. G. *Morfofiziologicheskaya i produktsionnaya kharakteristiki gibrida sibirskogo osetra Acipenser baerii i belugi Huso huso: Avtoref. ... kand. biol. nauk* [Morpho-physiological and production characteristics of Siberian sturgeon hybrid *Acipenser baerii* and beluga *Huso huso*]. Moscow, 2011. 24 p.
5. Podushka S. B. Receiving sturgeon caviar with preservation producer's life [Poluchenie ikry u osetrovyykh s sokhraneniem zhizni proizvoditeley]. *Nauchno-tekhnicheskyy byulleten' laboratorii ikhtiologii INENKO*. 1999. № 2. P. 4–19.
6. Safronov A. S. *Otsenka kachestva proizvoditeley osetrovyykh ryb na primere bestera, russkogo, sibirskogo osetrov i gibrida mezhdu nimi kak o'ektiv razvedeniya i selektsii v akvakul'ture: Avtoref. diss. ... kand. biol. nauk* [Quality estimation of sturgeon producers on the example of a bester, Russian and Siberian sturgeon, and their hybrid as objects of cultivation and selection in aquaculture]. Moscow, 2003. 28 p.
7. Sokolov L. I., Malyutin V. S. Structural features of the fish population and characteristics of producers breeding Siberian sturgeon *Acipenser baerii* Brandt in the spawning areas of the River Lena [Osobennosti struktury populyatsii i kharakteristika proizvoditeley sibirskogo osetra Acipenser baerii Brandt r. Leny v rayone nerestilishch]. *Voprosy ikhtiologii*. 1977. Vol. 17. B. 2(103). P. 237–246.

ТИММО АЛЕКСАНДРОВИЧ ГАВРИЛОВ

кандидат технических наук, инженер кафедры механизации сельскохозяйственного производства агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
gavrilov@petsu.ru

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ КОРМОВ ДЛЯ ПУШНЫХ ЗВЕРЕЙ\*

Рассматривается вопрос повышения эффективности приготовления кормов для пушных зверей. Измельчение по своей роли в технологическом процессе и энергопотреблении является основной операцией приготовления кормов для пушных зверей, вследствие чего исследование факторов, оказывающих наибольшее влияние на энергозатраты операции измельчения, становится актуальным. Одним из таких факторов является угол скольжения лезвия ножа. Автор опирается на данные, полученные в результате экспериментального исследования. Исследуемый материал – мясо-рыбные корма – устанавливался на лабораторную установку и перерезался при различных углах скольжения лезвия ножа от 0 до 75° с шагом 15°. В результате эксперимента получены данные о влиянии угла скольжения лезвия ножа на энергозатраты операции измельчения. Анализируя эти данные, автор получил новую функциональную зависимость энергозатрат операции измельчения от угла скольжения лезвия ножа.

Ключевые слова: пушные звери, измельчение, мясо-рыбные корма, затраты энергии, угол скольжения лезвия

### ВВЕДЕНИЕ

Эффективность звероводческого производства во многом зависит от четкого и своевременного обеспечения зверей хорошо приготовленными, качественными кормами. В общих издержках производства шкур пушных зверей затраты на корма и их приготовление достигают 80 % [1]. Главным условием повышения эффективности приготовления кормов для пушных зверей является разработка и применение рекомендаций по энерго- и ресурсосбережению.

Технологии приготовления кормов для пушных зверей в общем виде складываются из набора операций: дефростация, мойка, поэтапное измельчение, смешивание и гомогенизация. Основные энергозатраты (до 50 % всех затрат энергии) приходятся на операцию измельчения, причем большая часть энергии расходуется нерационально, трансформируясь в тепло и другие виды энергии [1]. Вследствие этого актуально рассмотрение наиболее значимых факторов, оказывающих влияние на энергозатраты операции измельчения. К ним относятся [1], [3], [4]: скорость резания, вид режущего инструмента и его расположение, геометрические параметры режущего инструмента (в особенности угол заточки и угол скольжения лезвия ножа), температура измельчаемого корма.

Влияние угла скольжения лезвия ножа (угла  $\tau$ ) на энергозатраты операции измельчения – одна из основных закономерностей процесса измельчения кормов, причем под углом  $\tau$  подразумевается угол между направлением движения рассматри-

ваемой точки лезвия и нормалью к лезвию [1], [6]. По степени влияния этого фактора на энергозатраты операции измельчения кормов до настоящего времени нет единого мнения. Результаты исследований, приведенные в различных литературных источниках [1], [3], [4], [5], [7], [8], противоречивы и часто не совпадают по своим значениям.

Так, В. А. Желиговский пришел к выводу, что наименьшая удельная работа измельчения имеет место при рубящем действии лезвия. По его данным, по мере увеличения угла  $\tau$  удельная работа возрастает сначала медленно, а после достижения 70° все интенсивнее. В. П. Горячкин установил, что с увеличением угла  $\tau$  нормальная сила для возбуждения процесса уменьшается, особенно при значениях угла скольжения 30°. Исследования Н. Е. Резника показали, что увеличение значения угла  $\tau$  в определенных пределах выгодно в энергетическом отношении. Удельная работа резания с увеличением угла  $\tau$  до 25° падает, при дальнейшем увеличении этого угла – возрастает. В. И. Курдюмов и П. Н. Аюгин в ходе исследования по измельчению моркови [3] и Н. И. Лебедь – измельчению яблок [4] установили, что с увеличением угла  $\tau$  до 35° удельная работа снижается, а затем увеличивается. Сходные данные приводит М. А. Сулима, который при измельчении тимофеевки рекомендует угол  $\tau$  35...40°. По данным А. И. Пелеева, Н. А. Барсова, В.-Н. Tong, J. Sun, Z.-H. Xu, Z.-Y. Chen, B. Ji, B. Song [8] (при резании мяса), значительное сокращение энергозатрат наблюдается при угле  $\tau$  45...60°.

Анализ приведенных работ показывает, что нет теоретически обоснованных рекомендаций по влиянию угла  $\tau$  на энергозатраты операции измельчения кормов для пушных зверей. Это является существенным препятствием на пути повышения эффективности работы оборудования для приготовления кормов, а значит, и важной, актуальной проблемой, требующей решения.

Целью исследования является решение данной проблемы. Эта цель достигается путем исследования влияния угла  $\tau$  на энергозатраты операции измельчения кормов для пушных зверей. В соответствии с поставленной целью и с учетом теоретических предпосылок определены следующие задачи:

- 1) осуществить обзор и анализ существующих исследований;
- 2) реализовать экспериментальное исследование влияния угла  $\tau$  на энергозатраты операции измельчения;
- 3) выполнить анализ полученных результатов и предложить рекомендации по выбору угла  $\tau$ .

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исследуемого материала использовали говяжье мясо и субпродукты (влажность 72,1...72,9 %, плотность 1160...1180 кг/м<sup>3</sup>, температура перед измельчением -3...-1 °С), вследствие того что они относятся к основным компонентам кормовых рационов пушных зверей [1].

Экспериментальное исследование влияния угла  $\tau$  на энергозатраты (мощность  $N$ ) измельчения выполнено на лабораторной установке (рис. 1), к которой подключен счетчик электрической энергии «Нева МТ 123» (счетчик измеряет и отображает на дисплее значения мощности, погрешность 1 Вт).

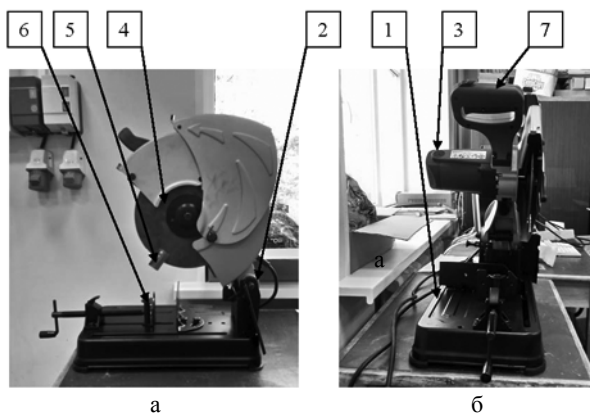


Рис 1. Лабораторная установка: (а) вид спереди, (б) вид сбоку. 1 – основание, 2 – стойка, 3 – электродвигатель, 4 – диск, 5 – нож, 6 – тиски, 7 – рукоятка с нажимным переключателем

Методика проведения исследования была следующей. Говяжье мясо и субпродукты нарезами кусками равного поперечного сечения 30 × 30 мм<sup>2</sup> и закрепляли в тисках установки.

Затем на диск установки крепили ножи под заданным углом  $\tau$  и запускали электродвигатель. Плавно опуская рукоятку с нажимным переключателем стойки, на которой крепится диск с ножами, производили измельчение (скорость резания составляла 20 м/с).

Показания счетчика электрической энергии «Нева МТ 123» фиксировали посредством цифровой видеокамеры. По окончании исследования на основе полученных видеозаписей определяли значения потребной мощности установки (на рабочем ходу)  $N_{\text{рх}}$ . Для определения мощности, затраченной непосредственно на измельчение, запускали электродвигатель и определяли потребную мощность установки на холостом ходу  $N_{\text{хх}}$ .

Затем подставляли полученные значения  $N_{\text{рх}}$  и  $N_{\text{хх}}$  в выражение

$$N_{\text{изм}} = N_{\text{рх}} - N_{\text{хх}}$$

Переставив ножи на диске под новым углом  $\tau$ , повторяли опыты. В ходе исследования осуществлялась пятикратная повторность опытов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам исследований была получена выборка данных о мощности  $N_{\text{изм}}$ , затраченной на операцию измельчения кормов. Для полученных данных произведена статистическая обработка общепринятыми методами математической статистики [1], [2] для 5 %-го уровня значимости. Результаты представлены на графике (рис. 2).

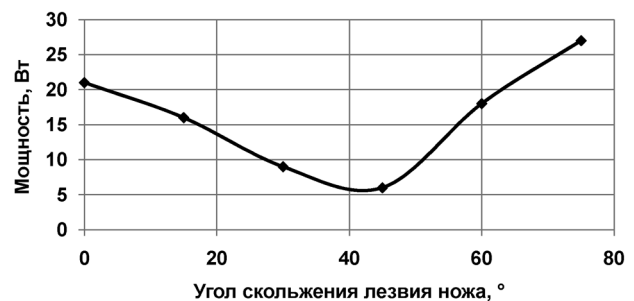


Рис. 2. График изменения мощности, затрачиваемой на измельчение, от угла скольжения лезвия ножа

Наиболее близко описывает полученную кривую (см. рис. 2) уравнение

$$N_{\text{изм}} = 0,012 \cdot \tau^2 - 0,806 \cdot \tau + 22,500, \text{ Вт},$$

где 0,012, (-0,806) и 22,500 – эмпирические коэффициенты.

Анализ полученных результатов исследования позволил установить следующее: между мощностью  $N_{\text{изм}}$ , затрачиваемой на измельчение, и углом скольжения лезвия ножа  $\tau$  существует сложная зависимость. Так, в диапазоне углов  $\tau$  от 0 до 45° наблюдается значительное уменьшение  $N_{\text{изм}}$ , в 3,5 раза, начиная от 45° и выше – значительное увеличение  $N_{\text{изм}}$  (так, при  $\tau = 75^\circ$   $N_{\text{изм}}$  увеличивается в 4,5 раза и в абсолютных величинах пре-

вышает  $N_{изм}$  при  $\tau = 0^\circ$  на 29 %). Такой характер полученной зависимости можно объяснить следующим образом [1]: изменение угла  $\tau$  приводит к возникновению ряда эффектов. Одни эффекты ведут к снижению энергозатрат операции измельчения (кинематическая трансформация угла заточки, кинематическая трансформация кромки лезвия), а другие – к повышению энергозатрат (прежде всего кинематическая трансформация толщины перерезаемого материала). Баланс тех и других эффектов характеризует суммарное влияние угла  $\tau$  на энергозатраты. Повышение эффективности приготовления кормов для пушных зверей возможно при правильном подборе значений угла  $\tau$ .

## ВЫВОДЫ

1. При измельчении кормов для пушных зверей с увеличением угла  $\tau$  от 0 до  $45^\circ$  наблюдается уменьшение энергозатрат в 3,5 раза, начиная с  $45^\circ$  и выше – увеличение энергозатрат в 4,5 раза.
2. Наименьшие энергозатраты при измельчении кормов для пушных зверей наблюдаются при  $\tau = 40..41^\circ$ . Применение данных значений угла  $\tau$  позволяет повысить эффективность приготовления кормов для пушных зверей.
3. Выявленная зависимость энергозатрат (мощности) от угла  $\tau$  изменяется согласно уравнению:  $N_{изм} = 0,012 \cdot \tau^2 - 0,806 \cdot \tau + 22,500$ .

\* Работа выполнена в рамках реализации комплекса мероприятий Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 гг. (подпроект: «Совершенствование строительных материалов на основе использования местных ресурсов и отходов переработки древесины»).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилов Т. А. Исследование процесса измельчения мягких субпродуктов и разработка конструкции измельчителя для звероводства: Дисс. ... канд. техн. наук. Петрозаводск, 2014. 147 с.
2. Колесников Г. Н. Дискретные модели механических и биомеханических систем с односторонними связями. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2004. 202 с.
3. Курдюмов В. И., Аюгин П. Н., Аюгин Н. П. Снижение энергоемкости измельчения // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2008. № 5. С. 50–53.
4. Лебедь Н. И. Обоснование конструктивных параметров и режимов работы измельчителя яблок: Дисс. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2013. 136 с.
5. Kováč J., Krilek J. The possibilities for measurement of saw blades wearing // Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis. 2011. Vol. 59. № 5. P. 137–144.
6. Kwon Y.-D., Park S.-J., Choi W.-G., Bang S.-I., Kwon H.-W. Shear cutting theory for the peripheral edges of brush blades, and tests of its effectiveness // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2014. Vol. 15. № 7. P. 1459–1465.
7. Spinellia R., Glushkov B. S., Markov I. Managing chipper knife wear to increase chip quality and reduce chipping cost // Biomass and Bioenergy. 2014. Vol. 62. P. 117–122.
8. Tong B.-H., Sun J., Xu Z.-H., Chen Z.-Y., Ji B., Song B. Experimental study and comprehensive evaluation on meat grinding // Modern Food Science and Technology. 2013. Vol. 29. № 12. P. 2953–2957.

Gavrilov T. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

## EFFICIENCY INCREASE IN FODDER PREPARATION FOR FUR BEARING ANIMALS

This article deals with the problem of efficiency increase in the fodder preparation process for fur-bearing animals. Grinding as a part of the energy consuming technological process is the main operation of the fodder preparation process in focus. Therefore, the study of factors influencing the level of energy consumption during grinding becomes essential. The slip angle of the blade is one of these factors. In this article, the author substantiates his conclusions based on the data obtained from the experimental research. The studied material, meat and fish feed were alternately placed on the laboratory apparatus and cut by the blade under the slip angle from  $0^\circ$  to  $75^\circ$ , with a step of  $15^\circ$ . Based on the obtained results, the influence of the slip angle of the blade on grinding energy consumption was calculated. Analyzing these data, the author obtained new functional dependences between the grinding energy consumption and the slip angle of the blade. It is a scientific novelty of the article.

Key words: fur-bearing animals, grinding, meat-fish feed, energy consumption, slip angle of the blade

## REFERENCES

1. Gavrilov T. A. *Issledovanie protsessa izmel'cheniya myagkikh subproduktov i razrabotka konstruktii izmel'chatelya dlya zverovodstva.*: Diss. ... kand. tekhn. nauk [Study of the grinding process of soft offals and the design of the grinder for fur farming. PhD. tech. sci. diss.]. Petrozavodsk, 2014. 147 p.
2. Kolesnikov G. N. *Diskretnye modeli mekhanicheskikh i biomekhanicheskikh sistem s odnostoronnimi svyazyami* [Discrete models of mechanical and biomechanical systems with unilateral constraints]. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2004. 202 p.
3. Kurdyumov V. I., Ayugin P. N., Ayugin N. P. Reduction of energy grinding [Snizhenie energoemkosti izmel'cheniya]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Vestnik of the Altai State Agrarian University]. 2008. № 5. P. 50–53.
4. Lebed' N. I. *Obosnovanie konstruktivnykh parametrov i rezhimov raboty izmel'chatelya yablok.*: Diss. ... kand. tekhn. nauk [Justification of design parameters and operating modes of the chopper apples. PhD. tech. sci. diss.]. Volgograd, 2013. 136 p.
5. Kováč J., Krilek J. The possibilities for measurement of saw blades wearing // Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis. 2011. Vol. 59. № 5. P. 137–144.
6. Kwon Y.-D., Park S.-J., Choi W.-G., Bang S.-I., Kwon H.-W. Shear cutting theory for the peripheral edges of brush blades, and tests of its effectiveness // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2014. Vol. 15. № 7. P. 1459–1465.
7. Spinellia R., Glushkov B. S., Markov I. Managing chipper knife wear to increase chip quality and reduce chipping cost // Biomass and Bioenergy. 2014. Vol. 62. P. 117–122.
8. Tong B.-H., Sun J., Xu Z.-H., Chen Z.-Y., Ji B., Song B. Experimental study and comprehensive evaluation on meat grinding // Modern Food Science and Technology. 2013. Vol. 29. № 12. P. 2953–2957.

Поступила в редакцию 26.03.2015

**ГЕННАДИЙ НИКОЛАЕВИЧ КОЛЕСНИКОВ**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой общетехнических дисциплин Института лесных, инженерных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*kgn@petsu.ru*

**МАРИНА ИВАНОВНА РАКОВСКАЯ**

кандидат технических наук, доцент кафедры общетехнических дисциплин Института лесных, инженерных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*mirrows@ya.ru*

### **К ОБОСНОВАНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ ОЧЕРЕДНОСТИ ПЕРЕХОДА ОДНОСТОРОННИХ СВЯЗЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИЗ ВОЗМОЖНОГО СОСТОЯНИЯ В ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ\***

Для обоснования энергетического критерия очередности перехода односторонних связей механических систем из возможного состояния в действительное состояние рассмотрено применение известной теоремы о том, что полная потенциальная энергия механической системы при выключении одной связи уменьшается или, по крайней мере, не увеличивается.

Ключевые слова: односторонние связи, моделирование

В данной работе рассматривается механическая система с односторонними связями. Структура такой системы может изменяться в зависимости от состояния односторонних связей. Для определения состояния односторонней связи предлагается использовать известную теорему: полная потенциальная энергия механической системы при наложении одной связи увеличивается или, по крайней мере, не уменьшается [1; 38]. Соответственно, полная потенциальная энергия механической системы при выключении одной связи уменьшается или, по крайней мере, не увеличивается. Выключение связей имеет место, например, при разрушении строительных конструкций. В моделях реальных конструкций количество связей на порядки больше единицы. Можно предположить, что в исходном состоянии механической системы все связи находятся в состоянии «включено». Тогда при достаточно большой нагрузке эволюция системы на стадии разрушения будет сопровождаться переходом связей из состояния «включено» в состояние «выключено».

В контексте данной работы связь – любое устройство, препятствующее перемещениям одного тела относительно другого. Двусторонняя связь всегда находится в состоянии «включено». Например, на уровне модели твердое тело можно рассматривать как механическую систему, в которой две любые части данного тела соединены двусторонними связями. Однако, принимая во внимание, что бесконечно прочных материалов не существует, нельзя исключать возможности разрушения (то есть выключения) этих связей

при некотором достаточно интенсивном воздействии. В механических системах возможны переходы связей из состояния «включено» («выключено») в состояние «выключено» («включено»).

Двустороннюю связь можно рассматривать как частный случай односторонней связи, находящейся в состоянии «включено». В ряде случаев отсутствующую связь можно рассматривать как одностороннюю связь, находящуюся в состоянии «выключено».

Для односторонней связи возможно одно из двух состояний: «включено» или «выключено»; при данном воздействии на конструкцию реализуется только одно из этих состояний. Например, до начала разрушения конструкции действительное состояние всех связей «включено». Для любой из этих связей возможным является также состояние «выключено». Увеличение нагрузки на конструкцию может привести к тому, что текущее состояние связи («включено») окажется нереализуемым и осуществится переход в состояние «выключено».

Проблема заключается в определении тех связей, которые переходят из возможного состояния в действительное. Решить данную проблему можно, если предположить, что в течение некоторого времени односторонние связи переходят из возможного состояния в действительное в определенной очередности [2], [3]. Установить эту очередность позволяет приведенная выше теорема, согласно которой полная потенциальная энергия механической системы при выключении одной связи уменьшается или, по крайней мере, не увеличивается. Предположим, что на достаточно



малом отрезке времени из возможного состояния в действительное состояние переходит только одна связь. Как идентифицировать эту связь? На основании принципа минимума потенциальной энергии в новое состояние перейдет та связь, переход которой приведет к минимуму полной потенциальной энергии механической системы. Переход данной связи в новое состояние повлечет изменение структуры механической системы, что моделируется одним шагом жордановых исключений с выбором диагонального разрешающего элемента в матрице жесткости по энергетическому критерию [2], [3]. Затем в преобразованной та-

ким образом модели механической системы с использованием того же энергетического критерия определяется очередная связь, переход которой минимизирует полную потенциальную энергию на очередном достаточно малом отрезке времени. Если таких связей нет, то вычисления завершаются. Иначе, выполняется один шаг указанных выше жордановых исключений.

Примеры вычислений приведены в статье [2]. Известны другие алгоритмы расчета конструкций с односторонними связями [4]. Однако применение энергетического критерия [3] оказывается в ряде случаев предпочтительным [2].

\* Работа выполнена в рамках реализации комплекса научных мероприятий Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 гг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильков Г. В. Эволюционные задачи строительной механики. Синергетическая парадигма. Ростов-на-Дону, 2003. 180 с.
2. Колесников Г. Н. Алгоритм декомпозиции линейной задачи дополнителности и его применение для моделирования соударений балансов в корообдирочном барабане // *Resources and Technology*. 2013. Т. 10. № 2. С. 111–138.
3. Колесников Г. Н., Раковская М. И. Энергетический критерий очередности перехода односторонних связей в действительное состояние // *Обозрение прикладной и промышленной математики*. 2006. Т. 13. С. 652.
4. Schoeder S., Ulbrich H., Schindler T. Discussion of the Gear – Gupta – Leimkuhler method for impacting mechanical systems // *Multibody System Dynamics*. 2014. Vol. 31. № 4. P. 477–495.

**Kolesnikov G. N.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Rakovskaya M. I.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

#### ENERGY CRITERION OF PRIORITY TRANSITION OF UNILATERAL CONSTRAINTS FROM POSSIBLE TO REAL STATES IN MECHANICAL SYSTEMS

To substantiate the energy criterion of priority transition of unilateral constraints in mechanical systems from a possible state to a real state we used a theorem: the total potential energy of the mechanical system, under at least one disengaged connection, decreases or at least does not increase.

Key words: unilateral constraints, modeling

#### REFERENCES

1. Vasil'kov G. V. *Evolyutsionnye zadachi stroitel'noy mekhaniki. Sinergeticheskaya paradigma* [Evolutionary problems of structural mechanics. Synergetic Paradigm]. Rostov-on-Don, 2003. 180 p.
2. Kolesnikov G. N. Decomposition Algorithm of Linear Complementarity Problem and its Application for Simulation of Pulpwood Collisions in Debarking Drum [Algoritm dekompozitsii lineynoy zadachi dopolnitel'nosti i ego primenenie dlya modelirovaniya soudareny balansom v koroobdirochnom barabane]. *Resources and Technology*. 2013. Vol. 10. № 2. P. 111–138.
3. Kolesnikov G. N., Rakovskaya M. I. The energy criterion of priority transition of unilateral constraints to the real state [Energeticheskiy kriteriy ocherednosti perekhoda odносторонnikh svyazey v deystvitel'noe sostoyanie]. *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki*. 2006. Vol. 13. P. 652.
4. Schoeder S., Ulbrich H., Schindler T. Discussion of the Gear – Gupta – Leimkuhler method for impacting mechanical systems. *Multibody System Dynamics*. 2014. Vol. 31. № 4. P. 477–495.

Поступила в редакцию 03.06.2015

**ЛЮДМИЛА АНАТОЛЬЕВНА ДЕВЯТНИКОВА**

кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры, строительных конструкций и геотехники Института лесных, инженерных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*lud\_dev@mail.ru*

**ЕЛЕНА ГЕННАДЬЕВНА ЕМЕЛЬЯНОВА**

кандидат экономических наук, доцент кафедры организации строительного производства Института лесных, инженерных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*zhenemel@mail.ru*

**АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ КУЗЬМЕНКОВ**

кандидат экономических наук, доцент кафедры организации строительного производства Института лесных, инженерных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*kuzmenkov@petsu.ru*

**АНАСТАСИЯ АЛЕКСЕЕВНА СИМОНОВА**

студент 4-го курса Института лесных, инженерных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*obchenie@mail.ru*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ВЫБОРЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОЗВЕДЕНИЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЖИЛЫХ ДОМОВ\*

Рассматриваются результаты оценки энергоэффективных ограждающих конструкций стен малоэтажных жилых домов по различным технико-экономическим показателям. Для исследования выбраны следующие конструкции стен: брусчатые стены с наружным утеплением, стены из газобетонных блоков с наружным утеплением, стены, изготовленные с применением системы несъемной опалубки VELOX (ВЕЛОКС), и стены из блоков с применением древесно-композитного материала. В результате сравнения по технологическим и экономическим показателям выявлены наиболее эффективные и экономически выгодные варианты конструкции стены для малоэтажного жилого здания в условиях Карелии.

Ключевые слова: малоэтажное строительство, технико-экономическое сравнение, ограждающие конструкции стен, энергоэффективность, ресурсосбережение

Строительство малоэтажных жилых объектов набирает все большую популярность и поддерживается государственными программами как на федеральном уровне, так и на уровнях субъектов РФ и муниципальных образований. Малоэтажное жилищное строительство рассматривается как одна из возможностей решения жилищной проблемы или улучшения жилищных условий для населения [4], [8].

В настоящее время в нормативно-технических документах отсутствует четко определенное понятие малоэтажного строительства. Однако в Градостроительном кодексе РФ определен ряд объектов капитального строительства, для которых установлен упрощенный порядок проектирования, проведения экспертизы проектной документации, строительства, строительного контроля и государственного строительного

надзора, а также ввода в эксплуатацию. К таким объектам жилищного строительства относятся здания высотой не более трех этажей: индивидуальные жилые дома, жилые дома блокированной застройки с количеством блок-секций в здании не более десяти; многоквартирные дома с количеством секций в здании не более четырех.

Наряду с усилением внимания потребителей к строительству малоэтажных жилых объектов для постоянного проживания, проявляется интерес к материалам, конструкциям и технологиям возведения, применяемым при строительстве такого рода объектов. Современный строительный рынок предлагает широкий спектр материалов, конструкций и технологий для строительства. При анализе предложений строительных компаний на рынке малоэтажного строительства РК [5] были выявлены основные группы стро-

ительных материалов для возведения ограждающих конструкций – это дерево и древесные материалы, мелкогабаритные элементы в виде кирпича, легкого бетона и композитных блоков и энергоэффективные конструкции с применением монолитного железобетона. К последним относятся технологии применения несъемной опалубки VELOX (ВЕЛОКС) и DURISOL (ДЮРИСОЛ), а также опалубки из пенополистирольных блоков. Следует также отметить, что наиболее популярным материалом для строительства и изготовления конструкций стен на территории РК остается древесина. Однако классические технологии строительства уходят на второй план в связи с повышающимися требованиями к теплозащитным свойствам конструкций, а их место занимают современные решения, возможность применения которых требует дополнительных исследований.

Целью предложенного в работе исследования явилось определение наиболее оптимального варианта устройства наружных стен, рассматриваемых в качестве ограждающих конструкций малоэтажного жилого здания. Сравнение различных конструкций наружных стен производилось по теплозащитным свойствам [6], а также по ряду технологических и экономических показателей, так как без комплексной оценки сложно предположить, какой из вариантов окажется предпочтительным.

В качестве объекта для исследования принят одноэтажный одноквартирный индивидуальный жилой дом общей площадью 70,6 м<sup>2</sup> с размерами в плане 9,8 × 5,8 м и высотой этажа 2,8 м (высота жилых помещений от пола до потолка 2,6 м). Объемно-планировочные решения дома приняты в соответствии с СП 55.13330.2011 и с учетом требований, определяющих технические показатели жилья экономического класса.

Для сравнительной оценки выбраны четыре варианта наружных стен, наиболее популярных в практике индивидуального малоэтажного домостроения в РК:

1. Стены из бруса с использованием эффективного утеплителя;
2. Стены из газобетона марки D400 с использованием эффективного утеплителя;
3. Стены с применением строительной системы VELOX (ВЕЛОКС);
4. Стены с применением древесно-цементного композитного материала по классификации ГОСТ Р 54854–2011.

Первый вариант ограждающих конструкций стен представлен классической конструкцией брусчатой стены с дополнительным наружным утеплением и наружной отделкой из металлического профилированного листа (металлосайдинга) по металлическому каркасу. Конструкция стены для первого варианта представлена на рис. 1. В конструкции стены применя-

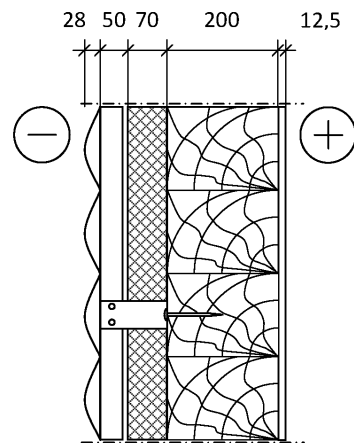


Рис. 1. Стена из бруса с использованием эффективного утеплителя

ется брус из древесины хвойных пород сечением 150 × 200 мм по ГОСТ 8486–86 и ГОСТ 24451–80, минераловатные плиты Rockwool ВЕНТИ БАТТС плотностью 90 кг/м<sup>3</sup> (ЗАО «Минеральная Вата») толщиной 70 мм и система навесного вентилируемого фасада с воздушным зазором с облицовкой металлическим сайдингом по металлическому каркасу (ООО «Компания Металл Профиль»). Между венцами бруска скрепляются деревянными нагелями круглого сечения диаметром до 3 см для обеспечения соединения одним нагелем нескольких рядов брусков (от двух до трех рядов). Крепеж нагелями осуществляется в шахматном порядке с шагом от 1000 до 1500 мм. Угловые соединения и стыки внутренних и наружных стен выполняются без остатка одним из известных способов: в полдерева с нагелем, впритык или встык, впритык с коренным шипом, в лапу, на вставных шпонках, сквороднем либо полусквороднем. Дополнительное утепление брусчатой стены необходимо, поскольку для соответствия современным нормам по тепловой защите толщина слоя только из древесины будет составлять примерно 0,5 м. Утепление также позволит решить проблему продуваемости стен между брусками и в угловых соединениях. Плиты минерального утеплителя крепятся к стене при помощи тарельчатых дюбелей с расчетом не менее 4 шт. на одну плиту размерами 1000 × 600 мм. Так как в конструкции используется гидрофобизированный утеплитель достаточно высокой плотности, устройство защиты из паропроницаемой, ветро- и влагозащитной мембраны не требуется. Облицовка из стального сайдинга монтируется на облегченную подконструкцию, состоящую из металлических крепежных кронштейнов и Г-образного крепежного профиля. Кронштейны устанавливаются на стену через паронитовую прокладку до монтажа слоя утеплителя. Вылет кронштейна назначается в соответствии с толщиной слоя утеплителя и исходя из необходимости обеспечения воздушного зазора величиной мини-

мум в 40 мм с учетом возможности закрепления направляющих под облицовку. В качестве основания под внутреннюю отделку стены принята ориентированно-стружечная плита OSB-3 толщиной 12,5 мм. В первом варианте конструкции для теплотехнического расчета приняты следующие характеристики слоев материалов стены:

- 1-й слой – ориентированно-стружечная плита OSB толщиной 0,0125 м, плотностью 650 кг/м<sup>3</sup> с коэффициентом теплопроводности 0,13 Вт/м °С;
- 2-й слой – брус толщиной 0,2 м, плотностью 500 кг/м<sup>3</sup> с коэффициентом теплопроводности 0,14 Вт/м °С;
- 3-й слой – утеплитель Rockwool ВЕНТИ БАТТС толщиной 0,07 м, плотностью 90 кг/м<sup>3</sup> с коэффициентом теплопроводности 0,035 Вт/м °С.

Стальной сайдинг не учтен в теплотехническом расчете, так как термическое сопротивление этого слоя ничтожно мало.

Второй вариант конструкции стены реализован в виде кладки из мелкогазобетонных блоков автоклавного твердения (в данном исследовании – газобетонные блоки АЕРОС). В рассматриваемом варианте конструкции стены используются блоки марки D400 размерами 300 × 250 × 625 мм, класс по прочности В2,5, класс по морозостойкости F50. Тонкошовная кладка блоков ведется с использованием клея АЕРОС и армированием через 4 ряда блоков арматурой диаметром 8 мм класса А400. Армирование также предусматривается для первого ряда кладки на фундаменте, зон опирания перемычек (желательно по 900 мм от края проемов), зон под оконными проемами (на ширину оконного проема плюс 900 мм в каждую сторону от проема), в уровне каждого перекрытия и под стропильной системой. Устройство перемычек над проемами реализуется за счет применения U-блоков этого же производителя. Конструкция U-блока имеет полость для размещения арматурного каркаса и последующего заполнения бетоном. С наружной стороны предусмотрен теплоизоляционный слой из плит каменной ваты Rockwool ФАСАД БАТТС плотностью 130 кг/м<sup>3</sup> и толщиной 50 мм. Крепление утеплителя производится либо механическим способом (тарельчатыми дюбелями), либо при помощи высокоадгезионных клеевых составов. Наружная отделка реализована по «мокрому» принципу с устройством декоративной штукатурки толщиной 15 мм по слою теплоизоляции. Для теплотехнического расчета приняты следующие характеристики слоев материалов стены:

- 1-й слой – газобетон Аегос марки D 400 толщиной 0,3 м, плотностью 400 кг/м<sup>3</sup> с коэффициентом теплопроводности 0,13 Вт/м °С;
- 2-й слой – утеплитель Rockwool ФАСАД БАТТС толщиной 0,05 м, плотностью

130 кг/м<sup>3</sup> с коэффициентом теплопроводности 0,037 Вт/м °С;

- 3-й слой – штукатурка толщиной 0,015 м, плотностью 2100 кг/м<sup>3</sup> с коэффициентом теплопроводности 0,698 Вт/м °С.

Конструктивное решение стены для второго варианта представлено на рис. 2.

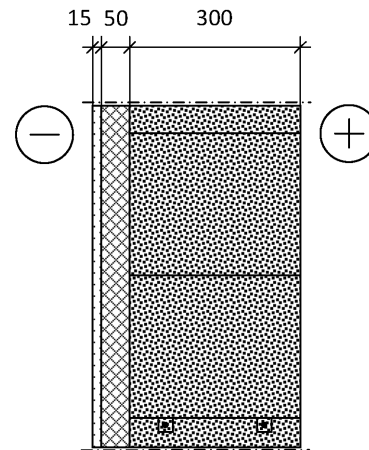


Рис. 2. Стена из газобетона с использованием эффективного утеплителя

Третий вариант стены представлен конструкцией, основанной на применении технологии монолитного строительства в несъемной опалубке из щепоцементных плит VELOX (ВЕЛОКС). В работе [3] рассмотрен пример использования системы VELOX в качестве ограждающих конструкций одноэтажного жилого дома. Представлены два варианта утеплителей (без изменения остальных слоев конструкции в целом) с небольшой разницей коэффициента теплопроводности в 0,002 Вт/м °С. Очевидно, что утеплитель с более низким коэффициентом теплопроводности придает конструкции стены повышенную теплозащиту, что сократило теплотеперид здания почти на 0,63 Вт на 1 м<sup>2</sup> общей площади дома.

Несъемная опалубка состоит из двух щепоцементных плит толщиной 35 мм, установленных параллельно друг другу и скрепленных между собой металлическими стяжками. К наружной плите приклеен слой экструдированного пенополистирола марки URSA XPS N-III толщиной 100 мм. Технологически в процессе возведения стен между плитами опалубки создается монолитное железобетонное ядро из тяжелого бетона толщиной 150 мм. Наружная и внутренняя отделка предусмотрена в виде слоя цементно-песчаной декоративной штукатурки толщиной 15 мм. Для теплотехнического расчета приняты следующие характеристики слоев материалов стены:

- 1-й слой – штукатурка толщиной 0,03 м, плотностью 2100 кг/м<sup>3</sup> с коэффициентом теплопроводности 0,698 Вт/м °С;

- 2-й слой – щепоцементная плита толщиной 0,07 м, плотностью  $670 \text{ кг/м}^3$  с коэффициентом теплопроводности  $0,11 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$ ;
- 3-й слой – монолитный железобетон толщиной 0,15 м, плотностью  $2500 \text{ кг/м}^3$  с коэффициентом теплопроводности  $2,04 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$ ;
- 4-й слой – экструдированный пенополистирол марки URSA XPS N-III толщиной 0,1 м, плотностью  $35 \text{ кг/м}^3$  с коэффициентом теплопроводности  $0,033 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$ .

Конструкция стены для третьего варианта показана на рис. 3.

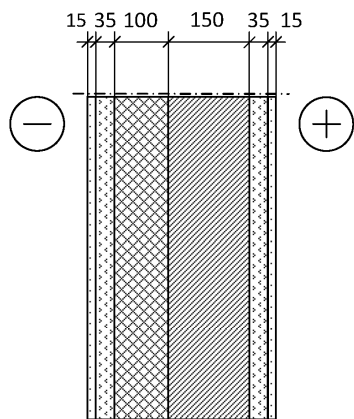


Рис. 3. Стена с применением системы VELOX

В четвертом варианте конструкции стены применяются мелкогазовые блоки из древесно-цементного композитного материала по классификации ГОСТ Р 54854–2011. В качестве заполнителя в материале блоков использованы опилки хвойных пород. Плотность блоков из древесно-цементного композита составляет  $650 \text{ кг/м}^3$ , класс прочности на сжатие В2,5, марка по морозостойкости F25 [1]. Размер блоков  $500 \times 250 \times 250 \text{ мм}$ . Общая толщина стены с учетом наружной и внутренней отделки в виде цементно-песчаной штукатурки толщиной 15 мм составляет 530 мм. Кладка выполняется с использованием легкого теплоизоляционного раствора на основе вспученного перлита с перевязкой кладки «тычком» через каждые три ряда ложковой кладки. Использование теплоизоляционного кладочного раствора позволяет избежать образования теплопроводных участков при формировании швов стандартной толщины: для горизонтальных швов – от 10 до 15 мм, в среднем 12 мм, в пределах высоты этажа; для вертикальных швов – от 8 до 15 мм, в среднем 10 мм. Перемычки над проемами выполняются из сборных железобетонных элементов, которые укладываются вдоль внутренней и наружной граней стены, а между ними устраивается вкладыш из теплоизоляционного материала. Деревянные балки перекрытий опираются на стену через выравнивающий слой из армированного цементно-песчаного раствора.

Глубина опирания деревянных балок должна быть не менее 150 мм. Для распределения нагрузки от балки под нее на кладку устанавливают стальную полосу толщиной 6 мм, ширина полосы не менее 60 мм. Между торцом и стеной должен оставаться воздушный зазор не менее 20 мм. Для теплотехнического расчета приняты следующие характеристики слоев материалов стены:

1-й слой – штукатурка толщиной 0,03 м, плотностью  $2100 \text{ кг/м}^3$  с коэффициентом теплопроводности  $0,698 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$ ;

2-й слой – блоки из древесно-цементного композитного материала толщиной 0,5 м, плотностью  $650 \text{ кг/м}^3$  с коэффициентом теплопроводности  $0,13 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$ .

Конструкция стены для четвертого варианта представлена на рис. 4.

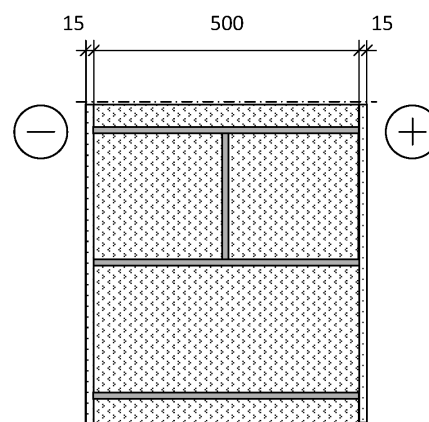


Рис. 4. Стены из мелкогазовых блоков из древесно-цементного композитного материала

В рамках современной концепции ресурсо- и энергосбережения вопрос использования отходов различных видов производства и потребления становится актуальным и для строительной отрасли. Варианты конструкции стены с использованием технологии ВЕЛОКС и с применением древесно-цементного композитного материала предусматривают использование отходов деревообрабатывающей промышленности в виде измельченной древесины [1], [2], [7].

Теплотехнический расчет четырех вариантов стен выполнен по методике СП 50.13330.2012 в соответствии с СП 131.13330.2012. На основе этих нормативных документов приняты следующие условия эксплуатации ограждающих конструкций для г. Петрозаводска:

- расчетная внутренняя температура  $20 \text{ °C}$ ;
- расчетная зимняя температура наружного воздуха холодной 5-дневки  $-28 \text{ °C}$ ;
- средняя температура отопительного периода  $-3,2 \text{ °C}$ ;
- продолжительность отопительного периода 235 суток.

Согласно расчету значение градусо-суток отопительного периода ( $D_d$ ) составило  $5452 \text{ °C} \cdot \text{сут.}$

следовательно, требуемое значение сопротивления теплопередаче  $R_{\text{req}} = 3,3082 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ . Далее для каждого варианта стен определено расчетное сопротивление теплопередаче ( $R_0, \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ). Показателем соответствия строительным нормам по теплотехническим характеристикам является выполнение условия  $R_0 \geq R_{\text{req}}$ . При подборе толщин слоев конструкций всех четырех вариантов стен это условие соблюдено. Кроме того, чтобы учесть неоднородность наружных стен, коэффициент теплотехнической однородности для всех вариантов принят равным 0,9. Результаты теплотехнического расчета представлены в таблице.

Толщина стены более 500 мм является неэкономичной из-за увеличения ширины фундаментных блоков. При увеличении толщины стены уменьшается объем помещения, а вместе с ним и общая площадь. Из рассмотренных вариантов толщину стены более 500 мм имеет только стена из древесно-цементного композита с наиболее высокими теплозащитными свойствами. Легче всех оказалась конструкция из бруса с утеплителем, имеющая также и наименьшую толщину из рассмотренных вариантов. Конструкции из древесно-цементного композита и технологии ВЕЛОКС отличаются наибольшим весом, но при этом характеризуются применением отходов деревообработки.

Для каждого из рассмотренных вариантов конструкций были разработаны технологические карты на выполнение строительно-монтажных работ по возведению стен и определены основные параметры технологических процессов: затраты труда рабочих, затраты времени машин и механизмов, расчетная продолжительность выполнения работ, часовая выработка и трудоемкость монтажа приведенной единицы измерения объема работ. Расчеты произведены на основании данных единых норм и расценок (ЕНиР) и, в отдельных случаях, на основании данных государственных элементных сметных норм (ГЭСН). В качестве рассматриваемого объема работ принят вышеописанный одноэтажный жилой дом. Расчет продолжительности производства работ произведен с учетом состава звена в соответствии с данными ЕНиР и при работе в одну смену длительностью 8 рабочих часов. Результаты сравнения технологических показателей представлены в таблице.

Как видно из результатов сравнения технологических показателей возведения стен, наиболее трудоемкими в исполнении являются стены из бруса с утеплением и устройство стен по технологии ВЕЛОКС. Стены из газобетонных блоков с наружным утеплением и древесно-цементных блоков имеют сопоставимые показатели по трудоемкости и продолжительности производства работ. Стены из бруса с наружным утеплением имеют наибольшую продолжительность вы-

полнения работ, что обусловлено большим количеством немеханизированных работ. Стены, выполняемые по технологии ВЕЛОКС, характеризуются наименьшей продолжительностью выполнения работ, что можно аргументировать отработанной технологией и высоким качеством исходных строительных материалов. Исходя из сравнения часовой выработки на  $1 \text{ м}^2$  наиболее производительными являются стены из газобетонных блоков с утеплением и система ВЕЛОКС, однако наименьшая трудоемкость устройства  $1 \text{ м}^2$  конструкции стены наблюдается у конструкций из газобетонных блоков и блоков из древесно-цементного композита.

Для сравнения экономических показателей рассматриваемых вариантов наружных стен в работе был выполнен расчет сметной стоимости строительно-монтажных работ по возведению исследуемого одноэтажного одноквартирного индивидуального жилого дома общей площадью  $70,6 \text{ м}^2$ . При расчете сметной стоимости отделочные работы не учитывались. Локальные сметы составлены базисно-индексным методом согласно требованиям МДС 81–35.2004 на основе территориальных единичных расценок Республики Карелия ТЕР-2001 с применением индексов пересчета сметной стоимости в текущий уровень цен. Индексы изменения сметной стоимости СМР по видам строительства в текущий уровень цен (на IV квартал 2014 года) приняты в соответствии с приложением № 1 к распоряжению Министерства строительства, жилищно-коммунального хозяйства и энергетики РК № 73 от 26 сентября 2014 года. Индексы применялись к статьям прямых затрат и составили:

- к основной заработной плате – 13,97;
- к эксплуатации машин и механизмов – 6,56;
- к материальным затратам – 4,52.

Накладные расходы рассчитывались косвенным путем в процентах от фонда оплаты труда рабочих-строителей и механизаторов по каждому виду строительно-монтажных работ согласно МДС 81–34.2004. Аналогично рассчитывалась сметная прибыль. Нормы сметной прибыли по видам строительно-монтажных работ приняты согласно МДС 81–25.2001. Результаты сравнения экономических показателей рассматриваемых вариантов наружных стен и расчетов сметной стоимости строительства здания приведены в таблице.

Как видно из результатов сравнения, по экономическим показателям наиболее затратной является брусчатая конструкция стены с наружным утеплением. На втором месте по стоимости – конструкция стены с использованием технологии ВЕЛОКС. Наиболее эффективными с точки зрения стоимостных показателей признаны конструкции с применением мелкоформатных блоков из газобетона и древесно-цементного композитного материала.

Сравнение расчетных (технических, конструктивных), технологических и экономических показателей вариантов наружных стен

Расчетные показатели конструкций	Варианты конструкций стен			
	Брус с утеплителем	Газобетон с утеплителем	VELOX	Древесно-цементный композит
Технические, конструктивные показатели				
Толщина стены, м	0,348	0,365	0,35	0,53
Сопротивление теплопередаче, $R_0$ , $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$	3,35	3,45	3,55	3,64
Вес $1 \text{ м}^2$ , кг	120,85	158	488,4	388
Использование отходов производства	–	–	+	+
Технологические показатели				
Рассматриваемый объем работ, $\text{м}^3/\text{м}^2$	37,02/105,26	38,9/105,4	37,24/105,28	57,46/106,72
Общая трудоемкость работ, чел./ч	513,38	286,15	462,49	269,06
Затраты машинного времени, маш./ч	6,81	17,92	24,11	17,92
Расчетная продолжительность работ, ч/см	170,08/21,26	137,2/17,15	125,2/15,65	136,56/17,07
Часовая выработка, $\text{м}^3/\text{ч}/\text{м}^2/\text{ч}$	0,21/0,62	0,28/0,77	0,3/0,84	0,42/0,78
Трудоемкость устройства $1 \text{ м}^3/1 \text{ м}^2$ конструкции, чел./ч	13,87/4,88	7,36/2,72	12,42/4,39	4,68/2,52
Экономические показатели				
Прямые затраты, руб.,	350406	88752	165571	64220
в том числе:				
– основная зарплата	89461	48527	82645	40103
– эксплуатация машин и механизмов	11294	19133	22148	8737
– материалы	249651	21092	60778	15380
Накладные расходы, руб.	103507	60173	109796	51159
Себестоимость, руб.	453913	148925	275367	115379
Сметная прибыль, руб.	62319	36510	63621	31693
Сметная стоимость, руб.	517627	189567	345222	148715
НДС, руб.	93172	34122	62140	26768
Итого с НДС, руб.	610800	223870	407362	175484
Сметная стоимость $1 \text{ м}^2$ , руб./ $\text{м}^2$	5803	2124	3869	1644
Сметная стоимость $1 \text{ м}^3$ , руб./ $\text{м}^3$	16499	5755	10939	3054
Экономические показатели строительства одноэтажного одноквартирного жилого дома общей площадью $70,6 \text{ м}^2$ (стены, фундамент и кровля)				
Прямые затраты, руб.,	692653,06	430781,28	507600,45	406248,32
в том числе:				
– основная зарплата	190658,18	149724,05	183841,98	141299,8
– эксплуатация машин и механизмов	26405,81	34245,04	37260,19	23848,77
– материалы	475589,07	246812,19	286498,28	241099,75
Накладные расходы, руб.	221044,46	161831,52	234365,04	174877,94
Себестоимость, руб.	913697,46	596612,8	741965,49	581126,26
Сметная прибыль, руб.	130821,38	105068,2	132179,82	100251,4
Сметная стоимость, руб.	1047576,13	704149,48	882714,34	685357,05
НДС, руб.	188563,7	126746,91	158888,58	123364,27
Итого с НДС, руб.	1236139,83	830896,38	1041606,92	808721,32
Сметная стоимость $1 \text{ м}^2$ общей площади дома (стены, фундамент и кровля), руб./ $\text{м}^2$	17509	11769	14754	11455

Общие выводы по результатам исследования:

1. Наиболее трудоемкой и дорогой в изготовлении из рассматриваемых вариантов является конструкция стены из бруса с наружным утеплением. С точки зрения эффективного

использования древесины необходимо более детальное исследование технологий возведения жилых зданий с использованием деревянных конструкций, например набирающих популярность деревянных каркасных домов.

2. Конструкции стен с использованием технологии ВЕЛОКС не могут рассматриваться как эффективные по технологическим и экономическим показателям при строительстве малоэтажных жилых зданий. Данная технология будет, на наш взгляд, более рациональной при возведении зданий средней этажности (от 3 до 5 этажей).
3. В качестве наиболее эффективных конструкций стен при возведении малоэтажных жилых зданий могут рассматриваться конструкции с применением мелкоформатных блоков из газобетона и древесно-цементного композитного материала. При этом для территории Республики Карелия блоки из газобетона являются привозным строительным материалом, в то время как блоки из древесно-цементного композита производятся местными компаниями.
4. Древесно-цементные композитные блоки более отвечают требованиям ресурсосбережения, так как при их производстве используются отходы деревообрабатывающей промышленности. Кроме того, по сравнению с блоками из легких бетонов, древесно-цементный композитный материал имеет лучшее соотношение прочности и жесткости, что позволяет отказаться от дополнительного армирования конструкции стены.
5. В качестве перспективного направления развития дальнейших исследований рассматривается более детальное сравнение вариантов конструкций стен малоэтажных зданий в основных группах: бревенчатые стены, брусчатые стены, деревянные каркасные стены, стены из легких блоков, кирпичные слоистые стены и монолитные стены с использованием систем несъемной опалубки с учетом возможности использования местных строительных материалов.

\* 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. Андреев А. А., Колесников Г. Н. Совершенствование технологии использования отходов лесопильных предприятий в производстве древесно-цементных материалов для малоэтажного строительства // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 68 (часть 6). С. 1139–1143.
2. Девятникова Л. А., Емельянова Е. Г. Пути повышения эффективности использования древесного сырья на целлюлозно-бумажных комбинатах // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки»*. 2012. № 8 (129). Т. 2. С. 65–68.
3. Девятникова Л. А., Симонова А. А. Поиск путей ресурсосбережения при проектировании индивидуального жилого дома с использованием системы Велокс (Velox) // *Деревянное малоэтажное домостроение: экономика, архитектура и ресурсосберегающие технологии: Сб. ст. научно-практ. конф.: г. Петрозаводск, 23–28 июня 2013 г.* Петрозаводск: Петропресс, 2013. С. 9–14.
4. Кузьменков А. А., Емельянова Е. Г. Тенденции развития жилищного строительства в Республике Карелия // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 8 (часть 1). С. 154–158.
5. Кузьменков А. А., Емельянова Е. Г., Александрова Т. О. Исследование предложения строительных компаний на рынке малоэтажного строительства Республики Карелия // *Ресурсосберегающие технологии, материалы и конструкции: Материалы научно-практ. конф.: г. Петрозаводск, 18 апреля 2014 г.* Петрозаводск: Петропресс, 2014. С. 81–87.
6. Титова С. А., Глущенко Н. В. Анализ энергоэффективности некоторых стеновых конструкций по их теплотехническим характеристикам // *Ресурсосберегающие технологии, материалы и конструкции: Материалы научно-практ. конф.: г. Петрозаводск, 18 апр. 2014 г.* Петрозаводск: Петропресс, 2014. С. 101–106.
7. Титова С. А., Кузьменков А. А. Измельченная древесина: опыт и перспективы применения (на примере Республики Карелия) // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 10 (часть 10). С. 2174–2177.
8. Черницова Т. В., Учинина Т. В. Анализ развития малоэтажного строительства в районах Пензенской области // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 1 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.science-education.ru/121-17173](http://www.science-education.ru/121-17173)

**Devyatnikova L. A.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

**Emel'yanova E. G.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

**Kuz'menkov A. A.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

**Simonova A. A.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

#### RESEARCH OF TECHNO-ECONOMICAL PARAMETERS FOR TECHNOLOGIES EMPLOYED IN ERECTION OF ENCLOSING STRUCTURES OF FREE-STANDING RESIDENTIAL BUILDINGS

The appraisal value of enclosing structures for free-standing residential buildings by means of different technical and economic indicators is considered in the article. The following wall constructions were chosen for the research: blocked walls with outdoor heat insulation, gas-concrete blocked walls with outdoor heat insulation, walls made with the use of sacrificial formwork system VELOX,



and blocked walls made with the use of wood-fiber composite material. According to the comparison results, the most practical and cost-efficient variants of the wall construction for free-standing residential buildings in the Republic of Karelia were identified.

Key words: low-height construction, engineering and economical comparison, wall enclosure structures, energy saving, resource conservation

#### REFERENCES

1. Andreev A. A., Kolesnikov G. N. Improvement technology of using sawdust in the manufacture of wood-cement materials for low-rise construction [Sovershenstvovanie tekhnologii ispol'zovaniya otkhodov lesopil'nykh predpriyatiy v proizvodstve drevesno-tsementnykh materialov dlya maloetazhnogo stroitel'stva]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2014. № 68 (part 6). P. 1139–1143.
2. Devyatnikova L. A., Emel'yanova E. G. Ways to improve effectiveness of wood resources' usage at pulp and paper mills [Puti povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya drevesnogo syr'ya na tsellyulozno-bumazhnykh kombinatakh]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences]. 2012. № 8 (129). Vol. 2. P. 65–68.
3. Devyatnikova L. A., Simonova A. A. Search of ways of resource-saving at the design of private houses with use of the system VELOX [Poisk putey resursoberezheniya pri proektirovanii individual'nogo zhilogo doma s ispol'zovaniem sistemy Veloks (Velox)]. *Derevyannoe maloetazhnoe domostroenie: ekonomika, arkhitektura i resursoberegayushchie tekhnologii: Sbornik statey nauchno-prakticheskoy konferentsii: g. Petrozavodsk, 23–28 iyunya 2013 g.* Petrozavodsk, Petropress Publ., 2013. P. 9–14.
4. Kuz'menkov A. A., Emel'yanova E. G. Housing trends in the Republic of Karelia [Tendentsii razvitiya zhilishchnogo stroitel'stva v Respublike Kareliya]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2013. № 8 (part 1). P. 154–158.
5. Kuz'menkov A. A., Emel'yanova E. G., Aleksandrova T. O. Research construction companies proposals in the market of low-rise building in Republic of Karelia [Issledovanie predlozheniya stroitel'nykh kompaniy na rynke maloetazhnogo stroitel'stva Respubliki Kareliya]. *Resursoberegayushchie tekhnologii, materialy i konstruksii: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii: g. Petrozavodsk, 18 aprelya 2014 g.* Petrozavodsk, Petropress Publ., 2014. P. 81–87.
6. Titova S. A., Glushchenko N. V. The analysis of energy efficiency of some wall designs on their thermal technical characteristics [Analiz energoeffektivnosti nekotorykh stenovykh konstruksiy po ikh teplotekhnicheskim kharakteristikam]. *Resursoberegayushchie tekhnologii, materialy i konstruksii: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii: g. Petrozavodsk, 18 apr. 2014 g.* Petrozavodsk, Petropress Publ., 2014. P. 101–106.
7. Titova S. A., Kuz'menkov A. A. Disintegrated wood: experience and prospects of application [Izmel'chennaya drevesina: opyt i perspektivy primeneniya (na primere Respubliki Kareliya)]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2013. № 10 (part 10). P. 2174–2177.
8. Chernitsova T. V., Uchinina T. V. Analysis of low-rise construction in the area of Penza region [Analiz razvitiya maloetazhnogo stroitel'stva v rayonakh Penzenskoy oblasti]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015. № 1. Available at: [www.science-education.ru/121-17173](http://www.science-education.ru/121-17173) (28.04.2015)

Поступила в редакцию 30.04.2015

**ИГОРЬ ГЕННАДЬЕВИЧ СКОБЦОВ**

кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных и технологических машин и оборудования Института лесных, инженерных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*iskobtsov@mail.ru*

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ROPS ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН С ПОЗИЦИЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ\*

Работа посвящена оценке показателей надежности лесных машин с применением методов линейной механики разрушения. Во введении представлены основные уравнения силового подхода механики разрушения, связывающие коэффициент интенсивности напряжений с длиной трещиноподобного дефекта. Вторая часть статьи посвящена получению аналитических зависимостей для оценки вероятности безотказной работы в предположении, что вязкость разрушения и коэффициент интенсивности напряжений являются случайными величинами, распределенными по нормальному закону. Для определения параметров распределения случайных величин (математических ожиданий и дисперсий) использован метод статистической линеаризации. В заключительной части приведена оценка вероятности безотказной работы на примере ROPS (устройства защиты оператора при опрокидывании) гусеничного трелевочного трактора. Интенсивность напряжений в конструкции определена с применением метода конечных элементов. Проведены расчеты для различных типов трещин: граничной краевой, сквозной и полуэллиптической. Показано, что наличие трещиноподобных дефектов, даже при небольших длинах, снижает вероятность безотказной работы.

Ключевые слова: механика разрушения, коэффициент интенсивности напряжений, показатели надежности, проектирование, устройство защиты при опрокидывании

### ВВЕДЕНИЕ

Для лесной техники, работающей в условиях сильнопересеченной местности, характерны такие аварийные ситуации, как опрокидывание машин или падение на них тяжелых предметов. Действующие нормативно-технические документы, регламентирующие требования к безопасности операторов лесных машин, предписывают оснащать кабины устройствами защиты при опрокидывании (ROPS – Roll-over protective structures) для снижения риска травмирования в случае возникновения аварийной ситуации. Так, стандартом ИСО 8082 допускается проведение статических лабораторных испытаний ROPS при боковом, вертикальном и продольном нагружении, при этом одним из главных требований является неразрушение конструкции ROPS при испытаниях.

Методам оценки показателей безотказности с позиций механики разрушения посвящены работы В. В. Болотина [1], А. В. Питухина [3], [4] и ряда других авторов. В работе [4] отмечается, что материалы реальных конструкций еще до начала эксплуатации имеют несовершенства в виде несплошностей, инородных неметаллических включений, раковин, газовых пор, дефектов сварки и механической обработки. Трещины могут развиваться в зонах действия наибольших механических напряжений, инициируясь на дефектах различного рода, которые можно рассматривать

как элементы начала разрушения (первоначальные трещины малого размера). В то же время одним из важнейших показателей безотказности является вероятность безотказной работы  $R$ , при решении задач оптимизации он зачастую входит в целевую функцию [8], [9], [10], поэтому представляется целесообразной разработка метода оценки вероятности безотказной работы конструкции ROPS в зависимости от длины и вида трещины.

В механике разрушения в зависимости от степени пластической деформации различают хрупкий, квазихрупкий и вязкий механизмы разрушения в условиях однократного воздействия постоянно возрастающей нагрузки. В работе А. Гриффитса представлен энергетический подход для описания механизма хрупкого разрушения при наличии трещины. Последующие исследования Дж. Ирвина привели к созданию концепции квазихрупкого разрушения и силового подхода, получившего наиболее широкое распространение в инженерных приложениях и связанного с использованием такого критерия, как коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$ . Согласно Дж. Ирвину, трещина начнет распространяться, если значение коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  достигнет критического значения  $K_{IC}$ :

$$K_I = K_{IC}.$$

Критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_{IC}$  считается постоянной величиной для данного материала, его значения приведены в литературе [5] для различных материалов.

Коэффициент интенсивности напряжений определяется по формуле

$$K_I = Y_I(l) \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot l}, \quad (1)$$

где  $Y_I(l)$  – коэффициент, учитывающий длину трещины и геометрическую форму детали;  $\sigma$  – нормальное напряжение, растягивающее трещину;  $l$  – длина (полудлина) трещины.

### ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ

Оценим вероятность безотказной работы в предположении, что плотность распределения вязкости разрушения материала элемента ROPS  $f_1(K_{IC})$  и коэффициента интенсивности напряжений  $f_2(K_I)$  известны и статистически независимы. В данном случае вероятность безотказной работы можно выразить как вероятность того, что коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$  не превысит вязкости разрушения  $K_{IC}$

$$R = \Pr\{K_{IC} \geq K_I\} = \Pr\{K_{IC} - K_I \geq 0\}.$$

Вероятность того, что коэффициент интенсивности напряжений находится в интервале

$$\Pr\left(K_I^0 - \frac{dK_I}{2} \leq K_I \leq K_I^0 + \frac{dK_I}{2}\right) = f_2(K_I^0) dK_I.$$

Вероятность того, что вязкость разрушения  $K_{IC}$  превысит некоторое значение коэффициента интенсивности напряжений  $K_I^0$

$$\Pr\{K_{IC} \geq K_I^0\} = \int_{K_I^0}^{\infty} f_1(K_{IC}) dK_{IC}.$$

Вероятность того, что значение коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  заключено в малом интервале  $dK_I$ , а вязкость разрушения  $K_{IC}$  превышает коэффициент интенсивности напряжений, задаваемый этим интервалом, имеет вид

$$f_2(K_I^0) dK_I \int_{K_I^0}^{\infty} f_1(K_{IC}) dK_{IC}.$$

Вероятность безотказной работы есть вероятность того, что вязкость разрушения  $K_{IC}$  превысит коэффициент  $K_I$  для всех его возможных значений

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(K_I) \left[ \int_{K_I}^{\infty} f_1(K_{IC}) dK_{IC} \right] dK_I.$$

Зависимость для оценки вероятности безотказной работы при однократном нагружении можно получить путем интегрирования по  $K_{IC}$ :

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(K_{IC}) \left[ \int_{-\infty}^{K_{IC}} f_2(K_I) dK_I \right] dK_{IC}.$$

Принимая во внимание, что вязкость разрушения – положительная величина, а разрушение по  $l$  типу раскрытия трещины на практике происходит при больших положительных напряжениях, в двух последних полученных формулах в нижних пределах интегрирования можно вместо « $-\infty$ » указать «0».

Получим зависимость для оценки вероятности отказа  $Q$  исходя из соображения, что возникновение отказа и его отсутствие образуют полную группу событий, то есть  $R + Q = 1$ .

Исходя из свойств плотности распределения можно записать

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_1(K_{IC}) dK_{IC} = \int_{-\infty}^{K_I} f_1(K_{IC}) dK_{IC} + \int_{K_I}^{\infty} f_1(K_{IC}) dK_{IC} = 1.$$

Следовательно,

$$\int_{K_I}^{\infty} f_1(K_{IC}) dK_{IC} = 1 - F_1(K_I),$$

где  $F_1(K_I)$  – функция распределения вязкости разрушения.

Подставим полученное выражение в формулу для вероятности безотказной работы

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(K_I) [1 - F_1(K_I)] dK_I = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f_2(K_I) F_1(K_I) dK_I,$$

и, таким образом, вероятность отказа

$$Q = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(K_I) F_1(K_I) dK_I.$$

Формулу для оценки вероятности безотказной работы можно выразить через функцию распределения коэффициента интенсивности напряжений

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(K_{IC}) F_2(K_{IC}) dK_{IC}.$$

Если величины  $K_I$  и  $K_{IC}$  распределены по нормальному закону с математическими ожиданиями  $\bar{K}_I$ ,  $\bar{K}_{IC}$  и дисперсиями  $\sigma_{K_I}^2$ ,  $\sigma_{K_{IC}}^2$ , то их плотности распределений

$$f_1(K_{IC}) = \frac{1}{\sigma_{K_{IC}} \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[ -\frac{(K_{IC} - \bar{K}_{IC})^2}{2\sigma_{K_{IC}}^2} \right],$$

$$f_2(K_I) = \frac{1}{\sigma_{K_I} \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[ -\frac{(K_I - \bar{K}_I)^2}{2\sigma_{K_I}^2} \right].$$

Введем случайную величину  $Y = K_{IC} - K_I$ . Она также будет распределена по нормальному закону с математическим ожиданием

$$\bar{y} = \bar{K}_{IC} - \bar{K}_I$$

и дисперсией

$$\sigma_y^2 = \sigma_{K_{IC}}^2 + \sigma_{K_I}^2.$$

Запишем функцию распределения случайной величины  $Y$ , используя нормированную функцию нормального распределения [2]

$$F(y) = \Phi^* \left( \frac{y - \bar{y}}{\sigma_y} \right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{y-\bar{y}}{\sigma_y}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

Тогда вероятность безотказной работы с учетом нормального закона распределения случайной величины  $Y$

$$R = \Pr\{y \geq 0\} = 1 - F(0) = 1 - \Phi^* \left( -\frac{\bar{y}}{\sigma_y} \right) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\bar{y}}{\sigma_y}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{\bar{y}}{\sigma_y}}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

Обозначим

$$z = -\frac{\bar{y}}{\sigma_y} = -\frac{\bar{K}_{IC} - \bar{K}_I}{\sqrt{\sigma_{K_{IC}}^2 + \sigma_{K_I}^2}} \quad (2)$$

и получим выражение для вероятности безотказной работы

$$R = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (3)$$

Поскольку нормальная функция распределения  $F(y)$  выражается через функцию Лапласа

$$F(y) = 0,5 + \Phi \left( \frac{y - \bar{y}}{\sigma_y} \right) = 0,5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{y-\bar{y}}{\sigma_y}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt,$$

вероятность безотказной работы можно представить в следующем виде

$$R = 0,5 - \Phi(z), \\ F(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

Таким образом, для оценки вероятности безотказной работы при нормальном распределении величин  $K_I$  и  $K_{IC}$  необходимо знать их математические ожидания  $\bar{K}_I$ ,  $\bar{K}_{IC}$  и дисперсии  $\sigma_{K_I}^2$ ,  $\sigma_{K_{IC}}^2$ . Для вязкости разрушения параметры  $\bar{K}_{IC}$  и  $\sigma_{K_{IC}}^2$  определяются экспериментальным путем, поскольку они являются характеристиками материала.

Найдем формулы для определения  $\bar{K}_I$  и  $\sigma_{K_I}^2$  при условии, что известны математические ожидания и дисперсии действующих номинальных напряжений  $\sigma$  и длины трещины  $l$ :  $\bar{\sigma}$ ,  $\sigma_{\sigma}^2$ ,  $\bar{l}$ ,  $\sigma_l^2$ .

На основании выражения (1) и с использованием метода статистической линеаризации получим

$$\bar{K}_I = Y_I \bar{\sigma} \sqrt{\pi \cdot \bar{l}}, \quad (4)$$

$$\sigma_{K_I}^2 = \left( Y_I \sqrt{\pi \cdot \bar{l}} \right)^2 \sigma_{\sigma}^2 + \left( Y_I \bar{\sigma} \sqrt{\frac{\pi}{4\bar{l}}} \right)^2 \sigma_l^2. \quad (5)$$

В случае квазихрупкого разрушения в вершине трещины образуется пластическая область, размеры ее можно оценить поправкой Ирвина:

$$r_p = \frac{1}{6\pi} \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_T} \right)^2 \quad \text{— для плоской деформации;}$$

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_T} \right)^2 \quad \text{— для плоского напряженного состояния.}$$

Таким образом, при определении  $K_I$  следует использовать «условную» длину трещины, увеличивая начальную длину на величину  $r_p$ , то есть  $l + r_p$ . Поскольку длина трещины значительно превышает величину поправки  $r_p$ , можно принять допущение о ее детерминированности. Тогда математическое ожидание длины трещины определится суммой  $\bar{l} + r_p$ , а ее дисперсия не изменится.

#### ПРИМЕР ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ

В качестве примера приведем расчет нагружения устройства защиты оператора гусеничного трелевочного трактора «Онежец 300» боковой силой  $F = 70$  кН (согласно требованиям ИСО 8082). Поскольку ИСО 8082 допускает при испытаниях использование распределителей боковой нагрузки, имеющих длину до 80 % горизонтального расстояния между передней и задней стойками ROPS, можно сделать допущение о плоском напряженном состоянии конструкции. Рассмотрим три варианта возникновения трещин следующих типов: сквозной, полуэллиптической и граничной краевой. Схема образования трещин представлена на рис. 1.

Материал ROPS – сталь 15ХСНД с пределом прочности  $\sigma_B = 800$  МПа, пределом текучести  $\sigma_T = 380$  МПа и критическим коэффициентом интенсивности напряжений  $K_{IC} = 44,6$  МПа $\cdot\sqrt{м}$  [5]. Моделирование напряженно-деформированного состояния ROPS «Онежец 300» было проведено автором в работе [7]. С использованием метода конечных элементов и программы «Зенит» оценена интенсивность механических напряжений. Поскольку зонами максимальных напряжений  $\sigma_1^{\max} = 715$  МПа являются зоны задних опор для установки ROPS на раме трактора [7], оценку вероятности безотказной работы проведем при допущении о возможном месте локализации трещин в зоне максимальных напряжений (рис. 2).

Величина коэффициента  $K_I$  вычислялась по формуле (1) при следующих функциях  $Y_I(l)$  [5]:

- для граничной краевой трещины –  $Y_I(l) = 1,1215$ ;
- для сквозной трещины –  $Y_I(l) = 1,0$ ;
- для полуэллиптической трещины –

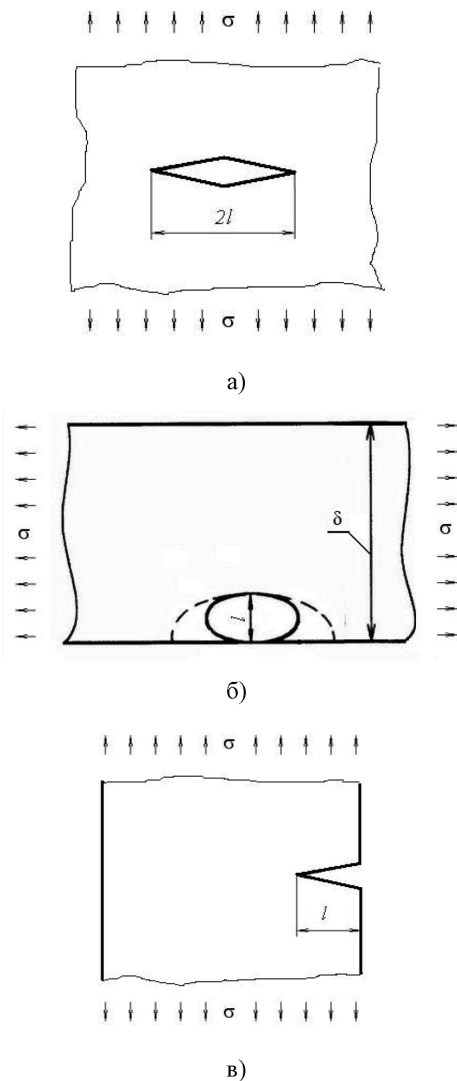


Рис. 1. Схемы образования трещин: а) сквозной; б) полуэллиптической; в) краевой

$$Y_l(l) = \frac{0,8}{1 - 0,5 \frac{l}{\delta}}$$

где  $\delta$  – толщина стенки профильной трубы,  $\delta = 8$  мм.

Таким образом, исходные данные для расчета по формулам (2)–(5):

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= 715 \text{ МПа}; \bar{K}_{IC} = 44,6 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}; \bar{l} = l \\ \sigma_{\sigma} &= 0,1 \bar{\sigma}; \sigma_{K_{IC}} = 0,1 \bar{K}_{IC}; \sigma_l = 0,1 \bar{l}. \end{aligned} \quad [6]$$

Результаты расчета вероятности безотказной работы устройства защиты оператора в зависимости от длины и вида трещины представлены на графике (рис. 3).

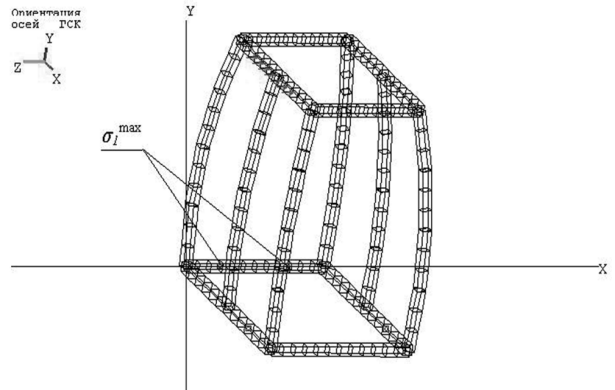


Рис. 2. Конечно-элементная модель ROPS «Онежец 300»

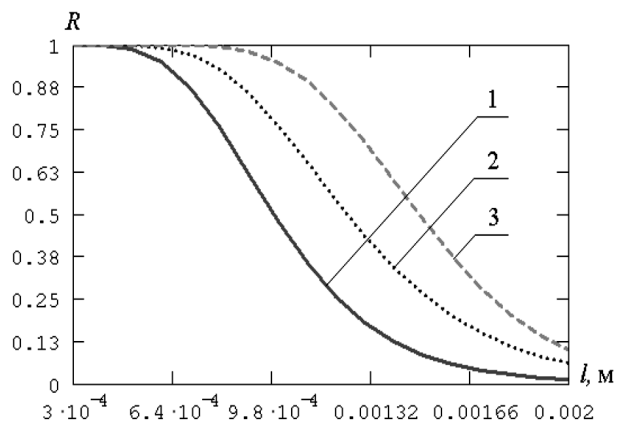


Рис. 3. График зависимости вероятности безотказной работы ROPS от длины и вида трещины: 1 – краевая; 2 – сквозная; 3 – полуэллиптическая

### ВЫВОДЫ

Технологические дефекты в виде несплошностей, раковин, неметаллических включений, риск от механической обработки и т. п., присутствующих в реальных материалах еще до начала эксплуатации, влияют на прочность конструкций и могут рассматриваться как элементы начала разрушения. Методика, представленная в данной работе, позволяет проводить оценку вероятности безотказной работы при однократном нагружении ROPS лесозаготовительной машины. Расчет проведен на примере ROPS гусеничного трелевочного трактора «Онежец 300» для варианта возможной локализации в зоне максимальных напряжений трещин следующих видов: сквозной, граничной краевой, полуэллиптической. Как следует из результатов расчета, наличие дефектов в виде трещин, даже небольшой величины, существенно снижает вероятность безотказной работы.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Книга по требованию, 2013. 312 с.
2. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2003. 479 с.
3. Питухин А. В. Оценка периода зарождения усталостной трещины от риска после механической обработки // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2008. № 1 (90). С. 111–113.
4. Питухин А. В., Скобцов И. Г., Хвоин Д. А. Оценка вероятности безотказной работы элементов конструкций с трещиноподобными дефектами // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2009. № 9 (103). С. 85–87.
5. Саврук М. П. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами: Справ. пособие: В 4 т. Т. 2: Механика разрушения и прочность материалов / Под общ. ред. В. В. Панасюка. Киев: Наукова думка, 1988. 620 с.
6. Серенсен С. В., Кобаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. М.: Машиностроение, 1975. 480 с.
7. Скобцов И. Г. Оценка несущей способности устройства защиты оператора лесопромышленного трактора с позиций механики разрушения // Инженерный вестник Дона. 2015. № 2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2915.
8. Pitukhin A. V. Fracture Mechanics and Optimal Design // Int. Journal for Numerical Methods in Engineering. 1992. Vol. 34, № 3. P. 933–940.
9. Pitukhin A. V. Optimal Design Problems Using Fracture Mechanics Methods // Computers and Structures. 1997. Vol. 65, № 4. P. 621–624.
10. Pitukhin A. V., Skobtsov I. G. The Statement of Optimal Design Problem with the Cusp Catastrophe Theory Application // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 709. P. 530–533.

**Skobtsov I. G.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

### ESTIMATION OF FOREST MACHINE ROPS RELIABILITY IN TERMS OF FRACTURE MECHANICS

This paper deals with the estimation of reliability measures in terms of fracture mechanics. The main fracture mechanics expressions linking stress intensity factor with the length of the crack like defect are presented in the introduction. Analytical equations evaluating the reliability function are obtained. The fracture toughness and the stress intensity factor are viewed as Gaussian random values in the second part of the paper. The statistical linearization method is used to determine distribution parameters (mean value, dispersion). The tracked skidder ROPS (roll-over protective structure) is used as an example of reliability function evaluation and is described in the last part of the paper. The stress intensity was estimated by the finite element method. Calculations are done for different types of cracks: through wall, edge and semi elliptic. It is shown that the presence of crack like defects, even of small length, reduces the level of reliability.

Key words: fracture mechanics, stress intensity factor, reliability measures, designing, roll-over protective structure (ROPS)

## REFERENCES

1. Bolotin V. V. *Prognozirovanie resursa mashin i konstruksiy* [Prediction of Machine and Construction Useful Life Span]. Moscow, Kniga po trebovaniyu Publ., 2013. 312 p.
2. Gmurman V. E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Theory of Probability and Mathematical Statistics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003. 479 p.
3. Pitukhin A. V. The Fatigue Crack Initiation Period Estimation Depending on the Mechanical Treatment Roughness [Otsenka perioda zarozhdeniya ustalostnoy treshchiny ot risok posle mekhanicheskoy obrabotki]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskije nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2008. № 1 (90). P. 111–113.
4. Pitukhin A. V., Skobtsov I. G., Khvoyn D. A. Survival function estimation of mechanical elements with crack like defects [Otsenka veroyatnosti bezotkaznoy raboty elementov konstruksiy s treshchinopodobnymi defektami]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskije nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2009. № 9 (103). P. 85–87.
5. Savruk M. P. *Koeffitsienty intensivnosti napryazheniy v telakh s treshchinami. Tom 2: Mekhanika razrusheniya i prochnost' materialov* [Stress Intensity Factors in Solids with Cracks. Vol. 2: Fracture Mechanics and Strength of Materials]: Resource book in 4 vol. / By V. V. Panasyuk edition. Kiev, Naukova dumka Publ., 1988. 620 p.
6. Serensen S. V., Kogaev V. P., Shneyderovich R. M. *Nesushchaya sposobnost' i rascheti detaley mashin na prochnost'* [Load-carrying Capacity and Machine Element Strength Analysis]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 480 p.
7. Skobtsov I. G. The estimation of load-carrying capacity of forest machine roll-over protective structure from the point of fracture mechanics [Otsenka nesushchey sposobnosti ustroystva zashchity operatora lesopromyshlennogo traktora s pozitsiy mekhaniki razrusheniya]. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2015. № 2. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2915.
8. Pitukhin A. V. Fracture Mechanics and Optimal Design // Int. Journal for Numerical Methods in Engineering. 1992. Vol. 34, № 3. P. 933–940.
9. Pitukhin A. V. Optimal Design Problems Using Fracture Mechanics Methods // Computers and Structures. 1997. Vol. 65, № 4. P. 621–624.
10. Pitukhin A. V., Skobtsov I. G. The Statement of Optimal Design Problem with the Cusp Catastrophe Theory Application // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 709. P. 530–533.

*Поступила в редакцию 06.05.2015*

**ЕЛЕНА ИГОРЕВНА РАТЬКОВА**

кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры, строительных конструкций и геотехники Института лесных, инженерных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*ratjkova@mail.ru*

**ВАСИЛИЙ КУЗЬМИЧ КАТАРОВ**

кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного транспорта Института лесных, инженерных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*vkatarov@psu.karelia.ru*

**НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА КОВАЛЕВА**

преподаватель кафедры промышленного транспорта Института лесных, инженерных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*natalya.kowalyowa2010@yandex.ru*

## УПЛОТНЕНИЕ ОСНОВАНИЙ ЛЕСНЫХ ДОРОГ НА ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ В МЕЖСЕЗОННЫЕ ПЕРИОДЫ\*

Рассмотрено влияние цикла «замораживание – оттаивание» в межсезонные периоды на модуль деформации и коэффициент пористости лесных глинистых почвогрунтов, используемых при возведении оснований лесных дорог. В лабораторных условиях подтверждено, что цикл «замораживание – оттаивание» является причиной уменьшения модуля деформации. Практическое значение полученных результатов определяется возможностью их использования для создания моделей, описывающих процессы уплотнения оснований лесных дорог.

Ключевые слова: почвогрунты, модуль деформации, межсезонные периоды, глины

### ВВЕДЕНИЕ

Лесные дороги обеспечивают круглогодичную вывозку лесоматериалов и доставку их потребителям. Они должны обладать высокими технико-экономическими качествами для выполнения требований ритмичности, экономичности и экологичности вывозки. Лесовозные автомобильные дороги являются капиталоемкими сооружениями. В связи с этим возникает задача нахождения оптимального метода строительства, который позволил бы снизить финансовые расходы и трудозатраты, а также повысить прочность и долговечность конструкции дорог [4], [5].

Одним из таких методов является технология возведения лесных дорог путем перемещения грунта из придорожных канав и резервов. Основным строительным материалом в этом случае является местный почвогрунт, перемещаемый экскаватором в тело земляного полотна из боковых канав, выполняющих роль притрассовых резервов.

При строительстве лесной дороги по указанной выше технологии возникает необходимость оценки плотности получаемого дорожного основания.

На значительной территории Северо-Западного федерального округа залегают глинистые почвогрунты. Поскольку строительство дорог ведется практически круглогодично, за исключени-

ем зимнего периода, то возникает необходимость оценки уплотнения грунта в периоды перепадов температур от положительных до отрицательных и наоборот.

В статьях [2] и [3] было показано, что многократные циклы «замораживание – оттаивание» почвогрунтов влияют на их физико-механические характеристики, в частности плотность, коэффициент сжимаемости и модуль деформации. В указанных работах приведены результаты испытаний суглинка в текучепластичном состоянии. Однако исследования глин не проводились.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования были отобраны текучепластичные глины, залегающие на лесной территории опытного участка учебно-научно-исследовательского комплекса «Лесная дорога» инновационно-технологического кампуса ПетрГУ [1].

Образцы почвогрунтов для испытаний были изготовлены с учетом требований ГОСТ 30416-2012 «Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения», а их отбор, упаковка, транспортирование, хранение и подготовка в соответствии с требованиями ГОСТ 12071-2000 «Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов».

Испытания проводились в лаборатории испытаний конструкций и сооружений Института лесных, инженерных и строительных наук ПетрГУ.

Для испытания почвогрунта было подготовлено 15 монолитов, которые были разбиты случайным образом на 5 групп:

- три монолита использовались для определения физических характеристик почвогрунта: плотности, влажности, коэффициента пористости, плотности скелета грунта, пористости;
- три монолита испытывались без замораживания;
- три монолита испытывались после одного цикла «замораживание – оттаивание»;
- три монолита испытывались после двух циклов «замораживание – оттаивание»;
- три монолита испытывались после трех циклов «замораживание – оттаивание».

Замораживание образцов осуществлялось в морозильной камере при температуре  $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 12 часов, оттаивание – в отопляемом помещении при температуре  $+21\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 9 часов перед испытанием и в течение 12 часов перед следующим замораживанием.

Все эксперименты выполнялись на стандартном лабораторном оборудовании по методике, стандартной для механики грунтов.

Особенность использованной методики заключается в следующем:

- одна часть образцов испытывалась до замораживания, а другая часть таких же образцов того же грунта испытывалась после одного, двух и трех циклов «замораживание – оттаивание»;
- нагружение проводилось ступенями по 0,05 МПа на первых двух ступенях и 0,1 МПа на третьей ступени с выдержкой по 5 минут.

За результат испытаний принималось среднее арифметическое значение параллельных определений соответствующего метода.

Методика определения физико-механических показателей почвогрунта приведена в работе [2].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Результаты определения физических характеристик почвогрунта приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Результаты определения физических характеристик

Физическая характеристика	Единица измерения	Значение
Плотность, $\rho$	г/см <sup>3</sup>	1,91
Влажность, $W$	%	29,7
Число пластичности, $I_p$	%	19
Показатель текучести, $I_L$	д. е.	0,87
Плотность скелета, $\rho_d$	г/см <sup>3</sup>	1,47
Коэффициент пористости, $e$	д. е.	0,86
Пористость, $n$	д. е.	0,46

По результатам испытаний по ГОСТ 25100-2012 «Грунты. Классификация» установлен вид и состояние почвогрунта – глина текучепластичная.

Результаты определения физико-механических характеристик почвогрунта после испытания приведены в табл. 2.

Таблица 2  
Средние значения физико-механических характеристик почвогрунта до замораживания и после оттаивания

Состояние	Коэффициент пористости $e$ , д. е.	Модуль деформации $E$ , МПа
До испытания	0,86	
Без замораживания	0,72	4,215
1-й цикл замораживания	0,661	3,518
2-й цикл замораживания	0,679	3,409
3-й цикл замораживания	0,601	3,211

Результаты испытаний (табл. 2) показали, что при многократных процессах замораживания и оттаивания после каждого цикла «замораживание – оттаивание» модуль деформации глины уменьшается. Наиболее интенсивные изменения происходят в первом цикле. В следующих циклах уменьшение модуля деформации суглинка замедляется.

Изменение физико-механических характеристик почвогрунта при многократных циклах «замораживание – оттаивание» представлено в табл. 3.

Таблица 3  
Изменение физико-механических характеристик почвогрунта при многократных циклах «замораживание – оттаивание»

Состояние	Коэффициент пористости $e$ , д. е.	Модуль деформации $E$ , МПа
Без замораживания	0,722 (100 %)	4,215 (100 %)
1-й цикл	-9,418 %	-18,956 %
2-й цикл	-13,435 %	-20,403 %
3-й цикл	-16,066 %	-26,88 %

## ВЫВОДЫ

Установлено, что при повторяющихся процессах замораживания и оттаивания после каждого цикла «замораживание – оттаивание» коэффициент пористости и модуль деформации глины уменьшаются. Наиболее интенсивные изменения происходят в первом цикле. В следующих циклах это уменьшение замедляется.

Экспериментально установлено, что модуль деформации глины после первого цикла «замораживание – оттаивание» уменьшается на 19 %, после второго и третьего – на 20,4 % и 27 % соответственно по отношению к значению модуля деформации в начальном состоянии до замораживания. Коэффициент пористости уменьшается



на 9,4 % после первого цикла «замораживание – оттаивание», на 13,4 % после второго цикла и на 15 % после третьего. Уменьшение коэффициента пористости и модуля деформации при многократном замораживании и оттаивании суглинка объ-

ясняется изменением структуры почвогрунта под влиянием циклов «замораживание – оттаивание».

Результаты исследований могут быть использованы для создания моделей, описывающих процессы уплотнения оснований лесных дорог.

\* 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. Катаров К. В., Ковалева Н. В., Кочанов А. Н., Марков В. И., Петров А. Н., Ратькова Е. И., Рожин Д. В., Степанов А. В., Соколов А. П., Сюнёв В. С. Проектирование, строительство, содержание и ремонт лесных дорог: Учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2014. 92 с.
2. Ратькова Е. И., Сюнёв В. С., Катаров В. К. Влияние цикла «замораживание – оттаивание» на модуль деформации и коэффициент сжимаемости суглинков // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2013. № 4 (133). С. 75–78.
3. Ратькова Е. И., Сюнёв В. С., Катаров В. К. Воздействие циклов «замораживание – оттаивание» на деформационные свойства лесных почво-грунтов Карелии // Resources and Technology. 2013. Т. 10. № 1. С. 73–89.
4. Aura E. Soil compaction by the tractor in spring and its effect on soil porosity // Journal of the scientific agricultural society of Finland. 1983. Vol. 55. P. 91–107.
5. Karjalainen T., Leinonen T., Gerasimov Y. Intensification of forest management and improvement of wood harvesting in Northwest Russia – Final report of the research project. Metlan työraport / Husso M. & Karvinen S. (eds.) // Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 110. Joensuu: Metla, 2009. 151 p.

**Rat'kova E. I.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian, Russian Federation)

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

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

#### GROUNDWORK BASE CONSOLIDATION OF FOREST ROADS BUILT ON CLAY SOILS DURING INTERSEASONAL PERIODS

The influence of the “freezing-thawing” cycle on the module of deformation and porosity coefficient of the forest clay soils used in construction of forest roads foundations during interseasonal periods is considered. Experiments conducted in laboratory settings have confirmed that the “freezing-thawing” cycle causes reduction of the deformation module. The practical value of the obtained experimental results is defined by the possibility of their usage in developing models describing the process of forest roads' groundwork base consolidation.

Key words: wood soils, module of deformation, off-season periods, clay

#### REFERENCES

1. Katarov K. V., Kovaleva N. V., Kochanov A. N., Markov V. I., Petrov A. N., Rat'kova E. I., Rozhin D. V., Stepanov A. V., Sokolov A. P., Syunev V. S. *Proektirovanie, stroitel'stvo, sodержanie i remont lesnykh dorog* [Design, construction, maintenance, and reconditioning of forest roads]. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2014. 92 p.
2. Rat'kova E. I., Syunev V. S., Katarov V. K. Effect of “freezing and defrosting” on deformation module and coefficient of clay loam reduction [Vliyaniye tsikla “zamorazhivaniye – ottaivaniye” na modul' deformatsii i koeffitsient szhimaemosti suglinkov]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. “Estestvennyye i tekhnicheskkiye nauki”* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2013. № 4 (133). P. 75–78.
3. Rat'kova E. I., Syunev V. S., Katarov V. K. Effect of cycles “freeze – thaw” by the deformation properties of Karelian forest soils and subsoils [Vozdeystvie tsiklov “zamorazhivaniye – ottaivaniye” na deformatsionnyye svoystva lesnykh pochvo-gruntov Karelii]. *Resources and Technology*. 2013. Vol. 10. № 1. P. 73–89.
4. Aura E. Soil compaction by the tractor in spring and its effect on soil porosity // Journal of the scientific agricultural society of Finland. 1983. Vol. 55. P. 91–107.
5. Karjalainen T., Leinonen T., Gerasimov Y. Intensification of forest management and improvement of wood harvesting in Northwest Russia – Final report of the research project. Metlan työraport / Husso M. & Karvinen S. (eds.) // Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 110. Joensuu: Metla, 2009. 151 p.

Поступила в редакцию 04.05.2015

УДК 547.979.733+547.233+541.124+541.121:536.7

**ВЛАДИМИР ПЕТРОВИЧ АНДРЕЕВ**

доктор химических наук, профессор кафедры молекулярной биологии, биологической и органической химии эколого-биологического факультета, заведующий лабораторией биологически активных природных и синтетических органических соединений Института высоких биомедицинских технологий, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
andreev@psu.karelia.ru

**ПАВЕЛ СЕРГЕЕВИЧ СОБОЛЕВ**

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

**НАТАЛЬЯ ИЛЬИНИЧНА МУХИНА**

студент 3-го курса эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
andreev@psu.karelia.ru

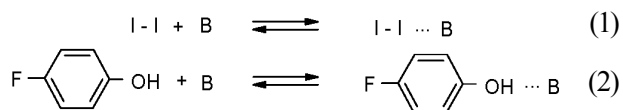
### СРАВНЕНИЕ НУКЛЕОФИЛЬНОСТИ *n*-ДОНОРНЫХ ЛИГАНДОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С Zn-ТФП, SbCl<sub>5</sub>, BF<sub>3</sub> И ЙОДОМ В АПРОТОННЫХ РАСТВОРИТЕЛЯХ\*

Рассмотрены корреляции основности/нуклеофильности *n*-донорных лигандов с использованием различных шкал (в качестве *v*-акцепторов использованы кислоты Льюиса: I<sub>2</sub>, SbCl<sub>5</sub>, BF<sub>3</sub>, Zn-ТФП и кислота Бренстеда – *p*-фторфенол). Показано, что в этом ряду донорные числа Гутмана (DN) обладают наиболее слабой предсказательной способностью нуклеофильности соединений. Другие шкалы хорошо коррелируют друг с другом, причем стерические факторы наименее существенны при координации с йодом и *p*-фторфенолом. По-видимому, на настоящий момент наиболее удобной является шкала основности/нуклеофильности *n*-донорных лигандов, использующая координацию Zn-ТФП с соединениями в хлороформе. Данная модельная система позволяет достаточно быстро определять кинетические (*K*,  $\Delta\lambda$ ) и термодинамические параметры ( $\Delta H^0$ ,  $\Delta S^0$  и  $\Delta G^0$ ) с помощью электронной спектроскопии, а также выделять молекулярные комплексы в кристаллическом состоянии для исследования методом рентгеноструктурного анализа.

Ключевые слова: координация, цинк-тетрафенилпорфирин, нуклеофильность, основность, электронная спектроскопия, йод, трифторид бора, пятихлористая сурьма

Ранее нами была предложена новая шкала нуклеофильности *n*-донорных лигандов, основывающаяся на константах устойчивости комплексов с Zn-ТФП в хлороформе при 25 °C [1]. Ввиду того что к настоящему времени накоплены кинетические и термодинамические данные для 190 лигандов [2], [3], [4], [5], в данной статье мы решили проверить, насколько успешно они коррелируют с соответствующими величинами, полученными для координации с молекулярным йодом [6], [7], [8], [9], SbCl<sub>5</sub> и BF<sub>3</sub>.

Использование понятия полосы переноса заряда (ППЗ) в электронных спектрах комплексов различных соединений с йодом позволило определить большое количество констант устойчивости в соответствии с уравнением (1), в котором I<sub>2</sub> является кислотой Льюиса, В – основанием Льюиса, ВI<sub>2</sub> – йодным комплексом, а величина *K<sub>c</sub>* – константой устойчивости комплекса (изменяется в пределах 10<sup>-1</sup>–10<sup>6</sup> л/моль).



К настоящему времени определены тысячи подобных констант в различных апротонных растворителях (например, алканы, CCl<sub>4</sub>, CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> или CHCl<sub>3</sub>) при различных температурах, которые довольно часто противоречат друг другу.

В работе [8] были выбраны наиболее надежные значения *K<sub>c</sub>*, измеренные в близких по природе растворителях при одной температуре, и введена «дийодная» шкала основности *pK<sub>B12</sub>* для 642 сильно различающихся по своей природе органических оснований. Значения *pK<sub>B12</sub>* были определены в соответствии с уравнением (3), в котором *K<sub>c</sub>* – это константа равновесия в уравнении (1) в алкane при 298 K.

$$pK_{B12} = \lg (K_c / 1 \text{ л}\cdot\text{моль}^{-1}). \quad (3)$$

Символ  $pK_{BI2}$  введен по аналогии со значением  $pK_{BH+}$ , используемым для шкалы основности по Бренстеду [11], и  $pK_{BHX}$  – шкалы основности по отношению к 4-фторфенолу (донор протона при образовании водородной связи с другими соединениями).

Ожидается, что наиболее сильные «дийодные», «протонные» и «4-фторфенольные» основания должны иметь наибольшие значения  $pK_{BI2}$ ,  $pK_{BH+}$  и  $pK_{BHX}$  соответственно. Однако перечисленные шкалы можно расширить, используя в качестве акцепторов другие кислоты Льюиса (например, галогенсодержащие соединения, способные к образованию галогенной связи) и Бренстеда – Лоури (источники протона).

Величины  $pK_{BI2}$  могут быть конвертированы в шкалу энергий Гиббса с помощью уравнения (4).

$$\Delta G^0 \text{ (КДж}\cdot\text{моль}^{-1}) = -RT \ln K_c = -5,708 \cdot pK_{BI2} \quad (4)$$

(при 298 К).

В шкале энергий Гиббса значения  $\Delta G^0$  между нейтральными донорами и акцепторами варьируют в довольно широком интервале (0–40 КДж/моль).

В работе [8] указывается, что между  $pK_{BI2}$  и  $pK_{BHX}$  (уравнения (1) и (2)) для нескольких сотен сильно различающихся по своей природе органических оснований чрезвычайно сложно выявить какие-то общие корреляции.

На наш взгляд, в первую очередь это обусловлено тем, что авторы математически пытаются сопоставить значения  $pK_{BI2}$  и  $pK_{BHX}$  чрезвычайно разнообразных по структуре соединений, используя минимальный набор параметров. Однако атомы йода (в молекуле йода) и водорода (в *p*-фторфеноле), за счет которых образуются молекулярные комплексы в этих двух шкалах, сильно отличаются по размерам, поляризуемости, электроотрицательности и другим физическим параметрам. В терминах шкалы Пирсона (ЖМКО) атом йода является мягким, а водород жестким центром, и прочность связей, образованных с их участием, должна сложным образом зависеть от жесткости/мягкости партнера.

Мы попытались сильно упростить этот подход и на основании данных работ [6], [7], [8], [9] построить корреляции для отдельных классов соединений, в которых существенны только изменения электронных эффектов. При этом предполагалось, что для соединений, не подчиняющихся линейной корреляции, можно будет обнаружить дополнительные эффекты, влияющие на процесс координации.

Как видно из рис. 1, для 3- и 4-замещенных пиридинов и анилинов выполняются линейные корреляции между  $\lg K_{Zn-ТФП}$  и  $pK_{BI2}$ , однако для 2-замещенных производных, вторичных и третичных анилинов это не так: точки для 2-хлор-, 2-бром-, 2-фторпиридинов (см. рис. 1а), а также *N*-метил- и *N,N*-диметиланилинов (см. рис. 1б)

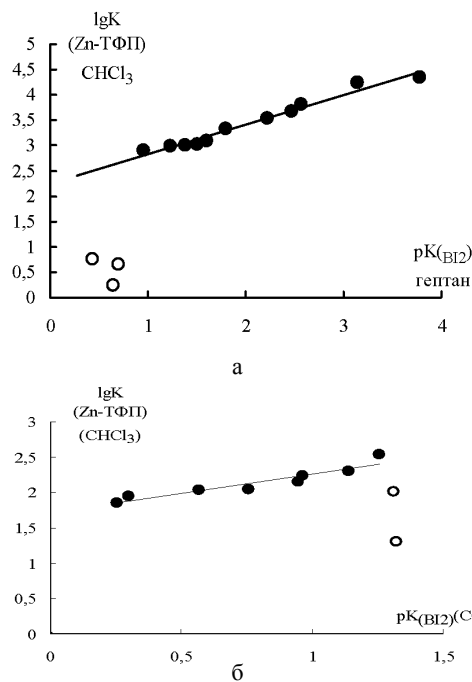


Рис. 1. Зависимость  $\lg K_{Zn-ТФП}$  от  $pK_{BI2}$  для процессов координации с (а) пиридинами ( $X = 4\text{-Me}_2\text{N}$ ,  $4\text{-NH}_2$ ,  $4\text{-Me}$ ,  $3\text{-Me}$ ,  $H$ ,  $4\text{-MeC=O}$ ,  $4\text{-COOEt}$ ,  $3\text{-F}$ ,  $3\text{-Br}$ ,  $3\text{-Cl}$ ,  $4\text{-CN}$ ;  $\lg K_{Zn-ТФП} = 0,59 \cdot pK_{BI2} + 2,25$ ;  $n 11$ ,  $r 0,99$ ; внизу точки для 2-хлор-, 2-бром-, 2-фторпиридинов) и (б) анилинами ( $X = 4\text{-MeO}$ ,  $3\text{-MeO}$ ,  $4\text{-Me}$ ,  $3\text{-Me}$ ,  $H$ ,  $4\text{-Br}$ ,  $3\text{-Br}$ ,  $3\text{-Cl}$ ;  $\lg K_{Zn-ТФП} = 0,55 \cdot pK_{BI2} + 1,72$ ;  $n 8$ ,  $r 0,94$ ; внизу точки для *N*-метил- и *N,N*-диметиланилина)

в силу влияния стерических факторов сильно отклоняются от прямых, выведенных для других производных.

Однако в случае корреляции  $pK_{BI2}$  от  $pK_{BHX}$  для координации с пиридинами наблюдаются несколько другие закономерности (рис. 2). Во-первых, точки для соединений, содержащих заместители во втором положении пиридинового кольца (2-амино-, 2-метил, 2-фтор, 2-хлор-, 2-бромпиридины и 2,2'-бипиридин), хорошо подчиняются линейному уравнению в отличие от зависимости  $\lg K_{Zn-ТФП} - pK_{BI2}$  (см. рис. 1а). По-видимому, это связано с тем, что атомы водо-

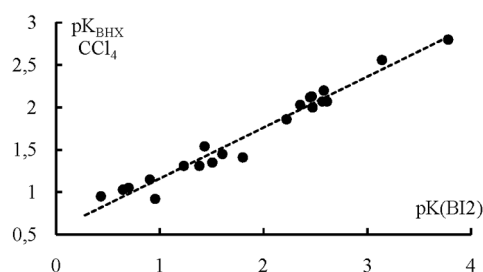


Рис. 2. Зависимость  $pK_{BHX}$  от  $pK_{BI2}$  (растворитель: гептан, циклогексан,  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  или  $\text{CCl}_4$ ) для процессов координации с пиридинами ( $X = 4\text{-Me}_2\text{N}$ ,  $4\text{-NH}_2$ ,  $4\text{-MeO}$ ,  $4\text{-Et}$ ,  $3\text{-NH}_2$ ,  $4\text{-Me}$ ,  $3\text{-Me}$ ,  $H$ ,  $2\text{-NH}_2$ ,  $2\text{-Me}$ ,  $4\text{-MeC=O}$ ,  $4\text{-Cl}$ ,  $4\text{-COOMe}$ ,  $3\text{-F}$ ,  $3\text{-Br}$ ,  $3\text{-Cl}$ ,  $3\text{-I}$ ,  $4\text{-CN}$ ,  $2\text{-F}$ ,  $2\text{-Cl}$ ,  $2\text{-Br}$ ; 2,2'-бипиридин),  $pK_{BHX} = 0,60 \cdot pK_{BI2} + 0,56$ ;  $r 0,98$   $n 22$

рода и йода более доступны для образования донорно-акцепторной связи в комплексе, чем атом цинка, находящийся в плоскости порфиринового кольца. Во-вторых, точки для 4-ацетил- и 4-цианопиридинов несколько сильнее отклоняются вниз от прямой, чем другие лиганды. Возможно, это связано с очень сильными акцепторными свойствами указанных заместителей в пиридиновом кольце. Известно, что заместители, обладающие сильным  $-M$  эффектом, не влияют на основность пиридинов по механизму сопряжения, характерному для этих групп, из-за чрезвычайно высокой электроакцепторности пиридинового атома азота. Вследствие этого такие заместители, как  $NO_2$  и  $CN$ , которые обычно являются акцепторами электронов, проявляют в этом случае донорные свойства по механизму сопряжения. Этим обусловлено то, что пиридины, содержащие указанные функциональные группы в четвертом положении ( $pK_a$  для 4-нитропиридина 1,39 и 4-цианопиридина 1,86), оказались более сильными основаниями [5], чем пиридины, содержащие эти же заместители в третьем положении ( $pK_a$  для 3-нитропиридина 1,18, для 3-цианопиридина 1,35).

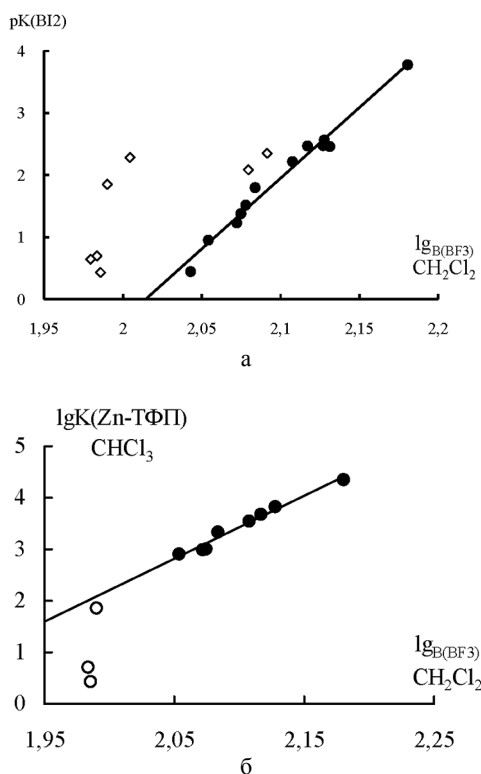


Рис. 3. Зависимость (а)  $pK_{BI2}$  (растворитель: гептан,  $CHCl_3$ ,  $CH_2Cl_2$  или  $CCl_4$ ) от  $pK_{B(BF_3)}$  ( $X = 4-Me_2N$ , 4-MeO, 4-трет-Бу, 4-Me, 3-Me, H, 4-MeC=O, 3-MeC=O, 3-Br, 3-Cl, 4-CN, 3-CN;  $pK_{BI2} = 22,7 \cdot pK_{B(BF_3)} - 45,9$ ;  $n = 12$ ,  $r = 0,99$ ; вверху точки для 2-хлор-, 2-бром-, 2-фтор-, 2-метил-, 2-этил-, 2,6-диметил- и 2,4,6-триметилпиридинов) и (б)  $lgK_{Zn-TФП}$  от  $pK_{B(BF_3)}$  координации с пиридинами ( $X = 4-Me_2N$ , 4-Me, 3-Me, H, 3-Br, 3-Cl, 4-MeC=O, 4-CN;  $lgK_{Zn-TФП} = 12,2 \cdot pK_{B(BF_3)} - 22,1$ ;  $n = 8$ ,  $r = 0,99$ ; внизу точки для 2-хлор-, 2-бром-, 2-фторпиридинов)

С целью проверить гипотезу о влиянии пространственной структуры акцептора на нуклеофильность/основность лиганда мы построили корреляции  $pK_{BI2} - pK_{BF_3}$  и  $lgK_{Zn-TФП} - pK_{BF_3}$  (рис. 3, данные для координации с йодом и трифторидом бора взяты из работы [7]). В данном случае величина  $K_{BF_3}$  (выражаемая в КДж/моль) характеризует сродство трифторида бора к основанию Льюиса в дихлорметане при  $25^\circ C$  при 1 атм.

Оказалось, что в обоих случаях поведение точек для 2-замещенных пиридинов не описывается линейным уравнением, причем на рис. 3а они находятся выше, а на рис. 3б – ниже прямой, по-видимому, указывая на то, что при координации с этими лигандами влияние стерических факторов при замене  $BF_3$  на йод уменьшается, а на  $Zn-TФП$  – возрастает. При этом в первом случае отклонение точек от прямой возрастает в ряду  $2-MePy$ ,  $2-EtPy < 2-FPy$ ,  $2-ClPy$ ,  $2-BrPy < 2,6-Me_2Py$ ,  $2,4,6-Me_3Py$ . Отчасти такой порядок можно объяснить тем, что накопление алкильных групп в положениях 2 и 6 затрудняет координацию по атому азота особенно сильно при образовании связи N-B. Правда, увеличение при этом  $+I$  эффекта должно стабилизировать комплексы с обоими акцепторами. В 2-галогенпиридинах при взаимодействии с йодом наряду с N-I не исключено одновременное образование «галогенных» связей, что в некоторой степени может дополнительно стабилизировать эти аддукты.

Для аммиака и первичных аминов, содержащих при атоме азота  $CH_2$  группу, также наблюдается линейная зависимость  $pK_{BI2}$  от  $lgK_{Zn-TФП}$ , но точки для лигандов с большими по объему алкильными группами (изо- и трет-бутиламин) лежат вне прямой (рис. 4).

Наконец, традиционно используемая шкала Гутмана (для оценки электронодонорной способности) 180 растворителей [10] характеризует их основность по Льюису или способность акцептировать атом водорода при образовании водород-

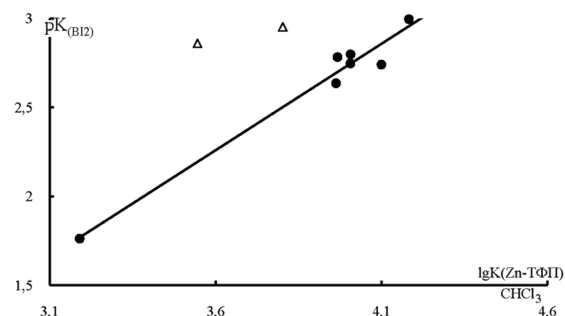


Рис. 4. Зависимость  $pK_{BI2}$  в гептане [7] от  $lgK_{Zn-TФП}$  в хлороформе ( $pK_{BI2} = 1,20 \cdot lgK_{Zn-TФП} - 2,05$ ;  $n = 7$ ,  $r = 0,985$ ; прямая построена по точкам для аммиака, метиламина, этиламина, н-бутиламина, изобутиламина, вторбутиламина, н-додециламина). Над прямой находятся точки для изо-пропиламина и трет-бутиламина

Значения чисел (DN) Гутмана [10] для основных классов п-донорных лигандов

Класс	п-донор	DN	Класс	п-донор	DN
Сложные эфиры	метилацетат	16,3	Пиридины	пиридин	33,1
	γ-бутиролактон	18,0		4-метилпиридин	34
Простые эфиры	диэтиловый эфир	19,2	Первичные амины	метиламин	39
	1,4-диоксан	14,8		этиламин	40
Спирты	метанол	19 (30)		н-пропиламин	38
	этанол	32		изо-пропиламин	57,5
	пропанол-2	36		н-бутиламин	42
	бутанол-1	29		трет-бутиламин	57,5
	2-метилпропанол-2	38		этилендиамин	55
	3-метилбутанол-1	32	диметиламин	51	
Анилины	н-октанол	32	Вторичные амины	диэтиламин	50
	анилин	35		ди-н-пропиламин	40
	2-хлоранилин	31		пиперидин	40
	N-метиланилин	33	Третичные амины	триметиламин	64
	N-этиланилин	33		триэтиламин	61
	N, N -диметиланилин	27		три-н-бутиламин	50
N-оксиды пиридинов	N, N -диэтиланилин	33	диметилбензиламин	21	
	N-оксид пиридина	32	аммиак	59 (42)	
	N-оксид 4-метилпиридина	36	Хинолины	хинолин	32
	N-оксид 4-метоксипиридина	41			

ной связи. В ней донорные числа (DN) Гутмана численно равны -ΔH образования комплексов этих молекул с кислотой Льюиса SbCl<sub>5</sub> состава 1 : 1 в 1,2-дихлорэтане (таблица).

Основность и нуклеофильность основных классов органических соединений в апротонных растворителях типа хлороформа и 1,2-дихлорэтана в первом приближении можно представить в виде следующей последовательности:

фенолы < альдегиды, кетоны, простые и сложные эфиры < анилины < N-оксиды пиридинов < пиридины < предельные амины.

Представленные в таблице величины DN позволяют заключить, что существенные отличия в их значениях наблюдаются в случае сильно различающихся по строению веществ, тогда как для соединений одного и того же класса они довольно близки. В целом изменения значений DN находятся в соответствии с рядом основности/нуклеофильности, приведенным выше для lgK<sub>Zn-ТФП</sub> и lgK<sub>В12</sub>, однако есть и противоречия. Например, у N,N-диэтиланилина (DN 33) выше, чем у N,N-диметиланилина (DN 27); мы же для координации Zn-ТФП с этими соединениями в хлороформе получили обратный порядок изменения констант устойчивости (K<sub>Zn-ТФП</sub>): 2,5 л·моль<sup>-1</sup> и 20,4 л·моль<sup>-1</sup>. У пиперидина (DN 40) меньше, чем у трет-бутиламина (DN 57,5) и даже три-н-бутиламина (DN 50); однако наши значения K<sub>Zn-ТФП</sub>: 49700, 3510 и 12,0 л·моль<sup>-1</sup> соответственно.

В большинстве случаев (за исключением N-оксидов пиридинов: lgK<sub>Zn-ТФП</sub> = 0,0534·DN + 1,205,

г 0,9999; n = 3) между DN и lgK<sub>Zn-ТФП</sub> линейные корреляции даже внутри одного класса соединений отсутствуют.

Таким образом, шкала Гутмана (в отличие от рK<sub>В12</sub>, рK<sub>В(BF3)}</sub> и рK<sub>Zn-ТФП</sub>) не позволяет получить ясного представления о взаимосвязи между донорной способностью оснований/нуклеофилов и их способностью к образованию молекулярных комплексов, а также вывести корреляционные уравнения, позволяющие количественно предсказывать реакционную способность соединений. В основе этой неудачи, на наш взгляд, лежат следующие причины:

1. Чрезвычайное разнообразие используемых растворителей (при малом количестве однотипных объектов) приводит к тому, что образующиеся молекулярные комплексы со SbCl<sub>5</sub> сложно классифицировать и корректный количественный учет электронных, стерических и других факторов на ΔH<sup>0</sup> процесса координации становится трудноосуществимым.
2. Пентахлорид сурьмы является очень сильным акцептором электронов, в результате чего контроль за сохранением его чистоты в процессе эксперимента сопряжен с огромными трудностями. Этой же причиной обусловлено существенное нивелирование влияния величины электронной плотности на реакционном центре донора на энтальпию процесса образования молекулярного комплекса. Так, значения DN для анилинов, приведенных в таблице, изменяются от 27 до 36, а аммиака и предельных аминов от 39 до 61 единицы, то

есть в достаточно узком диапазоне; для некоторых же соединений они определены очень грубо ( $DN$  для аммиака 59 (42), метанола 19 (30)).

При использовании шкал основности  $pK_{B12}$  и  $pK_{B(BF_3)}$  отчасти учтены эти недостатки: использованы менее сильные, чем  $SbCl_5$ , акцепторы ( $BF_3$  и особенно  $I_2$ ) и расширены серии однотипных лигандов, что позволило нам обсудить в данной статье их соответствие данным по комплексообразованию с  $Zn$ -ТФП (см. рис. 1–4). Однако недостатком указанных шкал является отсутствие литературных данных о термодинамике процесса комплексообразования.

В нашей шкале нуклеофильности/основности [1], [2], [3], [4], [5] мы учли перечисленные недостатки: в качестве акцептора используется довольно слабая кислота Льюиса –  $Zn$ -ТФП (исследуются только молекулярные комплексы  $n, \nu$ -типа состава 1 : 1 для достаточно больших групп нуклеофилов, относящихся к одному и тому же классу органических соединений) и приводятся  $\Delta G^\circ$ ,  $\Delta H^\circ$  и  $\Delta S^\circ$  для комплексов.

Предложенный нами новый подход к оценке нуклеофильности молекул на основе данных, характеризующих устойчивость их комплексов с МП, несомненно, имеет массу достоинств. Исследование кинетики и термодинамики координации  $Zn$ -ТФП в хлороформе со 190  $n$ -донорными лигандами (предельные, непредельные и ароматические амины, гетероароматические  $N$ -оксиды, спирты) методом электронной спектроскопии показало, что между координационными, химическими и биологическими процессами с участием одних и тех же лигандов/нуклеофилов/субстратов есть много общего, так как описываются подобными математическими уравнениями. С другой стороны, они имеют свои особенности. Так,

нами впервые обнаружено, что амины, содержащие  $n$ -октильную группу, обладают повышенной нуклеофильностью по отношению к порфириновым системам (координация с  $Zn$ -ТФП, раскрытие экзоцикла феофорбида *a*).

На наш взгляд, исследование таких особенностей комплексообразования МП методом ЭСП может дать резкий толчок к более глубокому пониманию механизмов органических и биохимических реакций, поскольку данная модельная система позволяет:

1. Работать с очень низкими концентрациями реагентов благодаря высоким коэффициентам экстинкции МП и определять значения констант устойчивости комплексов в очень широком диапазоне (для метилацетата  $K = 0,62 \text{ л}\cdot\text{моль}^{-1}$ , для DABCO –  $105000 \text{ л}\cdot\text{моль}^{-1}$ ).
2. В течение одного дня определить константы устойчивости комплексов (и термодинамические характеристики координации) МП с несколькими лигандами и при нескольких температурах, поскольку равновесия устанавливаются очень быстро.
3. При наличии линейных зависимостей смещений максимумов полос поглощения металлопорфирина ( $\Delta\lambda$ ) при координации с ним определенного класса соединений от каких-либо параметров в течение нескольких минут обнаруживать наличие аномалий в поведении лиганда с известным значением параметра (отсутствие корреляции с  $\Delta\lambda$  свидетельствует о наличии неучтенных явлений).
4. Получать молекулярные комплексы МП с лигандами (в отличие от интермедиатов в органической и биологической химии) в индивидуальном состоянии и исследовать их пространственное строение методами РСА и газовой электронографии.

\* 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. Андреев В. П., Нижник Я. П., Лебедева Н. Ш. Новая шкала основности/ нуклеофильности, основывающаяся на параметрах, характеризующих образование аксиальных ( $n, \nu$ -типа) комплексов  $Zn$ -ТФП с лигандами (основаниями/ нуклеофилами) // ЖОрХ. 2008. Т. 44. № 6. С. 914–922.
2. Андреев В. П., Соболев П. С., Зайцев Д. О. Количественные корреляции, связывающие процессы координации  $Zn$ -ТФП и реакции нуклеофильного замещения с участием анилинов // ЖОрХ. 2012. Т. 48. Вып. 6. С. 776–783.
3. Андреев В. П., Соболев П. С., Зайцев Д. О., Илюхин А. Б. Нуклеофильность гетероароматических  $N$ -оксидов при координации с  $Zn$ -тетрафенилпорфирином и в реакциях замещения // ЖОХ. 2014. Т. 84. № 1. С. 121–131.
4. Андреев В. П., Соболев П. С., Зайцев Д. О., Визер С. А., Ержанов К. Б., Тафеенко В. А. Нуклеофильность  $N$ -пропаргиланилинов в процессах координации с  $Zn$ -тетрафенилпорфирином в хлороформе // ЖОХ. 2014. Т. 84. № 8. С. 1378–1387.
5. Андреев В. П., Соболев П. С. Молекулярные комплексы металлопорфиринов как модельная система исследования донорно-акцепторных взаимодействий  $n, \nu$ -типа. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2015. 355 с.
6. Dartshevich E. V., Trotskaya E. A., Tsirelson V. G. The  $N \cdots I$  halogen bond in substituted pyridines as viewed by the source function and delocalization indices // Chemical Physics Letters. 2014. Vol. 601. P. 144–148.
7. Laurence C., Gal J. - F. Lewis basicity and affinity scales. Data and measurement. Wiley, 2010. 460 p.
8. Laurence C., Graton J., Berthelot M., Ghomari M. J. El The diiodine basicity scale: toward a general halogen-bond basicity scale // Chem. Eur. J. 2011. Vol. 17. P. 10431–10444. DOI: 10.1002/chem.201101071
9. Laurence C., Graton J., Gal J. - F. An Overview of Lewis Basicity and Affinity Scales // J. Chem. Educ. 2011. Vol. 88. P. 1651–1657.

10. Marcus Y. The Effectivity of Solvents as Electron Pair Donors. // J. Sol. Chem. 1984. Vol. 13. № 9. P. 599–604.
11. Perrin D. D. Dissociation constants of Organic Bases in Aqueous Solution. Butterworths; London, 1965. 265 p.

**Andreev V. P.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Sobolev P. S.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Mukhina N. I.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

### COMPARISON OF NUCLEOPHILISITY OF n-DONOR LIGANDS IN INTERACTION WITH Zn-TPP, SbCl<sub>5</sub>, BF<sub>3</sub> AND IODINE IN APROTIC SOLVENTS

The article examines correlations of basicity/nucleophilicity of n-donor ligands using different scales (Lewis acids are used as v-acceptors: I<sub>2</sub>, SbCl<sub>5</sub>, BF<sub>3</sub>, Zn-TPP, and Bronsted acid-p-fluorophenol). It is shown that in this series the Gutman donor numbers (DN) have the weakest predictability in compounds' nucleophilic capacity. Other scales properly correlate with each other, and steric factors have little significance in coordination with iodine and n-fluorophenol. Apparently, at the moment, the most convenient is the scale of basicity/nucleophilicity of n-donor ligands, which coordinates Zn-TPP with organic compounds in chloroform. Advantages of this scale are specified. This model system allows quick determination of kinetic (K, Δλ) and thermodynamic parameters (ΔH<sup>0</sup>, ΔS<sup>0</sup> and ΔG<sup>0</sup>) using electronic spectroscopy. It also helps to identify molecular complexes in the crystalline state by x-ray diffraction analysis.

Key words: coordination, zinc-tetraphenylporphyrin, nucleophilicity, basicity, electronic spectroscopy, iodine, boron trifluoride, antimony pentachloride

#### REFERENCES

1. Andreev V. P., Nizhnik Ya. P., Lebedeva N. Sh. New Basicity/Nucleophilicity Scale on the Basis of Parameters of Formation of Axial n, v-Complexes Derived from Tetraphenylporphyrinatozinc (II) and Base/Nucleophile as Ligand // Russian journal of organic chemistry. 2008. Vol. 44. № 6. P. 906–915. DOI: 10.1134/S1070428008060213
2. Andreev V. P., Sobolev P. S., and Zaitsev D. O. Quantitative Relations Holding in Coordination of (Tetraphenylporphyrinato) zinc (II) and Nucleophilic Substitution with Anilines // Russian Journal of Organic Chemistry. 2012. Vol. 48. № 6. P. 772–779. DOI: 10.1134/s1070428012060048
3. Andreev V. P., Sobolev P. S., Zaitsev D. O., Il'yukhin A. B. Nucleophilicity of heteroaromatic N-Oxides in Coordination with Zn (II) Tetraphenylporphyrinate and in the Substitution Reactions // Russ. J. Gen. Chem. 2014. Vol. 84. № 1. P. 115–124. DOI: 10.1134/S1070363214010186
4. Andreev V. P., Sobolev P. S., Zaitsev D. O., Vizer S. A., Erzhanov K. B., Tafenko V. A. Nucleophilicity of N-Propargylanilines in the Coordination to Zinc Tetraphenylporphyrine in Chloroform // Russian Journal of General Chemistry 2014. Vol. 84. № 8. P. 1599–1607. DOI: 10.1134/S1070363214080271
5. Andreev V. P., Sobolev P. S. *Molekulyarnye komplekсы metalloporfirinov kak model'naya sistema issledovaniya donorno-aktsseptornykh vzaimodeystviy n, v-tipa* [Molecular complexes of metalloporphyrins as model system of investigation of donor-acceptor interactions of n, v-type]. Petrozavodsk, 2015. 355 p.
6. Dartashevich E. V., Trotskaya E. A., Tsirelson V. G. The N...I halogen bond in substituted pyridines as viewed by the source function and delocalization indices // Chemical Physics Letters. 2014. Vol. 601. P. 144–148.
7. Laurence C., Gal J.-F. Lewis basicity and affinity scales. Data and measurement. Willey, 2010. 460 p.
8. Laurence C., Graton J., Berthelot M., Ghomari M. J. El The diiodine basicity scale: toward a general halogen-bond basicity scale // Chem. Eur. J. 2011. Vol. 17. P. 10431–10444. DOI: 10.1002/chem.201101071
9. Laurence C., Graton J., Gal J.-F. An Overview of Lewis Basicity and Affinity Scales // J. Chem. Educ. 2011. Vol. 88. P. 1651–1657.
10. Marcus Y. The Effectivity of Solvents as Electron Pair Donors. // J. Sol. Chem. 1984. Vol. 13. № 9. P. 599–604.
11. Perrin D. D. Dissociation constants of Organic Bases in Aqueous Solution. Butterworths; London, 1965. 265 p.

Поступила в редакцию 20.04.2015

**ВИКТОР ЮРЬЕВИЧ КАРАСЕВ**

доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики 1 физического факультета, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)  
*plasmadust@yandex.ru*

**АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ ШТЫКОВ**

преподаватель кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*shtykoff@gmail.com*

## ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ\*

Показано, что метод корреляционной спектроскопии может быть применен для изучения кинетических процессов в плазменно-пылевых структурах и расчета коэффициентов самодиффузии. Проведенные эксперименты по набору статистически достоверных данных приводят к заключению, что метод корреляционной спектроскопии является эффективным для оценки фазового состояния комплексной плазмы и для определения скорости протекания процессов фазовых переходов и установления границ их существования.

Ключевые слова: корреляционная спектроскопия, плазменно-пылевые структуры, коэффициент самодиффузии, динамика фазовых переходов

### ВВЕДЕНИЕ

Наличие пылевых частиц в плазме может существенно влиять на химический и зарядовый состав, электрофизические и оптические свойства, а также на процессы теплообмена и массопереноса. Пылевые частицы в плазме заряжаются потоками электронов и ионов, путем термо-, фото- и вторичной эмиссии электронов. Заряженные частицы взаимодействуют как между собой, так и с внешними электрическими и магнитными полями. Основным источником диссипации кинетической энергии частиц является столкновение с нейтральными атомами плазмообразующего газа. Комбинированное воздействие на плазменно-пылевые структуры (ППС) внешних сил, сил межчастичного взаимодействия и процессов диссипации приводит как к формированию квазистационарных структур (кристаллическая фаза), так и сложных колебательных и даже хаотических систем (жидкая или газообразная фаза).

ППС могут проявлять свойства кристаллических структур, жидкостей и газоподобных субстанций. Описание протекания процессов фазовых переходов в плазменно-пылевых структурах является важной задачей, решаемой в рамках изучения динамических и кинетических процессов. Так, в работах [10], [11] представлен процесс «плавления» плазменно-пылевых структур при уменьшении давления разряда, в работе [8] впервые было показано изменение фазовых состояний ППС при изменении мощности генерации ВЧ-разряда, а процессы фазовых переходов

ППС, сформированных в тлеющем разряде, впервые были описаны в работе [9]. Исследования, проводимые с целью изучения кинетических характеристик плазменно-пылевых структур, а также отработка методик их измерения и расчета актуальны.

В настоящей работе исследуются процессы самодиффузии, происходящие в ППС, сформированных в тлеющем разряде. Диффузия в классическом понимании как процесс присутствует во всех фазовых состояниях вещества и характеризуется процессом взаимного проникновения одного типа вещества в структуру другого, в результате чего происходит выравнивание их концентраций по всему занимаемому объему. В случае исследования ППС процесс диффузии протекает внутри системы «пылевые частицы – плазмообразующий газ», при этом не происходит проникновения одного типа вещества в другое, а только изменение координат частиц, составляющих ППС, внутри структуры в течение всего времени существования ППС. В этом случае процесс можно определить как самодиффузию – частный случай диффузии, при котором диффундируют собственные частицы вещества. При этом частицы, участвующие в диффузионном движении, обладают одинаковыми химическими свойствами, но могут различаться по своим физическим характеристикам: иметь разные размеры, заряд и др.

Изучение самодиффузии играет важную роль при определении фазового состояния ППС, изучения характеристик процессов массопереноса



в ППС. Процесс самодиффузии характеризуется коэффициентом самодиффузии  $D$ , который отражает качественные изменения динамического состояния системы и характеризует стабильность ППС. При изучении кинетических процессов важно знать поведение частиц структуры, их колебательные характеристики. Вследствие большой заинтересованности в описании процессов фазовых переходов, знание коэффициента самодиффузии как одного из параметров упорядоченности структуры и одновременно величины, характеризующей колебания частиц, дает возможность исследовать процессы, происходящие в структурах на кинетическом уровне.

В работе [5] изучены причины вызывающих самодиффузию пылевых частиц в ППС и показано, что данный процесс отличен от диффузии в газах, жидкостях и твердых телах. В случае ППС диффузия представляет из себя беспорядочное движение заряженных пылевых частиц вследствие флуктуаций заряда частиц во времени. То есть именно из-за изменения поля заряженной частицы вследствие флуктуации заряда и изменения внешних параметров, а также из-за взаимодействия частиц в структуре возникает самодиффузия частиц. При переходе от кристаллического состояния структуры к жидкому и далее газообразному движению частиц становятся все более интенсивными, поэтому величина коэффициента самодиффузии однозначно связана с агрегатным состоянием ППС.

Теоретические расчеты коэффициента самодиффузии для систем «пылевые частицы – плазмообразующий газ» приведены в работах [1], [2], [3], [6]. Указанные работы посвящены исследованию связи транспортных характеристик пылевой подсистемы, в них описаны связи корреляционных функций и коэффициентов самодиффузии пылевых частиц, полученных экспериментально, с параметром неидеальности  $\Gamma$  и параметром масштабирования  $\xi$ . Самодиффузия микрочастиц является основным средством массопереноса, который определяет энергетические потери в пылевых системах и их энергетические характеристики [1]. В работах [2], [3] описывается массоперенос в пылевой плазме посредством самодиффузии макрочастиц, при этом величина коэффициента самодиффузии отражает качественные изменения динамического состояния системы. В работе [2] представлены результаты численного моделирования процессов массопереноса.

Значение коэффициентов самодиффузии для диссипативных систем представляет интерес не только с точки зрения определения динамических характеристик пылевой плазмы, но и для анализа различных кинетических процессов в молекулярной биологии, медицине, химии полимеров и т. д. [1].

ППС не всегда являются однородными по своему фазовому состоянию. В ряде случаев система включает в себя как кристаллическую фазу, так и жидкую фазу с возможностью перехода в газообразное состояние. На рис. 1 представлены фотографии как однородных кристаллических (а), так и неоднородных (б) и (в) по своему фазовому состоянию ППС.

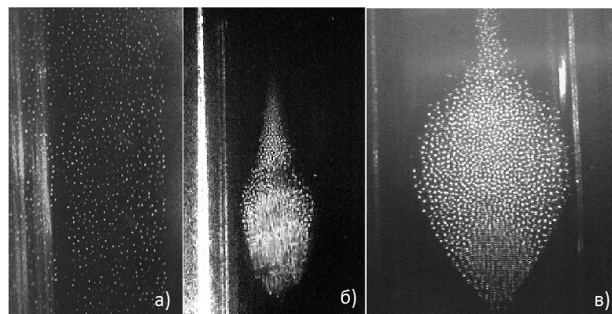


Рис. 1. Пример квазистационарной структуры, полученной при условиях: газ – Ar, материал частиц – MF, радиус 3,38 мкм,  $P = 25$  Па,  $I = 2$  мА (а), структуры с хаотическими колебаниями, полученной при условиях: газ – He, материал частиц –  $Al_2O_3$ ,  $P = 40$  Па,  $I = 0,6$  мА (б), и двухкомпонентной ППС, содержащей как кристаллическую фазу (верхняя часть), так и жидкую фазу (нижняя часть), полученной при условиях: газ – Ar, материал частиц –  $Al_2O_3$ , ток разряда – 0,6 мА, давление плазмообразующего газа – 60 Па (в)

Объектом нашего исследования являются упорядоченные плазменно-пылевые структуры в плазме инертных газов, которые создаются путем инжектирования частиц вещества в плазменный разряд. Основным методом является метод фотонной корреляционной спектроскопии, который в литературе называется также методом динамического рассеяния света. С помощью этого метода определены значения коэффициентов самодиффузии и получены данные о динамике неоднородных по фазовым состояниям ППС.

#### МЕТОД КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Корреляционная спектроскопия наиболее часто применима для изучения жидкостных дисперсных систем с наличием частиц или других неоднородностей для проведения исследований в медицине и биологии. Использование метода фотонной корреляционной спектроскопии возможно для изучения процессов самодиффузии упорядоченных плазменно-пылевых структур и определения их транспортных характеристик. В литературе описано применение метода для определения коэффициента самодиффузии макрочастиц в термической плазме, плазме ВЧ-разряда, при этом метод не был применим для оценок процессов самодиффузии в системах, сформированных в тлеющем разряде.

В рамках эксперимента на основании непрерывного измерения рассеянного на ППС излучения лазера измерена корреляционная функция интенсивности:

$$g_2(\tau) = \overline{I_1(t)I_2(t+\tau)} = \overline{f(t)f^*(t)f(t+\tau)f^*(t+\tau)}, \quad (1)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  – значения интенсивности сигнала в различные моменты времени.

В случае рассмотрения движения частицы в вязкой среде зависимость между корреляционной функцией интенсивности и коэффициентом самодиффузии рассматриваемого объекта определяется следующим образом:

$$\gamma(\tau) = e^{-q^2 D \tau}, \quad \text{где } q = 2k \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (2)$$

где  $k$  – волновой вектор ( $2\pi/\lambda$ );  $\theta$  – угол рассеяния.

Экспериментально полученная корреляционная функция позволяет оценить значение коэффициента самодиффузии на основании выражения (2). Набор численных значений (точки функции) аппроксимируется с помощью (2), нормированной в соответствии с выражением (3).

$$g_2(\tau) = \frac{g_2(\tau) - g_2(\infty)}{g_2(0) - g_2(\infty)}. \quad (3)$$

Для получения и обработки корреляционных кривых использовалась программа, позволяющая снимать данные с платы-коррелятора в режиме реального времени, сохранять, обрабатывать данные и представлять корреляционные функции в графическом виде. Получив корреляционную функцию из эксперимента на основании выражения (2), оценивали значение коэффициента самодиффузии  $D$ . Оценка  $D$  производилась путем аппроксимации экспериментально полученного набора точек с помощью экспоненты (2). Производился подбор параметра показателя экспоненты до наилучшего совпадения с экспериментом в соответствии с критерием наименьших квадратов.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения эксперимента была использована установка «Плазменный кристалл». Подробное описание установки приведено в работе [7]. К установке был присоединен корреляционный измерительный блок. Стеклоанодная разрядная трубка, в которой индуцировалась плазма тлеющего разряда и формировалась ППС, откачивалась до давления  $10^{-5}$  Па и заполнялась рабочим газом. Для вброса частиц во время эксперимента применялся контейнер с частицами. После включения высоковольтного источника тока разрядный ток в трубке задавался набором сопротивлений. Визуализация пылевой структуры осуществлялась полупроводниковым лазером DTL-316 и набором линз, формирующих «лазерный нож», в рассеянном свете которого возможно наблюдение ППС. В состав программно-аппаратного комплекса для получения корреляционных функций входили: фотоэлектронный умножитель, который использовался в качестве детектора рассеянного на ППС излучения, плата кор-

релятора и программное обеспечение «PhotoCor», реализующее получение данных в режиме реального времени, сохранение и обработку данных.

Эксперимент проводился следующим образом: в объем трубки напускался рабочий газ в диапазоне давлений от 20 до 120 Па. Были использованы следующие газы: аргон, неон и гелий. После генерации разряда устанавливалось значение тока разряда в диапазоне от 0,2 до 4 мА. В область плазменного разряда производилось инжектирование пылевых частиц (оксид алюминия, цинк, оксид железа или другой поли- или монодисперсный порошок), после чего выдерживалось время для стабилизации параметров ППС. Далее настраивали лазер для визуализации ППС и регистрировали корреляционную функцию в течение одной минуты. Сохранив экспериментальные данные корреляционных кривых, производили изменение значения токовых характеристик с шагом 0,1 мА, после чего эксперимент повторялся. После проведения серии измерений в заданном диапазоне токов откачивали рабочий объем трубки и заполняли газом с новым значением давления. В случае смены рабочего газа производилась замена баллона и тренировки вакуумной системы с дальнейшим подбором параметров генерации ППС. В случае замены частиц производилось развакуумирование установки, чистка контейнера, загрузка новых частиц, проверка работоспособности установки и вывод ее на рабочий режим.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При расчете коэффициентов самодиффузии было выявлено, что далеко не все корреляционные кривые поддаются однозначной аппроксимации с допустимым доверительным интервалом погрешности, как это описано выше. Особенно это касается структур, которые не имеют однородного фазового состава ввиду различной динамики колебаний частиц, как представлено на рис. 1б, в. Корреляционная функция, полученная экспериментально, не может быть аппроксимирована теоретически рассчитанными кривыми. Причина может быть в том, что структура имеет набор различных фазовых состояний в разных ее частях, определяющихся различными коэффициентами самодиффузии. Таким образом, в случае многокомпонентного фазового состава ППС могут быть описаны не одним коэффициентом самодиффузии, определяющимся по (2), а суммой экспонент:

$$g_2(\tau) = \sum \alpha_i e^{-\beta_i \tau}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – нормировочный коэффициент, зависящий от интенсивности рассеянного излучения,  $\beta = D * q^2$ ,  $q$  рассчитывается в соответствии с (2).

Был проведен эксперимент по определению коэффициента самодиффузии ППС, представлен-

ной на рис. 1в, для нижней и верхней ее частей отдельно. Получены корреляционные функции, представленные на рис. 2, которым соответствуют два разных значения коэффициента самодиффузии.

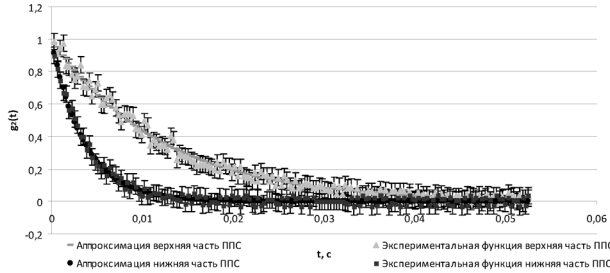


Рис. 2. Экспериментально полученные корреляционные кривые для верхней и нижней частей структуры, представленной на рис. 1в

Полученные значения коэффициентов самодиффузии: для верхней части структуры  $D = 1,12 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$ , для нижней  $D = 1,89 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$  – свидетельствуют о различных фазовых составах ППС в различных ее частях. Данный вывод был сделан на основании расчета параметра неидеальности  $\Gamma$ , который является одним из основных характеризующих параметров фазового состояния ППС. Зависимость между параметром неидеальности  $\Gamma$  и коэффициентом самодиффузии приведена в работе [6] и представлена следующим выражением:

$$D \cong \frac{T_p \Gamma^*}{12\pi(\omega^* + \nu_{fr}) m_p} \exp(-c_1 \frac{\Gamma^*}{\Gamma_c^*}), \quad (5)$$

где  $\Gamma_c^* = 102$ ,  $c_1 = 2,9$  для  $\xi > 0,3$ ,  $c_1 = 3,15$  для  $\xi < 0,3$ .

Для определения неидеальности необходимо рассчитать следующие параметры:

$\xi = \omega^* / \nu_{fr}$  – параметр масштабирования как отношение частоты колебаний макрочастиц к частоте столкновений макрочастиц с нейтралами;

$\omega^* = Z_p^* e \sqrt{n_p / \pi m_p}$  – частота колебаний макрочастиц;

$\nu_{fr} = \frac{C_n p}{R \rho}$  – частота столкновений макрочастиц с нейтралами.

На основании полученных экспериментальных данных для ППС, существующей в условиях: газ – Ar, материал частиц –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ток разряда – 0,6 мА, давление плазмообразующего газа – 60 Па и рассчитанных значений  $\nu_{fr} = \frac{8,6 \cdot 60}{5 \cdot 3,95} = 26$  Гц,  $\omega^* = Z_p^* e \sqrt{n_p / \pi m_p} \cong 21$  Гц,  $\xi = \omega^* / \nu_{fr} = 1,23$ , были получены значения  $\Gamma = 87$  для верхней части ППС и  $\Gamma = 112$  для нижней части. Полученные результаты согласуются с работой [6], где показано, что если параметр неидеальности  $\Gamma > 106$ , то ППС находится в состоянии плавления, а если

$\Gamma < 106$ , то ППС находится в стадии кристаллизации. Таким образом, полученный результат согласуется с теоретическими расчетами.

Далее был проведен эксперимент по определению корреляционной функции для всего объема ППС и произведено сравнение с суммой корреляционных кривых верхней и нижней частей ППС для доказательства достоверности гипотезы и правомерности выражения (4), результаты представлены на рис. 3. При сравнении корреляционной функции, рассчитанной для всей ППС, и кривой, полученной при суммировании корреляционных кривых от верхней и нижней частей ППС, можно сделать вывод, что данные кривые совпадают в пределах погрешности.

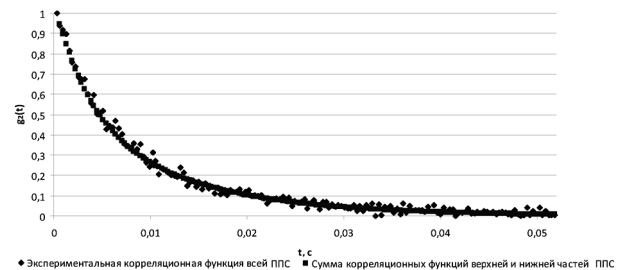


Рис. 3. Сравнение суммы корреляционных кривых верхней и нижней частей ППС и корреляционной кривой, полученной на основании измерения всего объема ППС

Для учета разницы в интенсивности рассеянного излучения для разных частей ППС введен коэффициент  $\alpha$ , учитывающий величину интенсивности рассеянного излучения при измерении корреляционных кривых.

Для проверки адекватности модели (4) были рассчитаны коэффициенты самодиффузии для квазистационарной ППС, представленной на рис. 1а, и структуры с хаотическими колебаниями, представленной на рис. 1б, не имеющей выраженных дополнительных фазовых компонент. Расчеты показывают, что в случае однородных по фазовому состоянию структур вторая компонента отсутствует. Таким образом, при определении корреляционной функции неоднородных по фазовому состоянию структур можно разложить ее в ряд и вычислить коэффициенты самодиффузии, характеризующие динамику изменения фазового состояния структуры.

Был проведен анализ изменения значения коэффициента самодиффузии в зависимости от внешних параметров среды – тока разряда и давления плазмообразующего газа. В результате применения метода были рассчитаны коэффициенты самодиффузии для ППС, состоящей из частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , левитирующих в аргоновой плазме, при диапазоне токов [0,3–3,5] мА и давлении 80 Па, размерами частиц в контейнере в диапазоне [5–60] мкм.

Полученный результат может быть интерпретирован следующим образом: при повышении

величины тока разряда ППС приобретает энергию, что приводит к изменению фазового состава – структура начинает «плавиться». Зарождение колебаний начинается в нижней части структуры и распространяется вверх. Таким образом, определенный промежуток времени можно наблюдать двухкомпонентную ППС, содержащую в себе два агрегатных состояния. Исходя из представленных данных на рис. 4, можно сделать вывод, что ППС, существующая в диапазоне тока разряда  $[0,3; 0,6]$  мА, имеет только одно фазовое состояние, соответствующее кристаллической фазе. Далее, в диапазоне токов  $[0,6; 2]$  мА ППС имеет две фазы одновременно. При превышении значения тока разряда свыше 2 мА ППС становится жидкостью.

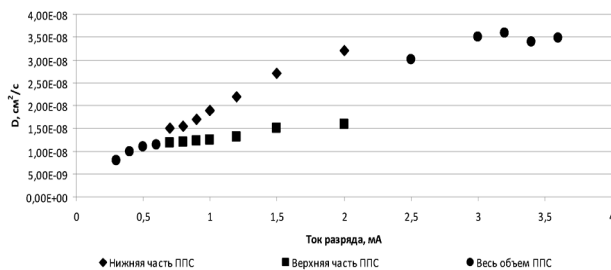


Рис. 4. Зависимость коэффициента самодиффузии от тока разряда (частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , газ – Ar,  $P = 80$  Па)

На основании полученных экспериментальных данных (рис. 5) были выведены зависимости значений коэффициентов самодиффузии от давления плазмообразующего газа. Рассчитаны коэффициенты самодиффузии для ППС, состоящей из частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , левитирующих в аргоновой плазме, при изменении давления плазмообразующего газа в диапазоне  $[25-120]$  Па и токе разряда 1,5 мА, размерами частиц в контейнере в диапазоне  $[5-60]$  мкм. Видно, что при постепенном повышении давления (до 60 Па) энергия колебаний ППС уменьшается, что приводит к появлению упорядоченных областей в ППС, дальнейшее

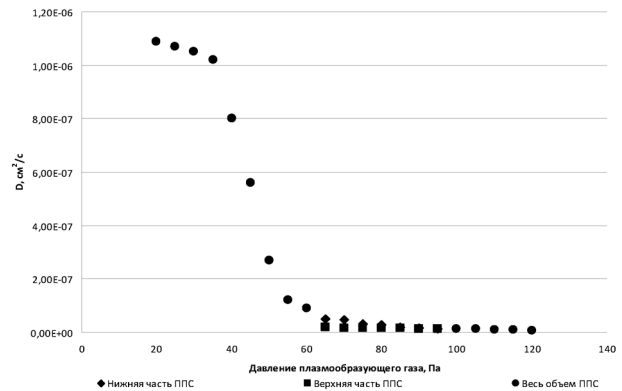


Рис. 5. Зависимость коэффициента самодиффузии от давления плазмообразующего газа. После достижения значения 60 Па начинается процесс кристаллизации (частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , газ – Ar,  $I = 1,5$  мА)

увеличение давления приводит к кристаллизации структуры до значения 90 Па. При увеличении давления плазмообразующего газа свыше 120 Па происходит разрушение ППС. Измеренный коэффициент самодиффузии (рис. 5) изменяется в соответствии с изменением структуры.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе применен метод корреляционной спектроскопии для определения коэффициентов самодиффузии в пылевой плазме. На основании измеренных корреляционных функций плазменно-пылевых структур и коэффициента самодиффузии определено наличие областей с разным фазовым состоянием внутри плазменно-пылевой структуры. Показано, что метод корреляционной спектроскопии является новым эффективным методом для оценки фазового состояния комплексной плазмы и определения скорости протекания фазовых переходов. Определена динамика фазовых переходов в ППС в зависимости от давления плазмообразующего газа и тока разряда на основании оценок значений коэффициента самодиффузии.

\* Работа частично поддержана грантом РФФ № 14-12-00094.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваулина О. С. Диффузия макрочастиц и критерии фазовых переходов для пылевых структур в слабоионизированной плазме // ЖЭТФ. 2002. Т. 121. В. 1. С. 35–46.
2. Ваулина О. С. Самоорганизация макрочастиц в слабоионизированной плазме // Материалы всероссийской научной конференции по физике низкотемпературной плазмы ФНТП–2001. Петрозаводск, 2001. Т. 2. С. 111–114.
3. Ваулина О. С., Петров О. Ф., Фортон В. Е. Моделирование процессов массопереноса на малых временах наблюдения в неидеальных диссипативных системах // ЖЭТФ. 2005. Т. 127. В. 5. С. 1153–1165.
4. Ваулина О. С., Храпак С. А. Моделирование динамики сильновоздействующих макрочастиц в слабоионизированной плазме // ЖЭТФ. 2001. Т. 119. № 2. С. 264–271.
5. Морфил Г. Е., Цытович В. Н., Томас Х. Комплексная плазма: II. Элементарные процессы в комплексной плазме // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 1. С. 3–36.
6. Нефедов А. П., Ваулина О. С., Петров О. Ф. и др. Динамика макрочастиц в плазме тлеющего разряда постоянного тока в условиях микрогравитации // ЖЭТФ. 2002. Т. 122. В. 4. С. 778–788.
7. Bulba A., Khakhaev A., Luizova L., Podryadchikov S., Scherbina A., Shtykov A. The Influence of Physical-Chemical Characteristics of Plasma-Forming Gas and Macroparticle Matter in Complex Plasma on Ordered Structure Self-Organization // International Conference on Physics of Dusty Plasmas. France, Orlean, 2005. AIP. V799. P. 359.

8. Chu J. Y. and Lin I. Direct observation of coulomb crystals and liquids in strongly coupled Rf dusty plasmas // Physical review letters. 1994. Vol. 72. № 25. P. 4009–4012.
9. Lipaev A. M., Molotkov V. I., Nefedov A. P., Petrov O. F., Torchinski V. M., Fortov V. E., Khrapak A. G. and Khrapak S. A. Ordered structures in a nonideal dusty glow-discharge plasma // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1997. № 112. P. 2030–2044.
10. Melzer A., Homann A., and Piel A. Experimental investigation of the melting transition of the plasma crystal // Phys. Rev. E 53. 1996. Issue 3. P. 2757.
11. Thomas H. M., Morfill G. E. Melting dynamics of a plasma crystal // Nature. 1996. № 379. P. 806–809.

Karasev V. Yu., St. Petersburg State University (St. Petersburg, Russian Federation)

Shtykov A. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

### THE INVESTIGATION OF PHASE TRANSITION DYNAMICS IN DUSTY PLASMA BY CORRELATION SPECTROSCOPY METHOD

It is shown that the method of correlation spectroscopy can be used to study the kinetic processes in plasma-dust structures and the calculation of self-diffusion coefficients. The method of correlation spectroscopy is effective for evaluation of the phase state of the integrated plasma, to determine the speed of the processes of phase transitions and establishing the boundaries of their existence.

Key words: correlation spectroscopy, dusty plasma, self-diffusion coefficient, dynamics of phase transitions

#### REFERENCES

1. Vaulina O. S. Diffusion of the macroparticles and the criteria of phase transitions for dust structures in low-ionized plasma [Diffuziya makrochastits i kriterii fazovykh perekhodov dlya pylevykh struktur v slaboionizirovannoy plazme]. *ZhETF*. 2002. Vol. 121. Ch. 1. P. 35–46.
2. Vaulina O. S. Self-organization of the macroparticles in a low-ionized plasma [Samoorganizatsiya makrochastits v slaboionizirovannoy plazme]. *Materialy vserossiyskoy nauchnoy konferentsii po fizike nizkotemperaturnoy plazmy FNTF–2001*. Petrozavodsk, 2001. Vol. 2. P. 111–114.
3. Vaulina O. S., Petrov O. F., Fortov V. E. Modeling of mass transfer processes at small observation times in nonideal dissipative systems [Modelirovanie protsessov massoperezenosa na malyykh vremenakh nablyudeniya v neideal'nykh dissipativnykh sistemakh]. *ZhETF*. 2005. Vol. 127. Ch. 5. P. 1153–1165.
4. Vaulina O. S., Khrapak S. A. Modeling the dynamics of strongly particulates in a low-ionized plasma [Modelirovanie dinamiki sil'novzaimodeystvuyushchikh makrochastits v slaboionizovannoy plazme]. *ZhETF*. 2001. Vol. 119. № 2. P. 264–271.
5. Morfill G. E., Tsytovich V. N., Tomas K. H. Complex Plasma: II. Elementary processes in complex plasma [Kompleksnaya plazma: II. Elementarnye protsessy v kompleksnoy plazme]. *Fizika plazmy*. 2003. Vol. 29. № 1. P. 3–36.
6. Nefedov A. P., Vaulina O. S., Petrov O. F. et al. Dynamics of macroparticles in the plasma glow discharge of direct current in microgravity [Dinamika makrochastits v plazme tleyushchego razryada postoyannogo toka v usloviyakh mikrogravitatsii]. *ZhETF*. 2002. Vol. 122. Ch. 4. P. 778–788.
7. Bulba A., Khakhaev A., Luizova L., Podryadchikov S., Scherbina A., Shtykov A. The Influence of Physical-Chemical Characteristics of Plasma-Forming Gas and Macroparticle Matter in Complex Plasma on Ordered Structure Self-Organization // International Conference on Physics of Dusty Plasmas. France, Orlean, 2005. AIP. V799. P. 359.
8. Chu J. Y. and Lin I. Direct observation of coulomb crystals and liquids in strongly coupled Rf dusty plasmas // Physical review letters. 1994. Vol. 72. № 25. P. 4009–4012.
9. Lipaev A. M., Molotkov V. I., Nefedov A. P., Petrov O. F., Torchinski V. M., Fortov V. E., Khrapak A. G. and Khrapak S. A. Ordered structures in a nonideal dusty glow-discharge plasma // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1997. № 112. P. 2030–2044.
10. Melzer A., Homann A., and Piel A. Experimental investigation of the melting transition of the plasma crystal // Phys. Rev. E 53. 1996. Issue 3. P. 2757.
11. Thomas H. M., Morfill G. E. Melting dynamics of a plasma crystal // Nature. 1996. № 379. P. 806–809.

*Поступила в редакцию 15.06.2015*

**ИРИНА ВЛАДИМИРОВНА СЫСУН**

преподаватель кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*irina.sysun@gmail.com*

**ВАЛЕРИЙ ИВАНОВИЧ СЫСУН**

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и электроэнергетики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*vsysun@psu.karelia.ru*

**ПЕТР ПЕТРОВИЧ БОРИСКОВ**

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

**ДИФфуЗИОННЫЙ МЕХАНИЗМ ОКИСЛЕНИЯ НИКЕЛЯ В ПРОВОДЯЩЕМ КАНАЛЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ Pt/NiO/Pt\***

Эффект резистивного переключения на основе простых бинарных оксидов металлов привлекает значительное внимание в связи с возможностью его применения в микросхемах новой электронной памяти. В работе исследуется диффузионный механизм окисления проводящего канала никеля в резистивной переключающей структуре с памятью Pt/NiO/Pt. Построена модель этого механизма в цилиндрической геометрии канала, которая идентична известной задаче замерзания (или оттаивания) полого цилиндра изнутри с постоянной температурой на внутренней поверхности. Численное решение в квазистационарном приближении, где учитывается зависимость от времени только движения границы окисления, хорошо согласуется с экспериментом. Проведенный анализ показывает, что диффузионное окисление может быть решающим фактором исчезновения металлической проводимости канала в переключающих структурах на основе оксида никеля и ряда других оксидов переходных металлов.

Ключевые слова: резистивная память, канальная проводимость, оксид никеля, диффузионное окисление

Ячейка резистивной памяти (ReRAM) Pt/NiO/Pt представляет собой обычную металл – оксид – металл (MOM) конденсаторную структуру, характеризующуюся свойствами переключения (рис. 1) из высокоомного состояния «OFF» в низкоомное «ON» (SET) и наоборот (RESET) (рис. 2). Для реализации этого эффекта необходимо провести процесс предварительной электрической формовки (forming), который представляет собой диэлектрический пробой (резкое, скачкообразное изменение проводимости оксидного слоя) MOM-структур при ограничении проходящего тока. Результатом формовки является формирование наноразмерного канала, структура и химический состав которого отличаются от исходного оксида [7], [12]. Отметим, что образование такого канала подтверждается исследованием переключения в многочисленных экспериментах как в оксидных планарных [3], так и сэндвич-структурах [4], [6], [7], [10], [11], [12], [13], [16].

Несмотря на то что накоплено большое количество экспериментальных данных по изучению эффекта переключения в различных оксидных сис-

темах со шнурованием тока, его механизм до сих пор остается не ясным. Для структуры с оксидом никеля, где состояние «ON» характеризуется наличием тонкого проводящего канала с избытком металла в виде множества фрагментов [13], наиболее устоявшимся предположением о механизме перехода RESET является окисление никеля за счет избытка кислорода в окружающем NiO при высокой температуре, обусловленной джоулевым нагревом [6], [10], [16].

Однако оценка этого нагрева и процесса окисления делается по упрощенным моделям передачи тепла и зависящей только от температуры скорости уменьшения радиуса канала (линейный рост слоя окисления) [10].

В то же время при плотном слое оксида может осуществляться диффузионный механизм окисления, когда в плоской геометрии скорость роста окисного слоя обратно пропорциональна его толщине [8]. В нашем случае этот процесс осложняется цилиндрической геометрией канала и диффузионным механизмом переноса кислорода в окружающем NiO. Возможны три варианта

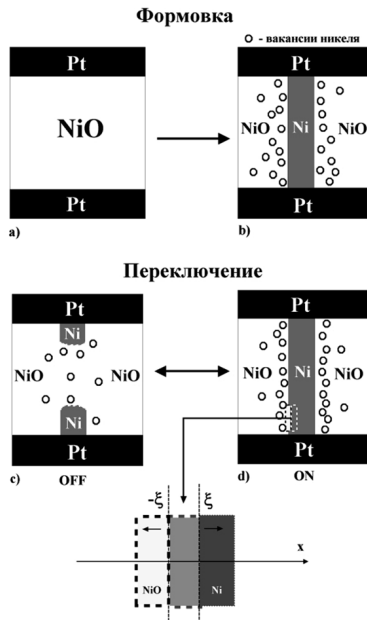


Рис. 1. Схема процессов электрической формовки и переключения MOM-структуры Pt/NiO/Pt. Внизу показаны границы окисления ( $\xi$ ) и ухода никелевых вакансий ( $-\xi$ ) в плоском случае геометрии канала

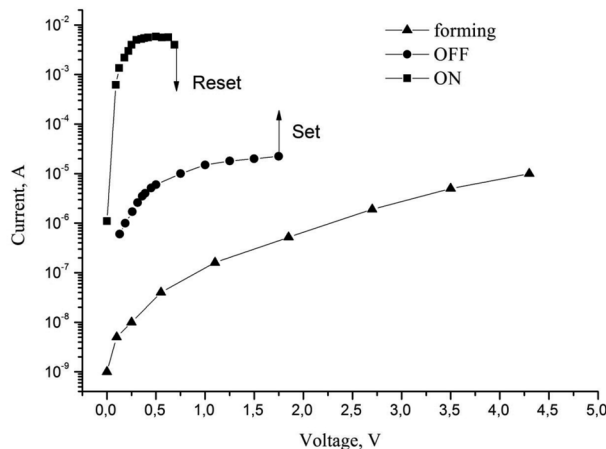


Рис. 2. ВАХ процессов электрической формовки и переключения MOM-структуры Pt/NiO/Pt

диффузии, приводящие к исчезновению металлической проводимости канала: непосредственная диффузия кислорода в канал, диффузия никелевых вакансий в канал и обратная диффузия атомов никеля из канала.

По данным [5], [9], наибольший коэффициент диффузии в монокристалле NiO (на 2–3 порядка) при характерных температурах разогрева канала  $\sim 1000$  К [11] имеет диффузия никелевых вакансий:

$$D_{Ni}^{vac} = 1,9 \cdot 10^{-2} \cdot \exp\left(-\frac{34540}{RT}\right),$$

$$D_{Ni} = 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot \exp\left(-\frac{58000}{RT}\right),$$

$$D_o = 6,2 \cdot 10^{-4} \cdot \exp\left(-\frac{57500}{RT}\right),$$

где  $D_{Ni}^{vac}$ ,  $D_{Ni}$  и  $D_o$  – коэффициенты диффузии ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) никелевых вакансий, никеля и кислорода соответственно,  $R$  – универсальная газовая постоянная ( $\text{cal}\cdot\text{K}^{-1}$ ).

Еще выше диффузия никелевых вакансий осуществляется по границам поликристалла [5]:

$$D_{NiGB}^{vac} = 1,0 \cdot 10^{-2} \cdot \exp\left(-\frac{28200}{RT}\right) = 1,0 \cdot 10^{-2} \cdot \exp\left(-\frac{14200}{T}\right), \quad (1)$$

где  $D_{NiGB}^{vac} \equiv D$  – коэффициент диффузии по границам ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ).

Сильная экспоненциальная зависимость коэффициента диффузии от температуры в (1) обуславливает пороговый характер окисления (растворения) канала от уровня тока.

Рассмотрим диффузионный механизм окисления при тонком (плоском) слое окисла. В данном процессе имеются две движущиеся границы: граница окисления,двигающаяся вглубь канала, и граница ухода никелевых вакансий из NiO. Так как процесс окисления лимитируется процессом ухода кислорода из прилегающей к каналу области NiO, то концентрация избытка кислорода в этой области соответствует концентрации его недостатка в канале. Тогда можно считать, что скорости обеих подвижных границ близки, но противоположны по знаку.

Диффузионный поток вакансий  $nv$  ( $n$  и  $v$  – концентрация и скорость никелевых вакансий) описывается выражением:

$$nv = -D \frac{\partial n}{\partial x}, \quad (2)$$

где координату будем отсчитывать от первоначальной границы канала. Уравнение непрерывности при отсутствии химических реакций внутри NiO есть:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \text{div}(nv) = 0. \quad (3)$$

Подставляя (2) в (3), получим диффузионное уравнение:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}. \quad (4)$$

Пусть  $\xi$  – координата границы окисления, ( $-\xi$ ) – координата границы ухода вакансий из NiO (см. рис. 1). Тогда граничные условия уравнения (4) есть  $n(x > \xi) = 0$ ,  $n(x \leq -\xi) = n_o$ , то есть вакансии отсутствуют внутри канала, а их концентрация равна равновесному значению  $n_o$  в глубине NiO до их границы ухода в канал. Аналитическим решением уравнения (4) является [14]:

$$n = n_o - C \cdot F\left(\frac{x + \xi}{2\sqrt{Dt}}\right), \quad (5)$$

где

$$F(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^z e^{-z^2} dz - \text{функция ошибок.}$$

Решение (5) показывает, что концентрация не меняется при пропорциональности координат корню от времени.

Положим  $\xi = \alpha\sqrt{t}$ , тогда

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{\alpha^2}{2\xi}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности, а постоянная  $C$  в (5), определяемая условием  $n(\xi) = 0$ , есть

$$C = \frac{n_o}{F(\alpha/\sqrt{D})}.$$

Для определения  $\alpha$  используем условие на границе окисления:

$$n_o \frac{d\xi}{dt} = -D \frac{\partial n}{\partial x}, \quad (7)$$

которое является следствием (2) при учете того, что недостаток кислорода в канале равен его избытку в окружающем NiO.

Подставляя (5) и (6) в (7), получим трансцендентное уравнение  $\alpha$  от  $D$ :

$$\frac{\alpha}{\sqrt{D}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{\alpha^2}{D}\right)}{\Phi\left(\frac{\alpha}{\sqrt{D}}\right)}. \quad (8)$$

Решением (8) является значение  $\alpha = 0,80 \cdot \sqrt{D}$ , тогда  $\xi = 0,80\sqrt{Dt}$  и

$$\frac{d\xi}{dt} = 0,32 \cdot \frac{D}{\xi},$$

а для времени перекрытия окислом заданной толщины  $r_o$  имеем

$$t_o = 1,56 \frac{r_o^2}{D}.$$

Отметим, что при фиксированном значении концентрации на начальной границе  $n(0,t) = n_o$  аналогичное рассмотрение дает

$$\xi = 1,24 \cdot \sqrt{Dt}, \quad \frac{d\xi}{dt} = 0,769 \cdot \frac{D}{\xi} = 0,62 \cdot \sqrt{\frac{D}{t}}, \quad (9)$$

$$t_o = 0,65 \cdot \frac{r_o^2}{D}.$$

Последние значения совпадают с решениями задачи замерзания воды при постоянной температуре на поверхности [2].

В цилиндрической геометрии аналитические решения уравнения

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \cdot \left( \frac{\partial^2 n}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial n}{\partial r} \right) \quad (10)$$

с граничными условиями, соответствующими окислению цилиндра с наружной поверхности,

отсутствуют даже при постоянной концентрации на поверхности. В задачах теплопроводности имеется приближенное решение для замерзания (или оттаивания) полого цилиндра изнутри с постоянной температурой на внутренней поверхности [1], [2]. В качестве аппроксимации предлагаются квазистационарные решения, когда для распределения по координате используется стационарное решение, а зависимость от времени определяется движением границы замерзания.

Применим этот метод для задачи окисления цилиндрического канала. Пусть  $r_o$  – начальный радиус канала,  $\xi$  – радиус поверхности окисления,  $r_{vac}$  – радиус границы ухода вакансий из NiO, а  $n(\xi) = 0$  и  $n(r_{vac}) = n_o$ . Отметим, что для сохранения потока должно выполняться условие [1]

$$r_{vac}^2 = 2r_o^2 - \xi^2. \quad (11)$$

Решением стационарного уравнения

$$\frac{\partial^2 n}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial n}{\partial r} = 0 \quad (12)$$

будет функция

$$n(r) = n_o \cdot \frac{\ln\left(\frac{r}{\xi}\right)}{\ln\left(\frac{r_{vac}}{\xi}\right)}, \quad (13)$$

а движение внутренней границы определяется условием окисления:

$$n_o \frac{d\xi}{dt} = -D \cdot \frac{\partial n}{\partial r} \Big|_{r=\xi}. \quad (14)$$

Тогда для скорости окисления с учетом (11) получим:

$$\frac{d\xi}{dt} = -\frac{D}{\xi \cdot \ln\left(\frac{r_{vac}}{\xi}\right)} = -\frac{2D}{\xi \cdot \ln\left(\frac{2r_o^2}{\xi^2} - 1\right)}. \quad (15)$$

Интегрируя (15) по  $\xi$  от  $r_o$  до 0, получим время полного окисления канала:

$$t_o = \frac{\ln 2}{2D} \cdot r_o^2 = 0,347 \cdot \frac{r_o^2}{D}. \quad (16)$$

Можно ожидать, что квазистационарное приближение дает завышенное значение (16), так как для установления стационарного состояния (13) требуется дополнительное время.

Подтверждение этому можно получить, переходя в (15) к предельному значению  $\xi \rightarrow r_o$ :

$$\xi \ln\left(\frac{r_{vac}}{\xi}\right) \rightarrow (r_{vac} - \xi) = 2 \cdot (r_o - \xi),$$

что соответствует плоской геометрии. В этом случае

$$\frac{d\xi}{dt} = -\frac{0,5 \cdot D}{(r - \xi)},$$



в то время как точное решение (10) для плоского слоя равно

$$\frac{d\xi}{dt} = -\frac{0,32 \cdot D}{\xi},$$

где  $\xi$  соответствует в цилиндре значению  $(r_0 - \xi)$ .

Для уточнения значений (15) и (16) нами произведено численное решение нестационарного уравнения (10). Введем безразмерные переменные:

$$n' = \frac{n}{n_0}, \quad r' = \frac{r}{r_0}, \quad \xi' = \frac{\xi}{r_0}, \quad \tau = \frac{D}{r_0^2} t.$$

Тогда уравнение (10) и условие (14) запишутся в виде

$$\frac{\partial n'}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 n'}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \cdot \frac{\partial n'}{\partial r'}, \quad (10')$$

$$\frac{d\xi'}{d\tau} = -\frac{\partial n'}{\partial r'} \Big|_{r'=\xi'}. \quad (14')$$

Начальные условия задаются как  $n' = 0$  при  $0 \leq r' < 1$  и  $n' = 1$  при  $r' \geq 1$ . Расчет производился методом конечных разностей на счетной области  $0 \leq r' \leq \sqrt{2}$  с выполнением условия устойчивости  $\Delta\tau < (\Delta r')^2/2$ . На границе окисления концентрация обнулялась, а избыток накапливался до значения  $\Delta n' = 1$ . После этого концентрация начинала рост в этой точке, а граница окисления переносилась в соседнюю точку. Рассчитывались скорость границы окисления и время полного окисления канала.

Результаты вычислений дают значения

$$t_0 = 0,64 \cdot \frac{r_0^2}{D}. \quad (17)$$

Скорость границы окисления при  $\xi \leq r_0$  равна  $\frac{d\xi}{dt} \approx 0,32 \cdot \frac{D}{\xi}$ , а при  $\xi \rightarrow 0$  она немного уменьшается. В то же время аналогичное численное ре-

шение уравнения (4), соответствующее плоской геометрии, дает значения, совпадающие с аналитическим решением (8), (9).

Для сравнения с экспериментом рассмотрим результаты работы [11], где измерялось время переключения из «ON» в «OFF» состояние NiO переключателя с толщиной пленки 60 nm. Сопротивление канала составляло 54  $\Omega$ , что при удельном сопротивлении  $\rho \approx 1 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$  дает исходный радиус канала  $r_0 = 20$  nm. По оценке авторов статьи, температура канала равнялась  $\sim 900$  K, а время переключения  $t_0 = (1 \div 2) \cdot 10^{-3}$  s. Расчет времени полного окисления канала по формуле (17) с коэффициентом диффузии (1) ( $D \approx 1,4 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$  при  $T = 900$  K) дает  $t_0 \approx 1,5 \cdot 10^{-3}$  s, что близко к экспериментально измеренному значению [11].

Таким образом, проведенный анализ показывает, что теплоиндуцированное диффузионное окисление никеля может быть решающим фактором исчезновения металлической проводимости канала и перехода из состояния «ON» в «OFF». Обратный переход (SET) является уже результатом «самозалечивания» канала переключения по схеме мягкого пробоя («soft breakdown») [15] в условиях резкого увеличения напряженности поля и сопротивления структуры. По своей сути механизм этого перехода аналогичен электрической формовке (но происходит при меньших напряжениях) и включает другие, отличные от диффузии эффекты (полевая и ударная ионизация, прыжковая проводимость и т. п.), что требует дальнейших исследований.

В заключение отметим, что диффузионный механизм окисления проводящего канала может быть достаточно универсальным и определять переход RESET в других переключающих структурах, особенно в оксидах на основе переходных металлов (V, Ti, Nb, Ta и др.).

\* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития Петрозаводского государственного университета на 2012–2016 годы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Изд-во технико-теоретической литературы, 1952. 392 с.
2. Carslaw H. S., Jaeger J. C. Conduction of Heat in Solids. 2<sup>nd</sup> ed. Oxford University Press, 1959. 485 p.
3. Fujiwara K., Nemoto T. Resistance switching and formation of a conductive bridge in metal/binary oxide/metal structure for memory devices. *Jap. Journal of applied physics*. 2008. Vol. 47. P. 8.
4. Jung K., Kim Y., Hyunsik W. J., Baeho I., Hong P. J., Lee J., Park J., Lee J. K. Electrically induced conducting nanochannels in an amorphous resistive switching niobium oxide film. *Applied physics letters*. 2010. Vol. 97. P. 233509-1, 233509-3.
5. Karakasidis T., Meyer M. Grain-boundary diffusion of cation vacancies in nickel oxide: mA molecular-dynamics study. *Physics Review B*. 1997 Vol. 55. № 20. P. 13853–13864.
6. Kim C. H., Moon H. B., Min S. S., Jang Y. H., Cho J. H. Nanoscale formation mechanism of conducting filaments in NiO thin films. *Solid State Communication*. 2009. Vol. 149. P. 1611–1615.
7. Klein N. Electrical Breakdown in Solids. *Advances in Electronics and Electron Physics*. New York: Academic Press, 1969. Vol. 26. P. 309–424.
8. Kofstad P. Non-Stoichiometry, Diffusion and Electrical Conductivity in Binary Metal Oxide. New York: Wiley, 1972. 404 p.
9. O'Keefe M., Moore W. J. Diffusion of oxygen in single crystals of nickel oxide. *Journal Physic Chemistry*. 1961. Vol. 65. P. 1438.
10. Russo U., Ielmini D., Cagli C. F., Lacaita A. Self-Accelerated Thermal Dissolution Model for Reset Programming in Unipolar Resistive-Switching Memory (RRAM) Devices. *IEEE Transaction on electron devices*. 2009. Vol. 56. № 2. P. 193–200.

11. Sato Y. K., Kinoshita M., Aoki Y. Sugiyama. Consideration of switching mechanism of binary metal oxide resistive junctions using a thermal reaction model. *Applied Physics Letters*. 2007. Vol. 90. P. 033503.
12. Sawa A. Resistive Switching in Transition Metal-Oxide. *Materials Today*. 2008. Vol. 11. P. 28–36.
13. Son J. Y., Shin Y.-H. Direct observation of conducting filaments on resistive switching of NiO thin films. *Applied Physics Letters*. 2008. Vol. 92. P. 222106.
14. Tichonov A. N., Samarskii A. A. Equations of mathematical physics. Pergamon Press, 1963. 735 p.
15. Toriumi A., Satake H. The boundary between hard- and soft-break-down in ultra-thin silicon dioxide films. *Structure and Electronic Properties of Ultrathin Dielectric Films on Silicon and Related Structures. Materials Research Society Symposium Proceedings*. 2000. Vol. 592. P. 323–329.
16. Yia Zc. L., Wang N., Zhang T., Ren J., Lion J. Effects of anode materials on resistive characteristics of NiO thin films. *Applied Physics Letters*. 2013. Vol. 102. P. 042901.

**Sysun I. V.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

**Sysun V. I.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

**Boriskov P. P.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

### DIFFUSION MECHANISM OF NICKEL OXIDATION IN CONDUCTING CHANNEL OF Pt/NiO/Pt SWITCHING STRUCTURE

A resistive switching effect based on the simple binary metal oxides has attracted considerable attention due to the possibility of its application in new electronic memory chips. A diffusion mechanism of nickel oxidation in the conductive channel of resistive switching memory structure Pt/NiO/Pt is studied. The developed model of this mechanism, built in the cylindrical geometry of the channel, is identical to the familiar model of freezing (or thawing) inside a hollow cylinder with a constant temperature on the inner surface. Numerical solution of a quasi-stationary approximation, which takes into account only the time dependence upon the movement of oxidation boundary, is consistent with the experiment. The analysis shows that the diffusion oxidation may be critical for the extinction of the channel's metallic conductivity in switching structures based on nickel oxide and oxides of other transition metals.

Key words: resistive memory, channel conductance, nickel oxide, diffusion oxidation

#### REFERENCES

1. Lykov A. V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of Heat Conduction]. Moscow, 1952. 392 p.
2. Carslaw H. S., Jaeger J. C. *Conduction of Heat in Solids*. 2<sup>nd</sup> ed. Oxford University Press, 1959. 485 p.
3. Fujiwara K., Nemoto T. Resistance switching and formation of a conductive bridge in metal/binary oxide/metal structure for memory devices. *Jap. Journal of applied physics*. 2008. Vol. 47. P. 8.
4. Jung K., Kim Y., Hyunsik W. J., Baeho I., Hong P. J., Lee J., Park J., Lee J. K. Electrically induced conducting nanochannels in an amorphous resistive switching niobium oxide film. *Applied physics letters*. 2010. Vol. 97. P. 233509-1, 233509-3.
5. Karakasidis T., Meyer M. Grain-boundary diffusion of cation vacancies in nickel oxide: mA molecular-dynamics study. *Physics Review B*. 1997 Vol. 55. № 20. P. 13853–13864.
6. Kim C. H., Moon H. B., Min S. S., Jang Y. H., Cho J. H. Nanoscale formation mechanism of conducting filaments in NiO thin films. *Solid State Communication*. 2009. Vol. 149. P. 1611–1615.
7. Klein N. Electrical Breakdown in Solids. *Advances in Electronics and Electron Physics*. New York: Academic Press, 1969. Vol. 26. P. 309–424.
8. Kofstad P. Non-Stoichiometry, Diffusion and Electrical Conductivity in Binary Metal Oxide. New York: Wiley, 1972. 404 p.
9. O'Keefe M., Moore W. J. Diffusion of oxygen in single crystals of nickel oxide. *Journal Physic Chemistry*. 1961. Vol. 65. P. 1438.
10. Russo U., Ielmini D., Cagli C. F., Lacaita A. Self-Accelerated Thermal Dissolution Model for Reset Programming in Unipolar Resistive-Switching Memory (RRAM) Devices. *IEEE Transaction on electron devices*. 2009. Vol. 56. № 2. P. 193–200.
11. Sato Y. K., Kinoshita M., Aoki Y. Sugiyama. Consideration of switching mechanism of binary metal oxide resistive junctions using a thermal reaction model. *Applied Physics Letters*. 2007. Vol. 90. P. 033503.
12. Sawa A. Resistive Switching in Transition Metal-Oxide. *Materials Today*. 2008. Vol. 11. P. 28–36.
13. Son J. Y., Shin Y.-H. Direct observation of conducting filaments on resistive switching of NiO thin films. *Applied Physics Letters*. 2008. Vol. 92. P. 222106.
14. Tichonov A. N., Samarskii A. A. Equations of mathematical physics. Pergamon Press, 1963. 735 p.
15. Toriumi A., Satake H. The boundary between hard- and soft-break-down in ultra-thin silicon dioxide films. *Structure and Electronic Properties of Ultrathin Dielectric Films on Silicon and Related Structures. Materials Research Society Symposium Proceedings*. 2000. Vol. 592. P. 323–329.
16. Yia Zc. L., Wang N., Zhang T., Ren J., Lion J. Effects of anode materials on resistive characteristics of NiO thin films. *Applied Physics Letters*. 2013. Vol. 102. P. 042901.

Поступила в редакцию 26.03.2015

**МИХАИЛ БОРИСОВИЧ ГИППИЕВ**

аспирант кафедры теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*gippiev@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*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ КЛАССИФИКАЦИИ СИМВОЛОВ В СТЕНОГРАФИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТАХ\***

При дешифровке исторических стенографических документов относительное местоположение символа влияет на его значение. Определяют три позиции: основная, надстрочная или подстрочная. В работе приводятся результаты сравнения четырех алгоритмов классификации символов по их положению методом одинарной аппроксимации, методом двойной аппроксимации, методом одинарной аппроксимации с уменьшением ошибки и методом двойной аппроксимации с уменьшением ошибки. Параметры алгоритмов выбирались экспериментально, используя обучающую выборку. Качество работы алгоритмов определяется пятью показателями: корректность, точность, полнота, F-мера и обобщенная F-мера. На основании обобщенной F-меры лучший результат показал алгоритм классификации символов методом двойной аппроксимации с уменьшением ошибки. Кроме того, для каждого алгоритма классификации определены оптимальные настроечные параметры, при которых среднее значение обобщенной F-меры на контрольной выборке является максимальным, и для каждого алгоритма определена длительность его обучения.

Ключевые слова: стенографический документ, алгоритм классификации символов, надстрочные и подстрочные символы, метод аппроксимации

**ВВЕДЕНИЕ**

Одним из этапов при распознавании рукописного текста является сегментация (выделение) строк. Для решения данной задачи предлагаются различные методы. При распознавании печатных текстов самым популярным является метод, связанный с построением проекции точек символов на ось, перпендикулярную строкам текста. Однако в случае рукописных документов при использовании данного метода возникают сложности, связанные с тем, что строки могут располагаться под некоторым углом, интервал между соседними строками может варьироваться и т. д. Поэтому при сегментации строк в рукописных документах используются либо его модификация, либо иные методы.

В работе [7] предлагается алгоритм, который динамически строит разделяющую линию между соседними строками. Для нахождения координат этой линии используется трехэтапный алгоритм. Первый этап алгоритма заключается в рекурсивном построении разделяющей линии между двумя строками с достаточно большим интервалом между ними. В качестве начальных точек разделяющих линий берутся локальные минимумы проекции точек символов на границу

изображения. Второй и третий этапы алгоритма заключаются в реализации обхода встречающихся на пути разделяющей линии символов. На втором этапе для этой цели используется огибание части встретившегося символа по контуру в случае, если огибаемая часть достаточно мала, если же этого сделать нельзя, тогда на третьем этапе алгоритма для нахождения точек разделяющей линии используется метод, суть которого заключается в следующем. Изображение с текстом делится на некоторое количество вертикальных прямоугольных секций. Внутри каждой секции строится проекция точек символов на границу этой секции, и локальные минимумы проекции являются точками, лежащими на разделяющей линии между двумя соседними строками.

Метод сегментации строк с разделением распознаваемого изображения на секции представлен в [5]. В данной работе дана модификация этого метода для того случая, если строки расположены под некоторым углом (необязательно одинаковым). Кроме того, при использовании рассматриваемого метода может возникнуть проблема, связанная с недостаточным количеством точек символов для какой-либо строки в секции,

например, это может произойти, если секция попадает на разрыв между двумя соседними символами строки. Тогда проекция для данной секции не отобразит наличие существующей строки. Для решения этой проблемы в работе [10] предлагается для каждой секции использовать сглаживающую проекцию, которая зависит от количества точек символов в соседних секциях.

При использовании методов, связанных с построением проекций, предполагается, что между строками есть четко выраженные интервалы и количество пересечений строк достаточно мало. Однако в стенограммах, ввиду того что размеры символов сильно варьируются, есть надстрочные и подстрочные символы, каждая отдельная строка может иметь произвольную форму, четко выделить интервал между двумя соседними строками не всегда возможно, поэтому в случае стенографических документов использовать рассмотренные выше методы нецелесообразно.

В работах [8], [9] рассматриваются метод выделения строк с помощью группировки компонентов изображения, а также метод выделения строк с помощью размытия исходного изображения документа. Метод группировки заключается в том, что отдельные компоненты (наборы связанных пикселей) на изображении соединяются согласно их геометрическим и топологическим характеристикам. Общая стратегия метода состоит в сопоставлении каждой компоненте соответствующей точки в некотором пространстве характеристик (например, центр тяжести) и в расчете расстояний между точкой, соответствующей данной компоненте, и точками, соответствующими соседним компонентам. Две компоненты объединяются, если расстояние между соответствующими им точками не превышает заданного вручную либо, например, полученного путем обучения на заранее подготовленной коллекции документов [11]. Метод размытия заключается в том, что вначале к исходному изображению применяется эффект размытия (например, по Гауссу [6]), таким образом каждая строка преобразуется в сплошную закрашенную область, после чего для выделения отдельных строк применяются хорошо известные методы сегментации изображений.

Методы, связанные с размытием исходного изображения документа, также сильно зависят от интервалов между строками, так как если будет большое количество пересечений строк, то на размытом изображении будет весьма трудно выделить отдельные строки.

Среди публикаций на русском языке, описывающих проблемы сегментации строк, можно выделить монографию Л. А. Местецкого, в которой предложен метод распрямления строк на основе гранично-скелетного представления бинарного изображения сканированного документа [3]. Суть данного метода заключается в использовании

гранично-скелетного представления бинарного изображения сканированного документа. Для распрямления используется внешний скелет изображения, под которым понимается скелет области, внешней границей которой является граница документа, а внутренними отверстиями – контуры изображенных в документе букв. По сути дела, речь идет о негативном изображении документа – белые буквы на черном фоне. Основная идея предлагаемого подхода заключается в том, что во внешнем скелете документа можно легко выделить ветви, лежащие между соседними текстовыми строками. Эти ветви можно использовать, чтобы аппроксимировать деформацию межстрочных пробелов на изображении. Затем по аппроксимации отдельных межстрочных пробелов можно построить аппроксимацию искажения всего документа. Данный метод может быть использован в том случае, если оригинальный текст содержал строго горизонтально ориентированные строки, то есть этот метод является некоторой корректировкой отсканированного документа, вследствие чего он также не может быть использован для выделения строк в рукописных документах, а тем более в стенограммах.

Наиболее применимыми методами для сегментации строк в стенографических документах являются методы группировки компонент, к которым относится предложенный нами алгоритм [1] распознавания строк методом построения графа связей. Его идея заключается в формировании списка связей, где для каждой связи заданы первая компонента, вторая компонента и расстояние между компонентами. Каждая компонента помещается в отдельную строку, и для каждой связи из списка выполняются следующие действия: 1) если компоненты, входящие в текущую связь, можно соединить, то есть для первой компоненты не задана следующая за ней компонента, а для второй компоненты не задана предшествующая, то объединяются строки, содержащие эти компоненты; 2) иначе, если компоненты соединить нельзя, то находятся вертикальные интервалы между компонентами строк, содержащими компоненты, входящие в связь, и если все интервалы не превышают заданный максимальный интервал, тогда объединяются строки; 3) выполняется переход к следующей связи. В отличие от других методов, на вход которых подается исходное изображение документа, для алгоритма распознавания строк методом построения графа связей входными данными является информация о месторасположении каждой отдельной компоненты, что облегчает задачу. Под компонентой в данном случае будет пониматься отдельный символ стенографического документа.

Кроме того, при распознавании стенографических документов возникает задача определения типа (основной, надстрочный и подстрочный) каждого символа в строке.

В работе [2] описаны предложенные нами алгоритмы классификации символов методами одинарной и двойной аппроксимации. Основная идея алгоритмов состоит в том, что строки в стенографических документах имеют форму, которую можно аппроксимировать полиномом некоторой степени. В данной статье рассматривается модификация этих алгоритмов, которая заключается в последовательном уменьшении ошибки аппроксимации за счет исключения части аппроксимируемых точек.

Кроме того, в статье приводятся результаты сравнения алгоритмов классификации без модификации и модифицированных алгоритмов классификации символов на основе заранее построенной контрольной выборки. При сравнении алгоритмов использовались такие оценки, как корректность (отношение числа правильно классифицированных символов к общему числу символов), точность, полнота, F-мера для каждого типа символов и обобщенная F-мера, которая представляет собой среднее значение оценок F-меры для каждого типа символов.

Сравнение алгоритмов проводилось в три этапа. Первый этап заключается в нахождении для каждого алгоритма оптимальных входных параметров (параметров, при которых достигается максимальное значение обобщенной F-меры) на каждом стенографическом документе из контрольной выборки и последующем сравнении оценок работы алгоритмов при найденных параметрах. Второй этап заключается в нахождении для каждого алгоритма входных параметров, при которых среднее значение оценок обобщенной F-меры на всех стенографических документах из контрольной выборки будет максимальным, и последующем сравнении средних значений обобщенной F-меры при найденных параметрах для каждого алгоритма. Третий этап заключается в определении скорости обучения каждого алгоритма на каждом стенографическом документе из контрольной выборки. Основными показателями скорости обучения алгоритмов классификации символов являются количество строк, на которых проведено обучения, контрольного стенографического документа и значение обобщенной F-меры, которое показал обученный алгоритм на данном документе.

Так как алгоритмы классификации символов определяют оценку вероятности, с которой каждый символ относится к тому или иному типу, было принято считать, что символ является основным, надстрочным или подстрочным, если вероятность данного события превышает 0,5. Кроме того, разбиение символов на строки выполнялось с помощью описанного выше алгоритма распознавания строк методом построения графа связей.

## АЛГОРИТМЫ КЛАССИФИКАЦИИ СИМВОЛОВ МЕТОДАМИ ОДИНАРНОЙ И ДВОЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ

Алгоритмы детально рассмотрены в работе [2], поэтому приведем лишь краткое описание принципа их работы. После распознавания строки строится одна линия аппроксимации по центрам прямоугольников, описывающих символы строки, в случае алгоритма классификации символов методом одинарной аппроксимации, и две линии аппроксимации по центрам верхних и нижних сторон прямоугольников, в которые вписаны символы строки, в случае алгоритма классификации символов методом двойной аппроксимации. После чего в зависимости от расположения символов строки относительно построенной(ых) линии(ий) аппроксимации рассчитывается оценка вероятности принадлежности символа к тому или иному типу.

## АЛГОРИТМЫ КЛАССИФИКАЦИИ СИМВОЛОВ МЕТОДАМИ ОДИНАРНОЙ И ДВОЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ С УМЕНЬШЕНИЕМ ОШИБКИ

Модифицированные алгоритмы классификации символов отличаются от немодифицированных только на этапе построения линии аппроксимации. Рассмотрим данный этап.

Вводятся два входных параметра алгоритма: *error* – максимальный процент, на который может уменьшиться ошибка аппроксимации, и *exclusion* – максимальный процент исключенных точек от общего числа аппроксимируемых точек.

Пусть  $P$  – множество аппроксимируемых точек.

$$P = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_{|P|}, y_{|P|})\}. \quad (1)$$

Выполняются следующие действия:

1. Строится полиномиальная аппроксимирующая функция  $\varphi_P(x)$  по точкам из множества  $P$ ;
2. Находится точка  $(x_j, y_j)$ , где 
$$j = \arg \max_{i \in 1..|P|} \{y_i - \varphi_P(x_i)\}; \quad (2)$$
3. Определяется множество  $P'$ , которое получается из множества  $P$  исключением из него точки  $(x_j, y_j)$ ;
4. Строится полиномиальная аппроксимирующая функция  $\varphi_{P'}(x)$  по точкам из множества  $P'$ ;
5. Определяется ошибка

$$E_1 = \sum_{i \in 1..|P|, i \neq j} |y_i - \varphi_P(x_i)|; \quad (3)$$

6. Определяется ошибка

$$E_2 = \sum_{i \in 1..|P'|} |y_i - \varphi_{P'}(x_i)|; \quad (4)$$

7. Если выполняется неравенство  $(E_1 - E_2) / E_1 \leq \text{error} / 100$  и процент исключенных точек не превышает *exclusion*, тогда переходим на

второй шаг, при этом в качестве множества  $P$  будет выступать множество  $P'$ , а в качестве аппроксимирующей функции  $\varphi_P(x)$  – функция  $\varphi_{P'}(x)$ .

Полученная в ходе выполнения вышеприведенных действий функция  $\varphi_P(x)$  будет определять линию аппроксимации.

#### СРАВНЕНИЕ ЛУЧШИХ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ КЛАССИФИКАЦИИ СИМВОЛОВ

Эксперимент проводился на четырех исторических стенографических документах, написанных А. Сниткиной под диктовку Ф. М. Достоевского. Эти документы были размечены вручную. Для каждого документа были найдены лучшие результаты работы каждого из четырех алгоритмов классификации символов, включающих алгоритм классификации символов методом одинарной аппроксимации, алгоритм классификации символов методом двойной аппроксимации, алгоритм классификации символов методом одинарной аппроксимации с уменьшением ошибки и алгоритм классификации символов методом двойной аппроксимации с уменьшением ошибки. Критерием, по которому выбирается лучший результат, является обобщенная F-мера.

В табл. 1 представлены оценки лучших результатов работы алгоритмов классификации символов для первой стенограммы, а также входные параметры, при которых достигаются эти результаты. К входным параметрам алгоритмов классификации символов относятся:

- $m$  – степень аппроксимирующего полинома (используется в каждом алгоритме);
- $\lambda$  – параметр, используемый при определении вероятности того, что символ является ос-

новным либо неосновным (надстрочным или подстрочным), в алгоритме классификации символов методом одинарной аппроксимации и алгоритме классификации символов методом одинарной аппроксимации с уменьшением ошибки,

а также рассмотренные выше параметры (*error*, *exclusion*).

Как видно из представленных в табл. 1 оценок, лучший результат показал алгоритм классификации символов методом двойной аппроксимации с уменьшением ошибки.

#### СРАВНЕНИЕ МАКСИМАЛЬНЫХ СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ ОБОБЩЕННОЙ F-МЕРЫ ДЛЯ ВСЕХ ДОКУМЕНТОВ

Для каждого алгоритма классификации символов были найдены максимальные средние значения обобщенной F-меры на всех стенографических документах из контрольной выборки, а также входные параметры, при которых достигаются эти значения (табл. 2).

Алгоритм классификации символов методом двойной аппроксимации с уменьшением ошибки показал самые высокие средние значения обобщенной F-меры.

#### СРАВНЕНИЕ ОБЪЕМА ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ АЛГОРИТМОВ КЛАССИФИКАЦИИ СИМВОЛОВ

Был проведен эксперимент по определению объема обучающей выборки (скорости обучения) алгоритмов классификации символов на каждом стенографическом документе. Оценка скорости обучения алгоритма заключалась

Таблица 1

Оценки лучших результатов работы алгоритмов классификации символов для первой стенограммы

Алгоритм	Методом одинарной аппроксимации			Методом двойной аппроксимации		
Параметры	$m = 4, \lambda = 0,0682$			$m = 3$		
Обобщенная F-мера	0,5087			0,5607		
Корректность	0,724			0,8368		
Тип символов	Осн.	Надстр.	Подстр.	Осн.	Надстр.	Подстр.
Полнота	0,7838	<b>0,5333</b>	0,4854	<b>0,952</b>	0,2667	0,4078
Точность	0,8651	0,1143	0,5495	0,8617	0,2	<b>0,84</b>
F-мера	0,8225	0,1882	0,5155	0,9046	0,2286	0,549
Алгоритм	Методом одинарной аппроксимации с уменьшением ошибки			Методом двойной аппроксимации с уменьшением ошибки		
Параметры	$m = 4, \lambda = 0,0386, exclusion = 50, error = 80$			$m = 1, exclusion = 30, error = 10$		
Обобщенная F-мера	0,5381			<b>0,6244</b>		
Корректность	0,8056			<b>0,8559</b>		
Тип символов	Осн.	Надстр.	Подстр.	Осн.	Надстр.	Подстр.
Полнота	0,9279	0,3333	0,3301	0,9432	0,3333	<b>0,5437</b>
Точность	0,8483	0,2778	0,5965	<b>0,8871</b>	0,3125	0,7671
F-мера	0,8863	0,303	0,425	<b>0,9143</b>	0,3226	<b>0,6364</b>

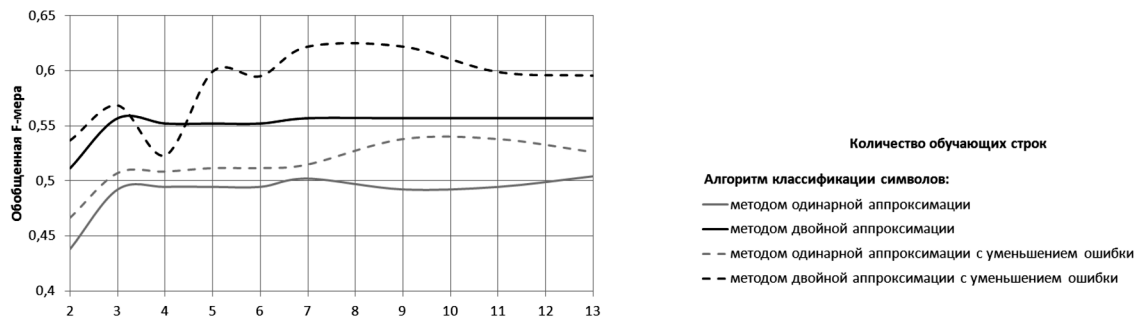
Таблица 2

Лучшие средние значения обобщенной F-меры алгоритмов классификации символов

Параметры				Обобщенная F-мера				
m	$\lambda$	error	exclusion	Стенограмма				Среднее значение
				№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	
Алгоритм классификации символов методом одинарной аппроксимации								
				Максимальные значения F-меры				
				<b>0,5087</b>	<b>0,6744</b>	<b>0,5854</b>	<b>0,6945</b>	
4	0,0473			0,4696	0,5831	0,5661	0,6728	0,5729
4	0,0474			0,4696	0,5831	0,5661	0,6728	0,5729
4	0,047			0,4686	0,5831	0,5661	0,6728	0,57265
4	0,0471			0,4655	0,5831	0,5661	0,6728	0,571875
4	0,0472			0,4655	0,5831	0,5661	0,6728	0,571875
Алгоритм классификации символов методом двойной аппроксимации								
				Максимальные значения F-меры				
				<b>0,5607</b>	<b>0,7172</b>	<b>0,6506</b>	<b>0,6756</b>	
2				0,5591	0,6886	0,5462	0,6756	0,617375
4				0,5524	0,6246	0,6287	0,6405	0,61155
1				0,5572	0,7172	0,4914	0,675	0,6102
5				0,5572	0,6	0,6506	0,6104	0,60455
3				0,5607	0,6558	0,5618	0,6344	0,603175
Алгоритм классификации символов методом одинарной аппроксимации с уменьшением ошибки								
				Максимальные значения F-меры				
				<b>0,5381</b>	<b>0,6768</b>	<b>0,6254</b>	<b>0,6945</b>	
4	0,0481	15	15	0,5238	0,5921	0,5878	0,6561	0,58995
4	0,0479	15	15	0,5201	0,5921	0,5878	0,6561	0,589025
4	0,048	15	15	0,5201	0,5921	0,5878	0,6561	0,589025
4	0,0481	15	10	0,5237	0,5921	0,5887	0,6508	0,588825
4	0,0479	15	10	0,5199	0,5921	0,5887	0,6508	0,587875
Алгоритм классификации символов методом двойной аппроксимации с уменьшением ошибки								
				Максимальные значения F-меры				
				<b>0,6244</b>	<b>0,7557</b>	<b>0,6612</b>	<b>0,7679</b>	
1		20	60	0,5855	0,7318	0,5274	0,7679	0,65315
1		20	65	0,5855	0,7318	0,5274	0,7679	0,65315
1		20	70	0,5855	0,7318	0,5274	0,7679	0,65315
1		20	75	0,5855	0,7318	0,5274	0,7679	0,65315
1		20	80	0,5855	0,7318	0,5274	0,7679	0,65315

в том, что на некотором количестве строк контрольного стенографического документа выполнялся поиск лучшего результата работы алгоритма, то есть результата, при котором достигается максимальное значение обобщенной F-меры. После чего при тех же входных параметрах, при которых был достигнут лучший результат на части строк, выполнялся запуск алгоритма на всем контрольном документе, при этом

фиксирувалось значение обобщенной F-меры. Таким образом, скорость обучения определяется количеством строк, используемых при обучении, и конечным значением обобщенной F-меры на всем стенографическом документе. На рисунке представлены графики зависимости значения обобщенной F-меры от количества обучающих строк для первой стенограммы.



Графики зависимости значения обобщенной F-меры от количества обучающих строк для первой стенограммы

Как видно из представленных графиков, лучший результат, начиная с пятой строки, показал алгоритм классификации символов методом двойной аппроксимации с уменьшением ошибки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в статье алгоритмы будут реализованы в создаваемой компьютерной программе для распознавания исторических стенограмм [4].

\* 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. № 4 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.science-education.ru/110-9725](http://www.science-education.ru/110-9725)
2. Гиппиев М. Б., Рогов А. А. Классификация символов в стенографических документах на основные, надстрочные и подстрочные // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2014. № 8 (145). Т. 2. С. 115–118.
3. Местецкий Л. М. Непрерывная морфология бинарных изображений: фигуры, скелеты, циркуляры. М.: Физматлит, 2009. 227 с.
4. Рогов А. А., Скабин А. В., Штеркель И. А. Автоматизированная информационная система распознавания исторических рукописных документов // Информационная среда ВУЗА XXI века: Материалы VI Междунар. науч. конф. Куопио (Финляндия), 4–10 декабря 2012. Петрозаводск, 2012. С. 127–130.
5. Var-Yosef I., Hagbi N., Kedem K., Dinstein I. Line segmentation for de-graded handwritten historical documents // Proceedings of the 2009 International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR). 2009. P. 1161–1165.
6. Du X., Pan W., Bui T. D. Text line segmentation in handwritten documents using Mumford-Shah model // Online Conference Proceedings for the 11th International Conference on Frontiers in Handwriting Recognition. 2008. Available at: <http://www.iapr-tcl1.org/archive/icfhr2008/Proceedings/papers/cr1132.pdf>
7. Gao Y., Ding X., Liu C. A multi-scale text line segmentation method in freestyle handwritten documents // Proceedings of the 2011 International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR). 2011. P. 643–647.
8. Katsouros V., Papavassiliou V. Segmentation of handwritten document images into text lines // Image Segmentation. 2011. Available at: <http://www.intechopen.com/books/image-segmentation/segmentation-of-handwritten-document-images-into-text-lines>
9. Likforman-Sulem L., Zahour A., Taconet B. Text line segmentation of historical documents: a survey // International Journal of Document Analysis and Recognition (IJ DAR). 2007. Vol. 9 (2-4). P. 123–138.
10. Papavassiliou V., Stafylakis T., Katsouros V., Carayannis G. Handwritten document image segmentation into text lines and words // Pattern Recognition. 2010. Vol. 43 (1). P. 369–377.
11. Yin F., Liu C.-L. Handwritten text line segmentation by clustering with distance metric learning // Online Conference Proceedings for the 11th International Conference on Frontiers in Handwriting Recognition. 2008. Available at: <http://www.iapr-tcl1.org/archive/icfhr2008/Proceedings/papers/cr1022.pdf>

Gippiev M. B., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
Rogov A. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

## EXPERIMENTAL COMPARISON OF ALGORITHMS FOR SYMBOLS' CLASSIFICATION IN SHORTHAND DOCUMENTS

A relative position of the symbol influences its meanings. This dependence was revealed in the process of decoding historic shorthand written documents. There are three positions: basic, superscript, or subscript. We present a comparison of the four algorithms for symbols' classification based on the single approximation method, double approximation method, single approximation method with the error decrease, and the double approximation method with the error decrease. Parameters of the algorithms were



chosen experimentally using a validation set. The performance level of the algorithms was measured in terms of accuracy, precision, recall, F-measure, and summarized F-measure. Based on the summarized F-measure, the best result was achieved with the algorithm for symbols' classification by double approximation method with the error decrease. We identified parameters for each algorithm in which the summarized F-measure is maximized for the validation data. We also identified learning duration period for each algorithm.

Key words: shorthand document, algorithm of symbols classification, superscript and subscript symbols, approximation method

#### REFERENCES

1. Gippiyev M. B., Zhukov A. V., Rogov A. A., Skabin A. V. Recognition of lines in historical handwritten documents [Raspoznavanie strok v stenograficheskikh dokumentakh]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2013. № 4. Available at: [www.science-education.ru/110-9725](http://www.science-education.ru/110-9725)
2. Gippiyev M. B., Rogov A. A. Classification of symbols in shorthand documents into basic, superscript and subscript [Klassifikatsiya simvolov v stenograficheskikh dokumentakh na osnovnyye, nadstrochnyye i podstrochnyye]. *Uchenyye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennyye i tekhnicheskyye nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2014. № 8 (145). Vol. 2. P. 115–118.
3. Mestetskiy L. M. *Nepreryvnaya morfologiya binarnykh izobrazheniy: figury, skelety, tsirkulyary* [Continuous morphology of binary images: figures, skeletons, circulars]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 227 p.
4. Rogov A. A., Skabin A. V., Shterkel' I. A. Automated information system for deciphering historical shorthand reports [Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema raspoznavaniya istoricheskikh rukopisnykh dokumentov]. *Informatsionnaya sreda VUZA XXI veka*. Petrozavodsk, 2012. P. 127–130.
5. Bar-Yosef I., Hagbi N., Kedem K., Dinstein I. Line segmentation for de-graded handwritten historical documents // Proceedings of the 2009 International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR). 2009. P. 1161–1165.
6. Du X., Pan W., Bui T. D. Text line segmentation in handwritten documents using Mumford-Shah model // Online Conference Proceedings for the 11th International Conference on Frontiers in Handwriting Recognition. 2008. Available at: <http://www.iapr-tc11.org/archive/icfhr2008/Proceedings/papers/cr1132.pdf>
7. Gao Y., Ding X., Liu C. A multi-scale text line segmentation method in freestyle handwritten documents // Proceedings of the 2011 International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR). 2011. P. 643–647.
8. Katsouros V., Papavassiliou V. Segmentation of handwritten document images into text lines // Image Segmentation. 2011. Available at: <http://www.intechopen.com/books/image-segmentation/segmentation-of-handwritten-document-images-into-text-lines>
9. Likforman-Sulem L., Zahour A., Taconet B. Text line segmentation of historical documents: a survey // International Journal of Document Analysis and Recognition (IJ DAR). 2007. Vol. 9 (2-4). P. 123–138.
10. Papavassiliou V., Stafylakis T., Katsouros V., Carayannis G. Handwritten document image segmentation into text lines and words // Pattern Recognition. 2010. Vol. 43 (1). P. 369–377.
11. Yin F., Liu C. - L. Handwritten text line segmentation by clustering with distance metric learning // Online Conference Proceedings for the 11th International Conference on Frontiers in Handwriting Recognition. 2008. Available at: <http://www.iapr-tc11.org/archive/icfhr2008/Proceedings/papers/cr1022.pdf>

Поступила в редакцию 21.05.2015

АНАСТАСИЯ ВИКТОРОВНА МОЧАЛОВА  
соискатель кафедры прикладной математики и кибернетики  
математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
stark345@gmail.com

## СОЗДАНИЕ И ПОПОЛНЕНИЕ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА\*

Автоматическое создание и пополнение терминологических систем на сегодняшний день является актуальной задачей. Это связано с тем, что подобные системы применяются для решения широкого спектра задач, связанных с анализом текстовой информации. Часто решение таких задач требует постоянного пополнения терминологических систем (терминосистем) актуальной информацией. В работе предлагается способ автоматического пополнения терминосистем с помощью алгоритма наложения семантических цепочек, специальным образом получаемых из набора семантических зависимостей. Эти семантические зависимости строит семантический анализатор по каждому анализируемому предложению входного русскоязычного текста. Определяются условия формирования семантических цепочек, а также предлагается алгоритм их наложения. Преимущество такого способа пополнения терминосистемы состоит в том, что в качестве анализируемых текстов могут использоваться любые русскоязычные тексты, содержащие проверенную, непротиворечивую информацию, а не только энциклопедические и толковые словари, или готовые онтологии, что позволяет вносить в систему информацию из новейших текстовых источников, например из научных статей, книг, докладов, новостных и аналитических обзоров.

Ключевые слова: терминосистемы, пополнение терминосистем, семантические отношения, семантический анализатор

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время уже существует достаточно большое количество различных терминологических систем. Такие системы могут использоваться как самостоятельно (например, в системах автоматических языковых переводов, в диалоговых, вопросно-ответных, поисковых системах и др.), так и в качестве составляющей более высокоуровневых хранилищ информации, например онтологий.

Одна из важнейших проблем, возникающих при использовании терминосистем, заключается в том, что данные, содержащиеся в них, должны соответствовать действительности: окружающий мир постоянно изменяется, что влечет за собой интенсивный рост объема информации. Для того чтобы уже созданные терминологические системы были актуальными, необходимо постоянно пополнять их новыми реальными данными.

На сегодняшний день имеются попытки автоматизировать процесс создания и пополнения терминосистем. Один из самых распространенных способов пополнения терминосистем базируется на использовании словарных определений. Также существует онтологический подход к построению терминосистем.

Однако большинство терминологических систем создается вручную (примерами подобных систем могут служить системы, особенности построения которых описаны в работах [6], [7]), что зачастую вызывает непреодолимые трудно-

сти в силу крайне большого объема обрабатываемых информационных материалов и малого количества специалистов, способных выполнить подобную работу, или же дороговизны оплаты их труда. Поэтому задача автоматизации пополнения терминосистем в настоящее время является актуальной.

### СПОСОБЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОПОЛНЕНИЯ ТЕРМИНОСИСТЕМ

Один из самых распространенных способов автоматического пополнения терминологических систем базируется на анализе словарных определений. При таком подходе в терминосистему добавляются сущности и тип их связи, найденные с помощью шаблонного поиска в словарном определении. Например, если требуется собрать все возможные виды строительных инструментов, то поиск в словаре производится по шаблонам вида «X является разновидностью строительных инструментов, которые...», «X – это строительный инструмент, используемый для...», «X – вид строительного инструмента, применяемый с целью...» и т. д. Подобные шаблоны поиска могут формироваться как вручную, так и автоматически с помощью самообучающихся программ [9]. К примеру, идея автоматического пополнения терминологической системы, являющейся основной составляющей онтологии, подробно описывается в работах [15], [17], [18]. Автор работы [15], оценивая методы автоматического

пополнения терминологических систем в рамках онтологий, утверждает, что изучение результатов, полученных на двух основных направлениях – *Ontology learning from texts* и *Ontology learning from machine-readable dictionaries*, а также собственный опыт привели его к выводу, что на данном этапе наиболее перспективна с точки зрения получения практических результатов технология, основанная на анализе и формализации определений, содержащихся в традиционных энциклопедических и толковых словарях. Автор работы [15] указывает на наличие отечественных работ, ориентированных на пополнение терминологических систем, находящихся в составе онтологий, на основе русскоязычных текстов. Примерами таких работ могут служить работы наших соотечественников А. Е. Ермакова [4], И. А. Минакова [8], В. И. Пекара [14], А. Нечипоренко и А. Русина [13].

Другой способ автоматизации пополнения терминосистем базируется на использовании онтологий. Например, автор работы [1] описывает онтологический подход к построению терминосистем. В работе [3] на примере терминологии логистики описывается способ создания терминосистем с помощью онтологий.

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ СОЗДАНИЕ И ПОПОЛНЕНИЕ ТЕРМИНОСИСТЕМЫ

### Терминология

**Терминосистема** – упорядоченное множество терминов с зафиксированными отношениями между ними, отражающими отношения между называемыми этими терминами понятиями [2]. Терминосистему можно представить в виде ориентированного графа, узлами которого являются термины, а направленные ребра соответствуют семантическим зависимостям, связывающим эти термины.

**Семантическая зависимость** – некая универсальная связь, усматриваемая носителем языка в тексте. Эта связь бинарна, то есть она идет от одного семантического узла к другому узлу [16]. Будем говорить, что два различных слова  $\alpha$  и  $\beta$  из одного предложения связывает семантическая зависимость с именем  $R$  (обозначим  $R(\alpha, \beta)$ ), если между  $\alpha$  и  $\beta$  существует некая универсальная бинарная связь.

**Семантическая сеть** – информационная модель предметной области, имеющая вид ориентированного графа, вершины которого соответствуют объектам предметной области, а дуги (ребра) задают отношения между ними. Объектами могут быть понятия, события, свойства, процессы [20].

**Семантическим анализатором** назовем программу, автоматически создающую базу данных, хранящую анализируемый текст в виде семантической сети.

**Факт** – достоверное знание, истинность которого доказана [5]. Предполагается, что на вход семантическому анализатору подаются тексты, истинность содержания которых не подлежит сомнению, поэтому в качестве фактов предлагается использовать определенные наборы семантических отношений между словами, словосочетаниями и другими синтаксическими единицами этих текстов на русском языке. О том, как именно формируются эти наборы, будет изложено далее. Подобное определение факта предложено в работе [12], где за факт принята семантическая зависимость, связывающая два термина.

### Связные семантические отношения

Рассмотрим все возможные варианты соотношений (с точки зрения точного совпадения и несовпадения) между аргументами двух семантических зависимостей  $R_1(\alpha_1, \beta_1)$  и  $R_2(\alpha_2, \beta_2)$  (см. табл. 1).

В табл. 1 показано, что случай, когда совпадают аргументы более чем одной из четырех рассматриваемых пар, невозможен. Это связано с тем, что семантическая зависимость не может связывать два одинаковых аргумента, так же как не может быть двух зависимостей, связывающих одни и те же аргументы, расположенные в инверсном порядке, или двух различных семантических зависимостей, связывающих одни и те же аргументы. Другими словами, не существует  $R(\alpha, \alpha)$ , так же как не может существовать  $R_1(\alpha_1, \beta_1)$ , если есть  $R_2(\beta_1, \alpha_1)$  и не может быть таких различных  $R_1$  и  $R_2$ , для которых будет верно как  $R_1(\alpha_1, \beta_1)$ , так и  $R_2(\alpha_1, \beta_1)$  (случай когда  $R_1 = R_2$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2$  и  $\beta_1 = \beta_2$ , очевидно, тоже рассматривать бессмысленно). Таким образом, имеет смысл рассматривать лишь те варианты соотношений между аргументами семантических зависимостей  $R_1(\alpha_1, \beta_1)$  и  $R_2(\alpha_2, \beta_2)$ , которые в табл. 1 отмечены как возможные случаи.

Пару семантических отношений  $R_1(\alpha_1, \beta_1)$  и  $R_2(\alpha_2, \beta_2)$  назовем связной, если выполнено одно из четырех следующих условий:

$$(\alpha_1 \neq \alpha_2) \& (\beta_1 \neq \beta_2) \& (\alpha_1 \neq \beta_2) \& (\beta_1 = \lambda_2) \quad (1)$$

$$(\alpha_1 \neq \alpha_2) \& (\beta_1 \neq \beta_2) \& (\alpha_1 = \beta_2) \& (\beta_1 \neq \lambda_2) \quad (2)$$

$$(\alpha_1 \neq \alpha_2) \& (\beta_1 = \beta_2) \& (\alpha_1 \neq \beta_2) \& (\beta_1 \neq \lambda_2) \quad (3)$$

$$(\alpha_1 = \alpha_2) \& (\beta_1 \neq \beta_2) \& (\alpha_1 \neq \beta_2) \& (\beta_1 \neq \lambda_2) \quad (4)$$

**Пример 1:** Рассмотрим анализируемое предложение: «Скачет, мчится по пыльной дороге уставший всадник». Для этого предложения будут составлены семантические связи:

- *Основа (всадник, мчаться)* (R1)

- *Основа (всадник, скакать)* (R2)

- *Характеристика действия (скакать, быстро)* (R3)

- *Местоположение (скакать, по дороге)* (R4)

- *Местоположение (мчаться, по дороге)* (R5)

- *Признак (дорога, пыльный)* (R6)

Таблица 1

Соотношение между аргументами семантических зависимостей  $R_1(\alpha_1, \beta_1)$  и  $R_2(\alpha_2, \beta_2)$ 

№	Соотн. между $\alpha_1$ и $\alpha_2$	Соотн. между $\beta_1$ и $\beta_2$	Соотн. между $\alpha_1$ и $\beta_2$	Соотн. между $\beta_1$ и $\alpha_2$	Выводы
1	$\alpha_1 \neq \alpha_2$	$\beta_1 \neq \beta_2$	$\alpha_1 \neq \beta_2$	$\beta_1 \neq \alpha_2$	Недостаточно информации
2	$\alpha_1 \neq \alpha_2$	$\beta_1 \neq \beta_2$	$\alpha_1 \neq \beta_2$	$\beta_1 = \alpha_2$	<b>Возможный случай № 1</b>
3	$\alpha_1 \neq \alpha_2$	$\beta_1 \neq \beta_2$	$\alpha_1 = \beta_2$	$\beta_1 \neq \alpha_2$	<b>Возможный случай № 2</b>
4	$\alpha_1 \neq \alpha_2$	$\beta_1 \neq \beta_2$	$\alpha_1 = \beta_2$	$\beta_1 = \alpha_2$	Противоречие
5	$\alpha_1 \neq \alpha_2$	$\beta_1 = \beta_2$	$\alpha_1 \neq \beta_2$	$\beta_1 \neq \alpha_2$	<b>Возможный случай № 3</b>
6	$\alpha_1 \neq \alpha_2$	$\beta_1 = \beta_2$	$\alpha_1 \neq \beta_2$	$\beta_1 = \alpha_2$	Противоречие
7	$\alpha_1 \neq \alpha_2$	$\beta_1 = \beta_2$	$\alpha_1 = \beta_2$	$\beta_1 \neq \alpha_2$	Противоречие
8	$\alpha_1 \neq \alpha_2$	$\beta_1 = \beta_2$	$\alpha_1 = \beta_2$	$\beta_1 = \alpha_2$	Противоречие
9	$\alpha_1 = \alpha_2$	$\beta_1 \neq \beta_2$	$\alpha_1 \neq \beta_2$	$\beta_1 \neq \alpha_2$	<b>Возможный случай № 4</b>
10	$\alpha_1 = \alpha_2$	$\beta_1 \neq \beta_2$	$\alpha_1 \neq \beta_2$	$\beta_1 = \alpha_2$	Противоречие
11	$\alpha_1 = \alpha_2$	$\beta_1 \neq \beta_2$	$\alpha_1 = \beta_2$	$\beta_1 \neq \alpha_2$	Противоречие
12	$\alpha_1 = \alpha_2$	$\beta_1 \neq \beta_2$	$\alpha_1 = \beta_2$	$\beta_1 = \alpha_2$	Противоречие
13	$\alpha_1 = \alpha_2$	$\beta_1 = \beta_2$	$\alpha_1 \neq \beta_2$	$\beta_1 \neq \alpha_2$	Противоречие
14	$\alpha_1 = \alpha_2$	$\beta_1 = \beta_2$	$\alpha_1 \neq \beta_2$	$\beta_1 = \alpha_2$	Противоречие
15	$\alpha_1 = \alpha_2$	$\beta_1 = \beta_2$	$\alpha_1 = \beta_2$	$\beta_1 \neq \alpha_2$	Противоречие
16	$\alpha_1 = \alpha_2$	$\beta_1 = \beta_2$	$\alpha_1 = \beta_2$	$\beta_1 = \alpha_2$	Противоречие

• **Признак (всадник, уставший)** (R7)

В табл. 2 приведены пары семантических зависимостей, сформированные семантическим анализатором по предложению из примера 1. Каждый столбец таблицы содержит пары семантических отношений, для которых выполняются условия (1)–(4) соответственно.

Таблица 2

Пары связанных семантических отношений, классифицированных в соответствии с условиями (1)–(4)

Пары сем. отнош., для которых верно условие (1)	Пары сем. отнош., для которых верно условие (2)	Пары сем. отнош., для которых верно условие (3)	Пары сем. отнош., для которых верно условие (4)
(R1)–(R5) (R4)–(R6)	(R3)–(R2)	(R5)–(R4)	(R1)–(R7) (R1)–(R2)

### Семантическая цепочка

Семантической цепочкой назовем такой набор различных семантических связей  $R_{\alpha\beta} = \{R_1(\alpha_1, \beta_1), R_2(\alpha_2, \beta_2), \dots, R_n(\alpha_n, \beta_n)\}$ , в котором все семантические связи можно упорядочить таким образом, что любое семантическое отношение, не стоящее на первом месте, будет связано хотя бы с одним семантическим отношением, стоящим до него (не обязательно с соседним). При этом  $\alpha_i$ , являющееся подлежащим в анализируемом предложении, по которому строится семантическая цепочка, назовем головным словом данной цепочки.

В работе [19] авторы определяют понятие *лексической цепочки* как последовательности слов текста, в которой каждое следующее слово связа-

но некоторым отношением с предшествующими словами цепочки. Такие цепочки могут выходить за рамки одного предложения и проходить через целый текст.

Опираясь на это определение, семантические цепочки можно рассматривать как частный случай представления лексических цепочек, в которых отношения между узлами являются семантическими зависимостями, а сама семантическая цепочка рассматривается в рамках одного предложения. Однако узлы семантической цепочки имеют более высокий уровень в иерархии языковых единиц, так как являются не просто словами, как в случае с лексической цепочкой, а неделимыми смысловыми единицами, которые могут быть представлены группой слов.

**Пример 2:** Рассмотрим предложение, приведенное в Примере 1. Для этого предложения семантическая цепочка будет представлена следующим множеством семантических связей  $R_{\alpha\beta}$ :

$$R_{\alpha\beta} = \{$$

Основа (всадник, мчаться)  
Основа (всадник, скакать)  
Характеристика\_действия (скакать, быстро)  
Местоположение (скакать, по дороге)  
Местоположение (мчаться, по дороге)  
Признак (дорога, пыльный)  
Признак (всадник, уставший)

$$\},$$

так как все отношения из этого множества можно переставить таким образом, что любое семантическое отношение, не стоящее на первом месте, будет связано хотя бы с одним семантическим отношением, стоящим до него. На рис. 1 нагляд-

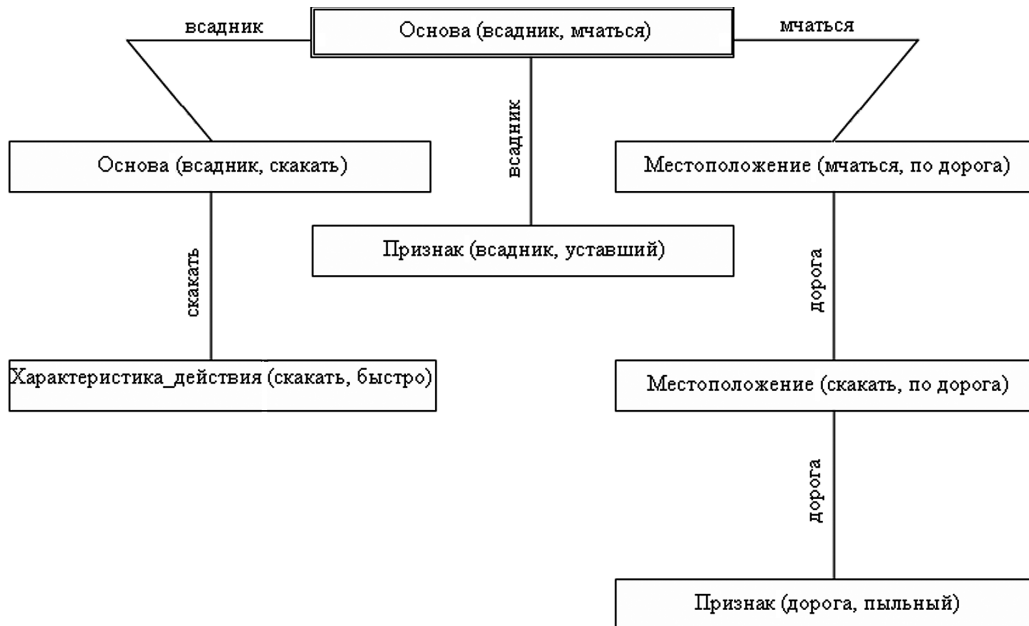


Рис. 1. Пары связанных семантических зависимостей

но представлены пары связанных семантических отношений, переставленные вышеописанным способом.

Очевидно, что все семантические зависимости из правильно построенного предложения будут принадлежать одной семантической цепочке.

Семантической цепочке соответствует ориентированный граф, в котором узлы – это слова, словосочетания или части предложения, являющиеся аргументами семантических зависимостей; вершины этого графа соединяют ребра, направленные от первого аргумента семантической связи ко второму. Ребра графа имеют названия,

однoименные с семантическими связями, связывающими пару вершин данного графа.

На рис. 2 представлен семантический граф, сформированный по вышеописанным правилам и отражающий семантическую цепочку, сформированную по предложению из Примера 1 (головное слово обведено двойной рамкой).

#### Алгоритм наложения семантических цепочек

Результатом наложения двух семантических цепочек является один (в случае если головные слова семантических цепочек совпадают) либо

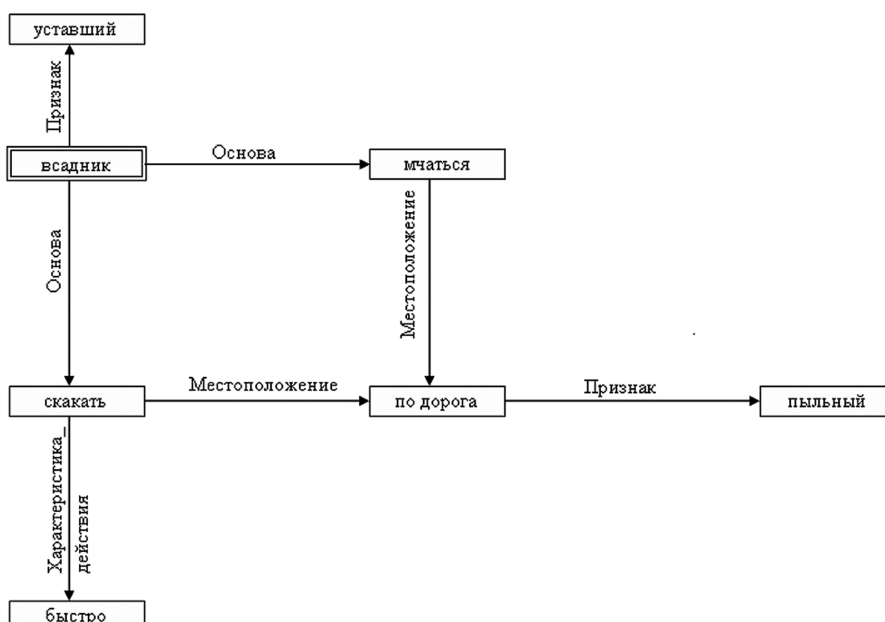


Рис. 2. Представление семантической цепочки в виде графа

два графа. Каждый граф, полученный в результате наложения семантических цепочек, является взвешенным и ориентированным. Узлы такого графа – это аргументы семантических связей, а ребра – семантические связи, связывающие эти аргументы. Каждое ребро такого графа имеет свой вес, определяющий количество вхождений конкретной семантической цепочки в анализируемый текст.

В результате наложения семантической цепочки  $R_{\alpha\beta}^1 = \{R_1^1(\alpha_1^1, \beta_1^1), R_2^1(\alpha_2^1, \beta_2^1), \dots, R_n^1(\alpha_n^1, \beta_n^1)\}$ , головным словом которой является  $\alpha_1^1$ , на семантическую цепочку  $R_{\alpha\beta}^2 = \{R_1^2(\alpha_1^2, \beta_1^2), R_2^2(\alpha_2^2, \beta_2^2), \dots, R_m^2(\alpha_m^2, \beta_m^2)\}$  с головным словом  $\alpha_1^2$  ( $m > n$ ) должна быть получена либо одна семантическая цепочка  $R_{\alpha\beta}^* = \{R_1^*(\alpha_1^*, \beta_1^*), R_2^*(\alpha_2^*, \beta_2^*), \dots, R_k^*(\alpha_k^*, \beta_k^*)\}$  (в случае когда семантические зависимости, содержащие головные слова цепочек  $R_{\alpha\beta}^1$  и  $R_{\alpha\beta}^2$ , совпадают, то есть  $R_{\alpha\beta}^1(\alpha_1^1, \beta_1^1) = R_{\alpha\beta}^2(\alpha_1^2, \beta_1^2)$ ), либо две исходные семантические цепочки  $R_{\alpha\beta}^1$  и  $R_{\alpha\beta}^2$ .

Семантическая цепочка  $R_{\alpha\beta}^*$  (для случая когда  $R_{\alpha\beta}^1(\alpha_1^1, \beta_1^1) = R_{\alpha\beta}^2(\alpha_1^2, \beta_1^2)$ ) формируется из цепочек  $R_{\alpha\beta}^1$  и  $R_{\alpha\beta}^2$  путем объединения соответствующих им графов:  $R_{\alpha\beta}^* := R_{\alpha\beta}^1 \cup R_{\alpha\beta}^2$ , при этом веса этих графов, представленные матрицами  $W(R_{\alpha\beta}^1)$  и  $W(R_{\alpha\beta}^2)$  соответственно, складываются:  $W(R_{\alpha\beta}^*) := W(R_{\alpha\beta}^1) + W(R_{\alpha\beta}^2)$ .

На рис. 3 представлена блок-схема алгоритма наложения семантических цепочек  $R_{\alpha\beta}^1$  и  $R_{\alpha\beta}^2$ .

На рис. 4 показан пример наложения двух семантических цепочек  $R_{\alpha\beta}^1$  (рис. 4а) и  $R_{\alpha\beta}^2$  (рис. 4б), представленных в виде графов, у которых одинаковые узлы, являющиеся семантическими отношениями, обозначены одинаковыми литерами, а узел, являющийся семантическим отношением, содержащим головное слово цепочки, обведен в двойную рамку. На рис. 4с показана семантическая цепочка, полученная в результате

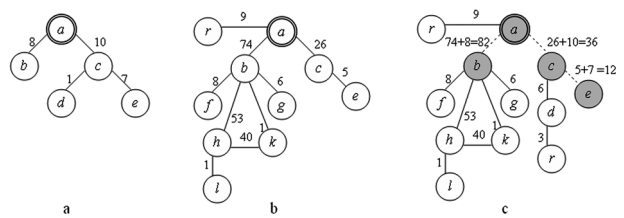


Рис. 4. Наложение семантических цепочек, представленных в виде графов

наложения цепочек  $R_{\alpha\beta}^1$  и  $R_{\alpha\beta}^2$ . Вершины графа, являющиеся общими для графов, представляющих  $R_{\alpha\beta}^1$  и  $R_{\alpha\beta}^2$ , выделены серым, а дуги, веса которых получились в результате суммирования соответствующих весов дуг  $R_{\alpha\beta}^1$  и  $R_{\alpha\beta}^2$ , нарисованы пунктиром.

**Применение алгоритма наложения семантических цепочек для автоматизации пополнения терминосистем**

Предлагается создавать терминологическую систему, представляя ее в виде ориентированного, взвешенного графа, полученного в результате наложения всех семантических цепочек, построенных по анализируемому тексту семантическим анализатором. Такое представление терминосистемы позволит определять семантические связи между всеми терминами, содержащимися в анализируемых текстах. Терминологическую систему, построенную вышеописанным образом, можно постоянно пополнять путем анализа новых текстов. Это позволит хранить в системе новейшую информацию о терминах и связях между ними.

Значения веса ребер семантического графа было решено нормировать на диапазон от 0 до 1.

На основании анализа весов ребер графа, входящих в общее представление терминосистемы и образующих путь от одной вершины-термина до другой, можно делать предположение о корректности и достоверности построенной между терминами связи. Логично предположить, что большее значение весов обуславливает большую корректность и достоверность связи, определенной между терминами. Малое же значение весов может быть поводом для рассмотрения найденных связей между двумя терминами специалистом вручную.

Так как ребра графа, представляющего терминосистему, имеют веса и в качестве фактов рассматриваются семантические цепочки, то каждому факту в терминосистеме можно в соответствие поставить значение «веса факта», который, например, может определяться минимальным весом из всех ребер цепочки. Тогда для каждого факта в терминологической системе можно предположить его истинность и достоверность: очевидно, что факт с большим весом будет иметь большую достоверность с большей вероятностью.

Вышеописанный способ построения терминосистемы был программно реализован на языке

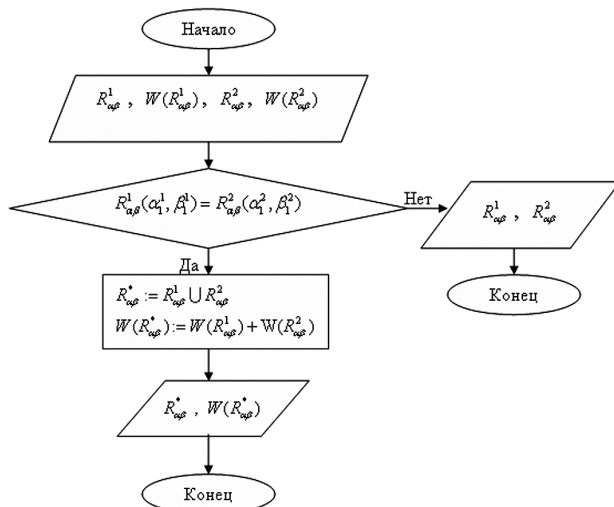


Рис. 3. Блок-схема алгоритма наложения семантических цепочек

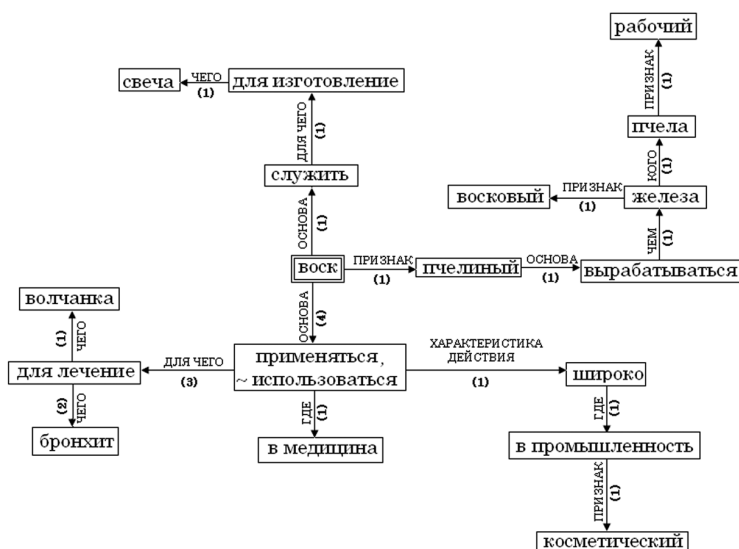


Рис. 5. Граф представления терминосистемы

программирования Java и в качестве составного модуля внедрен в вопросно-ответную систему, описанную в работе [11]. В качестве семантического анализатора, с помощью которого находятся семантические отношения и из которых впоследствии составляются семантические цепочки, использовалась программа-анализатор, алгоритм работы которой описан в статье [10].

*Пример 3:* Рассмотрим в качестве анализируемого текста следующие предложения, описывающие некоторые свойства термина «воск»: «Пчелиный воск вырабатывается восковыми железами рабочих пчел. Для лечения бронхитов используется воск. Воск широко применяется в косметической промышленности. Воск использовали в медицине. Воск служит для изготовления свечей. Воск применяется для лечения волчанки. Воск используется для лечения бронхитов».

Для этого текста по правилам, описанным в разделе «Алгоритм наложения семантических цепочек», будет создан ориентированный, взвешенный граф, представленный на рис. 5 (головное слово, являющееся термином, заносимым в систему, обведено двойной рамкой).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен способ создания и пополнения терминологической системы с помощью

разработанного и описанного алгоритма наложения семантических цепочек. Семантические цепочки специальным образом составляются из связанных семантических зависимостей, которые семантический анализатор строит для каждого анализируемого предложения. Связность семантических зависимостей предлагается определять условиями (1)–(4).

В отличие от наиболее распространенного в настоящее время способа пополнения терминосистем, основанного на использовании толковых и энциклопедических словарей, предлагаемый способ позволяет дополнять такие системы данными, содержащимися в текстовых источниках, на которые не накладываются дополнительные ограничения (помимо корректности описываемой информации и правильности составления предложений).

Предлагаемый в работе способ автоматического составления и пополнения терминосистемы программно реализован на языке программирования Java. Созданная терминосистема используется в алгоритме работы вопросно-ответной системы, описанной в статье [11].

В перспективе планируется использовать алгоритм построения и пополнения терминосистемы для автоматизации создания онтологии, которая будет интегрирована с вопросно-ответной системой [11].

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РГНФ в рамках научного проекта № 15–04–12029 «Программная разработка электронного ресурса с онлайн-версией русскоязычной вопросно-ответной системы».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арзамасцева И. В. Модели, методы и средства разработки лингвистического обеспечения проектных репозитивов САПР: Дисс. ... канд. техн. наук. Ульяновск, 2011. 270 с.
- Гринев С. В. Введение в терминоведение. М.: Московский Лицей, 1993. 309 с.
- Мюллер Ю. Э. Применение онтологий для создания терминосистем (на примере терминологии логистики) // II Congreso Internacional "La lengua y literatura rusas en el espacio educativo internacional: estado actual y perspectivas". Т. II. Мадрид: Rubinos-1860, S. A, 2010. С. 2038–2042.

4. Ермаков А. Е. Автоматизация онтологического инжиниринга в системах извлечения знаний из текста // Труды международной конференции «Диалог 2008» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.dialog-21.ru/digests/dialog2008/materials/html/23.htm>
5. Ефремова Т. Ф. Новый словарь русского языка (толково-словообразовательный). М.: Дрофа: Русский язык, 2000. 1233 с.
6. Леонова С. А. Терминосистема «автоматизированный электропривод» в английском и русском языках: синхронно-диахронный анализ: Дисс. ... канд. филол. наук. М., 2012. 257 с.
7. Майтлова А. В. Терминосистема предметно-специального языка «Банковское дело» в лингвокогнитивном аспекте – на материале русского и немецкого языков: Дисс. ... канд. филол. наук. М., 2008. 257 с.
8. Минаков И. А. Системный анализ, онтологический синтез и инструментальные средства обработки информации в процессах интеграции профессиональных знаний: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. Самара, 2007. 43 с.
9. Митрофанова О. А., Константинова Н. С. Онтологии как системы хранения знаний // Всероссийский конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению «Информационно-телекоммуникационные системы». 2008. 54 с.
10. Мочалова А. В. Алгоритм семантического анализа текста, основанный на базовых семантических шаблонах с удалением // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 5. С. 126–132.
11. Мочалова А. В., Мочалов В. А. Интеллектуальная вопросно-ответная система // Информационные технологии. 2011. № 5. С. 6–12.
12. Найханова Л. В. Методы и модели автоматического построения онтологий на основе генетического и автоматного программирования: Дисс. ... д-ра техн. наук. М., 2009. 451 с.
13. Нечипоренко А., Русин А. Система автоматизированного извлечения знаний из текстов на естественном языке // Труды международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии – 2003». Новосибирск, НГТУ, 2003 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.noolab.ru/index.php?id=stat&show=18>
14. Пекар В. И. Автоматическое пополнение специализированного тезауруса // Труды международной конференции «Диалог 2002» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.dialog-21.ru/en/digest/archive/2002/?year=2002&vol=22725&id=7631>
15. Рубашкин В. Ш. Онтологическая семантика. Знания. Онтологии. Онтологически ориентированные методы информационного анализа текстов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 348 с.
16. Сокирко А. В. Семантические словари в автоматической обработке текста: По материалам системы ДИАЛИНГ: Дисс. ... канд. техн. наук. М., 2001. 120 с.
17. Agramaki E., Imai T., Kashiwagi M., Kajino M., Miyo K. and Ohe K. Toward medical ontology using Natural Language Processing. Available at: <http://www.m.u-tokyo.ac.jp/medinfo/ont/paper/2005-ara.-1.pdf>
18. Novy E., Knight K., Junk M. Large Resources. Ontologies (SENSUS) and Lexicons. Available at: [www.isi.edu/natural-language/projects/ONTOLOGIES.html](http://www.isi.edu/natural-language/projects/ONTOLOGIES.html)
19. Morris J., Hirst G. Lexical Cohesion Computed by Thesaural Relations as an Indicator of the Structure of the Text // Computational Linguistics, 1991. № 17 (1). P. 21–45.
20. Roussopoulos N. D. A semantic network model of data bases. – TR No 104, Department of Computer Science, University of Toronto, 1976.

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

### CREATION AND UPDATE OF TERMINOLOGICAL SYSTEMS BY MEANS OF SEMANTIC ANALYZER

An automated creation and update of terminological systems is an urgent challenge today. Such systems are used to solve a wide range of problems concerning the process of text analysis. The problem associated with these systems is substantiated by the need to permanently update current information. In the paper we propose a method, which automatically creates and updates terminological systems with the help of an algorithm. The algorithm overlaps semantic chains that are derived from a set of semantic dependencies built by a semantic analyzer applied to every sentence of the text. The advantage of this method, developed to create and update terminological systems, is based on the fact that any Russian authentic textual data may be used as an analyzed text. Encyclopedia dictionaries or glossaries can also be studied with the help of the analyzer. This method is instrumental in the update of the system with the information from new textual sources: scientific papers, books, scientific reports, news or analytical reviews.

Key words: terminological systems, update of terminological systems, semantic chains, semantical analyzer

#### REFERENCES

1. Arzamastseva I. V. *Modeli, metody i sredstva razrabotki lingvisticheskogo obespecheniya proektnykh repozitoriev SAPR: Diss. ... kand. tekhn. nauk* [Models, methods and tools for development of linguistic support of project repositories of CAD. PhD. tech. sci. diss.]. Ulyanovsk, 2011. 270 p.
2. Grinev S. V. *Vvedenie v terminovedenie* [Introduction to terminology studies]. Moscow, Lyceum of Moscow Publ., 1993. 309 p.
3. Myuller Yu. E. Using ontologies for creating term systems (on an example of logistics terminology) [Primenenie ontologii dlya sozdaniya terminosistem (na primere terminologii logistiki)]. *II Congreso Internacional "La lengua y literatura rusas en el espacio educativo internacional: estado actual y perspectivas"*. Vol. II. Madrid: Rubinos-1860, S. A, 2010. P. 2038–2042.
4. Ermakov A. E. Automatization of an ontological engineering for systems of knowledge mining in text [Avtomatizatsiya ontologicheskogo inzhiniringa v sistemakh izvlecheniya znaniy iz teksta]. *Trudy mezhdunarodnoy konferentsii "Dialog 2008"*. Bekasovo, 2008. Available at: <http://www.dialog-21.ru/digests/dialog2008/materials/html/23.htm>
5. Efremova T. F. *Novyy slovar' russkogo yazyka (tolkovo-slovoobrazovatel'nyy)* [New dictionary of the Russian language (explanatory-word formative)]. Moscow, Drofa, The Russian Language Publ., 2000. 1233 p.
6. Leonova S. A. *Terminosistema "Avtomatizirovannyy elektropriwod" v angliyskom i russkom yazykakh: sinkhronno-diakhronnyy analiz: Dis. ... kand. filol. nauk* [Term system "Automatic electric drive" in English and Russian languages: synchronous-diachronous analysis. PhD. phil. sci. diss.]. Moscow, 2012. 257 p.



7. М а y т о в а А. В. *Terminosistema predmetno-spetsial'nogo yazyka "Bankovskoe delo" v lingvokognitivnom aspekte – na materiale russkogo i nemetskogo yazykov: Diss. ... kand. filol. nauk* [Term system of the subject-specific language "Banking business" in a linguo-cognitive aspect – as exemplified in the Russian and German languages. PhD. phil. sci. diss.]. Moscow, 2008. 257 p.
8. М и n а k о в I. A. *Sistemnyy analiz, ontologicheskii sintez i instrumental'nye sredstva obrabotki informatsii v protsessakh integratsii professional'nykh znaniy: Avtoref. diss. ... d-ra tekhn. nauk* [System analysis, ontological synthesis and data processing tools in the processes of professional knowledge integration. Dr. tech. sci. diss.]. Samara, 2007. 43 p.
9. М и t r o f a n o в a O. A., К o n s t a n t i n o в a N. S. Ontologies as systems of data storage [Ontologii kak sistemy khraneniya znaniy]. *Vserossiyskiy konkursnyy otbor obzorno-analiticheskikh statey po prioritetnomu napravleniyu "Informatsionno-telekommunikatsionnye sistemy"* [All-Russian competitive selection of the review analytical papers on the priority direction "Information telecommunication systems"], 2008.
10. М o c h a l o в a A. V. Algorithm of semantical text analysis based on the basical semantical templates with removal [Algoritm semanticheskogo analiza teksta, osnovanny na bazovykh semanticheskikh shablonakh s udaleniem]. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2014. № 5. P. 126–132.
11. М o c h a l o в a A. V., М o c h a l o в V. A. Intellectual question-and-answer system [Intellektual'naya voprosno-otvetnaya sistema]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies], 2011. № 5. P. 6–12.
12. N a y k h a n o в a L. V. *Metody i modeli avtomaticheskogo postroyeniya ontologiy na osnove geneticheskogo i avtomatnogo programmirovaniya: Diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Methods and models for automated ontologies construction basing on genetic and automata-based programming. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, 2009. 451 p.
13. N e c h i p o r e n k o A., R u s i n A. A system for automated knowledge extraction from natural-language texts [Sistema avtomatizirovannogo izvlecheniya znaniy iz tekstov na estestvennom yazyke]. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Informatsionnye sistemy i tekhnologii – 2003"*. Novosibirsk, NSTU Publ., 2003. Available at: <http://www.noolab.ru/index.php?id=stat&show=18>
14. P e k a r V. I. Automated updating of the problem-specific thesaurus [Avtomaticheskoe popolnenie spetsializirovannogo tezaurus]. *Trudy mezhdunarodnoy konferentsii "Dialog 2002"*. Available at: <http://www.dialog-21.ru/en/digest/archive/2002/?year=2002&vol=22725&id=7631>
15. R u b a s h k i n V. S h. *Ontologicheskaya semantika. Znaniya. Ontologii. Ontologicheski orientirovannyye metody informatzionnogo analiza tekstov* [Ontological semantics. Knowledge. Ontologies. Ontologically-oriented methods of information text analysis]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2013. 348 p.
16. S o k i r k o A. V. Semanticheskie slovari v avtomaticheskoy obrabotke teksta: Po materialam sistemy DIALING. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Semantical dictionaries in automated text processing: as exemplified by the DIALING system. PhD. tech. sci. diss.]. Moscow, 2001. 120 p.
17. A r a m a k i E., I m a i T., K a s h i w a g i M., K a j i n o M., M i y o K. and O h e K. Toward medical ontology using Natural Language Processing. Available at: <http://www.m.u-tokyo.ac.jp/medinfo/ont/paper/2005-ara..-1.pdf>
18. H o v y E., K n i g h t K., J u n k M. Large Resources. Ontologies (SENSUS) and Lexicons. Available at: [www.isi.edu/natural-language/projects/ONTOLOGIES.html](http://www.isi.edu/natural-language/projects/ONTOLOGIES.html)
19. M o r r i s J., H i r s t G. Lexical Cohesion Computed by Thesaural Relations as an Indicator of the Structure of the Text // *Computational Linguistics*. 1991. № 17 (1). P. 21–45.
20. R o u s s o p o u l o s N. D. A semantic network model of data bases. – TR No 104, Department of Computer Science, University of Toronto, 1976.

Поступила в редакцию 21.01.2015

## УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Серия «Естественные и технические науки» включает в себя следующие рубрики, соответствующие трем отраслям наук: «Биологические науки» (03.00.00), «Медицинские науки» (14.00.00), «Физико-математические науки» (01.00.00); трем группам специальностей из отрасли «Сельскохозяйственные науки»: «Ветеринария и зоотехния» (06.02.00), «Лесное хозяйство» (06.03.00) и «Рыбное хозяйство» (06.04.00); двум группам специальностей из отрасли «Технические науки»: «Технология, машины и оборудование лесозаготовок, лесного хозяйства, деревообработки и химической переработки биомассы дерева» (05.21.00) и «Строительство и архитектура» (05.23.00).

Представляемые рукописи должны соответствовать тематике журнала и содержать материалы, не опубликованные ранее в других изданиях.

Статья предоставляется в распечатанном виде на бумаге формата А4 (в двух экземплярах) и в электронном виде. Печатная версия статьи подписывается всеми авторами.

**Объем** оригинальной и обзорной статьи не должен превышать один печатный лист. Статья набирается в текстовом редакторе Microsoft Word и сохраняется с расширением.doc. **Поля:** верхнее и нижнее – 2 см, правое и левое – 3 см. Абзацный отступ – 0,5 см. **Шрифт:** Times New Roman, размер – 14 пунктов, список литературы – 12 пт, межстрочный интервал – полуторный. Нумерация страниц – справа внизу страницы.

Статья должна состоять из следующих элементов:

**УДК** (индекс Универсальной десятичной классификации) в левом верхнем углу.

**Сведения об авторе:** имя, отчество, фамилия автора(ов) полностью прописными буквами; ученая степень и звание; место работы: должность, кафедра, факультет, вуз, город, страна; электронный адрес, а также контактный телефон и почтовый адрес.

**Название статьи** жирным шрифтом прописными буквами.

**Аннотация (объем от 120 до 250 слов)** является кратким резюме большей по объему работы. Аннотация может публиковаться самостоятельно и, следовательно, должна быть понятной без обращения к самой публикации. Она является основным источником информации в отечественных и зарубежных информационных системах и базах данных, индексирующих журнал. Структура аннотации должна повторять структуру статьи и включать введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение (выводы). Результаты работы описывают предельно точно и информативно. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Выводы могут сопровождаться рекоменда-

циями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье. Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации. Следует избегать лишних фраз (например, «автор статьи рассматривает...»), не включать несущественные детали, применять значимые слова из текста статьи. Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения в аннотации не приводятся. В тексте аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций. Аннотация предназначена для компетентной аудитории, включая международную, поэтому можно использовать техническую (специальную) терминологию дисциплины. Текст аннотации должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т. д. («consequently», «moreover», «for example», «the benefits of this study», «as a result» etc.), либо разрозненные излагаемые положения должны логично вытекать один из другого. Необходимо использовать активный, а не пассивный залог (“The study tested”, но не “It was tested in this study”).

**Ключевые слова** – от 3 до 8 слов (или словосочетаний, несущих в тексте основную смысловую нагрузку).

**Список литературы** должен быть представлен на отдельных листах в 2 вариантах:

1) на русском языке в соответствии с ГОСТ 7.1–84 «Библиографическое описание документа. Общие требования и правила составления». Цитируемая в статье литература (автор, название, место, издательство, год издания и страницы (от и до или общее количество)) приводится в алфавитном порядке, сначала отечественные, затем зарубежные авторы;

2) список литературы должен быть записан на языке оригинала латинскими буквами (References). Если русскоязычная статья была переведена на английский язык и опубликована

в английской версии, то необходимо указывать ссылку из переводного источника. Как правило, библиографические описания российских публикаций составляются в следующей последовательности: авторы (транслитерация), перевод названия статьи на английский язык, название статьи в транслитерированном варианте в квадратных скобках, название источника (транслитерация, курсив), выходные данные с обозначениями на английском языке.

**В тексте статьи ссылка** дается в квадратных скобках, через точку с запятой – цитируемая страница, если это необходимо.

**Примечания** (в том числе архивные и другие источники) даются в виде концевых сносок.

На **английский язык** необходимо перевести ФИО автора(ов), место работы, город, страну; название статьи (оформляется прописными буквами и не содержит артиклей), аннотацию и ключевые слова и разместить данные после списка литературы перед References.

Таблицы – каждая печатается на отдельной странице, нумеруется соответственно первому упоминанию ее в тексте и снабжается заголовком. Таблицы предоставляются в текстовом редакторе Microsoft Word (форматы.doc или docx) или табличном редакторе Microsoft Excel (форматы.xls или.xlsx). **Иллюстрации** (рисунки, фотографии, схемы, диаграммы) нумеруются, снабжаются подписями и предоставляются в виде отдельных растровых файлов (в формате.tif, bmp). В бумажной версии на обороте каждой иллюстрации ставится номер и пометка «верх», «низ». В тексте статьи указывается место таблицы или рисунка. Таблиц и иллюстраций не должно быть более 5.

**Правила предоставления иллюстраций.** Растровые форматы: рисунки и фотографии должны иметь разрешение не менее 300 dpi (формат.tif), без LZW уплотнения, в градациях серо-

го. Векторные форматы: рисунки должны иметь толщину линий не менее 0,2 мм, текст в них может быть набран шрифтом Times New Roman или Arial.

**Правила предоставления диаграмм и графиков.** Графики и диаграммы должны быть созданы в табличном процессоре Excel и присылаться вместе с исходными численными данными в одном файле с расширением.xls. При создании графиков и диаграмм следует использовать черный, белый цвета и градации серого, различного типа штриховку; избегать применения трехмерной графики, градиентных заливок и т. д. Все надписи и числа на графиках желательно делать, используя жирный шрифт ArialСyr, размер 14. На самом графике не должно быть названия, оно должно быть отражено в подрисуночной подписи. В виде растрового изображения могут быть представлены графики, полученные с помощью специальных программ статистической обработки.

**Требования к математическим формулам.** Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation (присутствует в составе Word), MathType или символьным шрифтом (надстрочные и подстрочные символы, меню «Вставка», «Символ»). Настоятельно рекомендуется не использовать русские буквы в формулах, набираемых в специальных редакторах. Формулы в виде картинок любого формата не принимаются.

**Статьи, поступившие в редакцию, подлежат обязательному рецензированию.**

Редакция оставляет за собой право внесения в текст редакторских изменений, не искажающих смысла статьи.

Материалы, не соответствующие предъявленным требованиям, редакция не рассматривает.

Решение о публикации принимается редакционными коллегами журнала.

Более подробная информация для авторов дана на сайте журнала: [uchzap.petrSU.ru](http://uchzap.petrSU.ru)

## CONTENTS

### BIOLOGICAL SCIENCES

- Ivanter E. V.*  
ON SEASONAL AND AGE DEPENDENT WEIGHT CHANGES IN BANK VOLE (*CLETHRIONOMYS GLAREOLUS* SCHREB) ..... 7
- Smirnova L. E., Kirilina V. M., Fedin A. N., Krivchenko A. I.*  
ADENOSINE AND HISTAMINE LOW CONCENTRATION INFLUENCE ON MUSCLE CONTRACTION IN TRACHEA AND BRONCHI ..... 12
- Smirnov L. P., Sukhovskaya I. V., Borvinskaya E. V.*  
ETHOXYRESORUFIN O-DEETHYLASE – SYSTEMATIC ACCESSORY AND ITS FUNCTIONAL FEATURES OF PHASE I ENZYME OF XENOBIOTICS BIOTRANSFORMATION (REVIEW) ..... 18
- Dzyubuk I. M., Kuritsyn A. E., Polina A. V.*  
EFFECT OF WINTER FEEDING FREQUENCY ON CAGED JUVENILE RAINBOW TROUT GROWTH ..... 24
- Kuchko Ya. A., Savosin E. S., Kuchko T. Yu.*  
PRESENT CONDITION OF ZOOPLANKTON AND MACROZOOBENTHOS COMMUNITIES OF LAKE SEGOZERO IN AREAS OF TROUT FARM LOCATION ..... 29
- ### MEDICAL SCIENCES
- Sergeev A. M., Skoromets A. A., Sergeeva A. A., Kovalenko A. I., Bondarenko G. E.*  
TICK-BORNE ENCEPHALITIS AND LYME-BORRELIOSIS IN REPUBLIC OF KARELIA (MODERN CLINICAL AND EPIDEMIOLOGICAL ASPECTS) ..... 34
- Vinogradov V. V., Dudanov I. P.*  
IMMOBILISATION OF PLASMINOGEN ACTIVATOR WITHIN POROUS ALUMINA MATRIX FOR CREATION OF NEW THROMBOLYTIC MATERIALS ..... 37
- Antonen E. G., Nikitina M. V., Kruchek M. M., Hyanikyaynen I. V.*  
CEREBRAL SYNDROME WITH COGNITIVE IMPAIRMENT IN CHRONIC CEREBRAL ISCHEMIA AND ITS CORRECTION BY AGOMELATINE ..... 43
- Varlamova T. V., Dorshakova N. V., Karapetyan T. A.*  
POSSIBILITIES OF GENETIC RISK ASSESSMENT OF TYPE 1 DIABETES MELLITUS IN CHILDREN AND ADOLESCENTS IN KARELIAN REPUBLIC ..... 50
- Subbotina N. S., Dorshakova O. V., Kozlovskaya E. M., Belousova G. P.*  
VEGETATIVE REGULATION OF CARDIAC RHYTHM IN CONDITIONS OF CHRONIC DEFICIENCY IN CEREBRAL CIRCULATION ..... 55
- Usenko G. A., Vasendin D. V., Usenko A. G., Nishcheta O. V.*  
DEPENDENCES BETWEEN ACTIVITY OF LIPOPROTEIN-ASSOCIATED PHOSPHOLIPASE A2 AND BLOOD LIPIDS IN PATIENTS WITH ARTERIAL HYPERTENSION ..... 61

### AGRICULTURAL SCIENCES

- Glazunov Yu. B., Merzlenko M. D., Mel'nik P. G.*  
COMPARATIVE GROWTH CHARACTERISTICS OF KARELIAN SCOTS PINE IN CONDITIONS OF MOSCOW REGION ..... 67
- Volkova A. Yu., Khuobonen M. E.*  
REPRODUCTIVE INDICATORS OF CAGE GROWN STURGEON PRODUCERS IN CONDITIONS OF EUROPEAN NORTH ..... 73
- Gavrilov T. A.*  
EFFICIENCY INCREASE IN FODDER PREPARATION FOR FUR BEARING ANIMALS ..... 77

### ENGINEERING SCIENCE

- Kolesnikov G. N., Rakovskaya M. I.*  
ENERGY CRITERION OF PRIORITY TRANSITION OF UNILATERAL CONSTRAINTS FROM POSSIBLE TO REAL STATES IN MECHANICAL SYSTEMS ..... 80
- Devyatnikova L. A., Emel'yanova E. G., Kuz'menkov A. A., Simonova A. A.*  
RESEARCH OF TECHNO-ECONOMICAL PARAMETERS FOR TECHNOLOGIES EMPLOYED IN ERECTION OF ENCLOSING STRUCTURES OF FREE-STANDING RESIDENTIAL BUILDINGS ..... 82
- Skobtsov I. G.*  
ESTIMATION OF FOREST MACHINE ROPS RELIABILITY IN TERMS OF FRACTURE MECHANICS ..... 90
- Rat'kova E. I., Katarov V. K., Kovaleva N. V.*  
GROUNDWORK BASE CONSOLIDATION OF FOREST ROADS BUILT ON CLAY SOILS DURING INTERSEASONAL PERIODS ..... 95

### PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

- Andreev V. P., Sobolev P. S., Mukhina N. I.*  
COMPARISON OF NUCLEOPHILISITY OF N-DONOR LIGANDS IN INTERACTION WITH ZN-TPP, SBCL<sub>2</sub>, BF<sub>3</sub> AND IODINE IN APROTIC SOLVENTS ..... 98
- Karasev V. Yu., Shtykov A. S.*  
THE INVESTIGATION OF PHASE TRANSITION DYNAMICS IN DUSTY PLASMA BY CORRELATION SPECTROSCOPY METHOD ..... 104
- Sysun I. V., Sysun V. I., Boriskov P. P.*  
DIFFUSION MECHANISM OF NICKEL OXIDATION IN CONDUCTING CHANNEL OF PT/NIO/PT SWITCHING STRUCTURE ..... 110
- Gippiyev M. B., Rogov A. A.*  
EXPERIMENTAL COMPARISON OF ALGORITHMS FOR SYMBOLS' CLASSIFICATION IN SHORTHAND DOCUMENTS ..... 115
- Mochalova A. V.*  
CREATION AND UPDATE OF TERMINOLOGICAL SYSTEMS BY MEANS OF SEMANTIC ANALYZER ..... 122
- Info for the authors** ..... 130