
Министерство образования и науки
Российской Федерации

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

№ 6 (143). Сентябрь, 2014

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)
- А. С. ИСАЕВ**
доктор биологических наук,
профессор, академик РАН (Москва)
- МАРЕК 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)
- 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 РАН (Петрозаводск)
- ПААВО ПЕЛКОНЕН**
доктор технических наук,
профессор (Йоенсуу, Финляндия)
- И. В. РОМАНОВСКИЙ**
доктор физико-математических наук,
профессор (Санкт-Петербург)
- Е. С. СЕНЯВСКАЯ**
доктор исторических наук, профессор (Москва)
- КАРОЛИНА СКВАРСКА**
доктор философии (Прага, Чешская Республика)
- А. Ф. ТИТОВ**
доктор биологических наук, профессор,
член-корреспондент РАН (Петрозаводск)
- ИНОУЭ ЮКИЁСИ**
профессор (Токио, Япония)
- Р. М. ЮСУПОВ**
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАН (Санкт-Петербург)

Редакционная коллегия серии
«Естественные и технические науки»

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

Ministry of Education and Science
of the Russian Federation

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

№ 6 (143). September, 2014

Natural & Engineering Sciences

Chief Editor

Anatoly V. Voronin, Doctor of Technical Sciences, Professor

Chief Deputy Editor

Vladimir B. Akulov, Doctor of Economic Sciences, Professor

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

Vladimir S. Syunev, Doctor of Technical Sciences, Professor

Executive Secretary

Nadezhda V. Rovenko, Candidate of Philological Sciences

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

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

uchzap.petrSU.ru

Editorial Council

- | | |
|---|--|
| <p style="text-align: center;">V. BOLSHAKOV
Doctor of Biological Sciences,
Professor, the RAS Member (Ekaterinburg)</p> | <p style="text-align: center;">V. ORPHINSKY
Doctor of Architecture, Professor,
Full Member of RAS (Petrozavodsk)</p> |
| <p style="text-align: center;">I. DUDANOV
Doctor of Medical Sciences, Professor,
the RAS Corresponding Member (Petrozavodsk)</p> | <p style="text-align: center;">P. PELKONEN
Doctor of Technical Sciences,
Professor (Joensuu, Finland)</p> |
| <p style="text-align: center;">V. ZAKHAROV
Doctor of Philological Sciences, Professor (Moscow)</p> | <p style="text-align: center;">I. ROMANOVSKY
Doctor of Physical-Mathematical Sciences,
Professor (St. Petersburg)</p> |
| <p style="text-align: center;">A. ISAYEV
Doctor of Biological Sciences,
Professor, the RAS Member (Moscow)</p> | <p style="text-align: center;">E. SENYAVSKAYA
Doctor of Historical Sciences,
Professor (Moscow)</p> |
| <p style="text-align: center;">M. VOCHOZKA
Doctor of Economic Sciences
(Ceske Budejovice, Czech Republic)</p> | <p style="text-align: center;">K. SKWARSKA
Doctor of Philosophy
(Praha, Czech Republic)</p> |
| <p style="text-align: center;">V. LEVIN
Doctor of Physical-Mathematical Sciences,
Professor (Mexico, Mexico)</p> | <p style="text-align: center;">A. TITOV
Doctor of Biological Sciences, Professor,
the RAS Corresponding Member (Petrozavodsk)</p> |
| <p style="text-align: center;">T. LÖNNGREN
Doctor of Philosophy (Tromsø, Norway)</p> | <p style="text-align: center;">I. YUKIYOSHI
Professor (Tokyo, Japan)</p> |
| <p style="text-align: center;">N. MEL'NIKOV
Doctor of Technical Sciences,
Professor, the RAS Member (Apatity)</p> | <p style="text-align: center;">R. YUSUPOV
Doctor of Technical Sciences, Professor, the RAS Corresponding Member (St. Petersburg)</p> |
| <p style="text-align: center;">I. MULLONEN
Doctor of Philological Sciences, Professor (Petrozavodsk)</p> | |

Editorial Board of the Series
“Natural & Engineering Sciences”

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

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЯ

Ивантер Э. В., Моисеева Е. А., Леонтьев И. А.
Экология полевки-экономки
(*Microtus oeconomus* Pall.) в коренных
и антропогенных ландшафтах Карелии 7

Китаев С. П., Савосин Е. С.
Оценка состояния макрозообентоса озерной
экосистемы при выращивании товарной форели . 13

Туманов И. Л.
Особенности биологии и состояние запасов
бурого медведя на островах Южных Курил . . . 16

Кучко Я. А., Кучко Т. Ю., Ильмаст Н. В.
Зоопланктон как показатель состояния
экосистемы озера Каменное 22

Медведева М. В., Федорец Н. Г., Ильинов А. А.
Биологическая активность почв еловых гене-
тических резерватов Северного Приладожья . . . 27

Смирнов Л. П., Суховская И. В.
Роль глутатиона в функционировании
систем антиоксидантной защиты
и биотрансформации (обзор) 34

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

*Елгаева Е. А., Писарева М. М., Никитина О. Е.,
Кижло С. Н., Грудинин М. П., Дуданова О. П.*
Роль мутантных форм вируса гепатита В
в прогрессирующем течении хронического
гепатита В 41

*Корнева В. А., Кузнецова Т. Ю., Богословская Т. Ю.,
Мандельштам М. Ю., Васильев В. Б.*
Семейная гиперхолестеринемия в Карелии:
распространенность, клинические
и генетические особенности, лечение
(опыт 10-летнего наблюдения) 47

Лесонен А. С., Лоскутова Е. Е., Виноградова И. А.
Маркетинговые исследования рынка проти-
воаллергических антигистаминных лекар-
ственных препаратов 58

*Федоровых В. С., Маркелов Ю. М., Карбаускене С. И.,
Бакунович Т. В.*
Выявление туберкулеза у детей и подрост-
ков в Республике Карелия с помощью пре-
парата «Диаскинтест» 62

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

Голубева Л. В., Наквасина Е. Н.
Смена напочвенного покрова на старо-
пахотных залежах Каргопольского района
Архангельской области 67

Новожилова О. А.
Автоматизированные системы управления
как фактор повышения эффективности мо-
лочного животноводства 72

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Андреев А. А., Колесников Г. Н., Чалкин А. А.
Древесно-цементный композит с добавкой
стеатита как конструкционный и демпфи-
рующий материал 75

Талбонен А. Н., Рогов А. А.
Аннотирование изображений из историче-
ского цифрового альбома с помощью тек-
стур методом моментов 79

*Шиловский В. Н., Питухин А. В., Кяльвияйнен В. А.,
Костюкевич В. М.*
Обеспечение эксплуатационной техноло-
гичности лесозаготовительных машин 84

Воронова А. М., Пискунов М. А.
Моделирование параметров лесосеки для
тестирования алгоритма построения систе-
мы транспортных путей 88

Калашиник А. И., Калашиник Н. А., Запорожец Д. В.
Исследование состояния насыпного гид-
ротехнического сооружения на моренном
основании 93

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Бакушев С. В.
Продольно-поперечные геометрически-
нелинейные волны деформаций 99

*Величко А. А., Борисков П. П., Черемисин А. Б.,
Стефанович Г. Б.*
Рентгеновский фотоэлектронный анализ
анодных пленок оксида ванадия 104

Журкин Д. В., Рабинович А. Л.
Оценка формы цепных углеводородных мо-
лекул методом Монте-Карло 109

Новичонок А. О., Ковальский Р.
C/2012 S1 (ISON): early observations at Mt.
Lemmon survey 118

Семенов А. Б., Воробьев А. Н., Серержина М. А.
Алгоритм поиска связанных областей на би-
нарном видеоизображении чересстрочной
развертки для применения в FPGA 120

Contents 124

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

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

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ РАН

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

Сведения о журнале и его архиве передаются в ОАО «Агентство „Книга-Сервис“» и размещаются на базовом интернет-ресурсе 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

Подписано в печать 22.09.2014. Формат 60×90^{1/8}. Бумага офсетная. Печать офсетная.
10 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. (1-й завод – 175 экз.). Изд. № 271

Индекс 66093. Цена свободная.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77–37987
от 2 ноября 2009 г. выд. Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций

Отпечатано в типографии Издательства
Петрозаводского государственного университета
185910, Республика Карелия,
г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33

ЭРНЕСТ ВИКТОРОВИЧ ИВАНТЕР

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

ЕЛЕНА АНАТОЛЬЕВНА МОИСЕЕВА

кандидат биологических наук, доцент кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
eko200@petsu.ru

ИВАН АЛЕКСЕЕВИЧ ЛЕОНТЬЕВ

аспирант кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
eko200@petsu.ru

**ЭКОЛОГИЯ ПОЛЕВКИ-ЭКОНОМКИ (*MICROTUS OECONOMUS* PALL.)
В КОРЕННЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ЛАНДШАФТАХ КАРЕЛИИ***

В Карелии полевка-экономка значительно уступает по численности большинству популяций из других частей видового ареала (средний многолетний показатель – 0,28 экз. на 100 ловушко-суток и 0,12 на 10 канавко-суток). Это связано с ограниченным распространением подходящих биотопов (травянистые болота и поросшие осокой берега лесных водоемов) и малой их кормностью. Наиболее характерная черта биотопического размещения вида в таежной зоне – стенотопность – практическое отсутствие его в сомкнутых хвойных древостоях, даже в сильно фрагментированных, и тяготение к зарастающим вырубкам. В итоге сплошные концентрированные рубки леса могут весьма позитивно сказываться на численности и распространении полевки-экономки, особенно когда свежие вырубки появляются вблизи от источника расселения (пойменные луга, ивняки и др.). Основные причины многолетних изменений численности вида – метеорологические факторы зимнего и весенне-летнего сезонов, определяющие, с одной стороны, успешность перезимовки и репродукции популяции, а с другой – кормовые условия (урожай зеленой массы, ее доступность для зверьков и др.).

Ключевые слова: популяция, биотоп, экологические факторы, динамика численности, стенотопность, конкуренция

Полевка-экономка – весьма характерный представитель мышевидных грызунов Карелии, однако по уровню численности этот вид значительно уступает здесь большинству его популяций из других частей видового ареала. Средний многолетний (1956–2013) показатель учетов этого вида в Карелии составил 0,28 экз. на 100 ловушко-суток и 0,12 на 10 канавко-суток, тогда как в средней полосе и в южнотаежной зоне России полученные результаты учетов этого вида превышают их в 5 и даже 10 раз [3]. Лишь в Ленинградской и Свердловской областях, а также в Латвии и Белоруссии полевка-экономка столь же малочисленна, как и в Карелии [1], [6], [8].

Низкий уровень численности вида на территории таежного Северо-Запада России можно связать с ограниченным распространением подходящих биотопов и малой их кормностью. Травянистые болота и поросшие осокой берега лесных водоемов – основные места обитания полевки-экономки в таежной зоне [3] – занимают в Карелии незначительные площади (в боль-

шинстве здесь преобладают бедные травянистой растительностью моховые болота). Сочная водно-болотная растительность, представленная в основном редкими зарослями, тянущимися узким пунктиром вдоль ручьев, таежных речек и по берегам травянистых озер, способна прокормить сравнительно небольшое поголовье зверьков. Росту их численности препятствуют также резкие перепады уровня воды, ведущие к сокращению кормности и ремизности угодий.

В условиях Карелии, как и всего ареала, полевка-экономка – один из наиболее стенотопных видов мелких грызунов. Она предпочитает увлажненные участки, приуроченные к берегам водоемов, сырые ольшаники, луга, осоково-пушицевые кочкарники, заросли кустарников по границе с моховыми болотами и особенно листовенное мелколесье в долинах рек и ручьев. В этих стациях она преимущественно и ловилась (табл. 1). По гидрофильности полевка-экономка близка к водяной полевке, но в отличие от нее редко селится у открытой воды и часто встре-

чается в глубине леса, придерживаясь влажных и сильно захламленных участков. В целом же характерная черта биотопического размещения экономки – практическое отсутствие ее в сомкнутых хвойных древостоях, даже в сильно фрагментированных (табл. 2). Численность экономки была здесь значительно стабильнее, чем во втором по численности этого вида биотопе – несомкнутом лиственном молодняке на злаковой вырубке (коэффициент вариации 129% против 346% соответственно).

В дальнейшем, по мере старения вырубки численность полевки-экономки продолжает ос-

таваться довольно высокой (рис. 1). Этим она отличается от темной полевки, которая на данной вырубке исчезала уже через 5 лет [5]. Более того, полевка-экономка не только быстро восстановила численность после глубокой депрессии всего населения мелких млекопитающих, но и усилила свои позиции в группе мышевидных грызунов. Одной из причин этого можно считать «подпитку» населения экономки на вырубке иммигрантами из ближайших мест – пойменных ивняков и заливного луга с мощным травяно-кустарничковым ярусом.

Таблица 1
Биотопическое размещение и численность полевки-экономки в Карелии

Биотоп	Учеты ловушками			Учеты канавками		
	экз. на 100 ловушко-суток	доля вида в уловах, %	коэффициент верности биотопу	на 10 канавко-суток	доля вида в уловах, %	коэффициент верности биотопу
Сосняки лишайниковые	–	–	–	–	–	–
Сосняки-зеленомошники	–	–	–	07	0,6	–1,40
Ельники-зеленомошники и травяно-кустарничковые	01	0,3	0	0,20	0,9	+0,15
Спелые лиственные и смешанные леса	04	0,1	+3,50	0,40	1,7	0
Лиственное мелколесье	07	1,4	–0,47	0,20	1,8	+2,30
Молодые и зарастающие вырубки	02	0,6	00	–	–	–
Луга и другие сельскохозяйственные угодья	03	0,7	00	0,50	4,7	+0,20

Таблица 2
Изменение численности и соотношения видов полевок в коренных и трансформированных рубками лесных биотопах

Биотоп	Рыжая полевка			Темная полевка			Полевка-экономка		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Учеты ловушко-линиями									
Сосняки зеленомошные, спелые	2,8	60	94	0,14	2,5	5,0	0	0	0
Ельники зеленомошные, спелые	2,8	62	98	0,02	0,4	0,7	0	0	0
Открытые вырубки	1,9	22	37	2,3	26,0	45,0	0,8	8	16,0
Молодняки 6–20 лет	2,9	39	66	0	14,0	23,0	0,4	5	9,1
21–40 лет	2,0	72	100	0,06	0	0	0	0	0
Вторичные древостои 50–80 лет	2,1	43	92	0,06	1,0	2,6	0,1	3	4,4
Семенные куртины	2,3	58	96	0,1	2,0	4,2	0	0	0
Недорубы	3,8	55	89	0,4	5,0	9,4	0	0	0
Экотоны (лес-вырубка)	4,7	39	55	2,9	25,0	34,0	0,9	8	10,6
Учеты ловчими канавками									
Сосняки зеленомошные, спелые	2,2	40	95	0,6	10	26	0	0	0
Ельники зеленомошные, спелые	1,0	27	100	0	0	0	0	0	0
Открытые вырубки	0,1	2	5	1,4	32	76	0,1	3	5,4
Молодняки 6–20 лет	0,5	9	41	0,6	14	49	0	0	0
20–30 лет (смешанные)	2,0	45	77	0,6	10	23	0	0	0
20–40 лет (хвойные)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Вторичные древостои 50–80 лет	1,1	24	50	0	0	0	0,2	4	9,1
Семенные куртины	1,6	23	59	0,8	14	30	0	0	0
Недорубы	0,7	12	70	0,2	3	20	0	0	0

Примечания. I – численность – экз. на 100 ловушко-суток или на 10 канавко-суток; II – % от улова мелких млекопитающих; III – % от улова землероек.

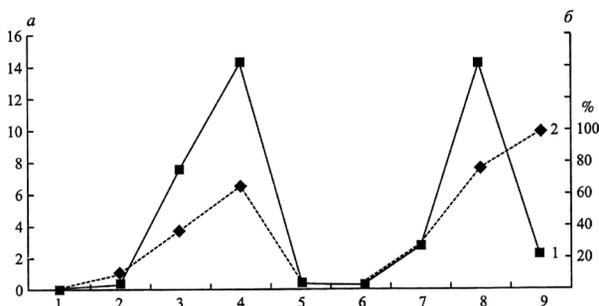


Рис. 1. Изменения численности (1) и индекс доминирования (2) полевки-экономки в связи с давностью рубки (из [5]). По оси абсцисс – давность рубки, лет; по оси ординат *a* – численность, экз. на 100 ловушко-суток, по оси ординат *b* – индекс доминирования, %

Таким образом, сплошные концентрированные рубки леса могут весьма позитивно сказываться на численности и распространении даже такого стенотопного вида, как полевка-экономка, особенно в тех случаях, когда свежие вырубki появляются вблизи источников расселения (пойменные луга, ивняки и др.). На таких участках численность экономок в отдельные годы достигала весьма высоких показателей (до 14 экз. на 100 ловушко-суток) [5]. При этом экономки вполне успешно выдерживают совместное обитание с другими видами лесных полевок (рыжая, темная). Учитывая, что в этих условиях экономки могут заселять вырубki довольно продолжительное время (по крайней мере 8–10 лет), можно предполагать, что промышленное освоение лесов за последние полвека увеличило размеры территории, заселенной экономкой, прежде всего за счет примыкающих к прибрежным местообитаниям открытых и зарастающих вырубok.

Сезонные и годовые изменения биотопического размещения полевки-экономки в условиях Карелии не очень значительны. Это связано с общим низким уровнем численности зверьков, сосредотачивающихся обычно в немногих оптимальных «станциях переживания». Кроме того, весенние затопления, служащие во многих местах главной причиной сезонных перемещений полевки-экономки ([3], [4], [14] и др.), не достигают в Карелии значительных масштабов и играют второстепенную роль. Во второй половине лета экономки становятся более эвритопными и заселяют большее число станций, а зимой и в начале вегетационного периода, как и вообще в годы низкой численности, сосредотачиваются в немногих наиболее благоприятных местах.

Особо следует сказать об отношении полевки-экономки к сельскохозяйственным и другим окультуренным участкам. Вопреки установившемуся в литературе мнению о «синантропизме» только сибирских экономок и отсутствии этой особенности у полевок, населяющих европейскую часть России [3], в Карелии полевки-

экономки весьма охотно селятся на огородах, засеянных полях и сенокосных лугах, расположенных у водоемов, а поздней осенью и весной часто попадают в стогах сена и различных постройках человека. По свидетельству Дж. Таста [15], еще более синантропны полевки-экономки Лапландии. Здесь они являются типичными обитателями культурного ландшафта и замещают отсутствующих в местных поселках крысы и мышей. В то же время вырубok, даже сырых, они в условиях Лапландии явно избегают.

В целом же для полевок-экономок Карелии характерен, по терминологии Н. П. Наумова [9], мозаичный тип поселений, представляющих обычно ленточные вкрапления, приуроченные к долинам рек, сырым низинам и заболоченным берегам травянистых озер. Поскольку мозаичный тип поселения в данном случае отличается стабильностью и образован устойчивыми мерусами (термин В. Е. Флинта), можно говорить об инсулярном типе пространственной структуры популяции полевок-экономок Карелии (в представлении В. Е. Флинта [12]).

Ранее мы уже указывали на характерные различия в биотопическом размещении полевки-экономки и темной полевки, обусловленные их конкурентными отношениями [2]. В Карелии это проявляется в своеобразном разграничении «сфер влияния». Полевка-экономка, как более сильный и стенотопный вид, выбирает лучшие, более влажные и захлапленные участки с богатым травяным покровом и зарослями кустарника, а темная – менее требовательная к местообитанию – расселяется значительно шире, не избегая сухих с однообразной растительностью мест, в том числе травяных лесов на водоразделах. О территориальной конкуренции этих видов в зоне березовых лесов, где их экологические ниши наиболее полно совпадают, пишет, по наблюдениям в Северной Финляндии, Дж. Таст [16].

На рис. 2 показана многолетняя динамика численности полевки-экономки в Карелии по данным двух видов учета – ловушками и канавками. При этом согласованный ход обеих кривых демонстрирует совершенно уникальную картину: стабильно низкую численность вида на протяжении почти всего 60-летнего периода при наличии всего одного, но зато чрезвычайно высокого ее подъема в 1963 году. В этот год величина уловов превысила средние многолетние показатели почти в 40 раз, тогда как за все остальное время колебания численности экономки не превышали 2–3-кратной величины. Напомним, что тот же 1963 год был рекордным по отловам и для многих других видов мелких млекопитающих Карелии, в том числе доминирующих по всему региону – обыкновенной бурозубки и рыжей полевки [2]. Сходство в характере популяционной динамики у полевки-экономки и рыжей полевки отмечал также А. Н. Формозов [13],

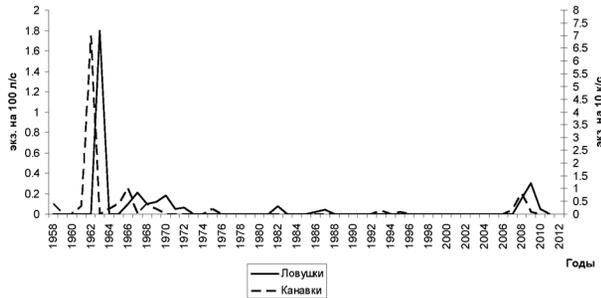


Рис. 2. Многолетняя динамика численности полевки-экономки в Карелии по данным учетов численности ловушко-линиями и ловчими канавками

однако он усматривал и существенные отличия. Такие отличия есть и в Карелии. Они касаются в основном амплитуды колебаний численности, более широкой у полевки-экономки, и количества подъемов, более частых у рыжей полевки. Еще менее синхронны изменения численности экономки и темной полевки. Так, у темной полевки наивысшая численность за все годы исследований зарегистрирована в 1968 году при полной депрессии численности полевки-экономки, а у последней – в 1963 году, когда численность темной полевки также заметно возросла. Если присовокупить к этому территориальную разобщенность двух названных видов (они занимают или разные биотопы, или разные участки биотопа), то причины описанных явлений следует искать в конкурентных отношениях между ними. Эту точку зрения одним из первых высказал А. Н. Формозов: «...очевидно, два вида лесных серых полевок, сходных по величине и привязанности к травянистым местам леса, являются антагонистами и делят между собой сходные биотопы, избегая близкого соседства одна другой» [13; 59].

Для выяснения роли отдельных факторов в многолетних изменениях численности полевок-экономок Карелии мы сопоставили два периода: с одной стороны, год депрессии (1962), предшествовавший рекордному подъему численности, и следовавший за ним год снижения (1964), а с другой – сам год подъема численности (1963).

Зима 1961/62 года отличалась капризной, во многом аномальной погодой. В период от первых морозов, отмеченных 10 ноября, до второй декады февраля низкие температуры воздуха (до -29°) часто чередовались с оттепелями (до $+3-4^{\circ}$), во время которых выпадали осадки в виде морозящего дождя и мокрого снега. Снег выпал на слабо промерзшую землю; в дальнейшем наблюдалось полное оттаивание почвы во время оттепелей и промерзание ее (до 3–28 см) в периоды низких температур воздуха. Глубина снега чуть превысила многолетние показатели, но снег был очень плотный и сильно насыщен влагой. Кроме того, постоянно образовывалась

приземная ледяная корка, нередко значительной толщины. Весна 1962 года была сравнительно поздней, холодной и затяжной (переход среднесуточной температуры через 5° отмечен на неделю позднее обычного), с частыми возвратами холодов. Первая половина лета отличалась прохладной погодой и обилием осадков, а вторая – более сухой и умеренно теплой. Урожай зеленой массы был средним, но в июне из-за поздней весны и низких температур травянистая растительность вегетировала слабо. Осень была поздней и теплой, снежный покров установился только 13 декабря.

Зима 1963/64 года по погодным условиям была близка к описанной выше, только март и апрель были гораздо холоднее, а январь, наоборот, теплее, с частыми оттепелями и гололедами. Снега было меньше нормы, и земля промерзала на большую глубину. Весна 1964 года была поздней и холодной, с частыми заморозками на почве. Снег прошел примерно на неделю позднее, чем в обычные годы, позднее отмечен и переход среднесуточных температур через 0 и 5° . Лето выдалось засушливым, баланс влаги – 83. Урожай травянистых растений в типичных местообитаниях полевки-экономки (влажный разнотравный луг, остросочник, осушаемый торфяник и др.) был ниже среднего на 12–20% (неопубликованные данные В. А. Зайковой), и они сравнительно рано начали усыхать.

Зима 1962/63 года в отличие от предыдущих и последующих характеризовалась умеренно холодной, но ровной погодой. За всю зиму наблюдалась только одна оттепель (27 февраля – 1 марта). Снежный покров был очень рыхлый, и глубина его значительно превышала норму. Весна 1963 года наступила рано и была очень дружной: переход среднесуточной температуры через 0 и 5° зарегистрирован на 8–10 дней раньше обычных сроков. Снеготаяние протекало бурно, и снег сошел раньше, чем в предыдущие и последующие зимы. Лето было теплым. В июне наблюдалась очень хорошая вегетация травянистых растений и общий урожай зеленой массы на многих типах лугов заметно превышал средние многолетние показатели (устное сообщение В. А. Зайковой). Первая половина лета была сухой, но в июле – августе осадков выпало достаточно. Осень началась очень поздно (переход среднесуточной температуры воздуха через 10° отмечен 28 сентября, что является самой поздней датой для всех лет наблюдений), но стойкий снежный покров установился на 10 дней раньше обычного.

Таким образом, год максимального подъема численности полевок-экономок отличался благоприятными условиями перезимовки (ровной, без оттепелей и гололедов зимней погодой, высоким и рыхлым снежным покровом), ранней и дружной весной, теплым продолжительным

летом, хорошей вегетацией травянистых растений и оптимальным распределением летних осадков. Напротив, годы депрессии характеризовались малоснежными с капризной погодой зимами (частые и затяжные оттепели и гололеды, плотный мокрый снег, промерзание почвы, образование приземной ледяной корки), поздними и затяжными веснами с возвратами холодов, низкими температурами, обилием осадков в начале лета, их дефицитом и засухой в конце июля – августе и невысокими урожаями зеленой массы. Сочетание этих факторов и обусловило в первом случае хорошую сохранность поголовья к весне и началу лета, чрезвычайно интенсивное (с массовым участием прибылых животных) и продолжительное по срокам размножение и в итоге резкий подъем численности поголовья к осени, а во втором – высокую зимнюю и весеннюю смертность животных (из-за низких температур в приземном ярусе, уплотнения снега, образования ледяной корки и т. д.), позднее начало и низкую интенсивность размножения и в итоге депрессию численности. В то же время каждый из названных факторов (глубина снежного покрова, оттепели и гололеды, сроки наступления и продолжительность весны, обилие и распределение осадков и др.), взятый в отдельности, по-видимому, не способен оказать решающее влияние на размножение и численность полевки-экономки. Существенно их комплексное действие. А поскольку удачное сочетание большого количества разнообразных гидрометеорологических и фенологических факторов – явление редкое, то редкими бывают и высокие подъемы

численности полевки. За более чем 60 лет наших наблюдений это произошло лишь однажды – в 1963 году. Что же касается внутривидовых механизмов авторегуляции численности, то у полевки-экономки Карелии они, очевидно, играют незначительную роль, и прежде всего из-за очень низкой плотности видовой популяции. Они могут реализовываться, вероятно, только в годы резкого и длительного подъема численности, а в остальное время рост поголовья сдерживается внешними экзогенными факторами.

В сезонной динамике численности полевки-экономки Карелии (рис. 3) обращает на себя внимание сравнительно поздний максимум отлова зверьков – в октябре, тогда как, например, в верховьях Лены он отмечается в конце августа – сентябре [10]. По всей видимости, это связано с более активным позднелетне-осенним размножением карельских полевки-экономки.

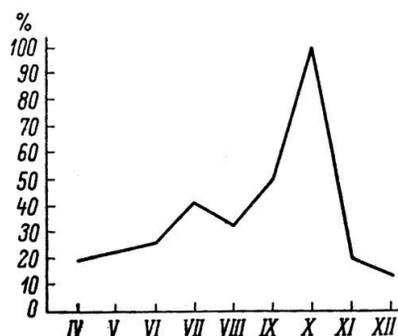


Рис. 3. Сезонная динамика отлова полевки-экономки (по средним многолетним данным). По оси абсцисс – месяцы; по оси ординат – относительное количество зверьков, % от отлова за октябрь

* 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. Айрапетьянц А. Э. Насекомоядные и грызуны // Звери Ленинградской области. Л., 1970. С. 150–165.
2. Ивантер Э. В. Популяционная экология мелких млекопитающих таежного Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1975. 246 с.
3. Карасев А. В. Экологические особенности млекопитающих – носителей лептоспиры *grippytyphosa* и их роль в природных очагах лептоспироза // Фауна и экология грызунов. Вып. 10. М., 1971. С. 45–53.
4. Кривошеев В. Г. Полевка-экономка // Млекопитающие Якутии. М.: Наука, 1971. С. 344–366.
5. Курхинен Ю. П., Данилов П. И., Ивантер Э. В. Млекопитающие Восточной Фенноскандии в условиях антропогенной трансформации таежных экосистем. М.: Наука, 2006. 208 с.
6. Лапинь И. М. Биология и паразитофауна мелких лесных млекопитающих Латвийской ССР. Рига, 1963. 135 с.
7. Марвин М. Я. Мышевидные грызуны северных районов Среднего Урала // Ученые записки Уральского ГУ. Т. 43. Вып. 3. Свердловск, 1966. С. 11–21.
8. Михолап О. Н., Терехович В. Ф. Динамика численности мышевидных грызунов в лесных биотопах Белоруссии // Экология позвоночных животных Белоруссии. Минск, 1965. С. 34–41.
9. Наумов Н. П. Типы поселений грызунов и их экологическое значение // Зоологический журнал. 1954. Т. 33. Вып. 2. С. 211–219.
10. Реймерс Н. Ф., Воронов Г. А. Насекомоядные и грызуны Верхней Лены. Иркутск, 1963. 192 с.
11. Флинт В. Е. Типы пространственной структуры у мелких млекопитающих // Популяционная структура вида у млекопитающих. М.: Изд-во МГУ, 1970. С. 161–163.
12. Флинт В. Е. Пространственная структура популяций мелких млекопитающих. М.: Наука, 1977. 182 с.
13. Формозов А. Н. Мелкие грызуны и насекомоядные Шарьинского района Костромской области в период 1930–1940 гг. // Материалы по грызунам. М.: Изд-во МОИП, 1948. № 3. С. 3–110.
14. Ta st J. The root vole, *Microtus oeconomus* (Pallas), as an inhabitant of seasonally flooded land // Ann. zool. fenn. 1966. Vol. 9. № 2. P. 9–17.
15. Ta st J. The root vole, *Microtus oeconomus* (Pallas), in man-made habitats in Finland // Ann. zool. fenn. 1968. Vol. 5. № 3. P. 97–106.
16. Ta st J. Influence of the root vole, *Microtus oeconomus* (Pallas), upon the habitat selection of the field vole, *Microtus agrestis* (L.), Northern Finland // Suomal. tiedekat. Toimituks. 1968. S. A. Vol. 4. № 136. P. 23.

Ivanter E. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Moiseeva E. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Leont'ev I. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

ECOLOGY OF ROOT VOLE (*MICROTUS OECONOMUS* PALL.) IN ANTHROPOGENIC LANDSCAPE OF KARELIA

Numerical strength of Karelian root vole is much weaker than the strength of other species in the species area. (The average long-standing data amount to 0,23 rouges per 100 trap-days) The phenomenon is conditioned by the limited distribution of appropriate biotopes (grassy swamps and numerous forest water basins covered by sedge grass) and poor availability of nutrition. The most characteristic features of the root vole habitat distribution in the taiga zone are its absence in the soft wood forests, on the one hand, and its distribution tendency toward grassy clear cuttings, on the other hand. Therefore, clear-cutting of the forest can lead to a significant increase of the root vole numerical strength especially when such cutting areas are located close to the natural habitat (bottomland meadows, willow shrubs, and etc.) of the studied species. The basic reasons for lasting fluctuations in species' numerical strength are seasonal meteorological factors, which define wintering and fertility level of the population, and availability of sufficient nutrition.

Key words: population, biotope, ecological factors, dynamics of numerical strength, competitiveness

REFERENCES

1. Ayrapet'yants A. E. Insects and rodents [Nasekomoyadnye i gryzuny]. *Zveri Leningradskoy oblasti* [Animals of Leningradskii region]. Leningrad, 1970. P. 150–165.
2. Ivanter I. V. *Populyatsionnaya ekologiya melkikh mlekopitayushchikh taezhnogo Severo-Zapada SSSR* [Population ecology of small mammals in the taiga zone of the USSR North-West]. Leningrad, Nauka Publ., 1975. 246 p.
3. Karaseva E. V. Ecological features of mammals – carriers of *grippytyphosa* and their role in leptospirosis development [Ekologicheskie osobennosti mlekopitayushchikh – nositeley leptospiry *grippytyphosa* i ikh rol' v prirodnykh ochagakh leptospiroza]. *Fauna i ekologiya gryzunov* [Rodents' fauna and ecology]. Issue. 10. Moscow, 1971. P. 45–53.
4. Krivosheev V. G. Root vole [Polevka-ekonomka]. *Mlekopitayushchie Yakutii* [Mammals of Yakutia]. Moscow, Nauka Publ., 1971. P. 344–366.
5. Kurkkinen Yu. P., Danilov P. I., Ivanter E. V. *Mlekopitayushchie Vostochnoy Fennoskandii v usloviyakh antropogennoy transformatsii taezhnykh ekosistem* [Mammals of Eastern Fennoskandia in conditions of anthropogenic transformation of taiga ecosystems]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 208 p.
6. Lapin' I. M. *Biologiya i parazitofauna melkikh lesnykh mlekopitayushchikh Latviyskoy SSR* [Biology and parasites' fauna of small forest mammals in Latvian SSR]. Riga, 1963. 135 p.
7. Marvin M. Ya. Mouse-like rodents of the Urals northern areas [Myshevidnye gryzuny severnykh rayonov Srednego Urala]. *Uchenye zapiski Ural'skogo GUT* [Proceedings of the Urals State University]. Vol. 43. Issue. 3. Sverdlovsk, 1966. P. 11–21.
8. Mikhailov O. N., Terekhovich V. F. Dynamics of mouse-like rodents' numerical strength in forest biotopes of Byelorussia [Dinamika chislennosti myshevidnykh gryzunov v lesnykh biotopakh Belorussii]. *Ekologiya pozvonochnykh zhyvotnykh Belorussii* [Ecology of vertebrate animals in Byelorussia]. Minsk, 1965. P. 34–41.
9. Naumov N. P. Types of rodents' settlements and their ecological significance [Tipy poseleniy gryzunov i ikh ekologicheskoe znachenie]. *Zoologicheskii zhurnal* [Zoological journal]. 1954. Vol. 33. Issue. 2. P. 211–219.
10. Reymers N. F., Voronov G. A. *Nasekomoyadnye i gryzuny Verkhney Leny* [Insects and rodents of the Upper Lena]. Irkutsk, 1963. 192 p.
11. Flint V. E. Types of spatial structures of small mammals [Tipy prostranstvennoy struktury u melkikh mlekopitayushchikh]. *Populyatsionnaya struktura vida u mlekopitayushchikh* [Species' population structure for mammals]. Moscow, MGU Publ., 1970. P. 161–163.
12. Flint V. E. *Prostranstvennaya struktura populyatsiy melkikh mlekopitayushchikh* [Spatial population structure for small mammals]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 182 p.
13. Formozov A. N. Small rodents of Shar'inskii region of Kostromskoi area in 1930–1940. [Melkie gryzuny i nasekomoyadnye Shar'inskogo rayona Kostromskoy oblasti v period 1930–1940 gg.]. *Materialy po gryzunam* [Materials on rodents]. Moscow, MOIP Publ., 1948. № 3. P. 3–110.
14. Tast J. The root vole, *Microtus oeconomus* (Pallas), as an inhabitant of seasonally flooded land // *Ann. zool. fenn.* 1966. Vol. 9. № 2. P. 9–17.
15. Tast J. The root vole, *Microtus oeconomus* (Pallas), in man-made habitats in Finland // *Ann. zool. fenn.* 1968. Vol. 5. № 3. P. 97–106.
16. Tast J. Influence of the root vole, *Microtus oeconomus* (Pallas), upon the habitat selection of the field vole, *Microtus agrestis* (L.), Northern Finland // *Suomal. tiedekat.* Toimituks. 1968. S. A. Vol. 4. № 136. P. 23.

Поступила в редакцию 25.07.2014

СТАНИСЛАВ ПЕТРОВИЧ КИТАЕВ

доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории экологии рыб и водных беспозвоночных, Институт биологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
kitaev.stas00@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)
szhenya@list.ru

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МАКРОЗООБЕНТОСА ОЗЕРНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ТОВАРНОЙ ФОРЕЛИ*

Представлены результаты гидробиологических исследований сообщества макрозообентоса озера Верхнее Пулонгское, расположенного в северной части Карелии. Дана оценка современного состояния донной фауны в летне-осенний период при товарном выращивании радужной форели. Анализ полученных данных показал, что по уровню количественного развития бентоса озеро Верхнее Пулонгское можно классифицировать как β -олиготрофный водоем амфиподо-ортокладиновой группы, типичный для зоны тайги и не испытывающий значительной антропогенной нагрузки.

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

ВВЕДЕНИЕ

Пресноводные экосистемы при современном уровне развития рыбохозяйственной деятельности (промышленного рыбоводства) подвержены существенному антропогенному влиянию. В результате загрязнения происходит трансформация условий водной среды, способная привести к изменениям в гидробиоценозе водоемов. Проведение постоянного мониторинга состояния экосистемы дает представление об уровне и скорости загрязнения отходами садкового хозяйства при товарном выращивании радужной форели.

Промышленное форелеводство в Карелии стало активно развиваться с начала 1990-х, в 2013 году объемы выращивания (данные Минсельрыбохотхоза РК) достигли 22 500 т в год. В связи со значительным наращиванием объемов товарной продукции радужной форели на садковых хозяйствах проблема изучения их влияния на естественные водоемы становится особенно актуальной [8], [9]. Гидробионты являются природными индикаторами и позволяют установить фоновое состояние водной экосистемы и ее последующее изменение при антропогенном воздействии. Сообщество макрозообентоса обладает рядом преимуществ при оценке состояния окружающей среды, что позволяет использовать его в качестве удобного, надежного и информативного биоиндикатора состояния водной среды и ее антропогенных изменений. По данным А. И. Баканова [3], эта экологическая группа обладает достаточно крупными размерами, способностью обитать в разных условиях, а значительная продолжительность жизненного

цикла позволяет им аккумулировать вещества, влияющие на водную экосистему.

Цель работы – оценить современное состояние сообщества макрозообентоса в озере Верхнее Пулонгское при выращивании товарной форели.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Работа выполнялась в 2012 году на озере Верхнее Пулонгское. Сбор проб макрозообентоса осуществлялся в июне и октябре в районе садкового хозяйства. Выбор станций обуславливался необходимостью оценки возможных изменений в экосистеме при эксплуатации форелевой фермы. В рамках программы изучения на водоеме было собрано и обработано 16 проб гидробиологического материала на 8 станциях, относящихся к различным биотопам (8 проб у садков, 4 пробы – 150–200 м до садков и 4 пробы в условно-чистой зоне – 600–800 м от садков). Отбор проб макрозообентоса осуществлялся дночерпателем ДАК-250 (модификация Экмана – Берджа с площадью захвата $1/40 \text{ м}^2$) с последующей промывкой грунта через сито № 19 (ячейка 0,5 мм) и фиксацией 8% раствором формальдегида. На каждой станции отбирали по два дночерпателя. Обработку проб проводили в лаборатории по общепринятой методике В. И. Жадина [5], организмы макрозообентоса идентифицировали с использованием определителей [8], [10]. Беспозвоночных взвешивали с точностью 0,1 мг на торсионных весах. Продукция макрозообентоса рассчитывалась по уравнению: $P_6 = (2,198 \pm 0,496) \times V_{\text{ср}}$, из чего следует, что продукция сообществ бентоса за вегетационный сезон пропорциональна

средней биомассе донных животных за это же время [1]. Уровень трофности озера определялся по методике С. П. Китаева [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Озеро Верхнее Пулонгское расположено в северной части Карелии (66°19 с. ш. и 33°12 в. д.), относится к бассейну Белого моря. В литературных источниках по озеру имеются только гидрологические данные [4]. Водоем глубокий, соединяется с Чупинской губой Белого моря через реку Пулонга. Площадь водной поверхности 28,4 км². Наибольшая длина озера 16 км, ширина 3,4 км, средняя глубина 15,0 м, наибольшая около 50 м. Коэффициент условного водообмена равен 0,45, то есть водные массы озера полностью возобновляются за счет притока воды с водосбора каждые 2 года, что является очень важным фактором при выращивании форели. Гидрологические показатели представлены в табл. 1.

Таблица 1
Основные гидрологические показатели оз. Верхнее Пулонгское [4]

Показатель	Величина
Площадь водосбора, км ²	601
Площадь водной поверхности, км ²	28,4
Объем водных масс, млн м ³	426
Средний годовой объем притока водных масс, млн м ³	190
Средняя глубина, м	15,0
Максимальная глубина, м	50,0
Прозрачность, м	2,5
Удельный водосбор	31,2
Коэффициент условного водообмена	0,45
Отношение прозрачности к средней глубине	0,16

В хозяйственном отношении озеро и его водосбор используются для рекреации и любительского рыболовства, а водосборная площадь – для рубок леса и в прошлом для добычи слюды.

Химический состав воды определялся по стандартным методикам [2; 7] в лаборатории гидрохимии Института водных проблем Севера КарНЦ РАН. Водные массы озера Верхнее Пулонгское по своему химическому составу относятся к гидрокарбонатному классу, группе кальция. Вода очень мягкая, ее жесткость равна 0,20 мг-экв/л, минерализация составляет 15,7–26,5 мг/л, цветность – около 45°. Содержание органических веществ невелико – перманганатная окисляемость колеблется в пределах 9,7–11,7 мгО/л, значения БПК₅, БПК₂₀ варьируют в незначительных пределах.

Химический анализ воды В. Пулонгского показал, что содержание общего фосфора и азота характерно для олиготрофных водоемов [6], [11].

Гидробиологические исследования на оз. Верхнее Пулонгское ранее не проводились. Зообентос озера характеризуется низкими количественными показателями. Средние количественные показатели зообентоса за период исследований приводятся в табл. 2 и 3.

Таблица 2
Средние количественные показатели зообентоса оз. Верхнее Пулонгское (лето, 2012 год)

Группы	Численность, экз./м ³	%	Биомасса, г/м ²	%
Chironomidae	120	39	0,05	3
Amphipoda	125	41	0,11	6
Nematoda	5	2	0,01	1
Bivalvia	55	18	1,79	90
Всего	305	100	1,96	100

Таблица 3
Средние количественные показатели зообентоса оз. Верхнее Пулонгское (осень, 2012 год)

Группы	Численность, тыс. экз./м ³	%	Биомасса, г/м ³	%
Chironomidae	45	22	0,03	10
Amphipoda	140	70	0,22	73
Nematoda	5	3	0,01	3
Oligochaeta	10	5	0,04	14
Всего	200	100	0,30	100

В конце июня соотношение количественных показателей основных групп зообентоса отражает состояние донной фауны в раннелетний период при температуре воды 10–11 °С (см. табл. 2). Доминировали амфиподы, а по биомассе – двустворчатые моллюски (41 % и 90 % соответственно). Доля остальных групп бентосных организмов была в этот период незначительной.

В осенний период (I декада октября) количественные показатели зообентоса снижаются (см. табл. 3). По сравнению с результатами, полученными в конце июня, в пробах отсутствуют представители двустворчатых моллюсков, в два раза увеличилась биомасса амфипод, были отмечены олигохеты. Общая биомасса зообентоса в связи с элиминацией некоторых групп и в силу их неравномерного распределения закономерно уменьшилась. В целом видовой состав зообентоса оз. Верхнего Пулонгского характерен для холодноводных олиготрофных водоемов бореальной зоны и представлен в основном северными и эвритопными видами. Главную роль в составе донной фауны исследуемого водоема играют амфиподы и водные насекомые, в частности личинки хирономид. По результатам исследования озеро можно отнести к группе амфиопо-ортокладиновых. Особую ценность водоему придает наличие реликтовых ракообразных, представленных понтопореей (*Monoporeia (Pontoporeia) affinis* Lindstrom). Из представителей других групп бентоса можно отметить пизидиум (*Bivalvia*), характерный элемент донных биоценозов олиготрофных водоемов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Макрозообентос исследованного водоема характеризуется относительно невысоким так-

сономическим разнообразием и низкими величинами численности и биомассы. По уровню количественных показателей донной фауны оз. Верхнее Пулонгское можно характеризовать как β -олиготрофный водоем, типичный для пресноводных экосистем таежной зоны Северной Карелии [6]. По результатам проведенных нами исследований не выявлено никаких отклонений в донном сообществе водоема. Учитывая способность организмов макрозообентоса аккумулировать загрязняющие вещества в течение длитель-

ного времени, целесообразно рекомендовать эту группу донных животных в качестве постоянного объекта для мониторинга экологического состояния водоема. Поэтому для более объективной оценки влияния форелевого хозяйства на водную экосистему водоема целесообразно продолжение начатых исследований.

Выражаем благодарность директору форелевого хозяйства А. Н. Седлецкому и его сотрудникам за предоставленную возможность сбора материала.

* Работа выполнена 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

1. Алимов А. Ф. Элементы функционирования водных экосистем. СПб., 2001. 147 с.
2. Абакумов В. А. Контроль качества вод по гидрологическим показателям в системе гидробиологической службы СССР // Научные основы в системе контроля качества поверхностных вод. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 93–99.
3. Баканов А. И. Использование зообентоса для мониторинга пресноводных водоемов // Биология внутренних вод. 2000. № 1. С. 68–82.
4. Григорьев С. В., Грицевская Г. Л. Каталог озер КАСР. М.; Л., 1959. 240 с.
5. Жадин В. И. Методика изучения донной фауны и экологии донных беспозвоночных // Жизнь пресных вод СССР. Т. 4. Ч. 1. М., Л.: Наука, 1956. С. 279–382.
6. Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 395 с.
7. Морозов А. К. Химический состав воды // Современное состояние водных объектов РК. 1998. С. 122.
8. Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 511 с.
9. Стерлигова О. П., Ильмаст Н. В., Китаев С. П. Фермерское рыбоводство в Республике Карелия (состояние и перспективы) // Состояние и перспективы развития пресноводной аквакультуры. М.: ВНИИР, 2013. С. 453–459.
10. Чертопруд М. В., Чертопруд Е. С. Краткий определитель беспозвоночных пресных вод центра Европейской России. М.: Макс-пресс, 2003. 120 с.
11. Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х. Умирающие озера (причины и контроль антропогенного эвтрофирования). Л.: Гидрометеиздат, 1990. 279 с.

Kitaev S. P., 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)

ESTIMATION OF MACROZOOBENTHOS OF LAKE ECOSYSTEMS AFFECTED BY COMMERCIAL RAINBOW TROUT CULTIVATION

Results of the hydrobiological research of macrozoobenthos community of the Lake Verchnee Pulongskoye located in the northern part of Karelia are presented. The current status of the benthic fauna in the summer-autumn period under commercial farming of rainbow trout is given. Our data analysis shows that according to the quantitative benthos development level the Lake Verchnee Pulongskoye can be classified as a β -oligotrophic water body of Amphipodo-Chironomida class. The Lake Verchnee Pulongskoye is a typical water body of the boreal zone with significant lacking of anthropogenic load.

Key words: freshwater ecosystem, macrozoobenthos, biomass, abundance, trout cultivation

REFERENCES

1. Alimov A. F. *Elementy funktsionirovaniya vodnykh ekosistem* [Elements of the aquatic ecosystem functioning]. St. Petersburg, 2001. 147 p.
2. Abakumov V. A. Monitoring of water quality parameters in the hydrological system of the hydrobiological service USSR [Kontrol' kachestva vod po gidrologicheskim pokazatelyam v sisteme gidrobiologicheskoy sluzhby SSSR]. *Nauchnye osnovy v sisteme kontrolya kachestva poverkhnostnykh vod* [Scientific bases of the control system of surface water quality]. Leningrad, Gidrometeizdat Publ., 1977. P. 93–99.
3. Bakonov A. I. Using zoobenthos for freshwater monitoring [Ispol'zovanie zoobentosa dlya monitoringa presnovodnykh vodoemov]. *Biologiya vnutrennikh vod* [Biology of Inland Waters]. 2000. № 1. P. 68–82.
4. Grigor'ev S. V., Gritsevskaya G. L. *Katalog ozer KASSR* [Catalog of KASSR lakes]. Moscow; Leningrad, 1959. 240 p.
5. Zhadin V. I. Methods of studying benthic fauna and ecology of benthic invertebrates [Metodika izucheniya donnoy fauny i ekologii donnykh bespozvonochnykh]. *Zhizn' presnykh vod SSSR* [Life freshwater USSR]. Vol. 4. Part 1. Moscow; Leningrad, Nauka Publ., 1956. P. 279–382.
6. Kitaev S. P. *Osnovy limnologii dlya gidrobiologov i ikhtologov* [Basics of limnology for hydrobiologists and ichthyologists]. Petrozavodsk, Karelian Research Centre Publ., 2007. 395 p.
7. Morozov A. K. Chemical composition of water [Khimicheskiy sostav vody]. *Sovremennoe sostoyanie vodnykh ob'ektov RK* [Current state of water bodies of the RK]. 1998. P. 122.
8. *Opredelitel' presnovodnykh bespozvonochnykh Evropeyskoy chasti SSSR* [Identifiers of freshwater invertebrates of the European part of the USSR]. Leningrad, Gidrometeizdat Publ., 1977. 511 p.
9. Sterligova O. P., Il'mast N. V., Kitaev S. P. Fish farming in the Republic of Karelia (status and prospects) [Fermerskoe rybovodstvo v Respublike Kareliya (sostoyanie i perspektivy)]. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya presnovodnoy akvakul'tury* [Status and perspectives of freshwater aquaculture]. Moscow, VNIIR Publ., 2013. P. 453–459.
10. Chertoprud M. V., Chertoprud E. S. *Kratkiy opredelitel' bespozvonochnykh presnykh vod tsentra Evropeyskoy Rossii* [A short guide to freshwater invertebrates of the center of European Russia]. Moscow, Max-press Publ., 2003. 120 p.
11. Khenderson-Sellers B., Marklend Kh. *Umirayushchie ozera (prichiny i kontrol' antropogennogo evtrofirovaniya)* [Dying Lake (causes and control of anthropogenic eutrophication)]. Leningrad, Gidrometeizdat Publ., 1990. 279 p.

Поступила в редакцию 24.02.2014

ИГОРЬ ЛЕОНИДОВИЧ ТУМАНОВ

доктор биологических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Западный филиал ВНИИ охотничьего хозяйства и звероводства им. профессора Б. М. Житкова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
itumanov@rambler.ru

ОСОБЕННОСТИ БИОЛОГИИ И СОСТОЯНИЕ ЗАПАСОВ БУРОГО МЕДВЕДЯ НА ОСТРОВАХ ЮЖНЫХ КУРИЛ

Проведена оценка численности и возрастной структуры популяции бурых медведей на островах Кунашир и Итуруп. Их определяли методом визуальной регистрации зверей и их следов (с измерением ширины пальмарной мозоли) у лососевых нерестилищ, а также путем сбора данных от охотников и лесников. Приведены сведения по морфологии, питанию и поведенческим особенностям животных. За последние годы, несмотря на возросший интерес к охоте на бурого медведя, серьезные изменений его возрастной структуры или падения численности не наблюдается. Высокая доля старых особей в выборках свидетельствует о недостаточной промысловой нагрузке на популяцию. Рост численности медведя на островах определяется большой облесенностью территории, наличием участков с трудно проходимыми для человека зарослями бамбука, устойчивой кормовой базой и умеренной эксплуатацией лесного фонда.

Ключевые слова: бурый медведь, острова Кунашир и Итуруп, биология, численность, факторы, ее определяющие

На юге Курильской гряды бурый медведь обитает на таких крупных островах, как Итуруп и Кунашир. Они представляют собой часть горной цепи, вытянутой в меридиальном направлении. Первый из них площадью 6725 кв. км состоит из горных хребтов и вулканических массивов высотой до 1220–1634 м. Второй – площадью 1550 кв. км – сложен из средней высоты горных образований (500–900 м над уровнем моря), чередующихся с рядом вулканов, из которых действующие достигают 1485–1819 м. В лесах господствует лиственница, береза и ольха с подлеском из бамбука. Из ягодных растений чаще встречаются голубика, брусника, шикша, рябина. По вершинам склонов гор произрастает кедровый стланик. Из-за интенсивной вырубке хвойно-березово-ольхового древостоя лесистость снижается, и обширные пространства густо зарастают зарослями бамбука, под пологом которого практически отсутствуют ягодники и растительность с сочными корневищами, которыми любят питаться бурые медведи. Летом они спускаются со склонов гор к морскому или океаническому побережью. Питаются погибшими морскими животными, а в конце сезона и осенью перебираются в долины рек, где выкапывают корневища сочных растений, ловят живых и поедают уже отнерестившихся лососевых рыб. Этот корм дает возможность медведям подготовиться и благополучно пережить холодные зимние месяцы [6].

Бурый медведь Южных Курил относится к группе Дальневосточных медведей, а из них – к уссурийскому подвиду *Ursus (Ursus) arctos lasiotus* Gray, 1897, который обитает также на Сахалине и в Приморье [1]. На рассматриваемых

островах он является обычным представителем местной фауны. По данным анализа митохондриального ДНК, проведенного японскими исследователями в Университете Хоккайдо, медведи с островов Кунашир и Итуруп оказались близки к таковым с восточной части о. Хоккайдо и отличны от генетической линии зверей с Сахалина.

Методы работы. Период активного нереста горбуши и кеты на Курилах наиболее удобен для проведения учетов зверей, когда они выходят к устьевым участкам рек. Во время экспедиционных работ в августе – сентябре 2008, 2011 и 2012 годов мы изучали состояние запасов медведей на островах, используя методы регистрации их следовой активности с замером ширины пальмарной мозоли лап, визуальных наблюдений за животными, исследования объектов пищи и сбора дополнительной информации за ряд лет от лесников, рыбаков и охотников. Камеральная обработка материала позволила оценить ориентировочную численность медведей и нормы хозяйственного использования популяции.

Места обитания. Приверженность к определенным местам обитания – характерная черта биологии бурых медведей. В летне-осенний период они придерживаются долин нерестовых рек и литорали морских побережий. К концу осени уходят к вершинам сопек, где предпочитают леса темнохвойных пород и лиственничников с зарослями бамбука. В подобных местах, на полянах лесного разнотравья и крупнотравянистой растительности по долинам рек, звери кормятся в то время, когда рыба еще не идет на нерест. В весенние месяцы питаются выбросами моря, прошлогодними ягодами, побегами и корневищами

лили и злаков, широко кочуя в поисках пищи по территории.

На Курилах берлоги зверей расположены в вершинах сопок, покрытых густыми зарослями бамбука, на участках хвойных и смешанных лесов с густым подлеском и буреломом. Лучшие места для берлог – это высокоствольные ельники на склонах сопок и вершинах гор. Часто берлоги встречаются среди крупнокаменистых россыпей, под корнями и выворотами деревьев, в неглубоких пещерах. В целом медведь отдает предпочтение угольям с пестрым составом стадий, прежде всего таким, где темнохвойные участки чередуются с выделами смешанных лесов, вырубками разной давности, болотами с островами, реками и озерами на слабосхолмленном рельефе, сопочникам, речным долинам и морскому побережью.

Морфологическая характеристика. По нашим визуальным наблюдениям, медведи, обитающие на Южных Курилах, по линейно-весовым характеристикам мало отличаются от таковых в европейской части страны. Судя по данным, собранным от лесников и охотников, отстрелянные и взвешенные по частям звери имели живой вес, который у взрослых самок редко превышал 200–250, а у самцов – 300–350 кг. Вместе с тем, по данным главного лесничего Курильского лесничества А. Н. Кораблева, иногда здесь встречаются и более крупные особи. Так, на о. Итуруп максимальный вес двух отстрелянных самцов медведей (взвешивание проводилось по частям) достигал 420 и 480 кг, а весной 2012 года на о. Кунашир был добыт крупный взрослый самец, туша которого, без шкуры и внутренностей, весила 380 кг. У таких особей толщина подкожной жировой прослойки в декабре достигала 20 см и более. В то же время средняя масса подкожного и внутреннего жира у добытых особей в августе – октябре составляла 20–50 кг.

Окраска меха большинства зверей колеблется от светло- до темно-бурой. Некоторые медведи, которых нам удавалось наблюдать ($n = 28$), были окрашены довольно пестро. Их холка, боковые стороны головы, ноги и плечи имели темные тона, а остальная часть туловища была заметно светлее. Изредка в этих местах встречаются также особи со светлой головой и предплечьями. По данным местных лесников и охотников, в популяции зверей доля «пестрых» особей, то есть с явно выраженными светлыми участками тела, составляет не более 5–8%.

Весенняя линька растянута. Начинается она в конце апреля и протекает бурно до последних чисел июня – середины июля. В весенний период шкура добытых зверей крепкая, прочная и представляет определенную трофейную ценность, если она «не тронута» полевками во время зимнего сна животных. Осенью и у молодых, и у старых особей отмечается только подрастание

густого пухового волоса и ости. Отстреленный в конце октября взрослый медведь имеет уже полноволосяный зимний меховой наряд.

Половая и возрастная структура. Длительное функционирование популяции любого вида животных определяется важнейшими биологическими параметрами, такими как стабильность плодovitости и структуры популяции. Они являются базовыми при оценке ее состояния и разработке рекомендаций по рациональной эксплуатации запасов зверей. Как и в других частях ареала вида, плодovitость медведей на островах колеблется от 1 до 3, редко до 4 особей и, судя по опросным данным к осени, в среднем составляет не более 2 медвежат на рожающую самку. На Итурупе, где этот вид широко распространен, по нашим визуальным наблюдениям, обнаруженным следам взрослых самок с сеголетками и сведениям, поступившим от опытных охотников ($n = 15$), плодovitость медведя на сентябрь 2011 и 2012 годов составляла 1–3, в среднем 2 особи.

Вполне понятно, что промысловые пробы в полной мере не отражают естественное соотношение полов в популяциях зверей и во многих случаях избирательны. Осенью здесь чаще отстреливают крупных самцов (на нерестилищах или на приваде), а в январе – феврале увеличивается количество добываемых самок за счет особей, обнаруженных с лайками на берлогах. В этом случае охотничьим собакам проще найти логово с самкой, кормящей в нем малышей.

Для охотохозяйственной оценки возрастной структуры вида и дальнейшего регулирования его численности в популяции следует использовать данные по классам размерности животных. Они основаны на выявленной взаимосвязи размеров пальмарной мозоли, возраста и массы тела зверей [2], [3], [4], [5], [7]. Для этой цели чаще выделяют 3 группы размерности: 1-й класс – молодые особи с шириной передней лапы 5–11 см; 2-й класс – средний возраст и взрослые (11,5–16,5 см); 3-й класс – старшая возрастная группа или условно старые особи (17–19 см и более). Поскольку размерные показатели животных на Южных Курилах и в северных регионах европейской части России практически не различаются, то это позволяет воспользоваться данным методом для определения структуры популяции вида и на островах Курильской гряды.

Анализ материалов по ширине передней лапы (пальмарная мозоль) медведей, обитающих в 2011 году в бассейнах нерестовых рек острова Итуруп ($n = 80$), показал, что структура популяции вида в этом сезоне была следующей:

1. Сеголетки и лончаки составляли в группировке 32,5% от общего количества встреченных животных.
2. Пестуны и взрослые особи – 52,5%.
3. Условно старые звери – 15%.

Судя по этим данным, на о. Итуруп в популяции медведя преобладают взрослые особи и пестуны (52,5%), а также молодняк, куда входят сеголетки и лончаки (32,5%). Если учесть, что во многих регионах страны, например на Северо-Западе России, где медведь довольно обычен, а лицензионная охота на него очень распространена, доля старых зверей в группировке составляет 6–11%, то большее их количество на Итурупе (15%) может свидетельствовать о недостаточной промысловой нагрузке на популяцию вида.

Особенности поведения. Естественных врагов на островах медведь практически не имеет. Волки здесь отсутствуют. Случаи прямого каннибализма среди зверей неизвестны. В летне-осеннее время на нерестилищах, кроме медвежьих следов, из хищных млекопитающих встречаются только следы лисицы и соболя, которые не брезгают снулой рыбой. Каких-либо контактов между ними не прослеживается. По сообщениям местных охотников и главных лесничих, медведи на островах живут оседло, а каждая особь занимает сравнительно небольшую территорию (7–15 кв. км). Тем не менее в период нереста рыбы на лесных дорогах, литорали, по берегам озер и рек, особенно у нерестилищ, часто встречаются разные особи или их следы. Иногда они проходят большие расстояния в одном направлении, хотя и с интервалом в 1–3 дня. Обнаруженные на этих участках следы отличаются по размерам: одни, видимо, принадлежат крупному зверю, другие – особям, которые заметно уступают ему по массе тела. Преследования крупной взрослой особью мелких собратьев не наблюдалось. Вместе с тем близкого расположения друг от друга следов взрослых одиночных зверей с шириной передней лапы 16–17 см и более не отмечалось. Вероятно, крупные медведи терпимо относятся к присутствию на их территории (включая и кормовые участки) самок и неполовозрелого молодняка, но не уживаются с представителями данного вида одинакового с ними размера или более сильными.

По нашим наблюдениям, на постоянные, богатые рыбой нерестилища первыми приходят кормиться взрослые, мощные самцы, после их ухода – особи среднего размера (и, видимо, возраста), а уже после них появляются самки с детенышами. Нам также приходилось наблюдать из засидки за группой зверей в небольшом лесном массиве, где на свалку из машины были вывалены отходы после разделки горбуши бригадой рыболовов. Первым здесь начал кормиться крупного размера медведь (видимо, самец). Через некоторое время к нему стали осторожно приближаться с одной стороны две более мелкие, взрослые особи, а с другой – самка с сеголетком. Они некоторое время выжидали, а потом попытались приблизиться к корму. Как только звери подошли достаточно близко, мощный медведь

встал на задние лапы и зарычал, отпугивая нежелательных конкурентов. Тут же две более мелкие особи мгновенно исчезли в кустах, а самка, встав на задние лапы и оскалив пасть, стала рычать на лидера, давая медвежонку время убежать. Только после этого она ретировалась. Таким образом, при обилии пищи явно выраженной борьбы между особями, вероятно, не происходит.

Время залегания зверей в берлоги в регионе сильно варьирует в зависимости от сроков наступления холодов. В обычные годы они уходят на зимовку в конце октября – начале ноября. Самый ранний их выход из зимнего убежища зарегистрирован в конце марта, а средние сроки окончания зимней спячки приходятся на II декаду апреля. Время выхода медведей из берлог определяется разными причинами: наличием у них жировых отложений и климатическими факторами.

Судя по опросным сведениям, особи, хорошо нагулявшие в осеннее время жировые резервы, поднимаются после зимнего сна позже слабоупитанных. В холодные весны их выход из берлог также запаздывает. В теплые весенние месяцы звери раньше выходят из берлог на поляны и открытые мысы на увалах, где долго кормятся, спасаясь от гнуса, который свирепствует в низинных лесных массивах. Весной самцы появляются из убежищ раньше самок. Спаривание происходит в конце мая – июне, иногда даже в начале июля. Рождение молодняка – обычно в январе – феврале, а выход из берлог – в апреле – мае, редко в конце марта.

Из эндопаразитов бурого медведя наибольшее распространение имеет *Trichinella spiralis*. На Кунашире и Итурупе особей, зараженных ею, иногда добывают в районах свалок, недалеко от рыболовецких хозяйств. Вероятно, здесь во время кормежки и происходит заражение. Однако количество зараженных особей на Южных Курилах невелико и составляет от 4 до 6% из общей пробы в 42 особи.

Нападения на человека на территории рассматриваемых островов возможны прежде всего в тех случаях, если он неожиданно оказывается между самкой и детенышами, а также около крупной добычи зверя или на участках, где он промышляет лососевых в неурожайные на них годы. Достоверные случаи нападения хищника на домашний скот или пасеки нам неизвестны. Медведи-шатуны встречаются крайне редко. Подобные единичные случаи объясняются не малым количеством «нагулявшего» ими для зимовки жира, как это прослеживается на материке, а тем, что уже спящих зверей подняли из берлоги чаще всего при валке леса. Такие особи становятся довольно опасными, известны случаи их агрессивного поведения. В другие сезоны не-

спровоцированные формы поведения и нападения медведей на людей крайне редки.

При недостатке рыбы на нерестилищах, то есть в местах, где они в основном и добывают корм в середине лета – осенью, звери могут подходить к поселкам, концентрироваться на свалках около рыболовецких хозяйств, скотомогильниках и помойках. Так, на о. Итуруп, в бухте Добрынина, 6 сентября 2011 года мы были свидетелями, как взрослая медведица спустилась днем с сопки, густо заросшей высоким бамбуком, и, подойдя к рыболовецким постройкам, спокойно кормилась остатками оставленной здесь рыбы. По общению местных жителей, в этих местах она иногда появляется уже третий год. Интересно, что через несколько дней в той же бухте, около домов рыбаков, был замечен еще один крупный медведь, вероятно, самец. Скорее всего, эти животные заходили сюда в поисках пищи. В данном сезоне рыбаки выловили рыбы в 4 раза меньше, чем обычно, и, видимо, нехватка кормов в природе вынуждала зверей близко подходить к поселкам.

Питание. На Южных Курилах в теплое время года основное значение в кормовом рационе медведя имеют: рыба в период нереста, корневища растений и грызуны. В весенний период и в начале лета он преимущественно растительнояден. Основу его рациона в это время года составляют различные ягоды, травянистые растения, в основном зонтичные и злаки, а также насекомые и мелкие грызуны. В мае – июле звери активно питаются прошлогодней лесной ягодой, личинками насекомых, жуками, сочными корневищами разнотравья, иногда рыбой и моллюсками. В конце лета охотно поедают поспевшую голубику, воронику и бруснику, раскапывают муравейники, а позднее все большее значение в их рационе приобретают горбуша, кумжа, кета и другие лососевые рыбы, поднимающиеся в реки на нерест. Примерно с октября и до перехода к берложному образу жизни звери потребляют орешки кедрового стланика, рябину и желуди, находят останки лососевых рыб и выбросы моря, а ягоды и корневища травянистых растений становятся второстепенным кормом. Если на севере Сахалина медведь осенью и весной по насту делает активные попытки добыть копытных, то на Кунашире и Итурупе они отсутствуют.

Весной звери чаще кормятся в утренние часы (чаще с 4 до 10 часов утра) и вечером (с 19 до 22 часов). Ближе к осени, во время накопления жировых запасов, их можно встретить на жировке в течение всего дня, хотя наибольшее количество встреч приходится на сумеречное время.

Осенью хищники держатся ближе к устьевым участкам рек, где нерестятся лососевые, которые в этот сезон на Южных Курилах занимают основную долю в их рационе. В некоторые годы при

малом количестве нерестящейся рыбы большое значение в питании медведей имеют грызуны, особенно красно-серые полевки, численность которых повсеместно велика. Весной, а иногда и осенью звери откапывают, отлавливают и кормятся грызунами, хотя фауна их в видовом отношении довольно бедна. Так, на самом крупном острове Южных Курил Итуруп отмечено 4 вида грызунов, три из которых (черная крыса *Rattus rattus*, серая крыса *Rattus norvegicus* и домовая мышь *Mus musculus*) попали на остров вместе с человеком. Единственный аборигенный вид этой группы здесь – красно-серая полевка *Clethrionomys rufocanus*. Черная крыса и домовая мышь ведут сугубо синантропный образ жизни. В лесных угодьях они практически не встречаются и отмечены лишь в некоторых населенных пунктах и их окрестностях.

Серая крыса на Южных Курилах отнесена к отдельному подвиду (*Rattus norvegicus caraco* Pallas, 1778). Она образует устойчивые популяции в дикой природе, обитая даже вдали от жилья. Часто встречается по берегам водоемов и водотоков. На территории южных островов Курильской гряды плотность ее населения заметно выше, чем во многих других частях ареала вида.

Красно-серая полевка на значительных пространствах Сибири и Дальнего Востока является одним из самых массовых видов грызунов в природной среде. Основу ее питания составляют зеленые части растений, веточки и почки ягодных кустарничков и некоторых лиственных пород. Этот сравнительно крупный среди полевок грызун является важным объектом питания всех наземных хищных млекопитающих в Сахалинской области. Его равномерное распространение по угодьям и высокий относительный показатель численности в разных локалитетах (до 20–22 особей на 100 ловушко-суток), со значительной долей молодых особей в отловах, свидетельствуют о наличии хорошей кормовой базы не только для бурого медведя, но и других наземных и пернатых хищников на островах Южных Курил.

Численность животных. Запасы рассматриваемого вида в целом по Сахалинской области относительно стабильны. В годы нашей работы сотрудниками Отдела государственного учета и кадастра объектов животного мира Министерства лесного и охотничьего хозяйства Сахалинской области они оценивались в 3,0–3,2 тыс. особей. На территории островов Кунашир и Итуруп бурый медведь распространен сравнительно равномерно. Наша визуальная регистрация зверей и их следовой активности, дополненная данными лесников и охранников кордонов ООПТ, показала, что на Кунашире в 2008–2012 годах численность вида колебалась в пределах 200–220 особей. На о. Итуруп она заметно выше. Осенью 2011 года, по результатам нашего учета и дан-

ным наблюдений лесничих Курильского лесничества М. А. Мещерякова и А. Н. Кораблева, а также охотников промыслового типа, на западной стороне о. Итуруп, на нерестовых участках основных рек и ручьев, запасы бурого медведя ориентировочно составляли 340–370 голов. На Тихоокеанском побережье его ресурсы были заметно ниже, чем на западной стороне острова, и колебались в пределах 190–200 особей. Таким образом, в целом по острову в этом сезоне они оценивались в 530–570 особей. Дальнейшая камеральная обработка материалов, собранных на о. Итуруп в 2008–2012 годах, свидетельствует о достаточно стабильном состоянии группировки вида. Ориентировочная численность ее в эти годы колебалась в диапазоне от 500 до 600 особей. Таким образом, средняя плотность населения зверей в указанные сроки на Итурупе составляла 0,82, на Кунашире – 1,35 особи на 1000 га площади соответствующих островов.

Основные факторы, определяющие численность вида. Состояние запасов и распределение бурого медведя в угодьях островов Южных Курил во многом определяются особенностями ландшафтно-экологических условий и степенью антропогенного воздействия на среду его обитания. В местах, где преобладают сравнительно простые биотопы, представленные в основном сосняками и слабооблесенными, часто посещаемыми людьми участками с ограниченными защитными и кормовыми условиями, запасы вида невелики. На территориях с явно выраженной мозаикой биотопов (ельники, пихтаци, смешанные леса со старыми вырубками, сопки с густо поросшими бамбуком склонами, перелески с площадями, занятыми сельскохозяйственными культурами), которые обеспечивают медведей разнообразием убежищ, растительной и животной пищи, их численность может заметно возрастать. Осенью они постоянно выходят за кормом в долины рек на нерестилища. Наличие здесь достаточного количества снулой и готовой к нересту в низовьях рек рыбы, которой хищники интенсивно питаются, позволяет животным создавать в организме жировые резервы, а следовательно, благополучно

пережить трудный зимний период и сохранить потомство. В годы, урожайные на орехи кедрового стланика и лесные, желуди и рябину, медведи также кормятся ими постоянно и набирают с осени достаточное количество жировых запасов, что способствует успешной зимовке.

На лесных территориях с частично вырубленным древостоем видовой и возрастной состав растительных сообществ заметно меняется. Спустя несколько лет вырубки зарастают и здесь формируются новые кормовые, а главное, труднопроходимые для человека места. Медведей на них беспокоят редко, а ремизность и кормовая емкость биотопов резко возрастают. Все это позволяет хищникам устраивать на подобных укромных участках леса надежные берлоги.

Анализ собранного материала позволяет сделать вывод о том, что за последние годы, несмотря на возросший интерес к охоте на бурого медведя, серьезных изменений его возрастной структуры в островных группировках или падения численности не наблюдается. Количество взрослых особей, то есть продуктивной части, не снижается, что также обеспечивает устойчивый прирост популяции. Мясо медведей на Южных Курилах слабо заражено трихинеллой и постоянно используется охотниками и их семьями в пищу. Шкуры выделывают и вместе с желчью продают приезжающим туристам. Из-за высокой стоимости лицензий выделяемые квоты на отстрел зверей полностью не реализуются, фактическая их добыча часто составляет не более 50–55 % от установленной квоты.

Таким образом, высокая численность бурого медведя на островах Кунашир и Итуруп определяется высоким процентом лесистости территории, наличием участков с труднопроходимыми зарослями бамбука, устойчивой кормовой базой (прежде всего за счет ягод, орехов, рыбы и мелких млекопитающих), а также умеренной эксплуатацией лесного фонда. Не последнюю роль в сохранности репродуктивного ядра группировки вида играет щадящий режим эксплуатации популяций и малая населенность островов людьми.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гептнер В. Г. и др. Млекопитающие Советского Союза. М., 1967. Т. 2. Ч. 1. М.: Высшая школа, 2007. 1004 с.
2. Данилов П. И., Русаков О. С., Туманов И. Л. Хищные звери Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1979. 164 с.
3. Данилов П. И., Русаков О. С., Туманов И. Л. Бурый медведь. Северо-Запад европейской части России // Медведи. М.: Наука, 1993. С. 21–37.
4. Пажетнов В. С., Кораблев П. Н. Абсолютный учет численности бурых медведей в Центральном-Лесном заповеднике // Экологические основы охраны и рационального использования хищных млекопитающих: Материалы совещания. М., 1979. С. 227–228.
5. Пажетнов В. С., Пажетнов С. В. Учет бурого медведя // Охота и охотничье хозяйство. 2002. № 3. С. 6–8.
6. Туманов И. Л. Бурый медведь в горных ландшафтах Южных Курил // Горные экосистемы и их компоненты: Материалы 4-й Междунар. конф. Нальчик, 2012. С. 84.
7. Klein D. K. Track differentiation for censusing bear populations. *J. Wildlife Manage.* 1959. Vol. 23. № 3. P. 361–363.

Tumanov I. L., Western Branch of Russian Research Scientific Institute of Hunting Farm and Animal Breeding named after B. M. Zhitkov (St. Petersburg, Russian Federation)

BIOLOGICAL FEATURES AND BRAUN BEAR NUMERICAL STRENGTH ON SOUTHERN KURIL ISLANDS

Assessment of brown bear numbers and their age structure on Kunashir and Iturup islands is carried out. The estimation is based on visual registration of the animals and their traces (including measurement of the palmar corn) registered at salmon spawning sites. The evaluated data on brown bear numerical strength also include information collected from game managers and foresters of the region. The data on morphological characteristics, nutrition, and behavioral habits of the studied animals are also provided. In recent years, in spite of the growing interest toward brown bear hunting no serious changes in the species' numerical strength were registered. High number of registered aged species in the area speaks of the low hunting pressure on the studied population. Consistent numerical strength of the population is defined by the bamboo underbrush terrain impassible for hunters, stable food reserve, and moderate exploitation of the forest fund.

Key words: brown bear, Kunashir and Iturup islands, biology, numerical strength, defining factors

REFERENCES

1. Geptner V. G. i dr. *Mlekopitayushchie Sovetskogo Soyuz* [Mammals of the Soviet Union]. Moscow, 1967. Vol. 2. Part 2. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2007. 1004 p.
2. Danilov P. I., Rusakov O. S., Tumanov I. L. *Khishchnye zveri Severo-Zapada SSSR* [Predators of the USSR North West]. Leningrad, Nauka Publ., 1979. 164 p.
3. Danilov P. I., Rusakov O. S., Tumanov I. L. The brown bear. North-West of the European part of Russia [Buryy medved'. Severo-Zapad evropeyskoy chasti Rossii]. *Medvedi* [Bears]. Moscow, Nauka Publ., 1993. P. 21–37.
4. Pazhetnov V. S., Korablev P. N. Absolute assessment of the brown bear numbers in Central Forest Reserve [Absolyutnyy uchet chislenosti burykh medvedey v Tsentral'no-Lesnom zapovednike]. *Ekologicheskie osnovy okhrany i ratsional'nogo ispol'zovaniya khishchykh mlekopitayushchikh: Materialy soveshchaniya*. Moscow, 1979. P. 227–228.
5. Pazhetnov V. S., Pazhetnov S. V. Uchet burogo medvedya [Assessment of brown bear numerical strength]. *Okhota i okhotnich'e khozyaystvo* [Hunting and hunting farm]. 2002. № 3. P. 6–8.
6. Tumanov I. L. Buryy medved' v gornykh landshavtakh Yuzhnykh Kuril [Brown bear in mountainous landscape of Southern Kurils]. *Gornye ekosistemy i ikh komponenty: Materialy 4-y Mezhdynarodnoy konferentsii*. Nalchik, 2012. P. 84.
7. Klein D. K. Track differentiation for censuring bear populations. *J. Wildlife Manage.* 1959. Vol. 23. № 3. P. 361–363.

Поступила в редакцию 20.06.2014

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

ТАМАРА ЮРЬЕВНА КУЧКО

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

НИКОЛАЙ ВИКТОРОВИЧ ИЛЬМАСТ

доктор биологических наук, профессор кафедры зоотехники, рыбоводства и товароведения агротехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
ilmast@onego.ru

ЗООПЛАНКТОН КАК ПОКАЗАТЕЛЬ СОСТОЯНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ ОЗЕРА КАМЕННОЕ*

Представлены результаты исследований зоопланктона озера Каменное, которые проводились в рамках комплексной программы биологического мониторинга водных объектов Республики Карелия в период с 2010 по 2012 год. Озеро расположено на особо охраняемой природной территории государственного природного заповедника «Костомукшский». Проведенные исследования показали, что сообщество зоопланктона озера представлено обычными для карельских водоемов видами, имеющими широкое географическое распространение. Всего был отмечен 41 вид планктонных коловраток и ракообразных. К числу доминирующих видов относятся *Asplanchna priodonta* Gosse, *Holopedium gibberum* Zaddach, *Daphnia cristata* Sars, *Bosmina coregoni* Baird, *Eudiaptomus gracilis* Sars. По уровню количественного развития планктонной фауны озеро Каменное относится к олиготрофному типу со средней биомассой до 1 г/м³. По величине индекса сапробности, рассчитанного по биомассе индикаторных организмов, – к олигосапробному классу водных объектов (2-й класс качества – чистые природные воды). Сравнение полученных результатов с данными исследований, проведенных в 70-х и 90-х годах XX века, подтверждает, что экосистема озера сохраняет естественное состояние и не испытывает дополнительного антропогенного воздействия.

Ключевые слова: мониторинг, сообщество зоопланктона, водная экосистема, видовой состав, биомасса, численность

ВВЕДЕНИЕ

Озеро Каменное (64°28' с. ш., 30°13' в. д.) принадлежит к бассейну реки Кемь (бассейн Белого моря) и является одним из верхних звеньев системы реки Чирка-Кемь. Изучение состояния экосистемы озера вызывает особый интерес в связи с тем, что оно расположено на особо охраняемой природной территории государственного природного заповедника «Костомукшский». Также озеро входит в состав Зеленого пояса Фенноскандии, протянувшегося по обе стороны вдоль российско-финляндско-норвежской границы, и считается одним из ключевых участков в системе мониторинга за состоянием окружающей среды на приграничных территориях.

В качестве одного из критериев при оценке состояния экосистемы озера может рассматриваться динамика таксономической структуры и количественных показателей зоопланктона. Существующая возможность ретроспективного

анализа гидробиологических показателей повышает ценность наблюдений, так как наличие сравнительного материала за более или менее длительный период времени является необходимым условием для правильной оценки протекающих в водоеме процессов [6].

Цель работы – дать оценку современного состояния сообщества зоопланктона озера Каменное и провести сравнение с результатами ранее проводившихся исследований.

МЕСТО ИССЛЕДОВАНИЯ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучение зоопланктона озера Каменное проводилось в рамках комплексной программы биологического мониторинга водных объектов Республики Карелия с 2010 по 2012 год. Общая площадь озера Каменное составляет 105,5 км², наибольшая длина – 24,4 км, наибольшая ширина – 12,1 км. Притоки озера представлены небольшими речками (Каранка-йоки, Люття-йоки,

Мунанка, Лахти-йоки) и 42 ручьями. Из водоема вытекает река Каменная (Ногеус-йоки). Береговая линия сильно изрезана, образуя заливы и несколько крупных глубоководных губ. Водосборная площадь озера составляет 652,9 км², средняя глубина – 8 м, максимальная – 26 м. Вода озера характеризуется высокой прозрачностью. В центральном плесе в летний период она достигает 5 м, зимой – 4 м, в губах колеблется от 0,7 до 2,8 м [1].

Химический состав воды формируется в условиях слабой растворимости пород коренного состава, представленных гранитами и связанными с ними мигматитами, значительного количества атмосферных осадков (среднее 566 мм в год), относительно большой высоты над уровнем моря (195 м). Эти факторы обуславливают очень низкую минерализацию не только поверхностных, но и подземных вод.

Анализ многолетних данных динамики гидрохимических показателей воды озера и сравнение их с результатами исследований 2010–2012 годов показали, что за последние 40 лет они практически не изменились. Вода характеризуется малой минерализацией (9,5 мг/л) и низким содержанием органических соединений (общий азот – 0,41 мг/л, общий фосфор – 0,005 мг/л). Содержание кислорода в верхних слоях в летний период колеблется в пределах 80–100%, дефицит отмечается в придонных горизонтах на глубинах свыше 20 м, рН воды 6,5–6,8 [4].

Пробы зоопланктона отбирались в середине июня каждого года на 5 постоянных станциях, расположенных в северной части водоема, которая характеризуется сложным рельефом дна и большими глубинами (до 20 м). В 2012 году также проводился дополнительный сбор материала в прибрежной части. Для отбора проб в пелагиали применялся планктоботометр Рутнера объемом 2 л, при этом облавливались все слои воды с интервалом в 1 м. Интегрированные пробы (поверхность–дно) процеживались через газ № 70, концентрировались до 100 мм³ и фиксировались 4 % формалином. На литоральных станциях применяли процеживание 50 л воды через планктонную сеть, также использовали качественные смывы фитофильных видов с нижней поверхности плавающих листьев макрофитов. Биомасса зоопланктона определялась расчетным методом. Для анализа структуры зоопланктоценоза использовались следующие индикаторные показатели: $V_{\text{crus}}/V_{\text{rot}}$, $N_{\text{clad}}/N_{\text{cop}}$, $V_{\text{cycl}}/V_{\text{cal}}$. Также рассчитывались индекс видового разнообразия и индекс сапробности. Трофический статус водоема оценивался по шкале трофности для зоопланктона по методике С. П. Китаева [2]. Систематика низших ракообразных и коловраток приводится согласно современным представлениям о таксономии планктонных беспозвоночных [5], [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Видовой состав. Список планктонных организмов, отмеченных нами в 2010–2012 годах, насчитывает 41 вид (табл. 1). Из них коловраток (*Rotifera*) – 8, ветвистоусых ракообразных (*Cladocera*) – 23, веслоногих ракообразных *Copepoda* – 10 (*Calaniformes* – 4 и *Cyclopiformes* – 6).

Зоопланктон озера Каменное представлен обычными для карельских водоемов видами, имеющими широкое географическое распространение, из них на долю эврибионтных приходится 53 % от общего числа. Это главным образом литоральные и фитофильные формы, которым в большей степени, чем пелагическим, свойственны широкие ареалы распространения. Пелагический комплекс представлен северными видами – обитателями озер зоны тундры и тайги, их доля составляет 45 %. Также в состав фауны входят космополиты и обитатели зоны смешанных лесов, число этих видов незначительно.

Видовое разнообразие планктонной фауны достигается в основном за счет ветвистоусых ракообразных, что является обычным явлением для водоемов Карелии. Большая толщина теплоактивного слоя в заливах обеспечивает развитие кладоцерного планктона, а сравнительная глубоководность озера создает благоприятные условия для существования представителей холодноводного комплекса.

К числу доминирующих видов коловраток *Rotifera* относятся *Asplanchna priodonta* Gosse, *Kellicottia longispina* (Kellicott) и *Conochilus unicornis* Rousselet. Повсеместно, но в небольших количествах встречаются *Keratella cochlearis* (Gosse) и *Bipalpus hudsoni* (Imhof). Основу пелагического планктонного комплекса ракообразных составляют широко распространенные в больших озерах Карелии представители северной фауны (*Holopedium gibberum* Zaddach, *Daphnia cristata* Sars, *Bosmina coregoni* Baird, *Limnoscia frontosa* Sars, *Eudiaptomus gracilis* (Sars), *Heterocope appendiculata* Sars, *Thermocyclops oithonoides* (Sars)), а также ряд эврибионтных организмов, отличающихся широкой экологической валентностью (*D. longispina* O. F. Muller, *B. longirostris* (O. F. Muller), *Mesocyclops leuckarti* (Claus)). На затишных участках литорали формируется зарослево-литоральный планктонный комплекс, который представлен главным образом фитофильными и придонно-бентическими видами: *Sida crystallina* (O. F. Muller), *Ophryoxus gracilis* Sars, виды *pp. Alona* и *Acroperus*, *Chydorus sphaericus* (O. F. Muller), *Eucyclops macruroides* (Lill.), *Megacyclops viridis* (Jurine). Ценоз прибойной литорали представляет собой обедненный в видовом составе пелагический комплекс зоопланктона открытых участков озера. Межгодовые различия в видовом составе зоопланктона незначительны и обусловлены видами с редкой встречаемостью.

Таблица 1
Видовой состав зоопланктона оз. Каменное

Вид	2010 г.	2011 г.	2012 г.
	Тип Rotifera Коловратки		
1. <i>Polyarthra dolychoptera</i> (Idelson 1925)	+	+	+
2. <i>P. major</i> (Burckhardt 1900)	-	-	+
3. <i>Synchaeta pectinata</i> (Ehrenberg 1832)	-	-	+
4. <i>Bipalpus hudsoni</i> (Imhof 1891)	+	+	+
5. <i>Asplanchna priodonta</i> (Gosse 1850)	+	+	+
6. <i>Keratella cochlearis</i> (Gosse 1851)	+	+	+
7. <i>Kellicottia longispina</i> (Kellicott 1879)	+	+	+
8. <i>Conochilus unicornis</i> (Rousselet 1892)	+	+	+
Класс Crustacea Ракообразные			
Надотряд Copepoda Веслоногие раки			
9. <i>Eudiaptomus gracilis</i> (Sars 1863)	+	+	+
10. <i>E. graciloides</i> (Lill. 1888)	+	+	-
11. <i>Heterocope appendiculata</i> (Sars 1863)	+	+	+
12. <i>Eurytemora lacustris</i> (Poppe 1887)	+	+	+
13. <i>Megacyclops viridis</i> (Jurine 1820)	+	+	+
14. <i>Mesocyclops leuckarti</i> (Claus 1857)	+	+	+
15. <i>Thermocyclops oithonoides</i> (Sars 1863)	+	+	+
16. <i>Eucyclops macruroides</i> (Lill. 1901)	+	-	-
17. <i>E. serrulatus</i> (Fischer 1851)	-	+	-
18. <i>Ectocyclops phaleratus</i> (Koch 1893)	+	-	+
Надотряд Cladocera Ветвистоусые			
19. <i>Limnosedon frontosa</i> (Sars 1862)	+	+	+
20. <i>Sida crystallina</i> (O. F. Muller 1776)	+	+	+
21. <i>Diaphanosoma brachyurum</i> (Lievin 1848)	+	+	-
22. <i>Ophryoxus gracilis</i> (Sars 1862)	+	+	-
23. <i>Holopedium gibberum</i> (Zaddach 1855)	+	+	+
24. <i>Acroperus harpae</i> (Baird 1834)	+	+	-
25. <i>Alonopsis elongatus</i> (Sars 1862)	+	+	+
26. <i>Chydorus sphaericus</i> (O. F. Muller 1785)	+	+	-
27. <i>Alona quadrangularis</i> (O. F. Muller 1785)	+	-	+
28. <i>A. affinis</i> (Leydig 1860)	+	+	-
29. <i>Scapholeberis mucronata</i> (O. F. Muller 1785)	-	+	-
30. <i>Rhynchotalona falcata</i> (Sars 1862)	+	-	-
31. <i>Alonella nana</i> (Baird 1850)	+	+	-
32. <i>Eurycercus lamellatus</i> (O. F. Muller 1785)	+	+	+
33. <i>Ceriodaphnia quadrangularis</i> (O. F. Muller 1785)	+	-	+
34. <i>Daphnia longispina</i> (O. F. Muller 1785)	-	+	+
35. <i>D. cristata</i> (Sars 1862)	+	+	+
36. <i>Bosmina (B.) longirostris</i> (O. F. Muller 1785)	+	+	+
37. <i>B. (Eubosmina) coregoni</i> (Baird 1857)	+	+	+
38. <i>B. (E.) cf. kessleri</i> (Uljanin 1872)	+	+	+
39. <i>Polyphemus pediculus</i> (Linne 1778)	+	+	+
40. <i>Leptodora kindtii</i> (Focke 1844)	-	+	+
41. <i>Bythotrephes brevis</i> (Lilljeborg 1901)	+	+	-
Всего видов	35	34	29

Количественные показатели. Средние количественные показатели зоопланктона по результатам наших исследований приведены в табл. 2–3. Соотношение количественных показателей основных групп зоопланктона отражает состояние планктонной фауны в ранне-

Таблица 2
Средние показатели численности зоопланктона оз. Каменное

Группы организмов	10.06–12.06.2010		14.06–17.06.2011		12.06–14.06.2012	
	экз./м ³	%	экз./м ³	%	экз./м ³	%
Rotifera	10,7	43,5	8,5	52,8	10,3	46,4
Cladocera	6,0	24,4	5,0	31,1	1,05	4,7
Cyclopiformes	1,9	7,7	1,7	10,6	8,47	38,0
Calaniformes	0,8	3,3	0,44	2,7	1,54	6,9
Nauplii	5,2	21,1	0,45	2,8	0,89	4,0
Всего	24,6	100	16,09	100	22,25	100

Таблица 3
Средние показатели биомассы зоопланктона оз. Каменное

Группы организмов	10.06–12.06.2010		14.06–17.06.2011		12.06–14.06.2012	
	г/м ³	%	г/м ³	%	г/м ³	%
Rotifera	0,300	39,5	0,248	39,6	0,117	20,2
Cladocera	0,373	49,1	0,241	38,5	0,184	31,7
Cyclopiformes	0,017	2,2	0,106	16,9	0,125	21,6
Calaniformes	0,033	4,4	0,027	4,3	0,148	25,5
Nauplii	0,036	4,8	0,004	0,7	0,006	1,0
Всего	0,759	100	0,626	100	0,580	100

летний период, при температуре воды 11–13 °С. В 2010 году по численности доминировали коловратки (43,5%), около 50% биомассы создавалось за счет ветвистоусых ракообразных (в основном виды *Bosmina*, *Daphnia* и *Holopedium*), интенсивное размножение которых начинается при более высоких температурах воды.

Высокий удельный вес коловраток (около 40% от общей биомассы) объясняется развитием крупной *A. priodonta*, которая является факультативным хищником и оказывает значительное влияние на трофическую структуру зоопланктоценоза. Высокие количественные показатели этого вида коловраток в озере Каменное отмечались и в предыдущих исследованиях. На долю циклопид и калянид (представленных главным образом науплиальными и младшими копепоидными стадиями) приходилось 2,2 и 4,4% соответственно.

В 2011 году по численности доминировали коловратки *A. priodonta* и *K. longispina* (52,8%), основную часть биомассы (около 80%) формировали в равных соотношениях коловратки и ветвистоусые ракообразные *Holopedium*, *Bosmina*, *Daphnia*, *Limnosedon*. В 2012 году по численности также преобладали коловратки *A. priodonta* и *C. unicornis* – 46%, по биомассе – клadoцеры рр. *Bosmina*, *Daphnia* и копеподы *E. gracilis*, *H. appendiculata* и *Th. oithonoides*.

По результатам наших 3-летних наблюдений отмечается значительное сходство в видовом составе и количественных показателях планктонной фауны в середине июня. Общее число видов по годам колеблется в пределах 29–35 систематических единиц. Основной фон зоопланк-

тона формируется за счет развития коловраток (в среднем 43 и 32% от общей численности и биомассы) и ветвистоусых ракообразных (28 и 53% соответственно). Веслоногие ракообразные представлены главным образом науплиальными и младшими копеподитными стадиями, поэтому их массовая доля составляет около 15%. Схожая картина развития планктонной фауны в середине июня – июле наблюдалась и в исследованиях 1972–1973 годов.

В зоне зарослевой литорали, на затишных участках, защищенных от прямого ветрового и волнового воздействия, создаются особые условия для развития зоопланктона. При стечении благоприятных кормовых и температурных факторов биомасса зоопланктона может создаваться за счет интенсивного размножения нескольких видов, что отражается на ее повышенных величинах (табл. 4). Данное явление было нами отмечено в 2012 году на трех литоральных станциях, где за счет массового развития кладоцер *Polyphemus pediculus* (L.), *Sida crystallina* (O. F. Muller), *Bosmina* spp. средняя биомасса зоопланктона составила 3,4 г/м³ при численности 65,1 тыс. экз./м³. В таких локациях создаются благоприятные кормовые условия для гидробионтов других трофических уровней, в первую очередь молоди рыб. По результатам исследований 1972–1973 годов зоопланктон закрытых участков литорали также отличался повышенными количественными показателями. Биомасса планктона здесь достигала 2–5 г/м³ при численности 30,2–93,2 тыс. экз./м³, около 90% биомассы составляли кладоцеры. В целом, на уровень развития и видовой состав зоопланктона заливов влияет ряд факторов: глубина, проточность, изолированность от главного плеса, степень и характер зарастания высшей водной растительностью.

Таблица 4
Количественные показатели зоопланктона литорали 12.06–14.06.2012

Группы	Численность, тыс. экз./м ³	%	Биомасса, г/м ³	%
Rotifera	8,7	13,4	0,259	7,6
Cladocera	49,3	75,7	2,986	87,8
Cyclopiformes	6,3	9,7	0,123	3,6
Calaniformes	0,2	0,3	0,029	0,9
Nauplii	0,6	0,9	0,003	0,1
Всего	65,1	100	3,4	100

В табл. 5 приведены общие показатели развития планктонной фауны и ряд структурных показателей, отражающих количественное соотношение основных групп в сообществе за все периоды изучения. При этом использовались данные, полученные для открытой части северного и центрального плеса озера [3].

Таблица 5
Общая характеристика зоопланктона оз. Каменное за периоды исследований

Показатель	1972–1973 гг.	1992–1993 гг.	2010–2012 гг.
Число видов	51	37	41
Численность, тыс. экз./м ³	14,8–16,0	3,6–6,4	12,7–24,6
Биомасса, г/м ³	0,279–0,360	0,160–0,260	0,413–0,759
$V_{\text{crus}}/V_{\text{rot}}$	1,2–8,0	7,3–49,0	1,52–4,40
$N_{\text{clad}}/N_{\text{cop}}$	0,9–1,4	0,3–2,0	0,1–1,9
$V_{\text{cycl}}/V_{\text{cal}}$	0,49–0,92	2,6–3,7	0,51–3,92
Индекс Шеннона, бит/экз.	–	–	1,95–2,10
Индекс сапробности	1,10–1,20	–	1,18–1,24
Доминирующие виды	<i>H. gibberum</i> , <i>A. priodonta</i> , <i>Bosmina</i> spp.	<i>Daphnia</i> spp. <i>H. gibberum</i> , <i>Bosmina</i> spp. <i>E. gracilis</i>	<i>Bosmina</i> spp. <i>A. priodonta</i> <i>Daphnia</i> spp. <i>E. gracilis</i>
Типизация водоема	Олиготрофный, олигосапробный, отдельные заливы мезотрофные	Олиготрофный, отдельные заливы мезотрофные	Олиготрофный, олигосапробный, отдельные заливы мезотрофные

Сравнение полученных результатов показывает значительное сходство в качественном составе, структуре и количественных показателях пелагического планктона за период с 1972 года. Комплекс доминирующих видов не претерпел существенных изменений и состоит из видов северной фауны и эвритопных, распространенных в больших озерах северной Карелии. Это подтверждается и величинами индекса сапробности, который отражает количественное соотношение индикаторных организмов. Динамика структурных индексов находится в пределах межгодовых различий и соответствует водоемам, не испытывающим дополнительного эвтрофирующего воздействия. По величинам численности и биомассы зоопланктона озеро Каменное характеризуется как олиготрофный водоем [2].

ВЫВОДЫ

Результаты наших исследований подтверждают стабильность видового состава и структуры сообщества зоопланктона оз. Каменное на протяжении последних 40 лет. Доминирующий комплекс в пелагиали водоема складывается из видов-индикаторов олиго- и олигобетамезосапробных условий. По величине индекса сапробности, рассчитанного по биомассе индикаторных организмов, озеро Каменное можно отнести к олигосапробному классу водных объектов (2-й класс качества – чистые природные воды). По уровню количественного развития зооплан-

ктона озера Каменное можно охарактеризовать как водоем олиготрофного типа. Отмеченные различия в показателях численности и биомассы не выходят за рамки естественных межгодовых колебаний зоопланктона за период с 1972 года.

Таким образом, по показателям сообщества зоопланктона экосистема озера Каменное сохраняет естественное состояние, что позволяет рассматривать его в качестве эталонного водоема при проведении гидроэкологических исследований.

* Работа выполнена 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 (НШ–1410.2014.4; Соглашение 8101), гранта РФФИ № 12–04–00022а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каталог озер и рек Карелии / Под ред. Н. Н. Филатова и А. В. Литвиненко. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 290 с.
2. Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 390 с.
3. Куликова Т. П. Зоопланктон водных объектов бассейна Белого моря / Отв. ред. А. А. Лукин. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 325 с.
4. Озера Карелии: Справочник / Под ред. Н. Н. Филатова и В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
5. 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.
6. Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.
7. Radwan S., Bielanska-Grajner I., Ejsmont-Karabin J. Wrotki (*Rotifera*) / S. Radwan (red.). Lodz: Oficyna Wydawnicza Tercja, 2004. 447 p.

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

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

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

ZOOPLANKTON AS INDICATOR OF LAKE KAMENNOE ECOSYSTEM CONDITION

Research results of zooplankton studies of the Lake Kamennoe are presented in the article. The research was carried out in the frames of an integrated program of biological monitoring of water bodies of the Republic of Karelia in 2010–2012. The lake is located in the specially protected area of Nature Reserve "Kostomukshskiy". Conducted studies have shown that the zooplankton community of the Lake Kamennoe is represented by conventional species of Karelian water bodies with wide geographic distribution. Altogether, 41 species of planktonic rotifers and crustaceans have been registered. Among the dominant species are *Asplanchna priodonta* Gosse, *Holopedium gibberum* Zaddach, *Daphnia cristata* Sars, *Bosmina coregoni* Baird, *Eudiaptomus gracilis* Sars. According to the level of quantitative development of planktonic fauna, the Lake Kamennoe belongs to the oligotrophic type with an average biomass up to 1 g/cub.m. By saprobity index value, which is calculated by the indicator of organisms' biomass, the Lake Kamennoe can be attributed to oligosaprobic class of water bodies (2nd quality class – pure natural water). Comparison of the results with the studies conducted in the 70s and 90s of the twentieth century confirms that the lake's ecosystem retains its natural state and does not experience additional human impact.

Key words: monitoring, zooplankton community, aquatic ecosystem, species composition, biomass, abundance

REFERENCES

1. *Katalog ozer i rek Karelii* [Catalogue of lakes and rivers of Karelia] / Pod red. N. N. Filatova i A. V. Litvinenko. Petrozavodsk, KarNC RAN Publ., 2001. 290 p.
2. *Kitaev S. P. Osnovy limnologii dlya gidrobiologov i ikhtologov* [Fundamentals of limnology hydrobiologists and ichthyologists]. Petrozavodsk, KarNC RAN Publ., 2007. 390 p.
3. *Kulikova T. P. Zooplankton vodnykh ob'ektov basseyna Belogo morya* [Zooplankton of the White Sea basin water bodies] / Otv. red. A. A. Lukin. Petrozavodsk, KarNC RAN Publ., 2010. 325 p.
4. *Ozera Karelii: Spravochnik* [Lakes of Karelia. Handbook] / Pod red. N. N. Filatova i V. I. Kukhareva. Petrozavodsk, KarNC RAN Publ., 2013. 464 p.
5. *Opredelitel' zooplanktona i zoobentosa presnykh vod Evropeyskoy Rossii. T. 1. Zooplankton* [Determinant of zooplankton and zoobenthos freshwater of European Russia. Vol. 1. Zooplankton] / Pod red. V. R. Alekseeva, S. Ya. Tsalolikhina. Moscow, Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK Publ., 2010. 495 p.
6. *Shitikov V. K., Rozenberg G. S., Zinchenko T. D. Kolichestvennaya gidroekologiya: metody sistemnoy identifikatsii* [Quantitative hydroecology: system identification methods]. Tolyatti: IEVB RAN Publ., 2003. 463 p.
7. *Radwan S., Bielanska-Grajner I., Ejsmont-Karabin J. Wrotki (Rotifera)* / S. Radwan (red.). Lodz: Oficyna Wydawnicza Tercja, 2004. 447 p.

Поступила в редакцию 18.03.2014

МАРИЯ ВЛАДИМИРОВНА МЕДВЕДЕВАкандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт леса Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
*mariamed@mail.ru***НАТАЛИЯ ГЛЕБОВНА ФЕДОРЦ**доктор сельскохозяйственных наук, заведующая лабораторией, Институт леса Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
*fedoret@mail.ru***АЛЕКСЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ ИЛЬИНОВ**кандидат биологических наук, научный сотрудник, Институт леса Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
ialexa33@mail.ru

БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ПОЧВ ЕЛОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕЗЕРВАТОВ СЕВЕРНОГО ПРИЛАДОЖЬЯ*

Основная цель работы состояла в изучении биологической активности почв еловых генетических резерватов Северного Приладожья. Отбор почв для микробиально-биохимических анализов был произведен по генетическим горизонтам из стенки разреза из пяти точек на всю глубину разреза. Численность почвенных гетеротрофных микроорганизмов, которые принимают участие в трансформации азот-, углеродсодержащих соединений, определяли методом посева на плотные селективные питательные среды по традиционной в почвенной микробиологии методике. Определение видового состава микробного ценоза почв проводили молекулярным методом ГХ–МС. Активность каталазы устанавливали газометрически по методике Круглова, Пароменской. На основании полученных данных было установлено, что численность сапротрофных бактерий в изучаемых почвах изменялась в пределах от 10^3 до 10^7 КОЕ/г почвы. Было выявлено, что темп и направленность микробной трансформации органического вещества в автоморфных почвах выше, характер распределения микробиологической активности имеет особенности по сравнению с почвами гидроморфного ряда. По общей численности микроорганизмов в верхнем органогенном горизонте почвы автоморфных позиций ландшафта в порядке возрастания образовывали ряд: бурозем грубогумусный типичный > подбур среднечемощный грубогумусный > органогенная примитивная. Активность каталазы в исследуемых почвах изменялась в пределах от 2,7 до 41,0 мл O_2 /5 мин/г почвы. Максимальная активность каталазы отмечена в верхнем горизонте почв бурозема грубогумусного типичного, минимальная – в минеральной толще данных почв на глубине 45 см. На примере почв буроземного типа в А0 и А1 горизонтах молекулярным методом были выделены биотипы, идентифицированные как: прокариоты, грибы, дрожжи, Protozoa, Eucariotes, Planta. Также установили, что доминируют по численности в микробном сообществе биотипы *Caulobacter*, *Rhodococcus equi*. Отмечали высокую численность *Streptomyces-Nocardiosis*, *Bacillus* sp. Полученные данные могут быть использованы при эколого-микробиологическом мониторинге почв, сформировавшихся в еловых древостоях, а также стать основой при разработке санитарно-гигиенических показателей качества почв антропогенно нарушенных экосистем.

Ключевые слова: Северное Приладожье, еловые генетические резерваты, микробиально-биохимические свойства почв

ВВЕДЕНИЕ

Исследование биологической активности лесных почв Карелии имеет давнюю историю, основные этапы которой подробно рассмотрены в работе [2]. На примере почв заповедника «Кивач» (среднетаежная подзона Карелии) установлены структура и состав микробного сообщества, его функциональная активность [4]. Также было изучено профильное распределение численности микроорганизмов основных эколого-трофических групп, выявлена ферментативная активность минеральных горизонтов почв различных гра-

нулометрических фракций. Последнее позволило приблизиться к вопросу о роли микробиоты в формировании матричной организации почв [6]. На основании полученных данных комплексных микробиологических исследований была составлена карта-схема биогенности почв заповедной территории.

Микробные сообщества лесных почв северо-таежной подзоны Карелии более подробно были исследованы в двух разных аспектах: основные закономерности функционирования микробных комплексов рассмотрены на примере почв запо-

ведника «Костомукшский», а практическая роль микробиоты раскрыта при изучении влияния аэротехногенного загрязнения на биологическую активность почв (на примере окрестностей Костомукшского ГОКа) [11].

Что касается почв Северного Приладожья, то их микробная составляющая практически не исследована. Вместе с тем почвы буроземного типа встречаются только в среднетаежной подзоне Карелии, причем локально [14], что дает основание для проведения более глубоких комплексных исследований почв. Микроорганизмы являются активными агентами разложения мортмассы, определяют темп и направленность трансформации органического вещества в почве, участвуют в синтезе гумуса. Биологическая активность почв – это интегральный показатель состояния всей микробиоты. В связи с этим основная цель исследования состояла в изучении биологической активности почв еловых генетических резерватов Северного Приладожья.

Полученные данные о структурно-функциональной организации микробного сообщества могут быть использованы при долгосрочном эколого-микробиологическом мониторинге почв, сформировавшихся в еловых древостоях, а также стать основой при разработке санитарно-гигиенических показателей качества почв антропогенно нарушенных экосистем.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в северной части Приладожья Карелии. Постоянные пробные площади (ППП) № 7 и № 8 заложены в Сортавальском и Хелюльском участковых лесничествах Сортавальского центрального лесничества, где расположены еловые генетические резерваты (№ 6 и № 8), подробное описание которых приводится в [10].

ПП7. Ельник черничный, 100-летний, состав 5,3Е 1,2С 3,4Б 0,1Ос, III класс бонитета. Запас древесины 443 м³/га, относительная полнота 1,2.

ПП8. Ельник черничный, 100-летний, состав 9,1Е 0,3С 0,3Б 0,4Ос. Имеет II класс бонитета, запас древесины 404 м³/га, относительная полнота 0,95. При исследовании микробного сообщества анализировались смешанные образцы почв, отобранные на участках с привязанностью к доминирующим парцеллам. Таксономическая принадлежность почв устанавливалась в соответствии с региональной классификацией [14], [16]. Отбор почв для микробиально-биохимических анализов был произведен по генетическим горизонтам на стенке разреза из пяти точек на всю глубину профиля. Численность почвенных гетеротрофных микроорганизмов, которые принимают участие в трансформации азот- и углеродсодержащих соединений, определяли методом посева на плотные элективные питательные среды по методике [12]. При этом

количество бактерий, использующих органические формы азота, учитывали на мясопептонном агаре (МПА), ассимилирующих минеральный азот – на крахмало-аммиачном агаре (КАА), олигонитрофилы – на среде Эшби, олиготрофные микроорганизмы – на почвенном агаре (ПА). Численность актиномицетов определяли на КАА. Комплекс аэробных целлюлозоразрушающих микроорганизмов изучался на среде Гетчинсона. Микроскопические грибы подсчитывали на среде Чапека со стрептомицином в качестве ингибитора роста бактерий. Определение видового состава микробного ценоза почв проводили молекулярным методом ГХ–МС [17].

Коэффициент микробиологической минерализации и иммобилизации, рассчитанный как отношение бактерий, утилизирующих минеральные формы азота, к численности микроорганизмов, потребляющих органический азот (КАА/МПА), использовали для оценки морфофункциональной структуры микробного ценоза и направленности трансформации органического вещества [12].

Активность каталазы устанавливали газометрически, описание методики приводится в [12]. В отобранных образцах почв определяли содержание общего углерода в аналитической лаборатории Института леса КарНЦ РАН на СНН-анализаторе по общепринятой методике, данные представлены в нашей предыдущей публикации [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Почвенный покров Приладожья отличается достаточно большой пестротой, что создает микрокусы с контрастными эдафическими условиями для развития микроорганизмов. В этой связи для исследования свойств почв еловых генетических резерватов использовали традиционный прием в почвоведении: на основе морфологического строения почвенного профиля множество изучаемых почвенных разностей разделили на генетически близкие группы. На основании этого было выделено пять наиболее распространенных типов почв, встречающихся на обоих пробных площадях (ПП7 и ПП8). Морфологические, физические, химические свойства почв различного генезиса были рассмотрены в [10]. В целом отмечено, что для изучаемых почв ведущими почвообразовательными процессами являются буроземо- и глееобразование, а также торфонакопление. Степень развития профиля лесных почв определяется местоположением на элементах рельефа. Три разреза (органо-генная примитивная (A₀, A₁), торфяно-болотная (A₀T, A₀A₁) и подбур (A₀, A_{1h}, B_{fm}, B_{fm}, BC)) характеризуют почвы, сформировавшиеся на скальном основании. Два разреза характеризуют почвы, сформировавшиеся на суглинистой морене: бурозем грубогумусный типичный (A₀, A₁, B_{fm}, B₂, BC, C) и торфяно-глеевая переходная (T₀,

T_1 , B_{hg} , G, C). Согласно морфологическому описанию, органогенная примитивная и торфяно-болотная почвы характеризуются укороченным профилем, резкая граница между горизонтами отсутствует, переход между ними постепенный. Профили бурозема грубогумусного и подбур более дифференцированы по цвету, структуре, границы между горизонтами более заметны.

Микробиологические исследования показали, что наиболее благоприятные условия для развития микроорганизмов складываются в почвах автоморфных участков ландшафта: бурозема грубогумусного типичного и подбур среднего, сформировавшихся на суглинистой морене (табл. 1, рис. 1). В данных почвах формируется микробценоз, образуемый из разнообразных таксономических групп: грибы, бактерии, актиномицеты. Среди эколого-трофических групп микроорганизмов преобладают аммонификаторы, олигонитрофилы, олиготрофы, а также комплекс целлюлозоразрушающих микроорганизмов (КЦМ). В составе аммонификаторов верхних горизонтов почв отмечен высокий процент спорообразующих бактерий (> 40 %), что свидетельствует о глубине минерализационных процессов. Гетеротрофные слизееобразующие бактерии рода *Pseudomonas* также были многочисленны в исследуемых почвах.

Численность бактерий, утилизирующих минеральные соединения азота, выше по сравнению с бактериями, использующими органические формы азота. Для органогенных горизонтов исследуемых почв характерным является высокое значение коэффициента микробиологической минерализации и иммобилизации Мишустина (КАА/МПА > 3,6), что подтверждает высокий уровень биодеструкции органических соединений в почве [13], [18]. При этом в составе комплекса бактерий, потребляющих минеральные формы азота, присутствуют актиномицеты, что подтверждает высокую скорость превращения труднорастворимых азотсодержащих соединений в почве. Они не были доминантами в микробном сообществе, а выступали в качестве ассоциантов, обладающих высокой функциональной активностью. Большое значение в микробном сообществе принадлежит бактериям-олигонитрофилам и олиготрофам, что свидетельствует о полноте биодеструкции органических и органоминеральных соединений в почвах до конечных стадий.

Численность микроскопических грибов в верхнем горизонте изучаемых почв (A_0) составляет < 32 тыс./см³ почвы. Микрмицеты, обладая мощным гидролитическим аппаратом, способны разрушать различные органические субстраты, регулировать круговорот элементов-биогенов [13]. Представители рода *Penicillium* были многочисленны в микробценозах всех исследуемых почв.

Также для изучаемых почв отмечали высокую численность комплекса целлюлозоразрушающих

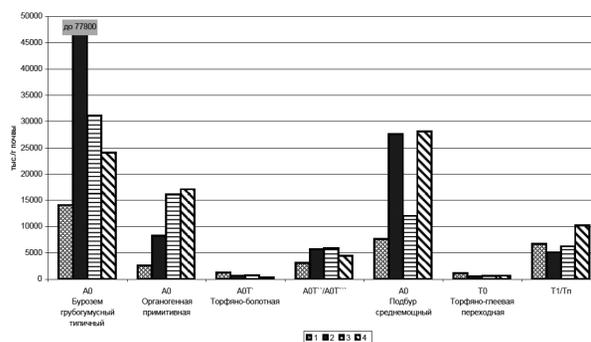


Рис. 1. Трофическая структура микробного сообщества органогенного горизонта почв, сформировавшихся в ельнике черничном: 1 – сапротитные бактерии; 2 – бактерии, использующие минеральные соединения азота; 3 – олигонитрофилы; 4 – олиготрофы

микроорганизмов (до 2 тыс./см³ почвы). Состав КЦМ был гетерогенным, в верхнем органогенном горизонте почв многочисленны бактерии, в нижележащих горизонтах наблюдали развитие микроскопических грибов. При этом выявили окрашенные в ярко-оранжевые цвета колонии миксобактерий и обильное выделение ими слизи. Слизеобразование, как проявление метаболической активности прокариот, является одним из важных факторов формирования структуры почв. Необходимо подчеркнуть, что целлюлолитики способны не только образовывать легко растворимые соединения углерода, но и подвижного фосфора, необходимого для роста и развития как микробиоты, так и растений.

Биологическая активность почв зависит от гидротермических условий [1], [9]. Результаты показали, что в почвах, развитых в условиях повышенного увлажнения (торфяно-болотная и торфяно-глеевая переходная), структура и состав микробного сообщества имеют как сходства, так и отличия с почвами, сформировавшимися в автоморфных участках ландшафта. Сходство заключается в присутствии всех наиболее значимых эколого-трофических групп: копиотрофы, олиготрофы, гидролитики. Это свидетельствует о том, что характер метаболических процессов, которые происходят в исследуемых почвах, однонаправленный: ингибирование процесса синтеза собственно органического вещества продуктами распада мортмассы, накопление их в почве и медленная трансформация микробиотой. Отличия заключаются в характере распределения по профилю почв важнейших эколого-трофических групп. Наибольшую численность микроорганизмов отмечали в средней части профиля гидроморфных почв, в отличие от почв автоморфного ряда, абрис распределения которых имеет максимум в верхней части профиля (органогенный горизонт A_0).

В исследуемых почвах численность микрмицетов и их распределение по профилю являются характерными для почв с периодическим увлаж-

Профильное распределение основных эколого-трофических групп микроорганизмов в почвах исследуемых еловых биогеоценозов, тыс./см³ почвы

Объект исследования, горизонт почв	Влажность почв, К	Бактерии, использующие				Бактерии-олигонитрофилы	Бактерии-олиготрофы	Микромицеты	КЦМ	Коэффициент минерализации
		органические соединения азота		минеральные формы азота						
		общее	споровые	общее	актиномицеты					
ПП7. Почва – органогенная примитивная на скальном основании										
A ₀	3,5	288	121	908	23	1782	1881	25	0,3	3,1
Почва – бурозем грубогумусный типичный на суглинистой морене										
A ₀	2,5	1058	444	5835	46	2333	1808	5	2,	5,5
A ₁	1,4	696	334	3058	201	2009	1372	31	8	4,4
B _{fm}	1,2	235	157	283	не обн.	559	497	39	3	1,2
B ₂	1,3	206	66	241	не обн.	525	181	22	1	1,2
BC	1,2	61	21	98	не обн.	304	57	21	не обн.	1,6
Почва – торфяно-болотная на скальном основании										
A ₀ T'	9,6	17	4	10	10	10	4	4	сл.	0,6
A ₀ T''	5,5	40	18	103	116	116	53	3	сл.	2,6
A ₀ T'''	4,2	76	36	110	104	104	110	3	сл.	1,5
A ₀ A ₁	1,9	101	41	143	211	211	55	11	не обн.	1,4
ПП8. Почва – подбур среднеспособный грубогумусный на скальном основании										
A ₀	2,9	1372	576	4970	130	2178	5058	32	1	3,6
A _{lh} B _{fm}	3,2	212	85	768	28	2120	559	19	2	3,6
B _{fm}	1,5	139	39	156	не обн.	535	172	38	1	1,1
BC	1,2	212	2	59	не обн.	252	78	48	не обн.	0,3
Почва – торфяно-глеевая переходная на суглинистой морене										
T ₀	8,9	58	15	26	не обн.	31	35	11	сл.	0,5
T ₁	8,7	161	81	434	13	546	512	13	0,3	2,7
T _n	3,1	896	287	328	25	384	1048	7	0,1	0,4
B _{hg}	1,7	391	98	491	не обн.	428	132	42	0,6	1,3
G	1,4	102	18	233	не обн.	316	39	30	сл.	2,3

нием. При этом исследователи отмечают, что численность микромицетов в почвах гидроморфного ряда практически не зависит от степени увлажнения почв [3], [7]. Наши исследования микробиоценоза торфяно-болотной и торфяно-глеевой почвы подтвердили этот вывод: резкого изменения численности микромицетов при градиенте влажности в изучаемых почвах не выявлено.

Следует отметить различия в микробных комплексах органогенных примитивных почв, характерной особенностью которых является достаточно короткий микробиологический профиль. При этом наибольшую плотность микробного населения отмечали в верхнем горизонте почв, что создает предпосылки для более высокой концентрации агрессивных метаболитов как самих микроорганизмов, так и растений, а также мортмассы, которая находится на разных стадиях разложения. Продукты деструкции, прямо и кос-

венно воздействуя на почвообразующую породу, вовлекают в общий химический круговорот дополнительные элементы питания, которые с внутрисочвенным стоком могут мигрировать в нижележащие страты почв, обогащая их. Это будет способствовать улучшению трофического режима почв, увеличению продуктивности елового древостоя.

Одна из задач исследования состояла в составлении кадастра микроорганизмов почв ненарушенных лесных экосистем. Впервые на примере почв буроземного типа в A₀ и A₁ горизонтах молекулярным методом были выделены биотипы микроорганизмов, принадлежащие к различным таксономическим группам (рис. 2). При этом установили, что доминируют по численности в микробном сообществе бактерии родов *Caulobacter* и *Rhodococcus*. Также отмечали высокую численность бактерий *Streptomyces*-

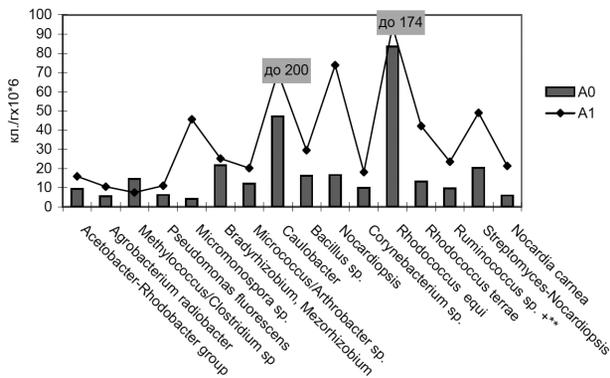


Рис. 2. Состав микробного сообщества бурозема грубогумусного, сформировавшегося в ельнике черничном

Nocardopsis, *Bacillus* sp. Представители последнего рода, как известно, являются активными продуцентами протеолитических ферментов [5]. Они, участвуя в конечных этапах превращения органического вещества, осуществляют более глубокую минерализацию природных полимеров. Их высокая численность в изучаемых почвах подтверждает интенсивно идущие процессы микробной трансформации органического вещества.

Одним из показателей напряженности метаболических процессов, происходящих в почве, является активность каталазы [1], [5]. Фермент класса оксидоредуктаз участвует в разложении перекиси водорода, образуемой в процессе окисления липидов, углеводов, белков. На основании полученных данных установили, что по активности каталазы верхнего горизонта автоморфные почвы образуют ряд: бурозем грубогумусный > подбур среднемошный грубогумусный > органогенная примитивная (рис. 3). При этом нами установлено, что в почвах с выраженным процессом буроземообразования структура, динамика микробных комплексов, их ферментативная активность сопряжены и коррелируют с содержанием органического вещества: максимальная активность выявляется в горизонте A_0 , вглубь почвенной толщи она резко снижается. Для почв с периодическим застойным увлажнением границы диапазона изменения активности каталазы в органогенном горизонте почв близки. Это свидетельствует о схожести процессов, происходящих в них: усиление анаэробных процессов и формирование условий для аккумуляции слабо разложившегося органического вещества и, как следствие, торфонакопления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований показали, что в микробном сообществе изучаемых

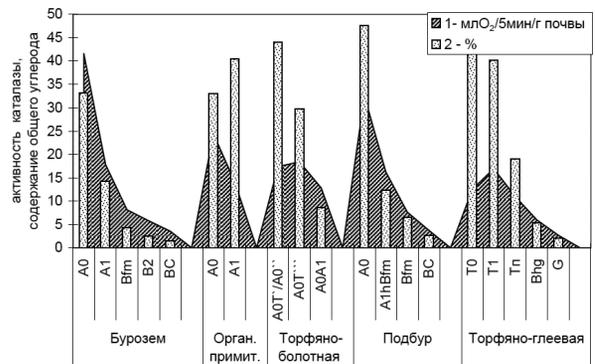


Рис. 3. Активность каталазы (1) и содержание общего углерода (2) в почвах еловых биогенотипов

почв присутствуют важнейшие эколого-трофические группы. Микробиологические свойства исследуемых почв имеют отличия. В почвах буроземного типа максимальная численность микроорганизмов приурочена к верхнему горизонту почв, соотношение эколого-трофических групп в составе микробного сообщества и ферментативная активность свидетельствуют о высокой напряженности микробиологических процессов. В почвах гидроморфного типа наибольшая численность выявлена в средней части профиля, поэтому характер распределения важнейших эколого-трофических групп иной, в целом метаболическая активность микробной биоты ниже, чем в почвах вышеуказанного типа. В примитивных почвах микробиологическая и ферментативная активность максимально проявляется только в верхнем горизонте почв.

Хотя в данной работе не рассматривался вопрос о сравнении биологической активности северо- и среднетаежной подзон Карелии, можно отметить, что микробные сообщества почв еловых генетических резерватов Северного Приладожья Карелии имеют особенности. В изучаемых биотопах присутствуют все важнейшие эколого-трофические группы, имеющие широкий диапазон численности, высокую функциональную активность. Высокая численность бактерий, осуществляющих круговорот азота и углерода, положительно влияет на биологическую активность почв, создает оптимальные условия для более глубокой деструкции органического вещества, что способствует накоплению гумуса. Последнее определяет хорошие лесорастительные свойства почв, высокую продукционную способность еловых фитоценозов, произрастающих в данных условиях.

* Работа выполнена в рамках проекта «Генетическая изменчивость малонарушенных популяций ели финской *Picea x fennica* Regel Kom. в Карелии» Подпрограммы «Генофонды и генетическое разнообразие» Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Биологическое разнообразие».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонова В. С. Микробиологические особенности антропогенно преобразованных почв Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 225 с.
2. Германова Н. И., Медведева М. В. Микрофлора почв заповедника «Кивач» // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. Вып. 10. С. 10–14.
3. Гродницкая И. Д., Сорокин Н. Д. Почвенно-микробиологический мониторинг лесоболотных экосистем Западной Сибири // Почвоведение. 2004. № 8. С. 945–951.
4. Загуральская Л. М., Медведева М. В. Микробное разнообразие почв хвойных и лиственных лесов // Разнообразие почв и биоразнообразие в лесных экосистемах средней тайги. М.: Наука, 2006. С. 228–234.
5. Звягинцев Д. Г., Бабьева И. П., Зенова Г. М. Биология почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 448 с.
6. Зубкова Т. А., Карпачевский Л. О. Матричная организация почв. М.: Русаки, 2001. 298 с.
7. Казеев К. Ш., Фомин С. Е., Колесников С. И., Вальков В. Ф. Биологические особенности локально-гидроморфных почв Ростовской области // Почвоведение. 2004. № 3. С. 361–372.
8. Каницкая Л. В., Рохин А. В., Медведева С. А., Кушнарев Д. Ф., Калабин Г. А. К вопросу о наличии лигнина в низкоорганизованных растениях: сфагновом мхе, хвоще топяном, папоротнике орляке // Химия в интересах устойчивого развития. 1999. Т. 7. С. 331–337.
9. Макушкин Э. О., Корсунов В. М., Павлова И. И. Биомасса микробных сообществ различных типов аллювиальных почв верховьев дельты Селенги // Известия Российской академии наук. Сер. биол. 2009. № 1. С. 100–107.
10. Медведева М. В., Федорец Н. Г., Ильинов А. А., Раевский Б. В., Рудковская О. А. Морфологические и химические свойства почв генетических резерватов Северного Приладожья // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2012. № 6 (127). С. 20–26.
11. Медведева М. В., Яковлев А. С. Изменение биохимических показателей почв в зоне влияния Костомукшского горно-обогатительного комбината // Почвоведение. 2011. С. 233–239.
12. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Д. Г. Звягинцева. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
13. Мирчинк Т. Г. Почвенная микология. М.: Изд-во МГУ, 1988. 220 с.
14. Морозова Р. М. Лесные почвы Карелии. Л.: Наука, 1991. 184 с.
15. Полянская Л. М., Никонов В. В., Лукина Н. В. Микроорганизмы Al-Fe-гумусовых подзолов сосняков лишайниковых в условиях аэротехногенного загрязнения // Почвоведение. 2001. № 2. С. 215–226.
16. Федорец Н. Г., Морозова Р. М., Синькевич С. М., Загуральская Л. М. Оценка продуктивности лесных почв Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. 190 с.
17. Osipov G. A., Turova E. S. Studying species composition of microbial communities with the use gas chromatography-mass spectrometry [Microbial community of kaolin]. *FEMS Microb.* 1997. Rev. 20. P. 437–446.
18. Robert L. Tate III. Soil microbiology (second edition). New York: John Wiley. Sons. Inc., 2000. 348 p.

Medvedeva M. V., Institute of Biology, Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Fedorets N. G., Institute of Biology, Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Ilyinov A. A., Institute of Biology, Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

BIOLOGICAL ACTIVITY OF SOILS IN GENETIC RESERVES OF NORTHERN LADOGA AREA

Our major task was to study biological activity of the soils in spruce genetic reserves of Northern Ladoga area. The soil survey based on the regional classification revealed 5 types of soils most typical of the sample plots in question. Three pits (organogenic Leptosol, peaty Histosols and podbur) exposed soils over crystalline bedrock. Two pits exposed soils over loamy moraine (raw humus Cambisol and transitional bog peat-gley soil). One of the specific research tasks was to determine the structure and numerical strength of the principal ecotrophic groups of microorganisms in the surveyed soils, and to study functional activity of the microbial community in these soils. Soil samples for the microbial-biochemical analysis were taken by individual genetic horizons from five points on the pit wall throughout the profile. The abundance of heterotrophic soil microorganisms, which take part in the transformation of nitrogen-, carbon-bearing compounds, was determined by inoculation on dense elective culture media following the technique traditionally used in soil microbiology. The species composition of the soil microbial community was determined by the molecular method of GC-MS. Catalase activity was determined gasometrically following Kruglov and Paromenskaya. Having analyzed the resultant data we found out that the numbers of saprotrophic bacteria in the soils ranged from 10^3 to 10^7 CFU/g of soil. The rate and directivity of the organic matter microbial transformation in automorphic soils was higher, and the microbial activity of distribution patterns differs from that in hydromorphic soils. In terms of total microorganism numbers in the upper soil horizon, soils of the automorphic series formed the following upward sequence: typical raw humus Cambisol > medium thickness raw humus podbur > organogenic Leptosol. Catalase activity in the soils in question ranged from 2.7 to 41.0 mlO₂/5 min/g of soil. The index was the highest in the upper horizon of typical raw humus Cambisols, and the lowest – in the mineral horizon of these soils at a depth of 45 cm. Application of the molecular method to the brown soil type yielded biotypes identified as prokaryotes, fungi, yeasts, protozoans, eukaryotes, Planta in horizons A0 and A1. We also found out that in terms of the abundance the dominant biotypes in the microbial community are presented by *Caulobacter*, *Rhodococcus equi*. High numerical strength was also demonstrated by *Streptomyces-Nocardiopsis*, *Bacillus* sp. The data from this study can be used in eco-microbiological monitoring of soils in spruce stands, and serve as the basis for working out sanitary and hygienic indicators of soil quality in disturbed ecosystems.

Key words: Northern Ladoga area, spruce genetic reserves, microbial-biochemical properties

REFERENCES

1. Arta mon ova V. S. *Mikrobiologicheskie osobennosti antropogenno preobrazovannykh pochv Zapadnoy Sibiri* [Microbiological specifics of soil reforming anthropogenity in Western Siberia]. Novosibirsk, SO RAC Publ., 2002. 225 p.
2. Ger man ova N. I., Me d ve d e va M. V. Soil microflora of reservation “Kivach” [Mikroflora pochv zapovednika “Kivach”]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Transactions of the Karelian Research Centre of RAS]. Petrozavodsk, 2006. Issue 10. P. 10–14.

3. Grodnitskaya I. D., Sorokin N. D. Soil-microbiology monitoring of ecosystem of Western Siberia [Pochvenno-mikrobiologicheskii monitoring lesobolotnykh ekosistem Zapadnoy Sibiri]. *Pochvovedenie* [Soil science]. 2004. № 8. P. 945–951.
4. Zagural'skaya L. M., Medvedeva M. V. Microbial diversity of soils in coniferous and deciduous forests [Mikrobnnoe raznoobrazie pochv khvoynykh i listvennykh lesov]. *Raznoobrazie pochv i bioraznoobrazie v lesnykh ekosistemakh sredney taygi* [Soil diversity and biodiversity in the middle-taiga ecosystem]. Moscow, Nauka Publ., 2006. P. 228–234.
5. Zvyagintsev D. G., Bab'eva I. P., Zenova G. M. *Biologiya pochv* [Biology of soil]. Moscow, Moscow State University Publ., 2005. 448 p.
6. Zubkova T. A., Karpachevskiy L. O. *Matrichnaya organizatsiya pochv* [Matrix organization of soils]. Moscow, Rusaki Publ., 2001. 298 p.
7. Kazeev K. Sh., Fomin S. E., Kolesnikov S. I., Val'kov V. F. Biological features of local-gidromorphic soils of Rostov region [Biologicheskie osobennosti lokal'no-gidromorfnykh pochv Rostovskoy oblasti]. *Pochvovedenie* [Soil science]. 2004. № 3. P. 361–372.
8. Kanitskaya L. V., Rokhin A. V., Medvedeva S. A., Kushnarev D. F., Kalabin G. A. To question of presence of lignin in plants of low organization: sphagnum mosses, horsetail uliginose, paprotnike orlyake [K voprosu o nalichii lignina v nizkoorganizovannykh rasteniyakh: sfagnovom mke, khvoshe topyanom, paprotnike orlyake]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya* [Chemistry in the interest of constantly develop]. 1999. Vol. 7. P. 331–337.
9. Makushkin E. O., Korsunov V. M., Pavlova I. I. Biomass of microbial cenosis in different types of alluvial Selenga's high delta soils [Biomassa mikrobnnykh soobshchestv razlichnykh tipov allyuvial'nykh pochv verkhov'ev del'ty Selengi]. *Izvestiya RAN. Ser. biol.* [Proceedings of Russian academy society. Ser. biol.]. 2009. № 1. P. 100–107.
10. Medvedeva M. V., Fedorets N. G., Il'inov A. A., Raevskiy B. V., Rudkovskaya O. A. Morphological and chemical properties of soils of genetic reservation in Northern Priladogije [Morfologicheskie i khimicheskie svoystva pochv geneticheskikh rezervatov Severnogo Priladozh'ya]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Science]. 2012. № 6 (127). P. 20–27.
11. Medvedeva M. V., Yakovlev A. S. Changes in microbial-biochemical parameters in the course of soil anthropogenic transformation in Eastern Fennoscandia [Izmenenie biokhimicheskikh pokazateley pochv v zone vliyaniya Kostomukshskogo gorno-obogatitel'nogo kombinata]. *Pochvovedenie* [Soil science]. 2011. P. 233–239.
12. *Metody pochvennoy mikrobiologii i biokhimii* [Methods of soil microbiology and biochemistry]. Moscow, Moscow State University Publ., 1991. 304 p.
13. Mirchink T. G. *Pochvennaya mikologiya* [Soil mycology]. Moscow, Moscow State University Publ., 1988. 220 p.
14. Morozova R. M. *Lesnye pochvy Karelii* [Forests soils of Karelia]. Leningrad, Nauka Publ., 1991. 184 p.
15. Polyanskaya L. M., Nikonov V. V., Lukina N. V. Microorganisms Al-Fe-humus podsols of pines lichens in aerotechnogenic pollution conditions [Mikroorganizmy Al-Fe-gumusovykh podzolov sosnyakov lishaynikovyykh v usloviyakh aerotekhnogenogo zagryazneniya]. *Pochvovedenie* [Soil science]. 2001. № 2. P. 215–226.
16. Fedorets N. G., Morozova R. M., Sin'kevich S. M., Zagural'skaya L. M. *Otsenka produktivnosti lesnykh pochv Karelii* [Estimate of productivity of forests soils of Karelia]. Petrozavodsk, KarRC RAC Publ., 2000. 190 p.
17. Osipov G. A., Turova E. S. Studying species composition of microbial communities with the use of gas chromatography-mass spectrometry [Microbial community of kaolin]. *FEMS Microb.* 1997. Rev. 20. P. 437–446.
18. Robert L. Tate III. *Soil microbiology* (second edition). New York: John Wiley. Sons. Inc., 2000. 348 p.

Поступила в редакцию 25.09.2013

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)
sukhovskaya@inbox.ru

**РОЛЬ ГЛУТАТИОНА В ФУНКЦИОНИРОВАНИИ СИСТЕМ
АНТИОКСИДАНТНОЙ ЗАЩИТЫ И БИОТРАНСФОРМАЦИИ (ОБЗОР)***

Глутатион – это уникальный пептид, содержащийся в клетках не только всех эукариотических организмов, но и многих прокариотов. В отличие от других пептидов, образующихся путем матричного синтеза или посттрансляционной модификации, он имеет собственный метаболический путь. Это соединение играет важнейшую роль в клеточном обмене, участвуя в поддержании окислительно-восстановительного потенциала, в процессах детоксикации ксенобиотиков эндо- и экзогенного происхождения, как непосредственно, так и в качестве субстрата для целого ряда ферментов биотрансформации. Возрастные изменения, стимуляция иммунных реакций, развитие острых и хронических заболеваний ассоциированы с синтезом глутатиона. В частности, почти все основные болезни человека сопровождаются вариабельностью уровня глутатиона и окислительного статуса в клетках. В данном обзоре в общем виде суммированы современные знания о свойствах глутатиона и его участии в различных защитных реакциях.

Ключевые слова: глутатион, система антиоксидантной защиты, биотрансформация ксенобиотиков

Эволюция живой природы на Земле с момента появления кислорода в атмосфере сопровождалась формированием в клетках биохимической системы антиоксидантной защиты. Одним из ее важнейших компонентов является восстановленный глутатион (GSH), который представляет собой трипептид L-γ-глутамил-L-цистеинил-глицин. Малый размер молекулы и наличие сульфгидрильной группы в боковой цепи цистеина превращает глутатион в универсального участника подавляющего большинства реакций, направленных на предотвращение повреждающего действия активных форм кислорода (АФК) и свободнорадикальных процессов.

Глутатион, будучи пептидом в классическом понимании, тем не менее является небелковым трипептидом, то есть не образуется путем матричного синтеза или посттрансляционной модификации. Синтез глутатиона *de novo* осуществляется исключительно в цитозоле в две ступени, катализируемых глутаматцистеинлигазой и глутатионсинтетазой [32]. Особенностью первого этапа синтеза является образование пептидной связи путем присоединения не α-, а γ-карбоксильной группы глутаминовой кислоты к аминокгруппе цистеина. Из-за столь необычного строения молекулы гидролиз такой пептидной связи осуществляется единственным мембранным ферментом γ-глутамилтранспептидазой,

расположенном только на внешних поверхностях определенных типов клеток [30]. Как следствие, GSH устойчив к внутриклеточной деградации и метаболизируется экстрацеллюлярно только в тканях, имеющих γ-глутамилтранспептидазу.

Глутатион обнаружен во всех эукариотических клетках. У прокариотов он встречается преимущественно у грамотрицательных и лишь у некоторых видов грамположительных бактерий [33]. Основными резервуарами этого трипептида служат, во-первых, цитозоль, в котором сосредоточено почти 90 %, 10 % приходится на митохондрии, и мизерный процент падает на долю эндоплазматического ретикулума [23]. Обмен GSH протекает очень быстро, например, в печени крыс период его полужизни составляет всего 2–3 часа.

Как показано для млекопитающих, гомеостаз глутатиона в клетках поддерживается тремя механизмами. Это синтез *de novo*, транспорт экзогенного GSH через плазматические мембраны и восстановление из окисленной формы.

GSH играет ключевую роль в поддержании редокс-статуса в клетке, определяемого соотношением концентраций окислительных и восстановительных эквивалентов [7]. Он существует в двух редокс-формах, восстановленной и окисленной (дисульфида глутатиона). Большая часть биологических функций глутатиона осуществляется путем превращения восстановленного GSH

в окисленную форму (GSSG) с помощью фермента глутатион пероксидазы и последующего возвращения в восстановленную форму (GSH) при участии НАДФН-зависимой глутатион редуктазы [24], которая использует этот кофактор из пентозофосфатного шунта [6]. Соотношение GSH/GSSG определяет окислительный статус клеток и четко регулируется двумя вышеназванными ферментами [37]. В норме поддерживается относительно низкий уровень GSSG. Это связано с необходимостью ограничивать образование смешанных с белками дисульфидов, так как GSSG может вступать в реакции с сульфгидрильными группами белков, образуя смешанные дисульфиды. Тиол-дисульфидное равновесие внутри клетки регулируется разными метаболическими процессами, включающими активность ферментов и транспортных систем, сигнальную трансдукцию и экспрессию генов через изменение редокс-чувствительных факторов транскрипции, таких как активатор белка-1 (AP-1), факторы каппа В (NFκB) и p53 [28], [38]. У насекомых GSSG восстанавливается до GSH через систему тиоредоксина [25]. Так как реакция окисления-восстановления является обратимой, то равновесие, определяющее редокс-статус клетки, пропорционально логарифму $[GSH]^2/[GSSG]$. Окислительно-восстановительный потенциал клеток может быть вычислен с помощью уравнения Нернста:

$$E_h = E_0 + 2,303 \cdot RT/nF \cdot \lg ([GSH]^2/[GSSG]),$$

где E_0 – редокс-потенциал глутатиона, равный $-0,24V$ [1], R – газовая постоянная ($8,314/\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), T – абсолютная температура (K°), n – число переносимых электронов (2), F – константа Фарадея ($96485 \text{ Дж} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$) [22].

Уровень GSH в клетках очень высок и достигает $1-10 \text{ mM}$. В подавляющем большинстве клеток концентрация GSH колеблется в пределах $1-2 \text{ mM}$, тогда как в гепатоцитах, экспортирующих глутатион, уровень этого трипептида может приближаться к 10 mM . Клетки могут экскретировать GSSG, доля которого не превышает $1/100$ общего пула глутатиона, или восстанавливать его в GSH. Однако именно синтез *de novo* наиболее существенен для роста уровня GSH.

Синтез этого трипептида является двухступенчатым. На первом этапе образуется γ -глутамилцистеин при участии глутаматцистеинлигазы. На втором осуществляется присоединение глицина с помощью GSH синтазы [30]. Контроль за скоростью синтеза осуществляется на первом этапе, поскольку ее определяющим фактором является концентрация цистеина в клетке [14]. Источником цистеина, используемого для синтеза GSH *de novo*, является катализ экстрацеллюлярного трипептида, осуществляемый γ -глутамил трансферазой, и/или конверсия метионина через цистатиониновый путь [31]. Однако существует и обходной путь.

Фермент γ -глутамилтрансептидаза, расположенная на внешней поверхности плазматических мембран, метаболизирует экстрацеллюлярный GSH, образуя γ -глутамилцистеин. Последний поглощается клетками и попадает на второй этап синтеза, в обход первого этапа [18]. Если цистатиониновый путь характерен для клеток печени, то расщепление внеклеточного GSH происходит на наружной поверхности плазматических мембран различных эпителиальных клеток, таких как клетки почек, поджелудочной железы, желчных протоков и тонкого кишечника.

Глутатион участвует в реализации нескольких жизненно важных функций. В первую очередь это нейтрализация токсических электрофильных соединений, которая осуществляется путем прямого контакта с АФК либо через активацию ферментов биотрансформации, таких как глутатион пероксидазы и глутатион трансферазы [6]. Активные формы кислорода играют важную роль в различных физиологических процессах, в том числе клеточной пролиферации и дифференциации, генной регуляции, антибактериальной защите. Основная доля активных метаболитов кислорода приходится на супероксид анион (O_2^-), гидроксильную группу (OH^\cdot), оксид азота (NO) и перекись водорода (H_2O_2). Последняя образуется путем как неэнзиматической, так и энзиматической дисмутации супероксид аниона. Но наиболее реактивным и опасным АФК является OH^\cdot , который может образовываться из H_2O_2 и супероксид аниона, а также в результате реакции супероксид аниона с окислом азота, когда образуется пероксинитрит ($ONOO^-$), распадающийся на двуокись азота (NO_2) и OH^\cdot [2].

Существенная роль отводится GSH и в регуляции свободнорадикальных процессов, в которых этот трипептид блокирует и удаляет свободные радикалы. Он поддерживает эссенциальный тиоловый статус белков и является резервуаром цистеина. GSH участвует в модуляции таких критически важных клеточных процессов, как синтез ДНК и иммунная функция [4], [30]. Кроме того, GSH поддерживает гомеостаз оксида азота (NO) [16], модулирует активность белков через посттрансляционную модификацию (S-глутатионилирование) [35] и рецепторов нейротрансмиттеров [34]. В клеточных органеллах глутатион играет разные роли. В митохондриях он участвует в регуляции апоптоза, задерживая некротические процессы, а в ядрах является ключевым регулятором пролиферации [8].

Главная функция GSH – детоксикация ксенобиотиков и/или их метаболитов. Эти соединения являются электрофилами и образуют конъюгаты с GSH как спонтанно, так и энзиматически, в реакциях, катализируемых глутатион S-трансферазой [29]. Образовавшиеся конъюгаты обычно экскретируются из клеток, например, из гепатоцитов в желчь. Кроме того, они могут подвергаться расщеплению, катализируемому

γ -глутамилтранспептидазой, с образованием остатка γ -глутаминовой кислоты и цистеинилглицинового конъюгата. Связь между цистеином и глицином разрывается дипептидазой, и в результате образуется конъюгат ксенобиотика с цистеином. Затем следует N-ацетилирование этого соединения с образованием меркаптуровой кислоты. Метаболизм GSH конъюгатов до меркаптуровой кислоты начинается в желчных протоках, кишечнике или почках, а образование N-ацетилцистеиновых конъюгатов обычно происходит в почках [4]. Аналогично метаболизируются токсические продукты эндогенного происхождения. Хотя большинство реакций конъюгации приводят к детоксикации, бывает, что образовавшийся продукт остается высоко реактивным [4]. Примером является конъюгат GSH с дибромэтаном [5]. Внутриклеточный глутатион необратимо расходуется в процессе конъюгации с ксенобиотиками.

Все аэробные организмы являются субъектами определенного уровня физиологического окислительного стресса, возникающего в результате окислительно-восстановительных процессов в митохондриях. Образующиеся промежуточные продукты, такие как супероксид ион ($O_2^{\cdot-}$), перекись водорода (H_2O_2), могут приводить к появлению токсических радикалов кислорода, что может стать причиной резкого роста уровня перекисного окисления липидов и повреждения клеток. Чтобы этого не происходило, OH \cdot эндогенного происхождения восстанавливается GSH в присутствии Se-зависимой глутатион пероксидазы. Затем GSH окисляется до GSSG, последний снова восстанавливается до GSH в присутствии NADPH-зависимой глутатион редуктазы. Весь этот процесс формирует так называемый редокс-цикл.

Органические перекиси могут восстанавливаться глутатион пероксидазой и глутатион S-трансферазой, перекись водорода – также восстанавливаться каталазой, которая присутствует только в пероксисомах. Поскольку в митохондриях каталаза отсутствует, то важность GSH для митохондрий не вызывает сомнений. Поэтому уровень митохондриального GSH критичен для защиты от окислительного стресса, как физиологического, так и возникающего при патологических состояниях [10].

Высокий уровень окислительного стресса может превысить возможности клетки по восстановлению GSSG в GSH, что приводит к накоплению GSSG. Для защиты клетки от сдвига в окислительно-восстановительном равновесии GSSG может активно экспортироваться из клеток либо вступить в реакцию с сульфгидрильными группами белков, что приводит к образованию смешанных дисульфидов, истощающих запасы клеточного GSH [28].

В таких клетках, как лимфоциты и фибробласты, повышенный уровень GSH ассоциируется с ранним пролиферативным ответом и является важным для клеток, вступающих в S-фазу [36]. В пролиферирующих первичных культурах низкой плотности гепатоцитов крыс повышение концентрации GSH стимулировало сдвиг фазы G0 до фазы G1 клеточного цикла [27]. Аналогичный эффект наблюдали после частичной гепатэктомии [19]. Если после этой операции заблокировать рост уровня GSH, то регенерация печени замедляется. Уровень GSH прямо коррелирует с ростом клеток карциномы печени [20]. Показано, что увеличение концентрации GSH способствует росту метастазов меланомы в печени [3]. Однако особенности молекулярного механизма модуляции клеточной пролиферации с помощью GSH до конца так и не выяснены. Известно, что GSH модулирует синтез ДНК, поддерживая уровень восстановленных глутаредоксина или тиоредоксина, которые необходимы для активации рибонуклеотидредуктазы, фермента, ограничивающего скорость синтеза ДНК [17].

Глутатион участвует в реализации процессов гибели клеток. Один из конечных этапов жизни, апоптоз, характеризуется такими морфологическими особенностями, как конденсация хроматина, фрагментация и межнуклеосомальная потеря ДНК. Заключительный этап, некроз, характеризуется разрывом и фрагментацией плазматических мембран и истощением запасов АТФ [11]. GSH модулирует процесс умирания клеток в обоих случаях. Он регулирует редокс-статус специфических тиоловых белков, таких как NF κ B, стресс киназы и каспазы, участвующих в гибели клетки [11]. При апоптозе происходит снижение уровня GSH у большинства клеток различных типов, в результате начинается рост концентрации АФК, усиливается экспорт GSH из клеток, падает активность γ -глутамилцистеиниллигазы [9], [15]. Тот факт, что блокировка утечки GSH в клетках U937 и HepG2 предотвращает апоптоз, индуцированный пирамицином [13], подтверждает идею о связи снижения уровня GSH в клетке с инициацией апоптоза у некоторых типов клеток. При очень высокой утечке GSH смерть клетки, индуцированная разными агентами, переходит из стадии апоптоза в стадию некроза [15]. Это означает, что высокие уровни АФК могут подавлять механизм апоптоза. Глутатион может влиять на процесс гибели клетки через модуляцию уровня митохондриальных АФК. Потеря GSH митохондриями ведет к росту уровня АФК и активного азота, дисфункции этих органелл и утечке АТФ, что может приводить к переводу процесса гибели клетки из апоптоза в некроз [11].

Показано, что у кроликов с возрастом происходит снижение концентрации глутатиона во всех тканях, обусловленное экспрессией генов γ -глутамилцистеиниллигазы и глутатионсинтетазы [26], [40]. Аналогичные результаты полу-

чены и на мышах. Хотя возрастные изменения ассоциированы со снижением уровня GSH у обоих полов, у самцов происходило более сильное снижение не только концентрации GSH, но и мРНК γ -глутамилцистеиниллигазы в большинстве тканей [40]. Инъекция эстрогена стимулировала экспрессию γ -глутамилцистеиниллигазы и глутатионсинтетазы и рост уровня GSH в печени мышей обоих полов, а в сердце и мозге эффект отсутствовал [26]. Проведенные исследования указывают на вероятность связи между снижением концентрации GSH и многими возрастными болезнями. Тем не менее влияние возраста на экспрессию γ -глутамилцистеиниллигазы и глутатионсинтетазы в значительной мере остается невыясненным.

Снижение уровня GSH, связанное с возрастом, может иметь два потенциально вредных последствия. Во-первых, может нарушиться гомеостаз по перекиси водорода, и ее концентрация в клетке начинает расти, что приводит к усилению образования свободного гидроксид радикала и соответственно к существенному повреждению различных макромолекулярных структур. Усиливается перекисное окисление липидов, в результате чего возрастает доля таких соединений, как малоновый диальдегид и 4-гидроксиноненаль, которые могут соединяться с ДНК и белками, модифицируя их структуру и функции [39]. Во-вторых, образование белок-смешанных дисульфидов может изменять каталитические возможности ферментов в достаточном широком диапазоне, что может отразиться на их способности поддерживать адаптивный ответ в условиях стресса. Оба этих типа альтераций присутствуют при возрастных изменениях [12], [21]. Поэтому поддержание оптимального редокс-статуса с помощью GSH является обязательным для ограничения повреждающего воздействия оксидативного стресса на макромолекулы.

В таких клетках, как лимфоциты и фибробласты, повышенный уровень GSH ассоциируется с ранним пролиферативным ответом и является важным для клеток, вступающих в S-фазу [36]. Происходит рост уровня GSH у пролиферирующих первичных культур низкой плотности гепатоцитов крыс, стимулировавший сдвиг фазы G0 до фазы G1 клеточного цикла [27], а также после частичной гепатэктомии [19]. Если после частичной эктомии заблокировать рост уровня GSH, то регенерация печени замедляется. Статус GSH

прямо коррелирует с ростом клеток карциномы печени [20]. Показано, что рост уровня GSH способствует росту метастазов меланомы в печени [3]. Однако особенности молекулярного механизма модуляции клеточной пролиферации с участием GSH до конца так и не выяснены. Известно, что GSH модулирует синтез ДНК, поддерживая уровень восстановленных глутаредоксина или тиоредоксина, которые необходимы для активации рибонуклеотидредуктазы, фермента, ограничивающего скорость синтеза ДНК [17].

Одной из наиболее важных функций GSH является запасание и сохранение цистеина, поскольку эта аминокислота крайне нестабильна во внеклеточных условиях и очень быстро окисляется до цистина в процессах, продуктами которых являются потенциально токсичные АФК [29]. Существует цикл γ -глутаминовой кислоты, который позволяет использовать GSH как непрерывный источник цистеина. Этот цикл функционирует следующим образом. Глутатион экскретируется из клетки, затем с помощью γ -глутамилтранспептидазы, расположенной на внешней поверхности мембран, расщепляется с образованием остатка γ -глутаминовой кислоты, который соединяется с другой аминокислотой (лучшим акцептором является цистеин), и цистеинил-глицина. γ -глутамиламинокислота транспортируется в клетку, и на этом цикл завершается. В клетке γ -глутамиламинокислота может дальше метаболизироваться, до аминокислоты и 5-оксипролина, который может превращаться в γ -глутамат и использоваться в синтезе GSH. Цистеинил-глицин расщепляется дипептидазой до цистеина и глицина. Цистеин транспортируется в клетки, где основная его масса расходуется на синтез GSH, часть входит в состав белков, в зависимости от потребностей клетки, оставшаяся часть деградирует до сульфата и таурина [29]. У подавляющего большинства клеток γ -глутаминовый цикл позволяет использовать GSH как непрерывный источник цистеина.

Несмотря на то что число работ, посвященных исследованию роли глутатиона в жизнедеятельности клеток, исчисляется тысячами, тем не менее многие молекулярные механизмы участия глутатиона в разных метаболических путях в значительной мере остаются неизвестными. Поэтому сохраняется повышенный интерес к выявлению новых свойств этого пептида.

* Работа выполнена при поддержке Гранта Президента РФ НШ-1642.2012.4, проекта ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.» № 8050, Проектов Программ Президиума РАН «Живая природа», «Проблемы происхождения жизни и становления биосферы» и ОБН РАН «Биоресурсы» на 2012–2014 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Торчинский Ю. М. Сера в белках. М.: Наука, 1977. 303 с.
2. Biswas S. K., Rahman I. Environmental toxicity, redox signaling and lung inflammation: the role of glutation. *Mol. Aspects Med.* 2009. Vol. 30 (1–2). P. 60–76.

3. Carretero J., Obrador E., Anasagasti M. J., Martin J. J., Vidal-Vanaclocha F., Estrela J. M. Growth-associated changes in glutathione content correlate with liver metastatic activity of B16 melanoma cells. *Clin. Exp. Metastasis*. 1999. Vol. 17. P. 567–574.
4. DeLeve L., Kaplowitz N. Importance and regulation of hepatic GSH. *Sem Liver Dis*. 1990. Vol. 10. P. 251–266.
5. DeLeve L., Kaplowitz N. Glutathione metabolism and its role in hepatotoxicity. *Pharmacol. Ther.* 1991. Vol. 52. P. 287–305.
6. Dickinson D. A., Forman H. J. Cellular glutathione and thiols metabolism. *Biochem. Pharmacol.* 2002. Vol. 64. P. 1019–1026.
7. Forman H. J., Dickinson D. A. Oxidative signaling and glutathione synthesis. *Biofactors*. 2003. Vol. 17. P. 1–12.
8. Forman H. J., Zhang H., Rinna A. Glutathione: Overview of its protective roles, measurement, and biosynthesis. *Mol. Aspects. Med.* 2009. Vol. 30 (1–2). P. 1–12.
9. Franklin C. C., Rosenfeld-Franklin M. E., White C., Kavanagh T. J., Fausto N. TGF β 1-induced suppression of glutathione antioxidant defenses in hepatocytes: caspase-dependent posttranslational and caspase-independent transcriptional regulatory mechanisms. *FASEB J.* 2003. Vol. 10. P. 1096.
10. Garcia-Ruiz C., Fernández-Checa J. C. Mitochondrial glutathione: hepatocellular survival-death switch. *J. Gastroenterol. Hepatol.* 2006. Vol. 21. P. 3–6.
11. Garcia-Ruiz C., Fernández-Checa J. C. Redox regulation of hepatocyte apoptosis. *J. Gastroenterol. Hepatol.* 2007. Vol. 22. P. 38–42.
12. Ghezzi P. Oxidoreduction of protein thiols in redox regulation. *Biochem. Soc. Trans.* 2005. Vol. 33. P. 1378–1381.
13. Ghibelli L., Fanelli C., Rotilio G., Lafavia E., Coppola S., Colussi C., Civitareale P., Cirio M. R. Rescue of cells from apoptosis by inhibition of active GSH extrusion. *FASEB J.* 1998. Vol. 12. P. 479–486.
14. Griffith O. W., Meister A. Potent and specific inhibition of glutathione synthesis by buthionine sulfoximine (S-n-butyl homocysteine sulfoximine). *J. Biol. Chem.* 1979. Vol. 254. P. 7558–7560.
15. Hall A. G. The role of glutathione in the regulation of apoptosis. *Eur. J. Clin. Invest.* 1999. Vol. 29. P. 238–245.
16. Hogg N. The biochemistry and physiology of S-nitrosothiols. *Ann. Rev. Pharmacol. Toxicol.* 2002. Vol. 42. P. 585–600.
17. Holmgren A. Regulation of ribonucleotide reductase. *Current Topics in Cellular Regulation*. 1981. Vol. 19. P. 47–76.
18. Huang C. S., Chang L. S., Anderson M. E., Meister A. Catalytic and regulatory properties of the heavy subunit of rat kidney γ -glutamylcysteine synthetase. *J. Biol. Chem.* 1993. Vol. 268. P. 19675–19680.
19. Huang Z. Z., Li H., Cai J., Kuhlentkamp J., Kaplowitz N., Lu S. C. Changes in glutathione homeostasis during liver regeneration in the rat. *Hepatology*. 1998. Vol. 27. P. 147–153.
20. Huang Z. Z., Chen C. J., Zeng Z. H., Yang H. P., Oh J., Chen L. X., Lu S. C. Mechanism and significance of increased glutathione level in human hepatocellular carcinoma and liver regeneration. *FASEB J.* 2000. Vol. 10. P. 1096.
21. Humphries K. M., Szveda P. A., Szveda L. I. Aging: a shift from redox regulation to oxidative damage. *Free Radic. Res.* 2006. Vol. 40. P. 1239–1243.
22. Hutter D. E., Till B. G., Greene J. J. Redox state changes in density-dependent regulation of proliferation. *Exp. Cell Res.* 1997. Vol. 232. P. 435–438.
23. Hwang C., Sinskey A. J., Lodish H. F. Oxidized redox state of glutathione in the endoplasmic reticulum. *Science*. 1992. Vol. 257. P. 1496–1502.
24. Jones D. P. Redox potential of GSH/GSSG couple: Assay and biological significance. *Methods Enzymol.* 2002. Vol. 348. P. 93–112.
25. Kanzok S. M., Fechner A., Bauer H., Ulschmid J. K., Muller H. M., Botella-Munoz J., Schneuwly S., Schirmer R., Becker K. Substitution of the thioredoxin system for glutathione reductase in *Drosophila melanogaster*. *Science*. 2001. Vol. 291. P. 643–646.
26. Liu H., Wang H., Shenvi S., Hagen T. M., Liu R. M. Glutathione metabolism during aging and in Alzheimer disease. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 2004. Vol. 1019. P. 346–349.
27. Lu S. C., Ge J. Loss of suppression of GSH synthesis under low cell density in primary cultures of rat hepatocytes. *Am. J. Physiol.* 1992. Vol. 263. P. 1181–1189.
28. Lu S. C. Regulation of hepatic glutathione synthesis: Current concept and controversies. *FASEB J.* 1999. Vol. 13. P. 1169–1183.
29. Meister A. Glutathione. In: Aria, IM.; Jakoby, WB.; Popper, H.; Schachter, D.; Shafritz, DA., editors. *The Liver: Biology and Pathobiology*. Raven Press; New York, 1988. Vol. 2. P. 401–417.
30. Meister A., Anderson M. E. Glutathione. *Ann. Rev. Biochem.* 1983. Vol. 52. P. 711–760.
31. Meister A., Anderson M. E., Hwang O. Intracellular cysteine and glutathione delivery systems. *J. AmColl. Nutr.* 1986. Vol. 5. P. 137–151.
32. Meister A., Tate S. S. Glutathione and related gammaglutamyl compounds: biosynthesis and utilization. *Annu Rev. Biochem.* 1976. Vol. 45. P. 559–604.
33. Newton G. L., Arnold K., Price M. S., Sherrill C., Delcardayre S. B., Aharonowitz Y., Cohen G., Davies J., Fahey R. C., Davis C. Distribution of thiols in microorganisms: mycothiol is a major thiol in most actinomycetes. *J. Bacteriol.* 1996. Vol. 178. P. 1990–1995.
34. Oja S. S., Janaky R., Varga V., Saranasaari P. Modulation of glutamate receptor functions by glutathione. *Neurochem. Int.* 2000. Vol. 37. P. 299–306.
35. Pompella A., Visvikis A., Paolicchi A., De Tata V., Casini A. F. The changing faces of glutathione, a cellular protagonist. *Biochem Pharmacol.* 2003. Vol. 66. P. 1499–1503.
36. Poot M., Teubert H., Rabinovitch P. S., Kavanagh T. J. De novo synthesis of glutathione is required for both entry into and progression through the cell cycle. *J. Cell Physiol.* 1995. Vol. 163. P. 555–560.
37. Schafer F. Q., Buettner G. R. Redox environment of the cell as viewed through the redox state of the glutathione disulfide/glutathione couple. *Free Radical Bio. Med.* 2001. Vol. 30. P. 1191–1212.
38. Townsend D. M., Tew K. D., Tapiero H. The importance of glutathione in human disease. *Biomed Pharmacotherap.* 2003. Vol. 57. P. 145–155.
39. Uchida K., Stadtman E. R. Quantitation of 4-hydroxynonenal protein adducts. *Methods Mol. Biol.* 2000. Vol. 99. P. 25–34.
40. Wang H., Liu H., Liu R. M. Gender difference in glutathione metabolism during aging in mice. *Exp. Gerontology*. 2003. Vol. 38. P. 507–517.

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)

GLUTATHIONE ROLE IN ANTIOXIDANT PROTECTION AND IN FUNCTIONING OF BIOTRANSFORMATION SYSTEM

Glutathione is a unique peptide contained not only in the cells of all eukaryotic organisms but in many prokaryotes as well. Unlike other peptides generated by the matrix synthesis or posttranslational modification, it has its own metabolic pathway. This substance plays a crucial role in cell metabolism, participating directly as a main player in maintenance of the redox status, in the processes of detoxification of xenobiotics of endo- and exogenous origin or acts as a substrate for a number of biotransformation enzymes. Age-related changes, stimulation of immune reactions, development of acute and chronic diseases are associated with GSH synthesis. In particular, almost all major human diseases are accompanied by variability in the level of GSH and oxidative status in the cells. The purpose of this review is to summarize accumulated knowledge on the properties of GSH and generalize glutathione participation in different protective reactions.

Key words: glutathione, antioxidant protection system, xenobiotic biotransformation

REFERENCES

1. Torchinskiy Yu. M. *Sera v belkakh* [Sulfur in proteins]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 303 p.
2. Biswas S. K., Rahman I. Environmental toxicity, redox signaling and lung inflammation: the role of glutathione. *Mol. Aspects Med.* 2009. Vol. 30 (1–2). P. 60–76.
3. Carretero J., Obrador E., Anasagasti M. J., Martin J. J., Vidal-Vanaclocha F., Estrela J. M. Growth-associated changes in glutathione content correlated with liver metastatic activity of B16 melanoma cells. *Clin. Exp. Metastasis.* 1999. Vol. 17. P. 567–574.
4. DeLeve L., Kaplowitz N. Importance and regulation of hepatic GSH. *Sem Liver Dis.* 1990. Vol. 10. P. 251–266.
5. DeLeve L., Kaplowitz N. Glutathione metabolism and its role in hepatotoxicity. *Pharmacol. Ther.* 1991. Vol. 52. P. 287–305.
6. Dickinson D. A., Forman H. J. Cellular glutathione and thiols metabolism. *Biochem. Pharmacol.* 2002. Vol. 64. P. 1019–1026.
7. Forman H. J., Dickinson D. A. Oxidative signaling and glutathione synthesis. *Biofactors.* 2003. Vol. 17. P. 1–12.
8. Forman H. J., Zhang H., Rinna A. Glutathione: Overview of its protective roles, measurement, and biosynthesis. *Mol. Aspects Med.* 2009. Vol. 30 (1–2). P. 1–12.
9. Franklin C. C., Rosenfeld-Franklin M. E., White C., Kavanagh T. J., Fausto N. TGF β 1-induced suppression of glutathione antioxidant defenses in hepatocytes: caspase-dependent posttranslational and caspase-independent transcriptional regulatory mechanisms. *FASEB J.* 2003. Vol. 10. P. 1096.
10. Garcia-Ruiz C., Fernández-Checa J. C. Mitochondrial glutathione: hepatocellular survival-death switch. *J. Gastroenterol. Hepatol.* 2006. Vol. 21. P. 3–6.
11. Garcia-Ruiz C., Fernández-Checa J. C. Redox regulation of hepatocyte apoptosis. *J. Gastroenterol. Hepatol.* 2007. Vol. 22. P. 38–42.
12. Ghezzi P. Oxidoreduction of protein thiols in redox regulation. *Biochem. Soc. Trans.* 2005. Vol. 33. P. 1378–1381.
13. Ghibelli L., Fanelli C., Rotilio G., Lafavia E., Coppola S., Colussi C., Civitareale P., Cirio M. R. Rescue of cells from apoptosis by inhibition of active GSH extrusion. *FASEB J.* 1998. Vol. 12. P. 479–486.
14. Griffith O. W., Meister A. Potent and specific inhibition of glutathione synthesis by buthionine sulfoximine (S-n-butyl homocysteine sulfoximine). *J. Biol. Chem.* 1979. Vol. 254. P. 7558–7560.
15. Hall A. G. The role of glutathione in the regulation of apoptosis. *Eur. J. Clin. Invest.* 1999. Vol. 29. P. 238–245.
16. Hogg N. The biochemistry and physiology of S-nitrosothiols. *Ann. Rev. Pharmacol. Toxicol.* 2002. Vol. 42. P. 585–600.
17. Holmgren A. Regulation of ribonucleotide reductase. *Current Topics in Cellular Regulation.* 1981. Vol. 19. P. 47–76.
18. Huang C. S., Chang L. S., Anderson M. E., Meister A. Catalytic and regulatory properties of the heavy subunit of rat kidney γ -glutamylcysteine synthetase. *J. Biol. Chem.* 1993. Vol. 268. P. 19675–19680.
19. Huang Z. Z., Li H., Cai J., Kuhlenkamp J., Kaplowitz N., Lu S. C. Changes in glutathione homeostasis during liver regeneration in the rat. *Hepatology.* 1998. Vol. 27. P. 147–153.
20. Huang Z. Z., Chen C. J., Zeng Z. H., Yang H. P., Oh J., Chen L. X., Lu S. C. Mechanism and significance of increased glutathione level in human hepatocellular carcinoma and liver regeneration. *FASEB J.* 2000. Vol. 10. P. 1096.
21. Humphries K. M., Szweda P. A., Szweda L. I. Aging: a shift from redox regulation to oxidative damage. *Free Radic. Res.* 2006. Vol. 40. P. 1239–1243.
22. Hutter D. E., Till B. G., Greene J. J. Redox state changes in density-dependent regulation of proliferation. *Exp. Cell Res.* 1997. Vol. 232. P. 435–438.
23. Hwang C., Sinskey A. J., Lodish H. F. Oxidized redox state of glutathione in the endoplasmic reticulum. *Science.* 1992. Vol. 257. P. 1496–1502.
24. Jones D. P. Redox potential of GSH/GSSG couple: Assay and biological significance. *Methods Enzymol.* 2002. Vol. 348. P. 93–112.
25. Kanzok S. M., Fechner A., Bauer H., Ulschmid J. K., Muller H. M., Botella-Munoz J., Schneuwly S., Schirmer R., Becker K. Substitution of the thioredoxin system for glutathione reductase in *Drosophila melanogaster*. *Science.* 2001. Vol. 291. P. 643–646.
26. Liu H., Wang H., Shenvi S., Hagen T. M., Liu R. M. Glutathione metabolism during aging and in Alzheimer disease. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 2004. Vol. 1019. P. 346–349.
27. Lu S. C., Ge J. Loss of suppression of GSH synthesis under low cell density in primary cultures of rat hepatocytes. *Am. J. Physiol.* 1992. Vol. 263. P. 1181–1189.
28. Lu S. C. Regulation of hepatic glutathione synthesis: Current concept and controversies. *FASEB J.* 1999. Vol. 13. P. 1169–1183.

29. Meister A. Glutathione. In: Aria, IM.; Jakoby, WB.; Popper, H.; Schachter, D.; Shafritz, DA., editors. *The Liver: Biology and Pathobiology*. Raven Press; New York, 1988. Vol. 2. P. 401–417.
30. Meister A., Anderson M. E. Glutathione. *Ann. Rev. Biochem.* 1983. Vol. 52. P. 711–760.
31. Meister A., Anderson M. E., Hwang O. Intracellular cysteine and glutathione delivery systems. *J. AmColl. Nutr.* 1986. Vol. 5. P. 137–151.
32. Meister A., Tate S. S. Glutathione and related gammaglutamyl compounds: biosynthesis and utilization. *Annu Rev. Biochem.* 1976. Vol. 45. P. 559–604.
33. Newton G. L., Arnold K., Price M. S., Sherrill C., Delcardayre S. B., Aharonowitz Y., Cohen G., Davies J., Fahey R. C., Davis C. Distribution of thiols in microorganisms: mycothiol is a major thiol in most actinomycetes. *J. Bacteriol.* 1996. Vol. 178. P. 1990–1995.
34. Oja S. S., Janaky R., Varga V., Saranasaari P. Modulation of glutamate receptor functions by glutathione. *Neurochem. Int.* 2000. Vol. 37. P. 299–306.
35. Pompella A., Visvikis A., Paolicchi A., De Tata V., Casini A. F. The changing faces of glutathione, a cellular protagonist. *Biochem Pharmacol.* 2003. Vol. 66. P. 1499–1503.
36. Poot M., Teubert H., Rabinovitch P. S., Kavanagh T. J. De novo synthesis of glutathione is required for both entry into and progression through the cell cycle. *J. Cell Physiol.* 1995. Vol. 163. P. 555–560.
37. Schafer F. Q., Buettner G. R. Redox environment of the cell as viewed through the redox state of the glutathione disulfide/glutathione couple. *Free Radical Bio. Med.* 2001. Vol. 30. P. 1191–1212.
38. Townsend D. M., Tew K. D., Tapiero H. The importance of glutathione in human disease. *Biomed Pharmacotherap.* 2003. Vol. 57. P. 145–155.
39. Uchida K., Stadtman E. R. Quantization of 4-hydroxynonenal protein adducts. *Methods Mol. Biol.* 2000. Vol. 99. P. 25–34.
40. Wang H., Liu H., Liu R. M. Gender differences in glutathione metabolism during aging in mice. *Exp. Gerontology.* 2003. Vol. 38. P. 507–517.

Поступила в редакцию 09.01.2014

ЕКАТЕРИНА АЛЕКСАНДРОВНА ЕЛПАЕВА

младший научный сотрудник лаборатории молекулярной вирусологии и геномной инженерии, НИИ гриппа Минздрава России (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
elpaevak@gmail.com

МАРИЯ МИХАЙЛОВНА ПИСАРЕВА

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории молекулярной вирусологии и геномной инженерии, НИИ гриппа Минздрава России (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
pisareva@influenza.spb.ru

ОЛЕСЯ ЕВГЕНЬЕВНА НИКИТИНА

кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник отделения экспериментальных научных исследований, НИИ гриппа Минздрава России (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
nikitina@influenza.spb.ru

СВЕТЛАНА НИКОЛАЕВНА КИЖЛО

зав. отделением, Центр по профилактике и борьбе со СПИД и инфекционными заболеваниями (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
skizhlo@yandex.ru

МИХАИЛ ПАВЛОВИЧ ГРУДИНИН

кандидат биологических наук, зав. лабораторией молекулярной вирусологии и геномной инженерии, НИИ гриппа Минздрава России (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
grudinin@influenza.spb.ru

ОЛЬГА ПЕТРОВНА ДУДАНОВА

доктор медицинских наук, профессор, зав. кафедрой пропедевтики внутренних болезней медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
odudanova@gmail.com

РОЛЬ МУТАНТНЫХ ФОРМ ВИРУСА ГЕПАТИТА В В ПРОГРЕССИРУЮЩЕМ ТЕЧЕНИИ ХРОНИЧЕСКОГО ГЕПАТИТА В

Целью исследования явилось определение распространенности генотипов вируса гепатита В, циркулирующих в Северо-Западном регионе России (Санкт-Петербурге, Ленинградской области и Республике Карелия), выявление мутаций, ответственных за развитие устойчивости к аналогам нуклеозидов/нуклеотидов, а также preS/S-мутаций, влияющих на синтез HBsAg и течение хронического гепатита В. Обследовано 579 больных ХГВ на наличие ВГВ в крови и/или ткани печени, генотип определен у 226 больных, секвенирование фрагмента гена полимеразы выполнено у 49 пациентов, особенности клинического течения ХГВ изучены у 67 больных – у 26 с HBsAg и у 41 – с серологическими признаками preS/S-мутаций. Вирусная ДНК выявлена у 323 (55,8 %) больных ХГВ, генотип D обнаружен у 183 (81,0 %), генотип А – у 37 (16,4 %) и микст D+A – у 6 (2,7 %) пациентов. Среди 49 пациентов первичные, вторичные и паттерн-мутации устойчивости к аналогам нуклеозидов выявлены у 14 (28,6 %) пациентов, данные мутации вызывали рецидив HBV-инфекции. PreS/S-мутации, ответственные за исчезновение HBsAg, выявлены у 2 (4,1 %) пациентов. PreS/S-мутантная вирусная инфекция при длительном течении ХГВ (>20 лет) вызывала прогрессирование некротически-воспалительного и фибротического процессов в печени и трансформацию гепатита в цирроз печени. Оценка генетической структуры вируса гепатита В имеет важное значение для диагностики, противовирусного лечения и прогнозирования клинического течения хронического гепатита В.

Ключевые слова: вирус гепатита В, генотипы, мутации лекарственной резистентности, preS/S-мутации, хронический гепатит В, секвенирование

Хронический гепатит В является одной из глобальных проблем мирового здравоохранения. В мире вирусом гепатита В (ВГВ) инфицированы около 350 миллионов человек, и около миллиона носителей вируса ежегодно умирает от печеноч-

ной недостаточности, цирроза печени и гепатоцеллюлярной карциномы. Основные успехи в лечении хронического гепатита В (ХГВ) связаны с развитием знаний о молекулярно-биологических особенностях вируса [5], [8], [13]. Одним из на-

иболее важных факторов, влияющих на тяжесть течения болезни и эффективность противовирусного лечения, является генотип вируса и структура его генома, которая подвержена постоянным изменениям в результате мутаций [16].

В настоящее время выделяют десять генотипов ВГВ – А–J генотипы [6], [7], [12], [17]. Отмечается зависимость частоты носительства ВГВ, частоты хронизации гепатита, путей передачи вируса, клинического течения ХГВ и эффективности противовирусной терапии (ПВТ) от генотипов вируса [6]. Информации в литературе о распространенности различных генотипов ВГВ на территории Российской Федерации недостаточно, и данная проблема требует дальнейшего изучения [1], [2], [3], [4].

Генетическая гетерогенность вирусной популяции у пациента обусловлена двумя ключевыми факторами: противостоением вируса иммунной системе хозяина и воздействием ПВТ. Так, под воздействием иммунного прессинга формируются *preC/C* и *preS/S*-мутации, приводящие к снижению и/или прекращению синтеза вирусных антигенов (HBeAg, HBsAg), а под влиянием противовирусных препаратов – аналогов нуклеозидов/нуклеотидов (АН) – происходит возникновение мутаций в гене полимеразы и развивается лекарственная резистентность. В связи с этим чрезвычайную важность для верификации гепатита В, определения клинического течения заболевания и назначения своевременного лечения представляют данные о структуре генома ВГВ.

В последовательности полимеразы ВГВ содержится YMDD-мотив, замены в котором играют основную роль в формировании устойчивости вируса к АН – ламивудину (ЛАМ), адефовиру (АДФ), энтекавиру (ЭТВ), телбивудину (ТБВ). Устойчивость к ламивудину связана с мутациями, приводящими к заменам в полимеразном белке M204V, L180M и др., устойчивость к адефовиру – к заменам N236T, A181V, к энтекавиру – I169T, M250V, T184G, S202I, к телбивудину – M204I/V [14], [15]. Данные изменения генетической структуры вируса не только снижают эффективность лекарственного контроля репликации вируса, но могут усиливать резистентность и изменять клиническое течение ХГВ.

Поскольку геном ВГВ имеет перекрывающиеся рамки считывания, мутации в полимеразном гене могут изменять свойства поверхностных белков. *PreS/S*-мутации, возникающие самостоятельно или сочетающиеся с полимеразными мутациями, также способны влиять на серологические и клинические особенности ХГВ. Они приводят к изменению структуры HBsAg, снижению или прекращению его секреции из гепатоцита, что, с одной стороны, затрудняет этиологическую верификацию ХГВ, а с другой – способствует развитию окислительного стресса, воспалению, ядерному увеличению числа цирку-

лярно замкнутых вирусных ДНК, развитию мутаций и раковой трансформации гепатоцитов на поздних стадиях ХГВ [9], [10], [11]. Клиническое значение *preS/S*-мутаций ВГВ остается неясным, в связи с чем данная проблема требует всестороннего изучения.

Целью исследования явилось определение распространенности генотипов ВГВ, циркулирующих в России на территории Санкт-Петербурга (СПб), Ленинградской области (ЛО) и Республики Карелия (РК) в период 2008–2013 годов, выявление мутаций, ответственных за развитие устойчивости к АН, а также *preS/S*-мутаций, влияющих на синтез HBsAg и течение ХГВ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обследовано 579 больных ХГВ (512 – из СПб и ЛО, 67 – из РК) в период с 2008 по 2013 год. Вирусные антигены HBsAg и HBeAg и антитела к вирусу гепатита В – AbHBs, AbHBe, AbHBc-*IgM*, AbHBc-*IgG* – исследовались методом иммуноферментного анализа с помощью тест-систем производства ЗАО «Вектор-Бест». Выявление ДНК ВГВ и определение вирусной нагрузки из образцов плазмы крови и биоптатов печени проводились методом ПЦР с использованием наборов реагентов «АмплиПрайм РИБО-преп», «АмплиСенс HBV-Монитор-FRT» и «АмплиСенс HBV» (ФГУН ЦНИИЭ Роспотребнадзора, Россия).

Амплификацию фрагмента генома ВГВ для генотипирования проводили с помощью типоспецифичных праймеров методом, разработанным в НИИ гриппа [3]. Анализ и очистку продуктов ПЦР для секвенирования проводили электрофорезом в 2 %-ном агарозном геле с добавлением бромида этидия (ЦНИИ эпидемиологии, РФ). ДНК из агарозного геля выделяли коммерческим набором QiaQuick Gel Extraction Kit (Qiagen, Германия). Секвенирование для определения нуклеотидной последовательности фрагмента гена полимеразы проводили методом Сэнжера при помощи набора реагентов ABI prism® BigDye™ Terminator v3.1 Kit с использованием оригинальных праймеров на приборе ABI PRISM 3100 («Applied Biosystems», США) [4]. Анализ последовательностей и построение выравниваний проводили с помощью программы Vector NTI 10 Advance (Invitrogen, США).

Особенности клинического течения ХГВ изучены у 67 пациентов с ХГВ. Оценивались печеночные тесты: уровень аланинаминотрансферазы (АЛАТ), аспартатаминотрансферазы (АСАТ), альбумина, гамма-глобулинов, IgA, IgM, IgG, щелочной фосфатазы (ЩФ). Определялся индекс гистологической активности (ИГА) по Knodell с оценкой паренхиматозного повреждения (ПП) (1–4 балла), портального воспаления (ПВ) (1–4 балла), перипортальных некрозов (ПН) (1–10 баллов) и фиброз (Ф) по Metavir (0–4 балла).

Протокол исследования выполнялся согласно Хельсинкской декларации, от всех пациентов было получено информированное согласие на исследование. Оценивались t-критерий Стьюдента, тест Манна – Уитни, статистическая обработка данных выполнялась с помощью пакета Statistica 6.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Среди обследованных 579 пациентов хроническим гепатитом ВГВ был выявлен у 323 (55,8 %). У пациентов из СПб и ЛО ВГВ был определен у 256 (50 %) человек, кроме этого были выявлены случаи инфицирования несколькими гепатовирусами: у 21 (4 %) пациента – сочетанное инфицирование ВГВ и вирусом гепатита С, у 5 (1 %) – ВГВ и вирусом гепатита D. Уровень вирусной нагрузки у этих пациентов был преимущественно низкий: менее 10^4 копий/мл у 161 (62,9 %) больного, 10^4 – 10^6 – у 29 (11,3 %) и лишь у 40 (15,6 %) он составлял более 10^6 копий/мл. У пациентов из Карелии ВГВ был обнаружен у всех 67 (100 %) пациентов: у 26 – в сыворотке крови и ткани печени, вирусная нагрузка у них составила $2,9 \pm 0,8 \times 10^4$ копий/мл, у 41 пациента – только в ткани печени.

Генотип ВГВ был определен у 226 (70,0 %) пациентов: у 203 (79,3 %) из СПб и ЛО и у 23 (34,3 %) из РК (табл. 1). Наиболее распространенным в СПб и ЛО оказался ВГВ генотипа D (у 163 (80,2 %) больных), для которого характерна более низкая вирусная нагрузка. В Карелии также преобладал ВГВ генотипа D – у 20 (87,0 %) пациентов. В целом доля генотипа D в структуре больных ХГВ составила 81,0 %, доля генотипа А была существенно ниже – 16,4 %.

Таблица 1

Распределение генотипов вируса гепатита В среди больных ХГВ в Санкт-Петербурге, Ленинградской области и Республике Карелия

Генотип / Регион	D		A		A+D		ни А, ни D		Всего, чел.
	чел.	%	чел.	%	чел.	%	чел.	%	
Санкт-Петербург и Ленинградская область	163	80,2	35	17,2	5	2,5	0	0	203
Республика Карелия	20	87,0	2	8,7	1	4,3	0	0	23
Всего	183	81,0	37	16,4	6	2,7	0	0	226

Для определения мутаций устойчивости к АН методом секвенирования по Сенжеру у 49 человек (30 из СПб и ЛО, 19 – из РК) была определена нуклеотидная последовательность фрагмента гена полимеразы. Полученные последовательности гена и предсказанные последовательности полимеразного и поверхностных белков сравнены с референсными из международной базы данных GenBank.

Мутация устойчивости rtM204I/V (rt – reverse transcriptase) была обнаружена лишь у одного человека. Интересно отметить, что у этого пациента было зарегистрировано изменение аминокислотной последовательности под воздействием терапии ламивудином. В 2006 году ему была проведена трансплантация печени с неverifiedированным гепатитом, с 2007 года был выявлен HBsAg, в связи с чем он последовательно получал ламивудин и телбивудин. После приема в течение года ламивудина были выявлены замены rtM204I и rtN236K, еще через шесть месяцев лечения ламивудином были обнаружены замены rtM204V, rtL80I, rtL180M, rtA181V и rtN236K, после 14 месяцев лечения телбивудином были определены замены rtM204V, rtV173L, rtL180M, rtA181C. С 2012 года пациент получал 1 мг энтекавира, в результате чего выявлялась волнообразная вирусная нагрузка снизилась до уровня менее 300 копий/мл. У других 13 пациентов также были выявлены первичные (приводящие к развитию лекарственной устойчивости) и вторичные (компенсаторные) мутации устойчивости к АН и паттерн-мутации устойчивости к противовирусным препаратам (табл. 2). Всего различные мутации в гене полимеразы были выявлены у 14 (28,5 %) пациентов.

Таблица 2

Первичные и вторичные мутации гена полимеразы, потенциально ответственные за устойчивость к противовирусным препаратам

Аминокислотные замены	Санкт-Петербург	Республика Карелия	Устойчивость к АН	
Первичные мутации	L80I	1	ЛАМ	
	L80V	1		
	V173L	2		
	L180M	3	ЛАМ/ЭТВ	
	A181V	1	A181TVS ЛАМ/ТБВ	
	A181C	2		
	A181S			
M204I	1	1	ЛАМ	
M204V	3		ЛАМ/ТБВ/ ЭТВ	
N236K	6	3	N236T АДФ	
Вторичные мутации	V84G	1	2	АДФ
	R192H	1		ЛАМ
	Q215H	4	1	ЛАМ/ АДФ
	Q215S		1	
	Q215R	1		
	Q215P	1		
I233N	3		АДФ/ТБВ	
Паттерн-мутации	M204I+N236K	1		ЛАМ
	M204V+L80I+L180M+ +A181V+N236K	1		ЛАМ
	M204V+V173L+L180M+ +A181C	2		ЛАМ
	A181S+Q215H		1	ЛАМ
	L80V+N236K		1	ЛАМ/АДФ
Итого, n	35	11		

Проведенный анализ S-гена показал, что мутации в полимеразе влияют и на поверхностный белок (табл. 3). Так, обнаруженные замены в 173, 181 и 204 положениях обратной транскриптазы приводили к замене аминокислоты в 164, 172/173 и 195/196 положениях S-белка соответственно. Данные мутации были выявлены у 2 (4,1 %) пациентов, которые и определили у них снижение концентрации HBsAg до недектируемого уровня.

Таблица 3
Изменения в последовательности белка S под действием мутаций устойчивости

Полимераза (обратная транскриптаза)	Поверхностный белок (S)
rtM204I	sW196L
rtM204V	sW196L+sI195M
rtM204V	sI195M
rtV173L	sE164D
rtA181V	sL173F
rtA181S	sW172C
rtA181C	sL173V+sW172C

С целью определения роли preS/S-мутаций в развитии печеночно-клеточного воспаления и фиброза и влияния длительности такой инфекции на активность ХГВ были сформированы три группы больных. В I группу вошли пациенты с HBsAg-положительным ХГВ с вирусемией с уровнем вирусной нагрузки $2,9 \pm 0,8 \times 10^4$ копий/мл

($1,2-4,4 \times 10^4$ копий/мл), мужчин было 13 (50,0 %), женщин – 13 (50,0 %), возраст – $39,7 \pm 6,3$ года, срок заболевания – $12,9 \pm 5,5$ года (табл. 4). Во II группу вошли пациенты с признаками preS/S-мутантного ВГВ с HBsAg-негативным ХГВ, сопоставимые с больными I группы по половому составу (мужчин – 15 (53,6 %), женщин – 13 (46,4 %)), возрастному составу ($40,5 \pm 7,3$ года) и по срокам заболевания ($13,5 \pm 4,8$ года). В III группу вошли пациенты с HBsAg-негативным ХГВ, но более старшего возраста ($51,8 \pm 3,7$ года), с достоверно более давним заболеванием ($25,2 \pm 5,3$ года) и давно произошедшей сероконверсией по HBsAg, чтобы оценить влияние длительности существования preS/S-мутантного ВГВ на прогрессирование ХГВ.

У пациентов II группы с preS/S-мутантным ВГВ по сравнению с пациентами I группы несмотря на отсутствие вирусемии выявлялась тенденция к увеличению маркеров печеночно-клеточного повреждения и воспаления: увеличивались уровни АЛАТ, Ig A, M, G, возрастал ИГА и фиброз. По мере увеличения длительности ХГВ и возраста у пациентов III группы происходил достоверный рост активности АЛАТ, АСАТ, появлялись признаки внутрипеченочного холестаза – увеличивалась ЩФ, прогрессировала печеночно-клеточная недостаточность – уменьшался уровень альбумина, протромбина, увеличивались показатели мезенхимально-воспалительного

Таблица 4
Клинико-лабораторные, гистологические и вирусологические показатели у больных ХГВ с HBsAg-емией и с preS/S-мутантным ВГВ без HBsAg с разным возрастом и длительностью заболевания (M \pm m)

Показатели	I группа HBsAg(+), n=26	II группа HBsAg(-), n=28	III группа HBsAg(-), n=13
Мужчины, n (%)	13 (50,0 %)	15 (53,6 %)	6 (46,2 %)
Женщины, n (%)	13 (50,0 %)	13 (46,4 %)	7 (53,8 %)
Возраст, годы	$39,7 \pm 6,3$	$40,5 \pm 7,3$	$51,8 \pm 3,7^*, **$
Длительность HBV-инфекции, годы	$12,9 \pm 5,5$	$13,5 \pm 4,8$	$25,2 \pm 5,3^*, **$
Вирусная нагрузка, $n \times 10^4$ копий/мл	$2,9 \pm 0,8$	0	0
АЛАТ, МЕ/л	$53,1 \pm 24,9$	$82,6 \pm 50,8$	$118,0 \pm 40,2^*$
АСАТ, МЕ/л	$40,0 \pm 16,7$	$66,7 \pm 25,3$	$86,5 \pm 26,2^*$
Билирубин, мкмоль/л	$35,4 \pm 15,1$	$21,1 \pm 18,0$	$43,3 \pm 35,0$
Альбумин, г/л	$43,5 \pm 2,1$	$41,1 \pm 2,2$	$36,4 \pm 3,2^*, **$
Гамма-глобулины, г/л	$13,3 \pm 1,8$	$13,0 \pm 2,1$	$17,6 \pm 3,0^*, **$
ЩФ, Ед/л	$124,1 \pm 37,9$	$151,7 \pm 66,1$	$195,9 \pm 49,6^*$
Протромбин, %	$84,7 \pm 2,5$	$82,1 \pm 2,8$	$78,2 \pm 2,9^*$
IgA, г/л	$2,3 \pm 0,7$	$2,6 \pm 1,3$	$3,3 \pm 2,3$
IgM, г/л	$2,2 \pm 0,4$	$2,4 \pm 2,0$	$3,9 \pm 2,7$
IgG, г/л	$15,8 \pm 1,8$	$14,1 \pm 2,1$	$19,7 \pm 2,4^*, **$
ИГА, баллы	$6,1 \pm 1,6$	$6,8 \pm 1,5$	$10,2 \pm 2,3^*$
ПП, баллы	$2,5 \pm 1,3$	$2,7 \pm 1,1$	$3,0 \pm 0,6^*$
ПВ, баллы	$2,2 \pm 1,1$	$2,3 \pm 0,9$	$3,0 \pm 1,3$
ПН, баллы	$1,5 \pm 1,0$	$2,0 \pm 1,2$	$3,8 \pm 1,2^*, **$
Фиброз, баллы	$1,1 \pm 0,6$	$1,6 \pm 1,1$	$2,9 \pm 1,2^*, **$

Примечание. * – разница достоверна с I группой, ** – разница достоверна со II группой.

процесса – уровень гамма-глобулинов, Ig, воспалительная инфильтрация портальных трактов и перипортальные некрозы. Такая отрицательная динамика печеночных тестов и гистологической картины заболевания свидетельствовала о формировании на фоне хронического гепатита цирроза печени.

ВЫВОДЫ

1. Среди больных хроническим гепатитом В в Санкт-Петербурге, Ленинградской области и Республике Карелия преобладает инфицированность вирусом гепатита В генотипа D (81,0 %), который склонен к развитию мутаций в различных участках генома под действием аналогов нуклеозидов и иммунного прессинга. Генотип А встречается реже: в Санкт-Петербурге и Ленинградской области – у 17,2 % пациентов, в Карелии – у 8,7 %.

2. Первичные, вторичные и паттерн-мутации устойчивости к аналогам нуклеозидов выявлены при секвенировании гена полимеразы у 14

(28,6 %) из 49 обследованных пациентов. Данные мутации снижают эффективность противовирусной терапии и способствуют прогрессированию хронического гепатита.

3. PreS/S-мутации обнаружены у 2 (4,1 %) из 49 больных, данные мутации снижают синтез HBsAg, репликативную активность вируса, затрудняя верификацию вирусного гепатита В и способствуя развитию вакцинускользающих штаммов вируса.

4. PreS/S-мутантные варианты вируса гепатита В вызывают умеренно выраженное, но неуклонно прогрессирующее течение некротически-воспалительного и фибротического процессов в печени, приводя через 20–30 лет к трансформации хронического гепатита в цирроз печени.

5. Оценка генетической структуры вируса гепатита В имеет важное значение для диагностики, определения схем противовирусного лечения и прогнозирования клинического течения хронического гепатита В.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Генотипическая характеристика вируса гепатита В у хронически инфицированных больных / Е. А. Елпаева, Е. А. Порещкова, М. М. Писарева и др. // Дальневосточный журнал инфекционной патологии. 2009. № 15. С. 56–59.
2. Дуданова О. П., Киселев О. И. Хронический гепатит В: диагностика и особенности клинического течения: Монография. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2013. 112 с.
3. Морозов В. М. Молекулярно-генетическая характеристика вариантов вируса гепатита В, циркулирующих в Санкт-Петербурге и Якутии: Дисс. ... канд. биол. наук. СПб., 2003. 127 с.
4. Писарева М. М. Молекулярно-биологические особенности вируса гепатита В дикой и мутантной форм в трех регионах Российской Федерации: Дисс. ... канд. биол. наук. СПб., 2007. 110 с.
5. Dan dri M., L o s a r n i n i S. New insight in the pathobiology of hepatitis B virus infection // Gut. 2012. Vol. 1. P. 6–17.
6. Genetic diversity of hepatitis B virus strains derived worldwide: genotypes, subgenotypes, and HBsAg subtypes / H. Norder, A. M. Courouche, P. Coursahet et al. // Intervirology. 2004. Vol. 47 (6). P. 289–309.
7. Genotype H: a new Amerindian genotype of hepatitis B virus revealed in Central America / P. Arauz-Ruiz, H. Norder, B. H. Robertson, L. O. Magnus // J. Gen. Virol. 2002. Vol. 83 (8). P. 2059–2073.
8. Gerlich W. H. Medical virology of hepatitis B: how it began and where we are now // Virol. J. 2013. Vol. 10. P. 239.
9. Hepatitis B virus pre-S deletion mutations are a risk factor for hepatocellular carcinoma: a matched nested case-control study / Z. L. Fang, C. A. Sabin, B. Q. Dong et al. // J. Gen. Virol. 2008. Vol. 89. P. 2882–2890.
10. High prevalence and mapping of pre-S deletion in hepatitis B virus carriers with progressive liver diseases / B. F. Chen, C. J. Liu, G. M. Jow et al. // Gastroenterology. 2006. Vol. 130. P. 1153–1168.
11. Impact of Hepatitis B Virus (HBV) PreS/S Genomic Variability on HBV Surface Antigen and HBV DNA Serum Levels / T. Pollicino, G. Amadeo, A. Restuccia et al. // Hepatology. 2012. Vol. 56. P. 434–443.
12. Као J. H. Molecular epidemiology of hepatitis B virus // Korean J. Intern. Med. 2011. Vol. 26 (3). P. 255–261.
13. Куо А., Гиш Р. Chronic hepatitis B infection // Clin. Liver Dis. 2012. Vol. 16 (2). P. 347–369.
14. Locarnini S., Mason W. S. Cellular and virological mechanisms of HBV drug resistance // J. Hepatol. 2006. Vol. 44 (2). P. 422–431.
15. Nomenclature for antiviral-resistant human hepatitis B virus mutations in the polymerase region / L. J. Stuyver, S. A. Locarnini, A. Lok et al. // Hepatology. 2001. Vol. 33 (3). P. 751–757.
16. Shi Y. H. Correlation between hepatitis B virus genotypes and clinical outcomes // Jpn. J. Infect. Dis. 2012. Vol. 65 (6). P. 476–482.
17. Typing hepatitis B virus by homology in nucleotide sequence: comparison of surface antigen subtypes / H. Okamoto, F. Tsuda, H. Sakugawa et al. // J. Gen. Virol. 1988. Vol. 69 (10). P. 2575–2583.

Elpaeva E. A., Influenza Research Institute (St. Petersburg, Russian Federation)
Pisareva M. M., Influenza Research Institute (St. Petersburg, Russian Federation)
Nikitina O. E., Influenza Research Institute (St. Petersburg, Russian Federation)
Kizhlo S. N., SPID and Infection Disease Centre (St. Petersburg, Russian Federation)
Grudin M. P., Influenza Research Institute (St. Petersburg, Russian Federation)
Dudanova O. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

ROLE OF HEPATITIS B VIRUS MUTANT FORMS IN PROGRESSIVE COURSE OF CHRONIC HEPATITIS B

The aim of the study was to determine the prevalence of HBV genotypes in the North-West of Russia (St. Petersburg, Leningrad region, and Republic of Karelia), to identify mutations responsible for resistance to nucleotide/nucleoside analogs (AN), preS/S-

mutations, canceling the HBsAg synthesis, and to detect the preS/S-mutations influence on the CHB course. HBV was analysed in plasma and/or in the liver biopsy materials of 579 patients with CHB; the genetic type was revealed in 226 patients; sequence analysis of polymerase gen was performed in 49 patients; peculiarities of CHB clinical course were studied in 67 patients: in 26 with HBsAg and in 41 patients with serological marker of preS/S-mutations. Viral DNA was detected in 323 (55,8 %) CHB patients, D genotype was revealed in 183 (81,0 %), A genotype – in 37 (16,4 %) and mixed D+A – in 6 (2,7 %) patients. Primary, secondary and pattern-mutations of resistance to drugs (nucleotide/nucleoside analogs) were detected in 14 (28,6 %) from 49 patients. These mutations caused the HBV-infection relapse. PreS/S-mutations, responsible for the HBsAg disappearance, were revealed in 2 (4,1 %) patients. PreS/S-mutation viral infection caused progressive liver necroinflammation, fibrosis, and transformation of CHB in liver cirrhosis after more than 20 years of clinical course. The estimation of the viral genetic structure has special significance for diagnosis, antiviral treatment, and prognosis of chronic hepatitis B clinical course.

Key words: hepatitis B virus, genotypes, drug resistance mutations, preS/S-mutations, chronic hepatitis B, sequencing

REFERENCES

1. Genotypic characteristics of hepatitis B virus in chronically infected patients [Genotipicheskaya kharakteristika virusa gepatita B u khronicheskii infitsirovannykh bol'nykh] / E. A. Elpaeva, E. A. Poretskova, M. M. Pisareva i dr. *Dal'nevostochnyy zhurnal infektsionnoy patologii* [Far Eastern Journal of Infectious Pathology]. 2009. № 15. P. 56–59.
2. D u d a n o v a O. P., K i s e l e v O. I. *Khronicheskiy gepatit B: diagnostika i osobennosti klinicheskogo techeniya: Monografiya* [Chronic hepatitis B: diagnosis and peculiarities of clinical course: monography]. Petrosavodsk, PetrSU Publ., 2013. 112 p.
3. M o r o z o v V. M. *Molekulyarno-geneticheskaya kharakteristika variantov virusa gepatita B, tsirkuliruyushchikh v Sankt-Peterburge i Yakutii: Diss. ... kand. boil. nauk* [Molecular and genetic characteristic of hepatitis B virus variants circulating in St. Petersburg and Yakutia: PhD biol. sci. diss.]. St. Petersburg, 2003. 127 p.
4. P i s a r e v a M. M. *Molekulyarno-biologicheskie osobennosti virusa gepatita B dikoy i mutantnoy form v trekh regionakh Rossiyskoy Federatsii: Diss. ... kand. boil. nauk* [Molecular and biological peculiarities of wild and mutant hepatitis B virus in three Russian Federation regions: PhD. biol. sci. diss.]. St. Petersburg, 2007. 110 p.
5. D a n d r i M., L o c a r n i n i S. New insight in the pathobiology of hepatitis B virus infection // *Gut*. 2012. Vol. 1. P. 6–17.
6. Genetic diversity of hepatitis B virus strains derived worldwide: genotypes, subgenotypes, and HBsAg subtypes / H. Norder, A. M. Courouce, P. Coursahet et al. // *Intervirology*. 2004. Vol. 47 (6). P. 289–309.
7. Genotype H: a new Amerindian genotype of hepatitis B virus revealed in Central America / P. Arauz-Ruiz, H. Norder, B. H. Robertson, L. O. Magnus // *J. Gen. Virol.* 2002. Vol. 83 (8). P. 2059–2073.
8. G e r l i c h W. H. Medical virology of hepatitis B: how it began and where we are now // *Virol. J.* 2013. Vol. 10. P. 239.
9. Hepatitis B virus pre-S deletion mutations are a risk factor for hepatocellular carcinoma: a matched nested case-control study / Z. L. Fang, C. A. Sabin, B. Q. Dong et al. // *J. Gen. Virol.* 2008. Vol. 89. P. 2882–2890.
10. High prevalence and mapping of pre-S deletion in hepatitis B virus carriers with progressive liver diseases / B. F. Chen, C. J. Liu, G. M. Jow et al. // *Gastroenterology*. 2006. Vol. 130. P. 1153–1168.
11. Impact of Hepatitis B Virus (HBV) PreS/S Genomic Variability on HBV Surface Antigen and HBV DNA Serum Levels / T. Pollicino, G. Amaddeo, A. Restuccia et al. // *Hepatology*. 2012. Vol. 56. P. 434–443.
12. K a o J. H. Molecular epidemiology of hepatitis B virus // *Korean J. Intern. Med.* 2011. Vol. 26 (3). P. 255–261.
13. K u o A., G i s h R. Chronic hepatitis B infection // *Clin. Liver Dis.* 2012. Vol. 16 (2). P. 347–369.
14. Locarnini S., Mason W. S. Cellular and virological mechanisms of HBV drug resistance // *J. Hepatol.* 2006. Vol. 44 (2). P. 422–431.
15. Nomenclature for antiviral-resistant human hepatitis B virus mutations in the polymerase region / L. J. Stuyver, S. A. Locarnini, A. Lok et al. // *Hepatology*. 2001. Vol. 33 (3). P. 751–7.
16. S h i Y. H. Correlation between hepatitis B virus genotypes and clinical outcomes // *Jpn. J. Infect. Dis.* 2012. Vol. 65 (6). P. 476–482.
17. Typing hepatitis B virus by homology in nucleotide sequence: comparison of surface antigen subtypes / H. Okamoto, F. Tsuda, H. Sakugawa et al. // *J. Gen. Virol.* 1988. Vol. 69 (10). P. 2575–2583.

Поступила в редакцию 19.05.2014

ВИКТОРИЯ АЛЕКСЕЕВНА КОРНЕВА

кандидат медицинских наук, доцент кафедры факультетской терапии, фтизиатрии, инфекционных болезней и эпидемиологии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

vikkorneva@mail.ru

ТАТЬЯНА ЮРЬЕВНА КУЗНЕЦОВА

доктор медицинских наук, доцент, зав. кафедрой факультетской терапии, фтизиатрии, инфекционных болезней и эпидемиологии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

eme@karelia.ru

ТАТЬЯНА ЮРЬЕВНА БОГОСЛОВСКАЯ

кандидат биологических наук, научный сотрудник Отдела молекулярной генетики, НИИЭМ СЗО РАМН (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

ktul7@yandex.ru

МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ МАНДЕЛЬШТАМ

доктор биологических наук, руководитель Лаборатории биохимической генетики Отдела молекулярной генетики, НИИЭМ СЗО РАМН, доцент, профессор кафедры биохимии биолого-почвенного факультета, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

michail@MM13666.spb.edu,

ВАДИМ БОРИСОВИЧ ВАСИЛЬЕВ

доктор медицинских наук, руководитель Отдела молекулярной генетики, НИИЭМ СЗО РАМН, профессор кафедры фундаментальной медицины и медицинских технологий стоматологического факультета, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

vadim@biokemis.ru

СЕМЕЙНАЯ ГИПЕРХОЛЕСТЕРИНЕМИЯ В КАРЕЛИИ: РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ, КЛИНИЧЕСКИЕ И ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ, ЛЕЧЕНИЕ (ОПЫТ 10-ЛЕТНЕГО НАБЛЮДЕНИЯ)*

Цель работы – изучить генетические и клинические особенности семейной гиперхолестеринемии (СГХС) в Карелии. Обследовано 196 пациентов с СГХС из 124 семей, жители Карелии, средний возраст $48 \pm 2,3$ года, женщин – 135 (69%). Генетическое обследование проведено у 109 пациентов (55,6%). Оценивались показатели липидного спектра, содержание глюкозы, уровень гормонов щитовидной железы; выполнялись электрокардиограмма, холтеровское мониторирование ЭКГ, эхокардиоскопия, триплексное сканирование брахиоцефальных артерий и артерий нижних конечностей, стресс-тест. Для постановки клинического диагноза СГХС использовались критерии Simon Broom. Основные клинические характеристики СГХС в Карелии: высокая частота встречаемости нелипидных факторов риска (артериальная гипертензия – в 64,5%, курение – в 34%, ожирение – в 48%). Встречаемость «стигм» СГХС невысока: липоидная дуга роговицы – 26%, сухожильные ксантомы – 17,3%, ксантелазмы век – 34%. Общее количество пациентов с проявлениями атеросклероза различной локализации составило 117 человек (59,7%), из них: ИБС в 27,5%, более половины в виде острого инфаркта миокарда, проявления церебрального атеросклероза в 26,5%, преимущественно в виде стеноза каротидных артерий, инсульт в анамнезе в 6%, облитерирующий атеросклероз нижних конечностей в 4,6%, многососудистое поражение в 21%. Средний возраст развития ИБС при СГХС – 44,6 года, ОИМ – 45,4 года, церебрального атеросклероза – 56 лет. Пациенты с СГХС, получавшие статины, достигали целевых уровней липидного профиля в 27% случаев. Характерные генетические черты СГХС в Карелии: отсутствие явного эффекта «основателя», обнаружены новые мутации рецептора ЛПНП: с.192del110/ins8, с.195_196insT, с.2191delG, S206R. Мутации R3500Q гена *APOB* не выявлены. Низкая частота встречаемости «финских» мутаций. У пациентов с СГХС в Карелии обнаружены характерные клинические и генетические черты.

Ключевые слова: семейная гиперхолестеринемия, мутация, рецептор липопротеидов низкой плотности

СГХС вызвана снижением скорости удаления липопротеидов низкой плотности (ЛПНП) из кровотока в результате мутаций в гене специфического рецептора ЛПНП, в результате чего наблюдаются выраженная гиперхолестеринемия и значительное повышение уровня ЛПНП в плазме, что обуславливает высокий риск развития сердечно-сосудистых заболеваний при СГХС [8], [10], [11]. Несмотря на общность этиопатогенетических черт данного заболевания, отмечено, что имеются этнические особенности (как клинические, так и генетические) в различных популяциях, которые на сегодняшний день мало изучены.

Цель – изучить клинические и генетические особенности СГХС в Карелии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Нами обследовано 196 пациентов с СГХС (124 семьи), наблюдавшихся на базе кафедры факультетской терапии медицинского факультета ПетрГУ. Клиническое обследование включало: оценку показателей липидного спектра, глюкозы, гормонов щитовидной железы, ЭКГ, холтеровское мониторирование ЭКГ, эхокардиографию, триплексное сканирование брахиоцефальных артерий и сосудов нижних конечностей, нагрузочные тесты, по показаниям – коронарографию. Большинство обследованных были русской национальности, проживали в Петрозаводске и Республике Карелия. Диагноз СГХС устанавливали по критериям британского руководства Simon Broome [39]. Средний возраст обследованных $48,7 \pm 2,3$ года, 37% пациентов были моложе 40 лет. В группе 61 мужчина (31,3%). Средний возраст мужчин – $52,7 \pm 2,8$ года, женщин – $43,1 \pm 1,7$ года.

Анализ липидов крови проводили на анализаторе «Cobas Integra 400+». Общий холестерин (ОХС), холестерин ЛПНП, триглицериды (ТГ) определялись энзиматическим колориметрическим методом. Липопротеиды высокой плотности (ЛПВП) определялись энзиматическим колориметрическим методом без предварительной преципитации (прямым методом).

Генетическое обследование выполнено у 109 чел. (55,6%) в ФГБУ «НИИЭМ» СЗО РАМН, Санкт-Петербург. Проведен автоматизированный флуоресцентный SSCP-анализ, ПДРФ-анализ и прямое секвенирование ДНК на гелевом секвенаторе «ALFExpress-2» («Amersham Biosciences») с применением программы «ALFWIN Sequence Analyzer». В качестве материала для анализа использовалась периферическая (венозная) кровь больных, которая затем на льду была перевезена в Санкт-Петербург. Для выделения ДНК из лейкоцитов периферической крови применяли метод Кюнцеля и соавторов [31] в модификации Белла [21] для небольших количеств крови. Для получения ДНК использовали замороженную кровь. Эта методика позволяет выделять ДНК размером до

50 т. п. н. ДНК выделяли из небольших количеств крови (700–1000 мкл).

Была оценена частота встречаемости вариантов полиморфных маркеров для жителей Петрозаводска и проведено сравнение полученных данных с имеющимися данными по пациентам с СГХС из Санкт-Петербурга и Финляндии.

Статистическая обработка результатов проводилась с помощью таблиц сопряжения (критерий «хи-квадрат») и программы «Биостат» (различия считались достоверными при $p < 0,05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Определенная СГХС диагностирована у 33 пациентов (17,8%), возможная – у 163 (83,2%). Определенную СГХС диагностировали согласно критериям Simon Broome [39] при наличии у взрослого ОХС более 7,5 ммоль/л (у ребенка до 16 лет более 6,7 ммоль/л), или уровне ХС ЛПНП более 4,9 ммоль/л (у ребенка до 16 лет более 4 ммоль/л) в сочетании с наличием сухожильного ксантоматоза у родственников 1-й или 2-й линии родства (11 пациентов (6,5%)), или при наличии позитивного теста ДНК-диагностики, подтверждающего мутацию гена ЛПНП-рецептора (22 чел. (11,3%)).

Диагноз «возможная СГХС» устанавливали, если ОХС был более 7,5 ммоль/л у взрослого (или более 6,7 ммоль/л у ребенка младше 16 лет), или уровень ХС ЛПНП более 4,9 ммоль/л у взрослого (или более 4 ммоль/л у ребенка младше 16 лет) в сочетании с отягощенным семейным анамнезом (102 пациента (52%)), или при наличии повышения ОХС более 7,5 ммоль/л у взрослого 1-й или 2-й степени родства (61 пациент (31%)). Кроме того, у некоторых пациентов присутствовали дополнительные диагностические критерии СГХС (39 пациентов, или 19,9%).

Колебания показателей липидного спектра составили: ОХС от 8,5 до 16 ммоль/л, ХС ЛПНП от 4,9 до 11 ммоль/л, ТГ от 1,7 до 3,8 ммоль/л, ХС ЛПВП от 0,9 до 2 ммоль/л.

Характерными «стигмами» СГХС являются липоидная дуга роговицы, ксантелазмы век и сухожильные ксантомы, однако их удается выявить далеко не у всех пациентов с СГХС и их отсутствие не исключает наличия заболевания. Нами липоидная дуга роговицы была выявлена в 26% случаев, сухожильные ксантомы – в 17,3%, ксантелазмы век – в 34,9%. Таким образом, основным диагностическим «ориентиром» СГХС преимущественно должна являться выраженная дислипидемия.

С целью анализа частоты встречаемости выраженных дислипидемий в Петрозаводске было проанализировано 28 225 историй болезни пациентов, находившихся на лечении в терапевтических отделениях ГБУЗ Республики Карелия «Больница скорой медицинской помощи» в г. Петрозаводске за период с 2002 по 2013 год. В исследова-

ние включали пациентов с ОХС более 9 ммоль/л (за счет ЛПНП). Выявлено 430 пациентов с выявленной гиперхолестеринемией. После исключения вторичных дислипидемий, СГХС согласно критериям диагностики была выявлена у 87 чел. Данный анализ позволил сделать заключение о том, что распространенность СГХС в Карелии составляет 1:300.

Клинические проявления атеросклероза у больных с СГХС в Карелии

Больные с СГХС относятся к категории высокого риска развития сердечно-сосудистых заболеваний и смертельного исхода от них [6].

Проанализирована частота встречаемости нелипидных факторов риска в целом по группе: курили 39 человек (19,9%), ожирение было выявлено у 69 человек (35,2%). Наиболее часто встречающимся фактором риска сердечно-сосудистых заболеваний была артериальная гипертензия – 65,8%.

Общее количество пациентов с проявлениями атеросклероза различной локализации составило 117 чел. (59,7%). ИБС была диагностирована у 54 пациентов (27,5%), проявления церебрального атеросклероза – у 52 (26,5%), у 9 (4,6%) выявлен облитерирующий атеросклероз нижних конечностей. У 36 человек (18,4%) наблюдалось сочетанное поражение коронарного и церебрального бассейнов, у 7 (3,6%) – поражение 3 сосудистых бассейнов, у 2 (1,1%) – сочетанное поражение коронарного бассейна и артерий нижних конечностей. Таким образом, многососудистое поражение (вовлечение 2 и более сосудистых бассейнов) было выявлено у 21% пациентов.

Клинические формы ИБС следующие: стенокардия напряжения у 20 пациентов (37% из всех форм ИБС), острый инфаркт миокарда (ОИМ) перенесли 29 человек (53,7% среди форм ИБС). У 11 пациентов (20,4%) выявлена аритмическая форма ИБС (фибрилляция и трепетание предсердий, желудочковая экстрасистолия).

Средний возраст дебюта ИБС составил 44,6 года, у мужчин – 42,5, у женщин – 51,7 года. Средний возраст развития ОИМ – 45,4 года, у женщин – 46,7, у мужчин – 43,8 года. ОИМ в возрасте до 40 лет развился у 27,5% пациентов (8 человек, 6 мужчин), в возрасте 40–55 лет – 41,3% (12 человек, 6 мужчин), у остальных – в возрасте более 55 лет (31,2% пациентов, 9 человек, 3 мужчин). Таким образом, у 68,8% пациентов первый ОИМ развился в возрасте до 55 лет. Если в возрасте до 40 лет ОИМ чаще встречается у мужчин (практически в 3 раза), то в среднем возрасте его частота среди лиц разного пола уравнивается, а в возрасте старше 55 лет ОИМ чаще дебютирует у женщин.

Стенокардия напряжения в возрасте до 40 лет не наблюдалась, в возрасте 40–55 лет диагностирована у 50% (10 пациентов, 7 женщин), у остальных

ных – старше 55 лет (10 пациентов, 6 женщин). Таким образом, стенокардия напряжения диагностировалась у пациентов с СГХС в средней и старшей возрастных группах, преимущественно у женщин, возможно, это связано с тем, что женщин среди наших пациентов было больше.

У 11 пациентов (5,6%) выявлена аритмическая форма ИБС (фибрилляция и трепетание предсердий, желудочковая экстрасистолия). Нарушения ритма также были диагностированы у лиц средней и старшей возрастных групп, у 2 пациентов нарушения ритма развились на фоне стенокардии напряжения, у 3 пациентов в анамнезе был перенесенный ОИМ. В 8 случаях (72,7%, 5 женщин и 3 мужчин) нарушения были выявлены у лиц старше 55 лет. Среди лиц с нарушениями ритма во всех возрастных группах преобладали женщины.

Нами у 52 пациентов (26,3%) были выявлены признаки стенозирующего поражения брахиоцефальных артерий по данным ультразвукового исследования. Из них у 41 пациента (79%) – двустороннее стенозирующее поражение сонных артерий, у 18 (9,1%) – стенозирующее поражение сонных артерий выраженной степени, достоверного различия частоты встречаемости стенозирующего процесса церебральных артерий у лиц разного пола не выявлено. Острое нарушение мозгового кровообращения (ОНМК) перенесли 12 пациентов (6,1%). Каротидная эндартерэктомия была выполнена 3 пациентам.

Особенности показателей липидного спектра в зависимости от наличия церебрального атеросклероза представлены в табл. 1. Показатели ОХС, ЛПНП достоверно не отличались в подгруппах пациентов с СГХС в зависимости от наличия церебрального атеросклероза. Колебания ОХС от 9,3 до 10,2 ммоль/л, колебания ХС ЛПНП от 6,6 до 6,97 ммоль/л. В 8,8% случаев у лиц с СГХС, имеющих церебральный атеросклероз, было отмечено снижение ЛПВП ниже нормы. Оказалось, что это снижение выявлялось в 2 раза чаще, чем в группе пациентов с СГХС в целом. У пациентов без церебрального ате-

Таблица 1
Показатели липидного спектра у пациентов с СГХС в зависимости от наличия церебрального атеросклероза

	Церебральный атеросклероз (52 чел.)	Без церебрального атеросклероза (144 чел.)	Группа в целом (196 чел.)
ОХС, ммоль/л	10,2 ± 0,8	9,3 ± 0,2	9,9 ± 0,3
ХС ЛПНП, ммоль/л	6,97 ± 0,5	6,6 ± 0,4	6,8 ± 0,5
ТГ, мг/дл	2,1 ± 0,1*	1,7 ± 0,1*	1,9 ± 0,2*
ЛПВП (% снижения ниже нормы)	8,8%	Показатель в пределах нормы	4,9%

Примечание. * p < 0,05.

росклероза снижения ЛПВП не было. Выявлено достоверное увеличение среднего уровня ТГ у пациентов с церебральным атеросклерозом: $2,1 \pm 0,1$ ммоль/л по сравнению с $1,7 \pm 0,1$ ммоль/л у пациентов с СГХС без церебрального атеросклероза ($p < 0,05$), остальные показатели липидного спектра в подгруппах достоверно не различались.

Нами были оценены факторы риска у пациентов с СГХС в зависимости от наличия церебрального атеросклероза (табл. 2). Пациенты с церебральным атеросклерозом были старше по сравнению с лицами с СГХС без признаков стенозирующего церебрального атеросклероза (средний возраст $56 \pm 5,8$ года по сравнению с $41,5 \pm 8,7$, $p < 0,05$). В 2,5 раза чаще среди пациентов с СГХС и проявлениями церебрального атеросклероза встречались курильщики. Имелась тенденция к увеличению числа пациентов с ожирением среди лиц с церебральным атеросклерозом (40%) по сравнению с группой без церебрального атеросклероза, однако различия не достоверны. Артериальная гипертензия в 3,3 раза чаще встречалась у пациентов с СГХС с церебральным атеросклерозом (частота ее встречаемости составила 88,5% по сравнению с 26,7% у лиц без церебрального атеросклероза, $p < 0,05$). У пациентов с СГХС, имеющих церебральный атеросклероз, в 4 раза чаще встречалась ИБС (выявлена у 69,2% пациентов по сравнению с 16,7% у лиц без церебрального атеросклероза, $p < 0,05$). В 5 раз чаще диагностировался ОИМ (у 34,6% среди лиц с церебральным атеросклерозом по сравнению с 6,9% среди лиц без него). В данной подгруппе пациентов с установленным церебральным атеросклерозом с учетом выполненного УЗИ сосудов частота сочетанного поражения коронарного и церебрального бассейнов (69,2%) подчеркивает склонность

Таблица 2
Факторы риска и частота ИБС у пациентов с СГХС в зависимости от наличия церебрального атеросклероза

	Церебральный атеросклероз (52 чел.)	Без церебрального атеросклероза (144 чел.)	Группа в целом (196 чел.)
Возраст (лет)	$56 \pm 5,8^*$	$41,5 \pm 8,7^*$	$48,7 \pm 2,3$
Курение (%)	25%* (13 чел.)	10,4%* (15 чел.)	19,9% (39 чел.)
Ожирение (%)	40% (21 чел.)	26,7% (38 чел.)	35,2% (69 чел.)
АГ (%)	88,5%* (46 чел.)	26,7%* (38 чел.)	65,8% (129 чел.)
ИБС (%)	69,2%* (36 чел.)	16,7%* (24 чел.)	51,5% (101 чел.)
ОИМ (%)	34,6%* (18 чел.)	6,9%* (10 чел.)	24,5% (48 чел.)

Примечание. * $p < 0,05$.

к мультифокальному течению атеросклероза у пациентов с СГХС.

Генетические особенности СГХС в Карелии

В результате проведенного исследования у пациентов с СГХС было обнаружено 13 мутаций и 6 полиморфизмов в гене рецептора ЛПНП. Из числа этих мутаций семь (с.195–196insT, с.192del10/ins8, с.618 T>G, с.1340 C>G, с.1686del8/insT, с.1936 C>A, с.2191delG) были охарактеризованы впервые в мире, а другие (с.58 G>A, с.925–931del7, с.1194 C>T, с.1532 T>C, с.1920 C>T) описаны ранее в других странах (табл. 3).

Таблица 3
Мутации в гене рецептора липопротеидов низкой плотности у пациентов с семейной гиперхолестеринемией, проживающих в Республике Карелия

Экзон гена	Название мутации по кДНК	Название мутации по белку по старой номенклатуре	Название мутации по белку по новой номенклатуре	Число семей (число пациентов)
Экзон 1	с.58 G>A	G (-2) R	G20R	1 (1)
Экзон 3	с.195–196 insT	FsV45: D108X	FsV66: D129X	1 (1)
	с.192 del10/ins8	Fs S44: D108X	Fs S65: D129X	1 (2)
Экзон 4	с.618T>G	S185R	S206R	1 (1)
Экзон 6	с.925–931del7	FsE287: V348X	FsE308: V369X	1 (2)
Экзон 9	с.1340 C>G	S426C	S447C	1 (2)
	с.1194 C>T	I377I	I398I	4 (4)
Экзон 10	с.1532 T>C	L490S	L511S	1 (1)
Экзон 11	с.1686del8/insT	FsW541: L547X	FsW562: L568X	1 (2)
Экзон 13	с.1936 C>A	L625I	L646I	2 (2)
	с.1920 C>T	N619N	N640N	1 (2)
Экзон 15	с.2191delG	FsV710: V715X	FsV731: V736X	1 (2)

Изначально предполагалось, что у жителей Петрозаводска и Республики Карелия будет выявлено большое количество мутаций, описанных ранее в Санкт-Петербурге, а также ожидалось обнаружить мутации FH-Helsinki и FH-North Karelia, специфичные для населения восточной Финляндии. Однако единственной общей мутацией, как с Санкт-Петербургом [45], так и с Финляндией [28], оказалась мутация FH-North Karelia, выявленная лишь в одной семье (у двух человек) из Петрозаводска. Делеция FH-North Karelia (с.925–931del7, Fs E308: V369X [Fs E287: V348X]) нарушает рамку считывания при трансляции и приводит к синтезу укороченного и нефункционального рецептора ЛПНП. У обоих пациентов с данной мутацией наблюдалось значительное повышение уровня ОХС, что согласуется с обширными эпидемиологическими данными в пользу вовлеченности этой мутации

в развитие атеросклероза. Среди больных СГХС из числа жителей Петрозаводска и Республики Карелия мы не нашли носителей мутаций G218del, C160G и с.313+1G>A, которые повторно встречались у больных СГХС – жителей Санкт-Петербурга [5], [45].

Мутация с.58 G>A (G20R [G (-) R]) была у одной пациентки из Петрозаводска. Данная мутация выявлялась ранее у пациентов из Франции [17], Новой Зеландии [32], Нидерландов [25], Турции [40] и Австрии [44] и описывалась как значимая для развития заболевания.

В последних публикациях эта нуклеотидная замена рассматривается как полиморфизм [38]. У нашей пациентки, помимо мутации с.58 G>A, была выявлена мутация FH-North Karelia, связь которой с заболеванием установлена давно. Отец пациентки является носителем мутации FH-North Karelia, но не мутации с.58 G>A, а биохимические показатели атеросклероза у отца выражены значительно сильнее, чем у дочери. Мы предположили, что мутация с.58 G>A была унаследована от матери, которая, по имеющимся у нас данным, от гиперхолестеринемии не страдала. Исследование ДНК матери подтвердило наше предположение. Таким образом, мы установили, что мутация с.58 G>A является нейтральным, непатогенным генетическим вариантом.

Нуклеотидная замена с.1194 C>T (I398I [I377I]) не приводит к изменению аминокислотной последовательности белка и является, по-видимому, молчащей мутацией. Причем у жителей Петрозаводска и Республики Карелия она была охарактеризована у четырех неродственных пациентов, таким образом, встречалась чаще, чем остальные мутации, и не сегрегировала с гиперхолестеринемией в семьях. Ранее эта мутация описывалась также в популяции Австрии [44].

Мутация с.1532 T>C (L511S [L490S]) ранее была охарактеризована в Италии и получила название FH-Rome-4 [23]. Данный дефект приводит к замене аминокислотного остатка лейцина на остаток пролина и, по данным SiftBlink, является патогенным. Мутация локализована в экзоне 10 гена рецептора ЛПНП и нарушает аминокислотную последовательность структуры бета-пропеллера домена, гомологичного предшественнику эпидермального фактора роста. Таким образом, мутация может способствовать нарушению связывания рецептора с лигандом. Данная нуклеотидная замена была выявлена у 56-летней пациентки со значительно повышенными липидами плазмы крови, что также свидетельствует в пользу значимости данной мутации. Однако для однозначного подтверждения этого предположения необходимо исследование влияния данной мутации на функциональную активность белка.

Мутация с.1920 C>T (N640N [N619N]), выявленная у брата с сестрой из Петрозаводска, яв-

ляется молчащей заменой. Данная мутация была описана в Испании [36] и Австрии [44].

Среди семи новых мутаций, выявленных в гене рецептора ЛПНП у жителей Петрозаводска и Республики Карелия, четыре мутации (с.195–196insT, с.192del10/ins8, с.1686del8/insT, с.2191delG) приводят к изменению кодирующей последовательности рецептора ЛПНП на число нуклеотидов, не кратное трем. Таким образом, происходит сдвиг рамки считывания при трансляции. Как предсказывает анализ нуклеотидной последовательности рецептора ЛПНП, при каждой из этих мутаций происходит преждевременная терминация трансляции и образование рецептора без трансмембранного и цитоплазматического доменов, то есть белка, неспособного связать и интернализировать лиганд – апоВ и апоЕ содержащие липопротеины. У всех пациентов – носителей мутаций сдвига рамки считывания были зафиксированы высокие показатели ОХС и ХС ЛПНП. Можно утверждать, что именно эти мутации явились причиной развития СГХС у пациентов. Все мутации были выявлены в разных семьях. Однако три из перечисленных мутаций (с.192del10/ins8, с.1686del8/insT, с.2191delG) встречались каждая в своей семье повторно. Мутация с.195–196 insT была выявлена у одного пациента, родственники которого в исследовании не участвовали.

Однонуклеотидная замена с.618T>G, приводящая к замене кодона для серина на кодон для аргинина в 3' части экзона 4 (S206R [S185R]), была описана у одного пациента с тяжелыми проявлениями СГХС. Любые замены в этом чрезвычайно консервативном участке, кодирующем лигандсвязывающий домен рецептора, как правило, приводят к развитию тяжелой гиперхолестеринемии. В норме лигандсвязывающие повторы цистеин-богатого домена рецептора ЛПНП несут кластеры отрицательно заряженных аминокислот, необходимых для координации ионов кальция и удержания лиганда. Можно предположить, что замена серина, аминокислоты с небольшим полярным радикалом, на аргинин с объемной положительно заряженной боковой цепью в этой области рецептора ЛПНП будет вызывать мисфолдинг и дисфункцию рецептора.

Мутации с.1340C>G (S447C [S426C]) и с.1936 C>G (L646I [L625I]), также описанные впервые в мире, по данным SiftBlink, не являются значимыми. Скорее всего, это справедливо относительно мутации с.1936 C>G (L646I [L625I]), приводящей к замене аминокислотного остатка лейцина на остаток изолейцина в связи со сходством этих остатков. Однако мутация с.1340C>G (S447C [S426C]) приводит к образованию нового остатка цистеина, способного образовывать дополнительные дисульфидные связи в домене, гомологичном предшественнику эпидермального

фактора роста, и таким способом влиять на функциональность белка.

Полиморфный сайт с.1171G>A (A391T [A370T]), выявленный у пациентов из Петрозаводска, также известен как *Stu I* ПДРФ [4], [41]. Вариант А данного полиморфного маркера был найден в разных городах России [5] и во многих странах мира: Южная Африка [30], Канада [42], Марокко [35], Дания [22]. Несмотря на замену аминокислотного остатка при данном полиморфизме, в разных исследованиях было показано, что он не оказывает влияния на уровень липопротеинов крови [41].

Все остальные полиморфизмы, встречающиеся у жителей Петрозаводска и Республики Карелия, не приводят к замене аминокислотного остатка в белке. Так, полиморфизм с.1413 G>A (R471R [R450R]), являющийся довольно частым вариантом для жителей Петрозаводска, был ранее охарактеризован как *BsmA I* ПДРФ и встречался в разных странах, в том числе Южной Африке [43], Норвегии [33] и России. Другая молчащая замена с.1959 C>T (V653V [V632V]), характерная для жителей Республики Карелия, описана в литературе как *Ava II* ПДРФ и встречается как в европейских популяциях, так и в популяции Китая [34].

Мажорных мутаций в генах *APOB* и *PCSK9*, характерных для жителей Европы, не было выявлено ни у одного обследованного пациента из Карелии. Все мутации были найдены в уникальных семьях и не встречались повторно, что говорит об отсутствии эффекта «основателя» в Карелии.

В табл. 4 представлено, какие мутации рецептора липопротеидов низкой плотности выявлены у пациентов с коронарным атеросклерозом, с церебральным атеросклерозом и при их сочетании; показано, что как при церебральном, так и при коронарном атеросклерозе могут быть выявлены мутации, приводящие к сдвигу рамки считывания, или же миссенс-мутации (приводящие к замене аминокислот в последовательности рецепторного белка).

Таблица 4

Мутации рецептора липопротеида низкой плотности у больных с атеросклерозом различной локализации

Коронарный атеросклероз	Пациенты со стенозирующим церебральным атеросклерозом	
	Церебральный атеросклероз в сочетании с коронарным	Изолированный стенозирующий церебральный атеросклероз
с.1340 C>G (S447C [S426C]) с.1936 C>A (L646I [L625I]) с.1686del8/insT (FsW562: L568X [Fs W541: L547X])	с.1532 T>C, (L511S [L490S]); с.618 T>G (S185R, S206R); с.192del10/ins8 (Fs S65: D129X [Fs S44: D108X])	с.2191delG (Fs V710: V715X, Fs V731: V736X)

Результаты наблюдения за пациентами с СГХС в Карелии

Сроки наблюдения за группой пациентов составили в нашем исследовании от 3 до 10 лет. Большинство пациентов (78 %) получают терапию статинами. Гиполипидемическая терапия не проводилась у пациентов молодого возраста, у лиц, категорически от нее отказавшихся. Целевые цифры показателей липидного спектра на фоне терапии статинами у пациентов с СГХС в Карелии были достигнуты в 27%. Выявлены следующие причины недостижения целевых цифр липидного спектра. Во-первых, выраженная исходная дислипидемия. Во-вторых, невозможность применения максимальных доз статинов вследствие появления трансаминитов, миалгий или по социальным причинам, такие причины выявлены в 46% случаев. Наконец, еще одной причиной мы посчитали отказ пациента/врача от терапии статинами или проведение терапии неадекватными дозами статинов. У 2 пациентов старше 60 лет развились повторные ОИМ. За 10 лет умерло 3 человека. Один из умерших – пациент 55 лет с повторным ОИМ, две пациентки старше 77 лет, летальный исход наступил вследствие прогрессирования осложнений ИБС.

ОБСУЖДЕНИЕ

На сегодняшний день, по данным статистики, в большинстве популяций частота встречаемости гетерозиготной формы СГХС составляет 1:500, гомозиготной – 1:1000000 [10]. Однако есть ряд стран, где встречаемость ее значительно выше [11].

Частота встречаемости СГХС в Карелии, по нашим данным, на сегодня составляет 1:300 (достаточно часто), что делает актуальным ориентирование практического врача на раннее выявление данного заболевания и проведение своевременной профилактики сердечно-сосудистых заболеваний у пациентов с СГХС среди жителей республики.

Большое количество исследований, проведенных в последнее время, показало, что общепринятые факторы риска ИБС сохраняют свое негативное влияние и при наличии СГХС. В частности, было показано, что такие факторы, как возраст, наличие артериальной гипертензии или сахарного диабета, индекс массы тела, повышенный уровень ХС ЛПНП и пониженный уровень ХС ЛПВП, являются факторами риска более ранней ИБС у больных с гетерозиготной СГХС и ухудшают прогноз даже по сравнению с другими пациентами с СГХС [12], [13], [14], [26]. Нами была установлена достаточно высокая частота встречаемости нелипидных факторов риска у пациентов с СГХС: частота встречаемости артериальной гипертензии – 64,5%, ожирения – 43%, курения – 34%.

В настоящее время были обнаружены и некоторые отличия роли факторов риска при СГХС от общей популяции. Например, снижение роли повышенного уровня гомоцистеина и повышение роли уровня ХС ЛПВП в качестве факторов риска атеросклероза [18]. Эти различия могут быть вызваны тем, что высокий уровень ХС ЛПНП, характерный для больных СГХС, может нивелировать действие других, более слабых генетических и приобретенных факторов риска ИБС [14]. Возможно, наоборот, если есть ведущий фактор риска в виде гиперхолестеринемии, то дополнительные факторы риска будут оказывать более сильное влияние на них, чем на общую популяцию.

Имеющиеся данные свидетельствуют, что ИБС у пациентов с гетерозиготной СГХС развивается в среднем на 10 лет раньше, чем в общей популяции [20]. Средний возраст, по данным статистики, развития ИБС у мужчин с СГХС составляет около 40 лет, у женщин – 50 лет [14], [20]. У пациентов с СГХС, находившихся под нашим наблюдением, средний возраст дебюта ИБС составил 46,7 года у женщин и 43,8 года у мужчин. По имеющимся данным, дебют ИБС у мужчин с СГХС происходит на 10 лет раньше, чем у женщин, однако нами самый ранний ОИМ был описан у 28-летней женщины [9], что, возможно, было связано с наличием у нее дополнительных факторов риска: курение, низкий уровень ЛПВП, ожирение.

Эти данные свидетельствуют о существенном повышении риска развития инфаркта миокарда у пациентов с СГХС. При исследовании больных СГХС российской популяции у 61,5 % пациентов была диагностирована ИБС, из них 31 % перенесли инфаркт миокарда [14]. В одном из наиболее крупных исследований ИБС была выявлена у 29,5 % пациентов с СГХС по сравнению с 10,5 % в группе контроля (Stone N. J, 1974). В нашем исследовании ИБС была диагностирована у 27,5 % пациентов с СГХС, ОИМ – у 14,8 %, при этом большинство пациентов находились на терапии статинами, у трети удалось достичь целевых показателей липидного спектра. Для больных СГХС при отсутствии лечения риск раннего развития ИБС повышен приблизительно 20-кратно по сравнению с риском для общей популяции [16]. ОИМ у наших пациентов с СГХС являлся наиболее частым проявлением ИБС (диагностирован у 53 % пациентов).

Нами также было показано, что в 21 % случаев атеросклероз при СГХС носит мультифокальный характер, в то время как в общей популяции сопутствующее поражение коронарных артерий при атеросклеротическом генезе ишемической болезни головного мозга диагностируется, по разным данным, с частотой от 19 до 41 % [1], [2], [3].

Проявления церебрального атеросклероза у пациентов с СГХС изучены гораздо в меньшей

степени, чем коронарного. Имеются немногочисленные литературные данные, рассматривающие частоту встречаемости поражения этого сосудистого бассейна и факторы риска, определяющие его развитие [26], [27].

Нами было установлено, что пациенты с церебральным атеросклерозом были старше по сравнению с лицами с СГХС без признаков стенозирующего церебрального атеросклероза ($56 \pm 5,8$ по сравнению с $41,5 \pm 8,7$, $p < 0,05$). У пациентов с СГХС и проявлениями церебрального атеросклероза чаще наблюдаются такие факторы риска, как курение, ожирение, артериальная гипертензия. У пациентов с СГХС, имеющих церебральный атеросклероз, также в 4 раза чаще встречалась ИБС (выявлена у 68,8 % пациентов по сравнению с 16,7 % у лиц без церебрального атеросклероза, $p < 0,05$) и в 5 раз чаще диагностировался ОИМ (у 34,6 % среди лиц с церебральным атеросклерозом по сравнению с 6,7 % среди лиц без стенозирующего церебрального атеросклероза, $p < 0,05$).

В Карелии выявлен ряд генетических особенностей СГХС. Несмотря на территориальную близость Финляндии, частота встречаемости «финских» мутаций на территории республики низкая и составляет в среднем 1:100; также отличается по генетическому профилю Карелия и от соседней Ленинградской области. Среди больных СГХС из числа жителей Петрозаводска мы не нашли носителей мутаций G218del, C160G и c.313+1G>A, которые повторно встречались у больных СГХС – жителей Санкт-Петербурга [5], [45]. В то же время у жителей Республики Карелия было выявлено 7 мутаций, не описанных ранее в мире, отсутствовало доминирование какой-либо из мутаций, что свидетельствует об отсутствии эффекта «основателя» и многообразии генетических изменений у жителей республики. Это еще раз подчеркивает, что, несмотря на общий этиопатогенез, в каждой популяции присутствуют особенности данного заболевания, прежде всего генетические.

Прогноз при СГХС почти всегда серьезный. Без лечения такие пациенты чаще всего умирают от ОИМ, мужчины обычно в возрасте 35–55 лет, женщины 55–75 лет [12]. В нескольких исследованиях было показано, что интенсивная гиполипидемическая терапия может не только нормализовать уровень липидов, но и остановить прогрессирование (у большинства больных) и даже вызвать регрессию (у некоторых пациентов) коронарного атеросклероза [15]. По нашим данным, большинство пациентов с СГХС в Карелии (78 %) получают терапию статинами. Достижение целевых цифр липидного спектра на фоне терапии статинами у пациентов с СГХС в Карелии составило 27%. Причинами недостижения целевых цифр липидного спектра были: выраженная исходная дислипидемия, невозмож-

ность применения максимальных доз статинов (трансаминиты, миалгии, социальные причины) – 46 % пациентов; отказ пациента/врача от терапии или назначение неадекватных доз статинов. Это отражает сложность ведения пациентов с СГХС и необходимость внедрения наряду с терапией статинами новых гиполипидемических препаратов, назначение комбинированной терапии.

ВЫВОДЫ

1. Особенности СГХС в Карелии: средний возраст пациентов 48 лет, преобладают женщины (69%), низкая частота встречаемости липоидной дуги роговицы (26%), сухожильных ксантом (17,3%), ксантелазмы век (34%); основной критерий диагностики – выраженная дислипидемия.

2. Клинические проявления атеросклероза выявлены у 59,7% больных СГХС: ИБС – у 27,5%, церебральный атеросклероз – у 26,5%, облитерирующий атеросклероз нижних конечностей – у 4,6%. Поражение 2 и более сосудистых бассейнов выявлено у 21 % пациентов. Средний возраст

развития ИБС при СГХС – 44,6 года, ОИМ – 45,4 года, церебрального атеросклероза – 56 лет.

3. Особенности генетического «профиля» СГХС в Карелии: мутация R3500Q гена АРОВ не характерна; низкая частота встречаемости мутации FN-North Karelia (1:100), характерной для жителей восточной Финляндии. Выявлены новые мутации рецептора ЛПНП: в гене рецептора ЛПНП было идентифицировано 13 мутаций: p.G20R, c.192del10/ins8, c.195–196insT, p.S206R, c.925–931del7, p.S447C, p.I398I, p.L426P, L511S, c.1686del8/insT, p.L646I, p.N640N, c.2191delG (7 мутаций охарактеризованы впервые в мире). Все предположительно значимые для развития заболевания мутации были найдены в уникальных семьях и не встречались повторно, что говорит об отсутствии эффекта «основателя» в Карелии.

4. Результаты динамического наблюдения за пациентами СГХС показали, что терапия статинами получают 78 % пациентов, достижение целевых цифр липидного спектра на фоне гиполипидемической терапии составило 27%; умерли 3 человека (1,5%), причина смерти – ИБС.

* Работа выполнена в рамках реализации мероприятий Программы стратегического развития ПетрГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов Ю. В., Гаджиев Н. А., Салганов А. В. Сочетанное атеросклеротическое поражение коронарных и брахиоцефальных артерий // Кардиология. 1991. № 4. С. 89–91.
2. Бокерия Л. А., Бухарин В. А., Работников В. С. Хирургическое лечение больных ишемической болезнью сердца с поражением брахиоцефальных артерий. М.: Изд-во НЦССХ им. А. Н. Бакулева РАМН, 1999. 174 с.
3. Бузиашвили Ю. Н. Диагностика и лечение мультифокального атеросклероза. Лекции по кардиологии / Под ред. Л. А. Бокерия, Е. З. Голуховой. М.: Изд-во НЦССХ им. А. Н. Бакулева РАМН, 2001. Т. 2. С. 142–161.
4. Захарова Ф. М., Голубков В. И., Мандельштам М. Ю., Липовецкий Б. М., Гайцхоки В. С. Идентификация новой миссенс-мутации G571E, новой молчащей мутации H229N, нонсенс мутации C74X и четырех однонуклеотидных полиморфизмов в гене рецептора липопротеинов низкой плотности у пациентов с семейной гиперхолестеринемией в Санкт-Петербурге // Биоорганическая химия. 2001. Т. 27. № 5. С. 393–396.
5. Захарова Ф. М., Татищева Ю. А., Голубков В. И., Липовецкий Б. М., Константинов В. О., Денисенко А. Д., Фаергеман О., Васильев В. Б., Мандельштам М. Ю. Семейная гиперхолестеринемия в Санкт-Петербурге: разнообразие мутаций свидетельствует об отсутствии выраженного эффекта основателя // Генетика. 2007. Т. 43. № 9. С. 1255–1262.
6. Кардиоваскулярная профилактика. Национальные рекомендации // Кардиоваск. тер. и проф. 2011. 10 (6). Прил. 2.
7. Комарова Т. Ю., Головина А. С., Грудинина Н. А., Захарова Ф. М., Корнева В. А., Липовецкий Б. М., Серебренникова М. П., Константинов В. О., Васильев В. Б., Мандельштам М. Ю. Новые мутации гена рецептора липопротеинов низкой плотности у пациентов с семейной гиперхолестеринемией из Петрозаводска // Генетика (Москва). 2013. Т. 49. № 6. С. 772–776.
8. Константинов В. О. Доклинический атеросклероз (диагностика и лечение). СПб.: Инкарт, 2006. 158 с.
9. Корнева В. А., Кузнецова Т. Ю., Мандельштам М. Ю. и др. Особенности клинических проявлений атеросклероза при семейной гиперхолестеринемии // Тер. арх. 2014. № 1. С. 18–22.
10. Кухарчук В. В., Малышев П. П., Мешков А. Н. Семейная гиперхолестеринемия: современные аспекты диагностики, профилактики и терапии // Кардиология. 2009. 49. № 1. С. 76–83.
11. Липовецкий Б. М. Наследственные дислипидемии: Руководство для врачей. СПб.: СпецЛит., 2010.
12. Малышев П. П., Рожкова Т. А., Соловьева Е. Ю. и др. Развитие ишемической болезни сердца при гетерозиготной форме семейной гиперхолестеринемии // Кардиоваск. тер. и проф. 2006. № 5. С. 5–13.
13. Малышев П. П., Рожкова Т. А., Соловьева Е. Ю. и др. Фенотипические особенности гетерозиготной формы семейной гиперхолестеринемии // Тер. арх. 2007. № 9. С. 34–38.
14. Мешков А. Н., Малышев П. П., Кухарчук В. В. Семейная гиперхолестеринемия в России: генетическая и фенотипическая характеристика // Тер. арх. 2009. № 81 (9). С. 23–28.
15. Рожкова Т. А., Сусеков А. В., Соловьева Е. Ю. и др. Эффективность и переносимость статинов у больных с первичными гиперлипидемиями в амбулаторной клинической практике // Кардиология. 2005. № 9. С. 32–34.
16. Goldberg A. C., Hopkins P. N., Toth P. P., Ballantyne C. M. et al. Семейная гиперхолестеринемия: скрининг, диагностика и лечение детей и взрослых пациентов: клиническое руководство, подготовленное группой экспертов по семейной гиперхолестеринемии при Национальной липидной ассоциации США // Атеросклероз и дислипидемии. 2012. № 1. С. 4–11.
17. Amsellem S., Briffaut D., Carrie A. et al. Intronic mutations outside of Alu-repeat-rich domains of the LDL receptor gene are a cause of familial hypercholesterolemia. *Hum. Genet.* 2002. Vol. 111. P. 501–510.
18. Assmann G., Gotto A. M. HDL cholesterol and protective factors in atherosclerosis. *Circulation.* 2004. 109 (suppl III). P. III-8–III-14.
19. Austin M. A., Hutter C. M., Zimmem R. L., Humphries S. E. Familial hypercholesterolemia and coronary heart disease: a HuGE association. *Am. J. Epidemiol.* 2004. 160. P. 421–429.

20. Beaumont V. B., Jacotot B., Beaumont J.-L. Ischaemic disease in men and women with familial hypercholesterolaemia and xanthomatosis – A comparative study of genetic and environmental factors in 274 heterozygous cases. *Atherosclerosis*. 1976. 24. P. 441–450.
21. Bell G. I., Karam J. H., Rutter W. J. Polymorphic DNA region adjacent to the 5'-end of the human insulin gene. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 1981. 78. P. 5759–5763.
22. Brusgaard K., Jordan P., Hansen H. et al. Molecular genetic analysis of 1053 Danish individuals with clinical signs of familial hypercholesterolemia. *Clin. Genet.* 2006. Vol. 69. № 3. P. 277–83.
23. Familial hypercholesterolemia due to defects in the gene encoding the LDL receptor. Mutations occurring in Italy and their analysis / Edited by A. Cantafora, F. Prestinaci, I. Blotta. *Rapporti ISTISAN*. 2006. Vol. 06/23. 90 p.
24. Fouchier S. W., Kastelein J. J., Defesche J. C. Update of the molecular basis of familial hypercholesterolemia in The Netherlands. *Hum. Mutat.* 2005. Vol. 26. P. 550–556.
25. Hobbs H. H., Brown M. S., Goldstein J. L. Molecular genetics of the DL receptor gene in familial hypercholesterolemia. *Hum. Mutat.* 1992. 1.6: P. 445–466.
26. Jansen A. C. M., van Aalst-Cohen E. S., Tanck M. W., Trip M. D. et al. The Contribution of classical risk factors to cardiovascular disease in familial hypercholesterolemia: data in 2400 patients. *J. Intern. Med.* 2004. 256. P. 482–490.
27. Junyent M., Cofán M., Núñez I., Gilbert R., Zambón D., Ros E. Influence of HDL cholesterol on preclinical carotid atherosclerosis in familial hypercholesterolemia. *Arterioscler Thromb Vase Biol.* 2006. 26 (5). P. 1107–13.
28. Koivisto U.-M., Turtola H., Aalto-Setälä K., Top B., Frants R. R., Kovanen P. T., Syvänen A. C., Kontula K. The familial hypercholesterolemia (FH)-North Karelia mutation of the low density lipoprotein receptor gene deletes seven nucleotides of exon 6 and is a common cause of FH in Finland. *J. Clin. Invest.* 1992. Vol. 90. № 1. P. 219–228.
29. Komarova T. Yu., Korneva V. A., Kuznetsova T. Yu., Golovina A. S., Vasilyev V. B., Mandelshtam M. Yu. Familial hypercholesterolemia mutations in Petrozavodsk: no similarity to St. Petersburg mutation spectrum. *BMC Medical Genetics*. 2013. Vol. 14. P. 128.
30. Kotze M. J., Langenhoven E., Warnich L. et al. The identification of two low-density lipoprotein receptor gene mutations in South African familial hypercholesterolaemia. *S. Afr. Med. J.* 1989. Vol. 76. № 8. P. 399–401.
31. Kunkel L. M., Kirby D. R., Boyer S. H., Borgaonkar D. S., Wachtel S. S., Miller O. J. et al. Analyses of human Y-chromosome-specific reiterated DNA in chromosome variants. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 1977. 74. P. 1245–1249.
32. Laurie A. D., Scott R. S., George P. M. Genetic screening of patients with familial hypercholesterolaemia (FH): a New Zealand perspective. *Atheroscler.* 2004. Vol. 5. № 5. P. 13–15.
33. Leren T. P., Solberg K., Rødningen O. K. et al. Screening for point mutations in exon 10 of the low density lipoprotein receptor gene by analysis of single-strand conformation polymorphisms: detection of a nonsense mutation – FH469→Stop. *Hum. Genet.* 1993. Vol. 92. P. 6–10.
34. Mak Y. T., Pang C. P., Tomlinson B. et al. Mutations in the low-density lipoprotein receptor gene in Chinese familial hypercholesterolemia patients. *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol.* 1998. Vol. 18. № 10. P. 1600–1605.
35. Messal M. El, Aït Chihab K., Chater R. Familial hypercholesterolemia in Morocco: first report of mutations in the LDL receptor gene. *J. Hum. Genet.* 2003. Vol. 48. № 4. P. 199–203.
36. Mozas P., Cenarro A., Civeira F. et al. Mutation analysis in 36 unrelated Spanish subjects with familial hypercholesterolemia: identification of 3 novel mutations in the LDL receptor gene. *Hum. Mutat.* 2000. Vol. 15. № 5. P. 483–484.
37. Ose L. Familial hypercholesterolemia from children to adults. *Cardiovasc. Drugs Ther.* 2002. 16. P. 289–293.
38. Pećin I., Whittall R., Futema M. et al. Mutation detection in Croatian patients with familial hypercholesterolemia. *Ann. Hum. Genet.* 2013. Vol. 77. № 1. P. 22–30.
39. Scientific Steering Committee on behalf of the Simon Broome Register group. Mortality in treated heterozygous familial hypercholesterolemia: implications for clinical management. *Atherosclerosis*. 1999. 142. P. 105–112.
40. Sözen M. M., Whittall R., Öner C., Tokatlı A. et al. The molecular basis of familial hypercholesterolaemia in Turkish patients. *Atherosclerosis*. 2005. Vol. 180. P. 63–71.
41. Vieira J. R., Whittall R. A., Cooper J. A. et al. The A370T variant (StuI polymorphism) in the LDL receptor gene is not associated with plasma lipid levels or cardiovascular risk in UK men. *Ann. Hum. Genet.* 2006. Vol. 70. Pt. 6. P. 697–704.
42. Wang J., Huff E., Janicka L., Hegele R. A. Low density lipoprotein receptor (LDLR) gene mutations in Canadian subjects with familial hypercholesterolemia, but not of French descent. *Hum. Mutat.* 2001. Vol. 18. № 4. P. 359.
43. Warnich L., Kotze M. J., Langenhoven E. et al. Detection of a frequent polymorphism in exon 10 of the low-density lipoprotein receptor gene. *Hum. Genet.* 1992. Vol. 89. № 3. P. 362.
44. Widhalm K., Dirisamer A., Lindemayr A., Kostner G. Diagnosis of families with familial hypercholesterolaemia and/or Apo B-100 defect by means of DNA analysis of LDL-receptor gene mutations. *J. Inherit. Metab. Dis.* 2007. Vol. 30. № 2. P. 239–247.
45. Zakharova F. M., Damgaard D., Mandelshtam M. Y., Golubkov V. I., Nissen P. H., Nilsen G. G. et al. Familial hypercholesterolemia in St-Petersburg: the known and novel mutations found in the low density lipoprotein receptor gene in Russia. *BMC Med Genet.* 2005. Vol. 6. № 1. P. 6.

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

Kuznetsova T. Yu., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Bogoslovskaya T. Yu., Institute for Experimental Medicine (St. Petersburg, Russian Federation)

Mandel'shtam M. Yu., Institute for Experimental Medicine, St. Petersburg State University (St. Petersburg, Russian Federation)

Vasil'ev V. B., Institute for Experimental Medicine, St. Petersburg State University (St. Petersburg, Russian Federation)

FAMILIAL HYPERCHOLESTEROLEMIA IN KARELIA: OCCURRENCE, SPREADING, CLINICAL, AND GENETIC PECULIARITIES, THERAPY (10 YEARS MANAGEMENT EXPERIENCE)

Familial hypercholesterolemia (FH) is an inherited metabolic disease resulting in specific elevation of the low-density lipoprotein (LDL) in blood plasma. The purpose of the research was to study genetic and clinical features of FH in Karelia. Totally 196 patients with FH from 124 Karelian families were examined (69% were female). The average age of the researched patients was 48 ± 2.3 years old. Genetic tests were performed in 109 patients (55.6%). In all patients blood plasma lipid spectrum, glucose plasma concentration, thyroid hormones levels were measured. Electrocardiography, Holter's monitoring of electrocardiography, echocardiography, triplex scanning of carotid arteries and vessels of lower extremities together with stress tests were performed. Clinical

diagnosis of FH was set according to Simon Broom criteria. The main clinical features of FH in Karelia include the following: FH patients frequently have additional non lipid risk factors (arterial hypertension in 64,5 %, smoking in 34 %, obesity in 48 %). The presence of FH stigmata was not frequent (corneal arcus in 26 %, tendon xantomas in 17,3 %, xantelasma in 34 %). Atherosclerosis was diagnosed in 117 patients (59,7 %), among them – ischemic heart disease was diagnosed in 27,5 % (more than half of them had myocardial infarction), atherosclerosis of brain vessels – in 26,5 % (stroke in 6 %), atherosclerosis of lower extremities – in 4,6 %, multifocal atherosclerosis – in 21 %. Manifestations of ischemic heart disease usually develop in patients of 45 years old, myocardial infarction – in 45,4 years old, brain atherosclerosis – in 56 years old. The targeted lipid level was obtained in 27 % of patients with FH. These patients were treated with statins. Special genetic features of the disease characteristic of Karelia include the following: lack of evident "founder" effect; specific Finnish mutations not typical for Karelia, new LDL receptor mutations, namely c.192del110/ins8, c.195–196insT, c.2191delG, S206R. R3500Q mutation of the APOB gene was not found in the sample of 109 persons at all. In FH patients from Karelia some clinical and genetic specific features were observed.

Key words: familial hypercholesterolemia, mutation, low-density lipoprotein (LDL) receptor

REFERENCES

1. Belov Yu. V., Gadzhiev N. A., Salganov A. V. Combined atherosclerotic affection of coronary and brachiocefal arteries [Sochetannoe ateroskleroticheskoe porazhenie koronarnykh i brachiotsefal'nykh arteriy]. *Kardiologiya* [Cardiology]. 1991. № 4. P. 89–91.
2. Bokeriya L. A., Bukharin V. A., Rabotnikov V. S. *Khirurgicheskoe lechenie bol'nykh ishemicheskoy bolezni yu serdtsa s porazheniem brachiotsefal'nykh arteriy* [Surgical treatment of patients with ischemic heart disease and affection of brachiocefal arteries]. Moscow, 1999. 174 p.
3. Buziashvili Yu. N. *Diagnostika i lechenie mul'tifokal'nogo ateroskleroza. Lekcii po kardiologii* [Diagnostic and treatment of multifocal atherosclerosis. Cardiology lectures] / By red. L. Bokeriya, E. Goluchova. Moscow, 2001. Book 2. P. 142–161.
4. Zakharova F. M., Golubkov V. I., Mandel'shtam M. Yu., Lipovetskiy B. M., Gaitskhoki V. S. Identification of novel missense mutation G571E, novel silent mutation H229H, nonsense mutation C74X, and four single nucleotide polymorphisms in the low-density lipoprotein receptor gene in patients with familial hypercholesterolemia from St. Petersburg [Identifikatsiya novoy missens-mutatsii G571E, novoy molchashchey mutatsii H229H, nonsense mutatsii C74X i chetyrekh odnonucleotidnykh polymorfizmov v gene retseptora lipoproteinov nizkoy plotnosti u patsientov s semeynoy giperkholesterinemiy v Sankt Peterburge]. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*. 2001. Vol. 27. № 5. P. 349–351.
5. Zakharova F. M., Tatishcheva Yu. A., Golubkov V. I., Lipovetskiy B. M., Konstantinov V. O., Denisenko A. D., Faergeman O., Vasil'yev V. B., Mandel'shtam M., Yu. Familial hypercholesterolemia in St. Petersburg: Diversity of mutations argues against a strong founder effect [Semeynaya giperkholesterinemiya v Sankt-Peterburge: raznoobrazie mutatsiy svidetel'stvuet ob otsustvii vyrazhennogo effekta osnovatelya]. *Genetika*. 2007. Vol. 43. № 9. P. 1046–1052.
6. Cardiovascular protection. National recommendations [Kardiovaskulyarnaya profilaktika. Natsional'nye rekomendatsii]. *Kardiovask. ter. i prof.* 2011. 10 (6). Pril. 2.
7. Komarova T. Yu., Golovina A. S., Grudinina N. A., Zakharova F. M., Korneva V. A., Lipovetskiy B. M., Serebrenitskaya M. P., Konstantinov V. O., Vasil'yev V. B., Mandel'shtam M. Yu. New mutations in low-density lipoprotein receptor gene in familial hypercholesterolemia patients from Petrozavodsk [Novye mutatsii gena retseptora lipoproteinov nizkoy plotnosti u patsientov s semeynoy giperkholesterinemiy iz Petrozavodsk]. *Russian Journal of Genetics*. 2013. Vol. 49 (6). P. 673–676.
8. Konstantinov V. O. *Doklinicheskiy ateroskleroz (diagnostika i lechenie)* [Preclinical atherosclerosis (diagnosis and treatment)]. St. Petersburg, Inkart Publ., 2006. 158 p.
9. Korneva V. A., Kuznetsova T. Yu., Mandel'shtam M. Yu. i dr. Clinical manifestations of atherosclerosis in familial hypercholesterolemia [Osobennosti klinicheskikh proyavleniy ateroskleroza pri semeynoy giperkholesterinemii]. *Ter. Arch.* 2014. № 1. P. 18–22.
10. Kukharchuk V. V., Malyshev P. P., Meshkov A. N. Familial Hypercholesterolemia. Contemporary Aspects of diagnosis, prevention and therapy [Semeynaya giperkholesterinemiya: sovremennye aspekty diagnostiki, profilaktiki i terapii]. *Kardiologiya*. 2009. 49. № 1. P. 76–83.
11. Lipovetskiy B. M. *Nasledstvennye displidemii. Rukovodstvo dlya vrachey* [Hereditary dyslipidemias. Guideline for physician]. St. Petersburg, 2010.
12. Malyshev P. P., Rozhkova T. A., Solov'eva E. Yu. i dr. Development of ischemic heart disease in heterozygous form of familial hypercholesterolemia [Razvitie ishemicheskoy bolezni serdtsa pri geterozigotnoy forme semeynoy giperkholesterinemii]. *Kardiovask. ter. i prof.* 2006. № 5. P. 5–13.
13. Malyshev P. P., Rozhkova T. A., Solov'eva E. Yu. i dr. Phenotypic characteristics of heterozygous forms of familial hypercholesterolemia [Fenotipicheskie osobennosti geterozigotnoy formy semeynoy giperkholesterinemii]. *Ter. archive*. 2007. № 9. P. 34–38.
14. Meshkov A. N., Malyshev P. P., Kukharchuk V. V. Familial hypercholesterolemia in Russia: genetic and phenotypic characteristics [Semeynaya giperkholesterinemiya v Rossii: geneticheskaya i fenotipicheskaya kharakteristika]. *Ter. archive*. 2009. № 81 (9). P. 23–28.
15. Rozhkova T. A., Susekov A. V., Solov'eva E. Yu. i dr. Effectiveness and acceptability of statin in patients with primary hyperlipidemia in ambulatory clinical practice [Effektivnost' i perenosimost' statinov u bol'nykh s pervichnymi giperlipidemiyami v ambulatornoy klinicheskoy praktike]. *Kardiologiya*. 2005. № 9. P. 32–34.
16. Goldberg A. C., Hopkins P. N., Toth P. P., Ballantyne C. M. et al. Familial hypercholesterolemia: screening, diagnostic and management of pediatric and adult patients. Clinical guideline from the National Lipid Association Expert Panel on Familial Hypercholesterolemia [Semeynaya giperkholesterinemiya: skrining, diagnostika i lechenie detey i vzroslykh patsientov: klinicheskoe rukovodstvo, podgotovlennoe gruppy ekspertov po semeynoy giperkholesterinemii pri Natsional'noy lipidnoy assotsiatsii SShA]. *Ateroskleroz i displidemii*. 2012. № 1. P. 4–11.
17. Amsellem S., Briffaut D., Carrie A. et al. Intronic mutations outside of Alu-repeat-rich domains of the LDL receptor gene are a cause of familial hypercholesterolemia. *Hum. Genet.* 2002. Vol. 111. P. 501–510.
18. Assmann G., Gotto A. M. HDL cholesterol and protective factors in atherosclerosis. *Circulation*. 2004. 109 (suppl III). P. III-8–III-14.
19. Austin M. A., Hutter C. M., Zimmern R. L., Humphries S. E. Familial hypercholesterolemia and coronary heart disease: a HuGE association. *Am. J. Epidemiol.* 2004. 160. P. 421–429.

20. Beaumont V. B., Jacotot B., Beaumont J.-L. Ischaemic disease in men and women with familial hypercholesterolaemia and xanthomatosis – A comparative study of genetic and environmental factors in 274 heterozygous cases. *Atherosclerosis*. 1976. 24. P. 441–450.
21. Bell G. I., Karam J. H., Rutter W. J. Polymorphic DNA region adjacent to the 5'-end of the human insulin gene. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 1981. 78. P. 5759–5763.
22. Brusgaard K., Jordan P., Hansen H. et al. Molecular genetic analysis of 1053 Danish individuals with clinical signs of familial hypercholesterolemia. *Clin. Genet.* 2006. Vol. 69. № 3. P. 277–83.
23. Familial hypercholesterolemia due to defects in the gene encoding the LDL receptor. Mutations occurring in Italy and their analysis / Edited by A. Cantafora, F. Prestinaci, I. Blotta. *Rapporti ISTISAN*. 2006. Vol. 06/23. 90 p.
24. Fouchier S. W., Kastelein J. J., Defesche J. C. Update of the molecular basis of familial hypercholesterolemia in The Netherlands. *Hum. Mutat.* 2005. Vol. 26. P. 550–556.
25. Hobbs H. H., Brown M. S., Goldstein J. L. Molecular genetics of the DL receptor gene in familial hypercholesterolemia. *Hum. Mutat.* 1992. 1.6: P. 445–466.
26. Jansen A. C. M., van Aalst-Cohen E. S., Tanck M. W., Trip M. D. et al. The Contribution of classical risk factors to cardiovascular disease in familial hypercholesterolemia: data in 2400 patients. *J. Intern. Med.* 2004. 256. P. 482–490.
27. Junyent M., Cofán M., Núñez I., Gilabert R., Zambón D., Ros E. Influence of HDL cholesterol on preclinical carotid atherosclerosis in familial hypercholesterolemia. *Arterioscler Thromb Vasc Biol.* 2006. 26 (5). P. 1107–13.
28. Koivisto U.-M., Turtola H., Aalto-Setälä K., Top B., Frants R. R., Kovanen P. T., Syvänen A. C., Kontula K. The familial hypercholesterolemia (FH)-North Karelia mutation of the low density lipoprotein receptor gene deletes seven nucleotides of exon 6 and is a common cause of FH in Finland. *J. Clin. Invest.* 1992. Vol. 90. № 1. P. 219–228.
29. Komarova T. Yu., Korneva V. A., Kuznetsova T. Yu., Golovina A. S., Vasilyev V. B., Mandelshtam M. Yu. Familial hypercholesterolemia mutations in Petrozavodsk: no similarity to St. Petersburg mutation spectrum. *BMC Medical Genetics*. 2013. Vol. 14. P. 128.
30. Kotze M. J., Langenhoven E., Warnich L. et al. The identification of two low-density lipoprotein receptor gene mutations in South African familial hypercholesterolaemia. *S. Afr. Med. J.* 1989. Vol. 76. № 8. P. 399–401.
31. Kunkel L. M., Kirby D. R., Boyer S. H., Borgaonkar D. S., Wachtel S. S., Miller O. J. et al. Analyses of human Y-chromosome-specific reiterated DNA in chromosome variants. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1977. 74. P. 1245–1249.
32. Laurie A. D., Scott R. S., George P. M. Genetic screening of patients with familial hypercholesterolaemia (FH): a New Zealand perspective. *Atheroscler.* 2004. Vol. 5. № 5. P. 13–15.
33. Leren T. P., Solberg K., Rødningen O. K. et al. Screening for point mutations in exon 10 of the low density lipoprotein receptor gene by analysis of single-strand conformation polymorphisms: detection of a nonsense mutation – FH469→Stop. *Hum. Genet.* 1993. Vol. 92. P. 6–10.
34. Mak Y. T., Pang C. P., Tomlinson B. et al. Mutations in the low-density lipoprotein receptor gene in Chinese familial hypercholesterolemia patients. *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol.* 1998. Vol. 18. № 10. P. 1600–1605.
35. Messal M. El., Aït Chihab K., Chater R. Familial hypercholesterolemia in Morocco: first report of mutations in the LDL receptor gene. *J. Hum. Genet.* 2003. Vol. 48. № 4. P. 199–203.
36. Mozas P., Cenarro A., Civeira F. et al. Mutation analysis in 36 unrelated Spanish subjects with familial hypercholesterolemia: identification of 3 novel mutations in the LDL receptor gene. *Hum. Mutat.* 2000. Vol. 15. № 5. P. 483–484.
37. Ose L. Familial hypercholesterolemia from children to adults. *Cardiovasc. Drugs Ther.* 2002. 16. P. 289–293.
38. Pećin I., Whittall R., Futema M. et al. Mutation detection in Croatian patients with familial hypercholesterolemia. *Ann. Hum. Genet.* 2013. Vol. 77. № 1. P. 22–30.
39. Scientific Steering Committee on behalf of the Simon Broome Register group. Mortality in treated heterozygous familial hypercholesterolemia: implications for clinical management. *Atherosclerosis*. 1999. 142. P. 105–112.
40. Sözen M. M., Whittall R., Oner C., Tokatli A. et al. The molecular basis of familial hypercholesterolaemia in Turkish patients. *Atherosclerosis*. 2005. Vol. 180. P. 63–71.
41. Vieira J. R., Whittall R. A., Cooper J. A. et al. The A370T variant (StuI polymorphism) in the LDL receptor gene is not associated with plasma lipid levels or cardiovascular risk in UK men. *Ann. Hum. Genet.* 2006. Vol. 70. Pt. 6. P. 697–704.
42. Wang J., Huff E., Janecka L., Hegele R. A. Low density lipoprotein receptor (LDLR) gene mutations in Canadian subjects with familial hypercholesterolemia, but not of French descent. *Hum. Mutat.* 2001. Vol. 18. № 4. P. 359.
43. Warnich L., Kotze M. J., Langenhoven E. et al. Detection of a frequent polymorphism in exon 10 of the low-density lipoprotein receptor gene. *Hum. Genet.* 1992. Vol. 89. № 3. P. 362.
44. Widhalm K., Dirisamer A., Lindemayr A., Kostner G. Diagnosis of families with familial hypercholesterolaemia and/or Apo B-100 defect by means of DNA analysis of LDL-receptor gene mutations. *J. Inherit. Metab. Dis.* 2007. Vol. 30. № 2. P. 239–247.
45. Zakharova F. M., Damgaard D., Mandelshtam M. Y., Golubkov V. I., Nissen P. H., Nilsen G. G. et al. Familial hypercholesterolemia in St- Petersburg: the known and novel mutations found in the low odensity lipoprotein receptor gene in Russia. *BMC Med Genet.* 2005. Vol. 6. № 1. P. 6.

Поступила в редакцию 01.07.2014

АННА СЕРГЕЕВНА ЛЕСОНЕН

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

ЕКАТЕРИНА ЕФИМОВНА ЛОСКУТОВА

доктор фармакологических наук, профессор, зав. кафедрой управления и экономики фармации медицинского факультета, Российский университет дружбы народов (Москва, Российская Федерация)
ekaterinaloskuttova@gmail.com

ИРИНА АНАТОЛЬЕВНА ВИНОГРАДОВА

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

МАРКЕТИНГОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЫНКА ПРОТИВОАЛЛЕРГИЧЕСКИХ АНТИГИСТАМИННЫХ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ*

Представлен анализ рынка противоаллергических антигистаминных средств с учетом торговых и международных непатентованных наименований, основных фармакологических характеристик, страны-производителя и средних розничных цен. Для выявления частоты назначения антигистаминных препаратов приведены результаты опроса 86 врачей г. Петрозаводска. Результаты исследования показали, что на первом месте по назначению находятся препараты 1-го и 2-го поколений из-за их невысокой стоимости. При сравнении стоимости 1 дня лечения антигистаминными препаратами каждого поколения выявлено, что стоимость лечения препаратами 3-го поколения ниже стоимости лечения препаратами 1-го и 2-го поколений, обладающими большим количеством побочных эффектов и низкой антигистаминной активностью. В результате исследования выявлена необходимость в информировании врачей о возможности сравнения затрат на лечение тем или иным препаратом и эффективности препарата.

Ключевые слова: антигистаминные средства, фармацевтический маркетинг, анкетирование

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время рост числа аллергических заболеваний рассматривается как глобальная проблема во многих странах. Основной группой препаратов, используемых при лечении аллергии, являются антигистаминные лекарственные препараты (АГЛП), рынок которых насыщен большим количеством торговых наименований одного и того же действующего вещества, что затрудняет их выбор.

Для рационального применения и повышения качества и эффективности лечения данной группой препаратов необходим анализ ассортимента с учетом торговых и международных непатентованных наименований, основных фармакологических характеристик, страны-производителя и средних розничных цен на антигистаминные лекарственные препараты.

Целью данной работы является анализ фармацевтического рынка АГЛП г. Петрозаводска и оценка назначений врачей по данной группе препаратов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для мониторинга состояния фармацевтического рынка антигистаминных средств были проведены маркетинговые исследования с использованием структурного, логического, графического, системного и контент-анализа данных Государственного реестра лекарственных средств (май 2013), прайс-листов 6 аптечных сетей г. Петрозаводска (ООО «Петрофарм 2000», ГУП «Карелфарм», ООО «Ремедиос», ООО «Луиза», ООО «Здравушка», ООО «Премиум»). Оценка назначений АГЛП проводилась по результатам опроса врачей (86 респондентов).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В Государственном реестре представлено 146 торговых наименований антигистаминных лекарственных препаратов с учетом производителей и лекарственных форм. Без учета лекарственных форм зарегистрировано 81 торговое название, которому соответствует 21 международное непатентованное наименование.

АГЛП представлены производителями из 24 стран. На долю отечественных антигистаминных препаратов приходится 57 торговых наименований (39,1%), на долю импортных: Венгрия – 14, Швейцария – 13, Индия – 12, Бельгия и Германия – по 7; Словения – 6 [2].

Среди зарегистрированных лекарственных форм АГЛП значительную долю занимают таблетки (более 50%); на остальные лекарственные формы приходится незначительные объемы: сиропы, капли, растворы и суспензии для внутреннего применения (15,8%); растворы для инъекционного введения (11,7%); глазные и назальные капли и спреи (10,9%); драже (4,1%); эмульсии и гели для наружного применения (2,1%); капсулы (2,1%) [2].

В соответствии с классификацией антигистаминные препараты подразделяют на препараты 1, 2 и 3-го поколений [1].

Препараты 1-го поколения принято называть седативными по доминирующему побочному эффекту. Для них характерны: неполная связь с H₁-рецепторами, поэтому необходимы относительно высокие дозы; кратковременный эффект, в результате чего увеличивается кратность приема; блокирование M-холинорецепторов, α-адренорецепторов, D-рецепторов, 5-HT-рецепторов; развитие тахифилаксии, из-за этого необходимо чередование антигистаминных препаратов разных групп каждые 2–3 недели [1], [3], [4].

По количеству торговых наименований среди препаратов 1-го поколения лидируют хлоропирамин и дифенгидрамин (табл. 1).

Таблица 1
Антигистаминные препараты 1-го поколения

Международное непатентованное наименование	Торговые наименования
Антазолин	В составе «Сперсаллерг» (Швейцария), «Санорин-аналергин» (Израиль), «Офтофеназол» (Россия)
Диметилметилпиридинилэтилтетрагидрокарболин	Димебон (Россия)
Диметинден	Фенистил, в составе «Виброцил» (Швейцария)
Дифенгидрамин	Димедрол, Димедрол буфус, Димедрол-УБФ, Псило-бальзам, Димедрол-Виал, в составе «Бетадрин», «Окуметил», «Полинадим» (Россия, Беларусь)
Клемастин	Тавегил (Швейцария), Клемастин-Эском (Россия)
Мебгидролин	Диазолин (Россия, Украина)
Прометазин	Пипольфен (Венгрия)
Сехифенадин	Гистафен (Латвия)
Хифенадин	Фенкарол (Латвия)
Хлоропирамин	Супрастин (Венгрия), Хлоропирамин (Россия), Хлоропирамин-Ферейн (Россия), Хлоропирамин-Эском (Россия)
Ципрогептадин	Перитол (Венгрия)

У препаратов 2-го поколения отмечаются: неконкурентное взаимодействие с рецепторами гистамина; увеличение длительности действия (18–24 ч); отсутствие у большинства препаратов седативного эффекта; высокая клиническая эффективность; отсутствие блокады других рецепторов и, как следствие, уменьшение нежелательных побочных реакций; отсутствие тахифилаксии. Несмотря на хороший профиль безопасности в терапевтических дозах, ряд АГЛП 2-го поколения при замедлении метаболизма обладает кардиотоксичностью, в связи с этим необходима коррекция дозы препарата при заболеваниях печени и ограничение приема для пациентов с удлинённым интервалом QT [1], [3], [4].

Абсолютными лидерами по числу торговых наименований среди препаратов 2-го поколения являются Лоратадин и Цетиризин (табл. 2).

Таблица 2
Антигистаминные препараты 2-го поколения

Международное непатентованное наименование	Торговые наименования
Азеластин	Аллергодил (Германия)
Акривастин	Семпрекс (Великобритания)
Левакабастин	Реактин, Визин Алерджи, Тизин Алерджи (Россия)
Лоратадин	Лоратадин (Нидерланды, Россия), Кларитин (Бельгия), Кларисенс (Россия), Ломилан (Словения), Лоратадин-Хемофарм (Сербия), Лоратадин-OBL (Россия), Эролин (Венгрия), Ломилан Соло (Словения), Лорагексал (Германия), Лоратадин-Тева (Израиль), Кларифер (Россия), Эролин (Венгрия), Кларидол (Индия), Лоратадин Штада (Россия), Кларалергин (Россия), Кларотадин (Россия), Алерприв (Аргентина), в составе «Аллергоферон» (Россия)
Рупатадин	Рупафин (Испания)
Цетиризин	Аллертек (Польша), Цетиризин (Македония), Зинцет (Индия), Цетрин (Индия), Цетиризин Гексал (Германия), Парлазин (Венгрия), Цезера (Словения), Цетиризин ДС (Вьетнам), Зодак (Чешская Республика), Алерза (Индия), Цетиринакс (Россия), Цетиризин-OBL (Россия), Цетиризин-Тева (Израиль), Летизен (Словения), Зиртек (Швейцария)
Эбастин	Кестин (Дания, Испания)

К 3-му поколению относятся активные метаболиты антигистаминных препаратов 2-го поколения (табл. 3). Минимальный метаболизм и отсутствие взаимодействия с изоферментами системы цитохрома CYP-450 дает возможность применять их у пациентов с заболеваниями печени без коррекции дозы препарата и сочетать с метаболизируемыми лекарственными препаратами. Помимо высокой антигистаминной активности и быстрого начала действия у АГЛП 3-го поколения отсутствует седативный эффект и кардиотоксическое действие [1], [3], [4].

Таблица 3
Антигистаминные препараты 3-го поколения

Международное непатентованное наименование	Торговые наименования
Дезлоратадин	Эриус (Бельгия), Лордестин (Россия), Дезлоратадин-Тева (Израиль), Дезлоратадин-Канон (Россия)
Левоситиризин	Ксизал (Швейцария), Гленцет (Индия), Супрастинекс (Венгрия), Цезера (Словения), Левоситиризин-Тева (Израиль)
Фексофенадин	Динокс (Индия), Гифаст (Россия), Фексадин (Индия), Телфаст (Германия, США), Фексофаст (Индия), Фексофенадин (Россия), Бексист-Сановель (Турция)

Анализ ассортимента АГЛП в аптеках г. Петрозаводска на основе прайс-листов 6 аптечных сетей показал, что на рынке присутствуют все международные непатентованные наименования, кроме Диметилметилпиридинилэтил-тетрагидрокарболина – препарата 1-го поколения и Рупатадина – препарата 2-го поколения.

Так как важное место в выборе лекарственных препаратов занимает промежуточный потребитель – врач, осуществляющий рациональное применение АГЛП, было проведено анкетирование врачей по частоте назначений различных антигистаминных лекарственных препаратов.

По результатам опроса на первом месте по назначению находятся препараты 1-го и 2-го поколений: Супрастин № 20 – 67,4% (средняя розничная цена за упаковку составляет 143,8 руб.); Цетрин № 20 – 55,8% (182,78 руб.); Лоратадин № 10 – 55,8% (от 12,77 до 57,45 руб.) и Тавегил № 20 – 33,7% (192,23 руб.). Среди препаратов 3-го поколения врачи назначают только Эриус № 10 – 10,5% (628 руб.), Супрастинекс № 14 – 2,3% (320 руб.) и Телфаст 120 мг № 10 – 2,3% (502 руб.).

Расположение таким образом назначаемых препаратов в рейтинге врачи объясняют невысокой стоимостью препаратов 1-го и 2-го поколений и недоступностью для всех потребителей препаратов 3-го поколения.

При оценке средних розничных цен на АГЛП в г. Петрозаводске установлено, что препараты стоимостью до 50 рублей составляют 10,2% рынка (в этом сегменте присутствуют препараты 1-го и 2-го поколений); на препараты ценового диапазона 51–100 рублей приходится 11% (2-е поколение); 101–200 рублей – 27,7% (препараты 1, 2 и 3-го поколений); 201–300 рублей – 25,5% (1, 2 и 3-е поколения) и выше 301 рубля – 25,6% (диапазон представлен препаратами 1, 2 и 3-го поколений).

Минимальная розничная цена на АГЛП установлена на рецептурный препарат 1-го поколения Димедрол № 10 (5,9 руб.), второе место занимает Лоратадин № 10 отечественного производства (12,77 руб.). Максимальная цена в аптеках г. Петрозаводска приходится на препараты 2-го и 3-го

поколений: Кларитин № 30; Эриус № 10; Телфаст 180 мг № 10; Лордестин № 30 (более 500 руб.).

Поскольку курс лечения АГЛП аллергических заболеваний зависит непосредственно от самого диагноза, проявлений болезни, стадии заболевания, целесообразно проанализировать стоимость 1 дня лечения препаратами каждого поколения, назначаемыми врачами г. Петрозаводска (табл. 4). Для сравнения взята стандартная средняя суточная доза лекарственного средства – Defined Daily Dose (DDD), которая используется по основному показанию к назначению у взрослых. Эта единица применяется Нордическим медицинским советом (Nordic Council of Medicines – NCM) с 1976 года и рекомендуется DURG (Drug Utilization Research Group) как единица измерения для сравнительной статистики потребления лекарств [5], [6].

Таблица 4
Стоимость антигистаминных лекарственных препаратов на 1 день лечения

Поколения АГЛП	Торговое наименование препарата	DDD, мг	Средняя розничная цена, руб.	Стоимость 1 дня лечения, руб.
1-е поколение	Супрастин 25 мг № 20	100*	143,38	28,68
	Тавегил 1 мг № 20	2	192,23	19,22
2-е поколение	Зодак 10 мг № 10	10	132,77	13,28
	Кларитин 10 мг № 10	10	134,8	13,48
	Лоратадин 10 мг № 10	10	12,77–57,45	1,28–5,75
3-е поколение	Цетрин 10 мг № 20	10	182,78	9,14
	Супрастинекс 5 мг № 14	5	320	22,86
	Телфаст 120 мг № 10	120	502	50,2
	Фексофаст 120 мг № 10	120	168	16,8
	Эриус 5 мг № 10	5	628	62,8

Примечание. * – доза Супрастина скорректирована в соответствии с Государственным реестром лекарственных средств РФ. (Назначаемая и принимаемая дозы могут отличаться в разных странах в зависимости от преобладающих показаний к назначению, национальных или региональных традиций терапии [5]).

Из табл. 4 видно, что стоимость 1 дня лечения препаратом 1-го поколения Супрастином (28,68 руб.), выше стоимости 1 дня лечения препаратами 2-го поколения – Зодак (13,28), Кларитин (13,48), Лоратадин (5,75), Цетрин (9,14) и препаратами 3-го поколения – Супрастинексом (22,86) и Фексофастом (16,8), которые обладают высокой антигистаминной активностью, быстрым наступлением лечебного эффекта и отсутствием нежелательных побочных эффектов.

ВЫВОДЫ

В результате исследования выявлена необходимость информировать врачей о возможнос-

ти сравнения затрат на лечение тем или иным препаратом и эффективности данного препарата (принадлежность к 1, 2 или 3-му поколению).

Маркетинговый анализ фармацевтического рынка АГЛП показал, что имеющийся ассортимент представлен всеми основными видами антигистаминных лекарственных препаратов, в связи с чем у врачей имеется возможность оптимального выбора АГЛП для каждого пациента

в зависимости от клинических проявлений аллергической реакции, стадии заболевания, образа жизни и сопутствующего диагноза. Кроме того, наличие в ассортиментном портфеле дистрибьюторов и аптечных организаций АГЛП всех поколений в широком ценовом диапазоне позволяет обеспечивать их высокую ценовую доступность для потребителей с различными финансовыми возможностями.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития на 2012–2016 годы «Университетский комплекс ПетрГУ в научно-образовательном пространстве Европейского Севера: стратегия инновационного развития».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верткин А.Л., Скотников А.С., Фельдман М.А. Антигистаминные препараты в терапии коморбидных больных // *Лечащий врач*. 2013. № 4. С. 71–73.
2. Государственный реестр лекарственных средств [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://grls.rosminzdrav.ru/GRLS.aspx>
3. Зайцева О.В. Антигистаминные препараты в практике педиатра: Руководство для врачей. М., 2012. 42 с.
4. Леонова М.В. Современные антигистаминные препараты: выбор в изобилии предложений // *Фарматека*. 2011. № 10. С. 26–31.
5. Якушева Е.Н., Ушкалова Е.А. Использование системы дневных стандартных доз при отборе лекарственных средств // *Российский медико-биологический вестник им. акад. И.П. Павлова*. 2008. № 3. С. 25–29.
6. WHO Collaborating Centre for Drug Statistics Methodology. Available at: http://www.whocc.no/atc_ddd_index/

Lesonen A.S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

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

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

ANTI-ALLERGIC ANTIHISTAMINES MARKET RESEARCH

This research analyzes Petrozavodsk anti-allergic antihistamines' market taking into account both the trade names and international unlicensed names, the main pharmacological characteristics, drug-producing countries, and retail average prices. 86 physicians completed anonymous questionnaires to assess antihistamines' administration frequency. The research showed that first- and second-generation antihistamines are administered more often due to their low price. It was revealed that the cost of one-day treatment with the third-generation antihistamines is lower than the treatment with the first- and second-generation drugs, because the last ones have more side effects and lower antihistaminic activity. Therefore, physicians should be more informed about the cost of treatment with antihistamines belonging to different generation.

Key words: antihistamines, pharmaceutical marketing, questionnaire

REFERENCES

1. Vertkin A.L., Skotnikov A.S., Fel'dman M.A. Antihistamines in therapy comorbid patients [Antigistaminnyye preparaty of terapii komorbidnykh bol'nykh]. *Lechashchiy vrach* [Doctor]. 2013. № 4. P. 71–73.
2. Gosudarstvennyy reestr lekarstvennykh sredstv [The state register of medicines]. Available at: <http://grls.rosminzdrav.ru/GRLS.aspx>
3. Zaytseva O.V. *Antigistaminnyye preparaty v praktike pediatri: Rukovodstvo dlya vrachey* [Antihistamines drugs in pediatric practice: a guide for physicians]. Moscow, 2012. 42 p.
4. Leonova M.V. Modern antihistamines: abundance of choice [Sovremennyye antigistaminnyye preparaty: vybor v izobilii predlozheniy]. *Farmateka* [Pharmateca]. 2011. № 10. P. 26–31.
5. Yakusheva E.N., Ushkalova E.A. Use of defined daily dose system in drug selection [Ispol'zovanie sistemy dnevnykh standartnykh doz pri otbore lekarstvennykh sredstv]. *Rossiyskiy mediko-biologicheskiy vestnik im. akad. I.P. Pavlova*. 2008. № 3. P. 25–29.
6. WHO Collaborating Centre for Drug Statistics Methodology. Available at: http://www.whocc.no/atc_ddd_index/

Поступила в редакцию 21.02.2014

ВАЛЕНТИНА СТЕПАНОВНА ФЕДОРОВЫХ

старший преподаватель кафедры лучевой диагностики и лучевой терапии, онкологии, урологии и фтизиатрии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
markelov@psu.karelia.ru

ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ МАРКЕЛОВ

доктор медицинских наук, доцент кафедры лучевой диагностики и лучевой терапии, онкологии, урологии и фтизиатрии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
markelov@psu.karelia.ru

СВЕТЛАНА ИВАНОВНА КАРБАУСКЕНЕ

специалист кафедры лучевой диагностики и лучевой терапии, онкологии, урологии и фтизиатрии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
markelov@psu.karelia.ru

ТАТЬЯНА ВЛАДИМИРОВНА БАКУНОВИЧ

врач-фтизиатр, Республиканский противотуберкулезный диспансер (Петрозаводск, Российская Федерация)
Tatjana_Bokunovich@inbox.ru

ВЫЯВЛЕНИЕ ТУБЕРКУЛЕЗА У ДЕТЕЙ И ПОДРОСТКОВ В РЕСПУБЛИКЕ КАРЕЛИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРЕПАРАТА «ДИАСКИНТЕСТ»

Изучены результаты использования препарата «Диаскинтест» (ДСТ) у 551 пациента (дети и подростки), наблюдавшегося в противотуберкулезном диспансере Республики Карелия, в том числе у 29 с заболеванием ТБ, а также заболеваемость ТБ детей и подростков, имевших тубконтакт. Полученные результаты подтверждают высокую чувствительность (у всех больных с локальными формами туберкулеза ДСТ был положительным) и специфичность ДСТ (у всех детей с поствакцинальной аллергией отмечалась отрицательная реакция на ДСТ), что позволяет использовать его для дифференциальной диагностики поствакцинальной и инфекционной аллергии у детей. Использование ДСТ в комплексном обследовании детей с виражами (VIA группа) и гиперпробами на реакцию Манту (VIB группа) позволяет выявить активную туберкулезную инфекцию и существенно сократить объем последующего рентгено-томографического обследования и динамического наблюдения фтизиатром с неоправданным назначением профилактического лечения. Наиболее высокая частота положительных реакций на ДСТ из групп риска по ТБ наблюдалась в группе контактных (50,6%). У значительного числа заболевших (13 из 26) контакт с больными-бактериовыделителями был выявлен лишь ретроспективно, после выявления заболевания ТБ (1/2 из них имела контакт с больными, выделявшими штаммы МБТ с множественной лекарственной устойчивостью, 2/3 имели семейный тубконтакт). Необходимо улучшение работы по выявлению контактов и их обследованию, расширение детских учреждений санаторного типа для разобщения и изоляции детей из очагов туберкулеза.

Ключевые слова: туберкулез, Диаскинтест, дети и подростки, группы риска, заболеваемость, обследование контактных

Несмотря на сохраняющийся значительный уровень «бациллярного ядра» (52,0 на 100 тыс.) и распространенность приобретенной множественной лекарственной устойчивости (МЛУ) среди больных туберкулезом (ТБ) в Республике Карелия (РК) – 28,3 на 100 тыс. (в РФ – 23,6 на 100 тыс.), а также высокий удельный вес первичной МЛУ в РК (35,9%) (в РФ – 19,8%), заболеваемость детского населения в РК в 2012 году составила 8,2 на 100 тыс., что почти в 2 раза ниже аналогичного показателя в РФ (15,2 на 100 тыс.). Данная ситуация может быть связана с дефектами организации выявления и регистрации случаев заболевания ТБ среди детей. Поэто-

му важной задачей является поиск новых, более информативных методов выявления ТБ у детей. Известно, что основным недостатком массовой туберкулинодиагностики среди детей и подростков с целью раннего выявления туберкулеза является высокий удельный вес ложноположительных реакций (от 40 до 90%) [5], преимущественно связанных с массовой вакцинацией БЦЖ. Подтверждением этому является анализ результатов массовой туберкулинодиагностики (проба Манту с 2 ТЕ ППД-Л) и сформированных на ее основе групп диспансерного наблюдения в Республиканском противотуберкулезном диспансере (РПТД) Республики Карелия. В 2012 году по

результатам массовой туберкулинодиагностики (в общей лечебной сети выполнено 85 926 проб Манту с 2 ТЕ) выявлено 7 случаев ТБ среди детей, что составило 0,008% от числа обследованных. По результатам массовой туберкулинодиагностики и обследования по контакту с больными ТБ в 2012 году для диспансерного наблюдения сформирована группа детей и подростков в количестве 2881 человека, среди которых заболели ТБ 12 человек (0,4%) (рис. 1). Все дети и подростки проходили динамическое наблюдение и обследование у фтизиатров с применением лучевых методов диагностики. В последние годы в результате исследований по первичной структуре генома *M. tuberculosis* (МБТ) обнаружены антигены (ESAT-6 и CFP-10), закодированные в зоне RD1 генома МБТ и экспрессирующиеся при размножении МБТ, свойственные только вирулентным, размножающимся штаммам МБТ. Данные белки отсутствуют у вакцинного штамма *M. bovis* и большинства нетуберкулезных микобактерий. В большинстве зарубежных стран на основе выделенных белков (ESAT-6 и CFP-10) для выявления латентной туберкулезной инфекции и дифференциальной диагностики ТБ создан и используется QFT-тест (QuntiFERON – TB Gold In-Tube test) in vitro (специфичность до 99%, чувствительность 78%) [9], [10], требующий забора крови из вены и дорогостоящей аппаратуры. В России на основе выделенных белков (ESAT-6 и CFP-10) разработан и внедрен внутрикожный диагностический тест (Диаскинтест – ДСТ) [3], [4], техника постановки которого сходна с пробой Манту с 2 ТЕ, утвержден к применению приказом МЗ СР РФ № 855 от 29.10.2009 г. Опубликованы работы [6], [7], [8] по использованию ДСТ, обладающего, по мнению авторов, более высокой специфичностью, чем проба Манту с 2 ТЕ, для раннего выявления ТБ.

Нами изучены результаты использования препарата ДСТ у 551 пациента, находившегося на диспансерном учете (группы риска) и прошедшего обследование в ГБУЗ «Республиканский противотуберкулезный диспансер» Республики Карелия, и 29 детей и подростков с выявленным активным ТБ (рис. 2). Среди 29 детей и подростков,

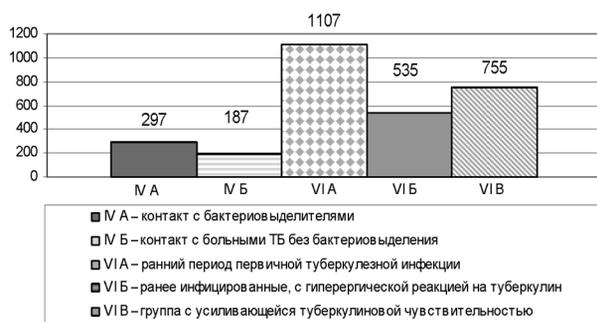


Рис. 1. Количество детей и подростков, наблюдавшихся в диспансерных группах риска по туберкулезу в РПТД (2012 г.)



Рис. 2. Количество детей и подростков, обследованных с помощью препарата «Диаскинтест»

находившихся на лечении с локальными формами ТБ, распределение форм ТБ было следующим: туберкулез внутригрудных лимфатических узлов – 18; экссудативный плеврит – 1; инфильтративный ТБ – 4; очаговый ТБ – 2; первичный туберкулезный комплекс – 4 больных. 83 пациента находились на учете по контакту с больными ТБ: в IVA – 56 чел., IVB – 27 чел. 102 ребенка наблюдались с поствакцинальной аллергией. В VIA группе – 96; в VIB – 94 ребенка и подростка. Отдельную группу составили 147 детей и подростков, инфицированных с прошлых лет, не подлежащих наблюдению у фтизиатра.

Результаты постановки ДСТ среди различных групп обследованных представлены на рис. 3. У всех детей и подростков (29 человек) с локальными формами ТБ реакция на ДСТ была положительной, что подтверждает высокую чувствительность препарата ДСТ.

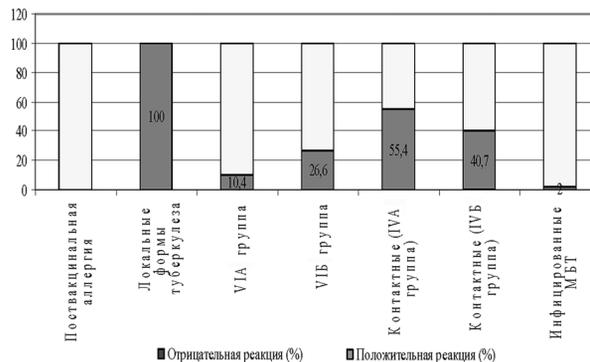


Рис. 3. Результаты Диаскинтеста среди детей и подростков в различных группах обследованных

Анализ результатов ДСТ среди контактных, наблюдавшихся в IVA и IVB группах в 2010–2013 годах – 83 чел., показал высокий удельный вес положительных результатов. Среди них положительный ДСТ отмечался у 42 чел. (50,6%), в том числе среди наблюдавшихся в IVA группе – из 56 у 31 (55,4%), в IVB группе – из 27 у 11

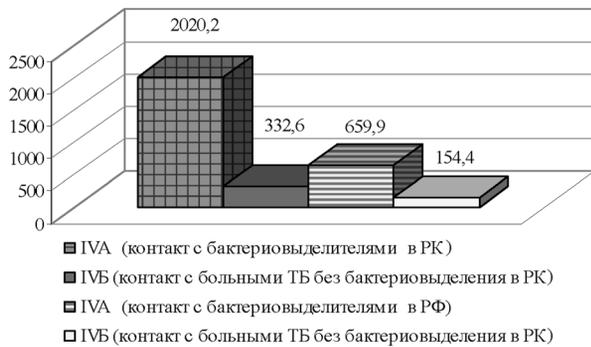


Рис. 4. Заболеваемость среди контактных по туберкулезу в РК и РК

(40,7%). Изучение заболеваемости ТБ за 2010–2013 годы, проведенное в данных группах, позволило выявить наиболее высокую заболеваемость среди контактных (рис. 4). По данным официальной статистики, за 4 года (2010–2013) в РК в IVA группе (контакт с больными ТБ бактериовыделителями) заболели локальными формами ТБ 13 детей и подростков, что составило 1010,1 на 100 тыс., превысив в 1,5 раза аналогичный показатель по РФ (659,9 на 100 тыс.) и в 123 раза показатель заболеваемости ТБ среди всего детского населения в РК (8,2 на 100 тыс.). Ретроспективный анализ позволил выявить контакт по ТБ у всех 29 заболевших локальными формами ТБ детей (см. таблицу). Среди них у 13 контакт с больными открытой формой ТБ выявлен лишь ретроспективно, в связи с этим необходимые профилактические мероприятия среди них не проводились. С учетом ретроспективно выявленных контактов у всех заболевших локальными формами ТБ детей (26 из них имели контакт с бактериовыделителями) заболеваемость в IVA группе составила 2020,2 на 100 тыс. и превыси-

Количество контактных, наблюдающихся в IVA и IVB группах ДУ и заболевших туберкулезом из контактов

	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	Всего за 2010–2012 гг. (абс.)	Заболеваемость на 100 тыс.
Наблюдалось в IVA группе	340	358	297	292	1287	
Заболело из IVA группы	1	3	6	3	13	1010,1
Выявлено ретроспективно из IVA группы	5	6	8	7	26	2020,2
Наблюдалось в IVB группе	360	247	187	108	902	
Заболело из IVB группы	1	1		1	3	

Примечание. Из 26 у 13 (50%) контакт выявлен при ретроспективном анализе. Из 26 у 11 (42,3%) – контакт с больными с МЛУ.

ла в 3 раза аналогичный показатель по РФ. Наиболее неблагоприятный фактор – выявление у 50% из них контакта с больными, выделявшими штаммы МБТ с МЛУ: из 26 заболевших 13 имели контакт с бактериовыделителями с МЛУ, абсолютное большинство из них находилось в тесном, семейном тубконтакте. В IVB группе заболели 3 чел. (332,6 на 100 тыс.), что в 2 раза превысило аналогичный показатель по РФ (154,4 на 100 тыс.). Подавляющее большинство детей и подростков проживали в социально неблагополучных семьях, в которых в абсолютном большинстве отмечался семейный тубконтакт (в IVA группе – 26 (78,6 %)). В VIA группе из 96 детей положительная реакция на ДСТ отмечалась у 10 человек (10,4%). Низкий процент положительных реакций в этой группе, возможно, обусловлен гипердиагностикой тубинфицированности по пробе Манту с 2 ТЕ, связанной с недостаточно качественным отбором детей и подростков на туберкулинодиагностику (на фоне катаральных явлений, аллергических проявлений и др.). В VIБ группе из 94 детей положительная реакция на ДСТ была у 25 человек (26,6%). У этих детей результаты ДСТ подтверждали активную туберкулезную инфекцию, что являлось одним из показаний для назначения им превентивной химиотерапии. Из 147 детей и подростков, инфицированных с прошлых лет, в 98% случаев отмечалась отрицательная реакция на ДСТ. У всех детей с установленной поствакцинальной аллергией на вакцину БЦЖ (102 ребенка) реакция на ДСТ была отрицательной, что указывает на высокую специфичность препарата ДСТ. Из всех обследованных методом ДСТ (545 детей и подростков), направленных к фтизиатру с положительными туберкулиновыми пробами, положительная реакция на ДСТ выявлена у 103 человек (18,9%), то есть в 5,3 раза реже, чем положительная проба Манту с 2 ТЕ ППД-Л.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты подтверждают высокую чувствительность (у всех больных с локальными формами туберкулеза ДСТ был положительным) и специфичность препарата «Диаскинтест» (у всех детей с поствакцинальной аллергией отмечалась отрицательная реакция на ДСТ), что позволяет использовать его для дифференциальной диагностики поствакцинальной и инфекционной аллергии у детей.

Наиболее высокий удельный вес положительных реакций на Диаскинтест из групп риска по ТБ наблюдался в группе контактных (50,6%). Заболеваемость ТБ в этой группе на территории Карелии составила 1324,8 на 100 тыс. (в IVA – 2020,2 на 100 тыс.; в IVB – 332,6 на 100 тыс.), превышая в 37–123 раза заболеваемость ТБ среди остального детского населения, что диктует

необходимость наиболее тщательного выявления контактов и их последующего обследования и наблюдения у фтизиатров.

У значительного числа заболевших детей и подростков (13 из 26) контакт с больными-бактериовыделителями был установлен лишь ретроспективно, после выявления заболевания ТБ (1/2 из них имела контакт с наиболее опасными больными, выделявшими штаммы МБТ с множественной лекарственной устойчивостью, 2/3 имели семейный тубконтакт), что свидетельствует о недостатках в организации по выявлению контактных лиц и работе с ними.

Учитывая высокую заболеваемость детей из контактов по ТБ, проживающих, как правило, в социально неблагополучных семьях, на фоне

широкого распространения туберкулеза с МЛУ в Карелии необходимо расширение детских учреждений санаторного типа для разобщения и изоляции детей из очагов туберкулеза.

Использование новой методики «Диаскинтест» в комплексном обследовании детей с выражениями (VIA группа) и гиперпробами на реакцию Манту с 2 ТЕ ППДЛ (VIB группа) позволяет выявить активную туберкулезную инфекцию и существенно сократить объем последующего углубленного рентгено-томографического обследования и динамического наблюдения фтизиатром с неоправданным назначением профилактического лечения (с неактивной туберкулезной инфекцией).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А к с е н о в а В. А., Л е в и Д. Т., К л е в н о Н. И. и др. Выявление туберкулеза и тактика диспансерного наблюдения за лицами из групп риска по заболеванию туберкулезом с использованием препарата «Диаскинтест» (аллерген туберкулезный рекомбинантный) // Туберкулез и болезни легких. 2010. № 2. С. 13–19.
2. Д о л ж е н к о Е. Н. Значение аллергена туберкулезного рекомбинантного (Диаскинтеста) в выявлении активного туберкулеза у детей // Туберкулез и болезни легких. 2012. № 9. С. 31–36.
3. К и с е л е в В. И., Б а р а н о в с к и й П. М., П у п ы ш е в С. А. и др. Новый кожный тест для диагностики туберкулеза на основе рекомбинантного белка ESAT – CFP // Молекулярная медицина. 2008. Т. 4. С. 4–6.
4. К и с е л е в В. И., Б а р а н о в с к и й П. М., Р у д ы х И. В. и др. Клинические исследования нового кожного теста «Диаскинтест» для диагностики туберкулеза // Туберкулез и болезни легких. 2009. № 9. С. 11–16.
5. Л е б е д е в а Л. В., Г р а ч е в а С. Г. Чувствительность к туберкулину и инфицированность микобактериями туберкулеза у детей // Туберкулез и болезни легких. 2007. № 1. С. 5–9.
6. О в с я н к и н а Е. С., Г у б к и н а М. Ф., Е р ш о в а Н. Г., К о б у л а ш в и л и М. Г. Опыт применения нового кожного теста «Диаскинтеста» для диагностики туберкулеза органов дыхания у детей и подростков в туберкулезном отделении // Туберкулез и болезни легких. 2010. № 1. С. 16–19.
7. П о д д у б н а я Л. В., Ш и л о в а Е. П. Туберкулезная инфекция у детей и подростков из семейных очагов // Туберкулез и болезни легких. 2011. № 1. С. 11–16.
8. С л о г о ц к а я Л. В., Л и т в и н о в В. И., Ф и л и п п о в А. В. и др. Чувствительность нового кожного теста (Диаскинтеста) при туберкулезной инфекции у детей и подростков // Туберкулез и болезни легких. 2010. № 1. С. 10–15.
9. M e n z i e s D., P a i M., C o m s t o c k G. Meta analysis: New Tests for the Diagnosis of Latent Tuberculosis Infection: Areas of Uncertainty and Research March // Annals of Internal. Medicine. 2007. Vol. 146, № 5. P. 340–354.
10. P a i M., Z w e r l i n g A., M e n z i e s D. T-cell-based assays for the diagnosis of latent tuberculosis infection: an up date // Ann. Intern. Med. 2008. August 5; 149 (3): 177–84. Epub 2008 Jun 30.

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

Markelov Yu. M., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Karbauskene S. I., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Bakunovich T. V., Republican tuberculosis dispensary (Petrozavodsk, Russian Federation)

RESULTS ON TUBERCULOSIS DETECTION IN CHILDREN AND ADOLESCENTS IN KARELIAN REPUBLIC AND EVALUATION TESTS WITH PREPARATION “DIASKINTEST” IN RISK GROUPS FOR TUBERCULOSIS

Research results of using preparation “Diaskintest” (DST) in 551 children and adolescents observed in TB dispensary of Karelian Republic (RK) are presented. The obtained results also included data on 29 diseased children and children from contact group. These results confirm high sensitivity (in all patients with localized forms of tuberculosis DST was positive) and specificity of DST (in all children with postvaccinal allergies a negative reaction to the DST was observed). This allows to differentiate postvaccinal and postinfectious allergies in children. The use of DST in children with primary infections (VI A group) and hyper reaction to Mantoux test (VI B group) revealed an active TB infection, significantly reduced the amount of X-ray tomographic surveys, and decreased dynamic observations by phthisiatrician and unnecessary use of prophylactic treatment. High frequency of positive reactions to DST was observed in the group of contact (50,6 %). The incidence of TB in this group in RK amounted to 1324,8 per 100 thousand (IVA – 2020,2 per 100 thousand, in IVB – 332,6 per 100 thousand), exceeding by 37 – 123 times the incidence of TB among children population. In the majority of cases (13 of 26) contacts with the MBT infected were identified only retrospectively. After TB detection (1/2 of them had contact with patients who carried MBT strains of multidrug-resistant (MDR) it was revealed that two thirds had a family tuberculosis contact. Given the high incidence of the disease in children who had TB contacts and who live in socially disadvantaged families it is necessary to improve efforts helping to identify their contacts. It is also essential to increase the number of health resorts for children in order to separate them from tuberculosis infected contacts and isolate them from centers of tuberculosis outbreaks.

Key words: tuberculosis, “Diaskintest”, children and adolescents, risk groups, morbidity, contact survey

REFERENCES

1. Aksenova V. A., Levi D. T., Klevno N. I. Detection of tuberculosis and other tactics and dispensary observation of persons at risk for tuberculosis using the drug "Diaskintest" (tuberculosis recombinant allergen) [Vyyavlenie tuberkuleza i taktika dispansernogo nablyudeniya za litsami iz grupp riska po zabolevaniyu tuberkulezom s ispol'zovaniem preparata "Diaskintest" (allergen tuberkuleznyy rekombinantnyy)]. *Tuberkulez i bolezni legkikh* [Tuberculosis and Lung Disease]. 2010. № 2. P. 13–19.
2. Dolzhenko E. N. Meaning tuberculosis recombinant allergen (Diaskintest) to identify active tuberculosis in children [Znachenie allergena tuberkuleznogo rekombinantnogo "Diaksintesta" v vyyavlenii aktivnogo tuberkuleza u detey]. *Tuberkulez i bolezni legkikh* [Tuberculosis and Lung Disease]. 2012. № 9. P. 31–36.
3. Kiselev V. I., Baranovskiy P. M., Pupyshev S. A. i dr. New skin test for tuberculosis diagnosis based on recombinant protein ESAT – CFP [Novyy kozhnyy test dlya diagnostiki tuberkuleza na osnove rekombinantnogo belka ESAT – CFP]. *Molekulyarnaya meditsina* [Molecular Medicine]. 2008. Vol. 4. P. 4–6.
4. Kiselev V. I., Baranovskiy P. M., Rudykh I. V. Clinical studies and other new skin test "Diaskintest" for the diagnosis of tuberculosis [Klinicheskie issledovaniya novogo kozhnogo testa "Diaksintesta" dlya diagnostiki tuberkuleza]. *Tuberkulez i bolezni legkikh* [Tuberculosis and Lung Disease]. 2009. № 9. P. 11–16.
5. Lebedeva L. V., Gracheva S. G. Tuberculin sensitivity and Mycobacterium tuberculosis infection in children. [Chuvstvitel'nost' k tuberkulinu i infitsirovannost' mikobakteriyami tuberkuleza u detey]. *Tuberkulez i bolezni legkikh* [Tuberculosis and Lung Disease]. 2007. № 1. P. 5–9.
6. Ovsyankina E. S., Gubkina M. F., Ershova N. G., Kobulashvili M. G. Experience of using the new skin test "Diaskintest" for the diagnosis of pulmonary tuberculosis in children and adolescents in the TB ward [Opyt primeneniya novogo kozhnogo testa "Diaksintesta" dlya diagnostiki tuberkuleza organov dykhaniya u detey i podrostkov v tuberkuleznom otdelenii]. *Tuberkulez i bolezni legkikh* [Tuberculosis and Lung Disease]. 2010. № 1. P. 16–19.
7. Poddubnaya L. V., Shilova E. P. Tuberculosis infection in children and adolescents from family homesteads [Tuberkuleznaya infektsiya u detey i podrostkov iz semeynykh ochagov]. *Tuberkulez i bolezni legkikh* [Tuberculosis and Lung Disease]. 2011. № 1. P. 11–16.
8. Slogotskaya L. V., Litvinov V. I., Filippov A. V. i dr. New skin test sensitivity (Diaskintest) for tuberculosis infection in children and adolescents [Chuvstvitel'nost' novogo kozhnogo testa (diaksintesta) pri tuberkuleznoy infektsii u detey i podrostkov]. *Tuberkulez i bolezni legkikh* [Tuberculosis and Lung Disease]. 2010. № 1. P. 10–15.
9. Menzies D., Pai M., Comstock G. Meta analysis: New Tests for the Diagnosis of Latent Tuberculosis Infection: Areas of Uncertainty and Research March. *Annals of Internal. Medicine*. 2007. Vol. 146, № 5. P. 340–354.
10. Pai M., Zwerling A., Menzies D. T-cell-based assays for the diagnosis of latent tuberculosis infection: an up date. *Annals of Internal. Medicine*. 2008. August 5; 149 (3): 177–84. Epub 2008. Jun 30.

Поступила в редакцию 18.03.2014

ЛЮБОВЬ ВЛАДИМИРОВНА ГОЛУБЕВА

преподаватель, Архангельский педагогический колледж, аспирант кафедры лесоводства и почвоведения Лесотехнического института, Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова (Архангельск, Российская Федерация)
gapk_2010@mail.ru

ЕЛЕНА НИКОЛАЕВНА НАКВАСИНА

доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесоводства и почвоведения Лесотехнического института, Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова (Архангельск, Российская Федерация)
nakvasina@yandex.ru

**СМЕНА НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА НА СТАРОПАХОТНЫХ ЗАЛЕЖАХ
КАРГОПОЛЬСКОГО РАЙОНА АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ**

Рассмотрена смена ценофлоры старопахотных залежей в средней подзоне тайги Архангельской области (Каргопольский район), характеризующейся высокоплодородными дерново-подзолистыми почвами, сформированными на карбонатной морене. Объектом исследования являются 15–130-летние залежи (27 ПП), вышедшие из активного сельскохозяйственного оборота. Для геоботанического описания использовались общепринятые методики. Исследования показали, что на старопахотных залежах на протяжении длительного периода (более 100 лет) происходит смена ценофлоры или вторичная сукцессия, которая имеет определенные этапы сукцессионного перехода. На начальной стадии интенсивно разрастаются луговые травы и долгое время (до 40 лет) сохраняются виды, используемые в севообороте. Формируется *Gramineae – Asteraceae – Rosaceae – Leguminosae* ассоциация с наибольшим числом сеgetальных растений в ее составе. Разнотравье представлено луговыми травами. В 40 лет происходит резкая смена фитоценоза, что доказывается при анализе сходства ценофлор. Формируется *Asteraceae – Leguminosae* ассоциация с включением лесных трав и появлением мохово-лишайникового подъяруса. Напочвенный покров состоит преимущественно из теневыносливых видов. Через 60 лет (после смыкания древостоя) в напочвенном покрове начинают преобладать лесные виды, происходит стабилизация лесной обстановки. В напочвенном покрове доминируют аборигенные виды, сеgetальные вымещаются ближе к опушкам или исчезают совсем. Однако даже в спелом насаждении среди доминантов напочвенного покрова встречаются луговые виды трав.

Ключевые слова: залежные поля, напочвенный покров, сукцессия, динамика, виды, сходство ценофлор

По данным ряда авторов, в Российской Федерации в настоящее время на площади более 10 млн га сельскохозяйственных угодий идет процесс зарастания древесной и кустарниковой растительностью. Эти процессы происходят в различных лесорастительных зонах, имеют принципиальные отличия и изучены недостаточно, особенно в отношении трансформации травяного покрова в процессе смены постагрогенной залежи лесом [3], [4], [5], [7], [8]. Вторичная сукцессия постагрогенных залежей происходит поэтапно, но в степной и таежной зонах разительно отличается. В условиях степной и лесостепной зон первые 2–3 года пашня зарастает одно- и двулетними видами, в последующие 5–7 лет – корневищными, которые затем сменяются рыхло-кустовыми и плотнокустовыми злаками [9; 180]. В подзоне южной тайги, где зарастание залежей происходит с участием древесных и кустарниковых пород, Н. Н. Новоселова по времени, прошедшему с момента прекращения использо-

вания, выделяет четыре стадии зарастающих угодий [7]. По ее данным, уже на четвертой стадии (15–20 лет) происходит формирование молодого сомкнутого леса (высота деревьев превышает 12 м) и появляются лесные виды трав при сохранении луговых.

Трансформация растительности на залежных полях более северных территорий до сих пор не изучена.

Наши исследования посвящены изучению напочвенного покрова постаграрных земель Каргопольского района, расположенного на юго-западе Архангельской области (подзона средней тайги). Одной из особенностей района являются почвообразующие породы, представленные карбонатной локальной мореной, распространенной в районах выхода известняков на поверхность. На карбонатной морене формируются высокопродуктивные дерново-карбонатные и дерново-подзолистые остаточнок-карбонатные почвы, по

свойствам существенно отличающиеся от зональных подзолистых.

История залежеобразования (отчуждения сельскохозяйственных земель из активного пользования) в районе позволила подобрать сукцессионный ряд пробных площадей различных сроков забрасывания (до 130 лет). Наиболее старые залежи образовывались в результате естественного процесса переселения жителей и утрат мелких деревень, позднее – банкротства сельскохозяйственных предприятий.

Геоботанические описания выполняли по общепринятой методике [6], изучение ценофлоры согласно [2]. Латинские названия растений напочвенного покрова даны по С. К. Черепанову [10]. Для оценки разнообразия видового состава использовали индексы: Шеннона, Жаккара, статистическую значимость средних значений показателей устанавливали, используя критерий Стьюдента. На основе индекса Шеннона вычисляли показатель выравненности [1].

Видовое разнообразие напочвенного покрова представлено более чем 20 семействами. В табл. 1 приведен список 10 ведущих семейств растений, формирующих растительные ценозы на старопашотных залежах разного возраста. Самые многочисленны из них: Gramineae Juss. (Poaceae Barnh.) (17 видов), Leguminosae Juss. (8 видов) и Asteraceae Dumort (13 видов). Остальные растительные семейства представлены меньшим числом видов.

Большинство многолетних трав семейства злаковых и бобовых (*Dactylis glomerata* L., *Festuca pratensis* Huds., *Festuca rubra* L., *Phleum pratense* L., *Vicia sativa* L., *Trifolium pratense* L.) использовались в севооборотах, поэтому некоторые виды (*Dactylis glomerata* L., *Trifolium pratense* L.) спустя 25–40 лет продолжают доминировать и имеют среднее проективное покрытие 30–20% и 10–15% соответственно. На залежах 60–130 лет сохраняется доминирование вида только *Trifolium*

pratense, среднее проективное покрытие которого на III варьирует от 30 до 25%. Встречаются старопашотные 80–130-летние залежи с проективным покрытием *Trifolium pratense* до 80% под пологом древостоя.

По мере сукцессионного развития залежей прежде всего резко уменьшается число видов семейства Gramineae: с 10–12 видов на ранних стадиях (в возрасте залежей до 40 лет) до 5 видов в возрасте залежей 80–130 лет, заросших лесом. Причем динамика смены неравномерна. В возрасте 40–60 лет залежеобразования происходит резкое снижение их количества, что подтверждается рассчитанным критерием Стьюдента (см. табл. 1). Между числом видов II–III сроков забрасывания различия статистически значимы ($t_{0,05} = 2,6$ при $t_{st} = 2,17$). Далее численность видов в напочвенном покрове остается достаточно стабильной, что связано с формированием на залежах лесной обстановки за счет смыкания крон деревьев.

При анализе ценофлоры все виды на старопашотных залежах были разделены на биогруппы, при этом выделяли: аборигенные (автохтонные), рудеральные, сегетальные, адвентивные (иммигранты) и виды-космополиты.

На всех залежах разных возрастов преобладают аборигенные (местные) виды, характерные для средней подзоны тайги (рис. 1). Число сегетальных (*Avena tatarica* L., *Pimpinella saxifraga* L., *Achillea millefolium* L. и др.) и рудеральных (*Arctium lappa* L., *Urtica dioica* L.) видов сохраняется до 40 лет, затем постепенно сокращается. Из адвентивных видов встречается только *Heracleum sosnowskyi* Manden. на залежах 15–25 лет. С течением времени он исчезает в зарослях и сохраняется только на открытых местах, лесных опушках, около лесовозных дорог. Неморальные виды на всей изученной территории отсутствуют.

Таблица 1
Динамика представленности видов ведущих семейств на залежах различных лет забрасывания

Семейство	Среднее число видов, шт.					Существенность различия (эмпирические значения критерия Стьюдента, t_{st}) между группами залежей по возрасту			
	I*	II	III	IV	V	I–II	II–III	III–IV	IV–V
Gramineae	12	10	4	3	5	1,1	2,6**	0,2	0,1
Asteraceae	12	7	4	2	4	14,1	1,3	0,6	0,1
Rosaceae	7	5	8	6	7	1,9	1,7	9,0	0,5
Leguminosae	6	4	5	4	3	1,3	0,5	0,5	0,2
Umbelliferae	4	3	2	1	2	0,6	0,5	0,2	0,1
Ranunculaceae	3	2	1	4	3	0,4	0,3	1,4	0,8
Equisetaceae	1	2	1	3	1	0,5	0,5	1,4	1,2
Orchidaceae	2	2	0	0	1	0,3	3,3	0,3	0,3
Pyrolaceae	0	0	3	2	1	0,3	2,8	1,8	0,3
Liliaceae	0	0	2	1	2	0,3	3,4	0,6	0,4

Примечание. * – длительность залежи: I – 15–25 лет, II – 25–40 лет, III – 40–60 лет, IV – 60–80 лет, V – 80–130 лет. ** – жирным шрифтом выделены показатели различия, достоверные при 5% уровне значимости.

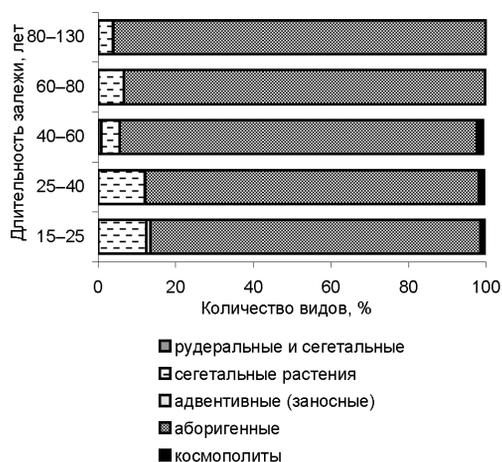


Рис. 1. Представленность растений по биогруппам в динамике залежеобразования

Все виды растений были распределены на эколого-ценотические группы: лесные, луговые, комбинированные (растут на лугу и в лесу) (рис. 2). Залежные пахотные земли постепенно зарастают сначала луговыми травами (*Leucanthemum Hill vulgare* Lam., *Campanula patula* L., *Achillea L. s. l. millefolium* L., *Alchemilla glomerulans* Bus., *Briza media* L., *Centaurea scabiosa* L., *Campanula persicifolia* L. и др.), затем появляются лесные (*Athyrium filix-femina* (L.) Roth, *Oxalis acetosella* L., *Maianthemum Wigg. bifoilium* (L.) F. W. Schmidt, *Pyrola rotundifolia* L. и др.).

Луговые травы начинают терять свое преимущество в травостое уже через 25 лет залежеобразования. Достоверность различия по числу луговых трав между залежами I–II групп возраста доказана ($t_{0,05} = 14,2$ при $t_{st} = 1,9$). Смена луговой ценофлоры на лесную, в состав которой включаются лесные виды трав (*Rubus saxatilis* L., *Trientalis europaea* L., *Paris quadrifolia* L. и др.),

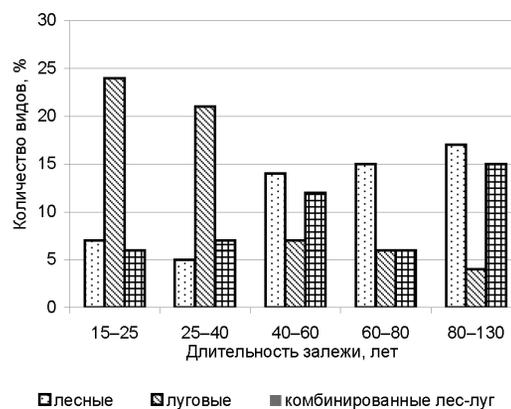


Рис. 2. Принадлежность растений к различным эколого-ценотическим группам

происходит после 40 лет, при этом в напочвенном покрове долгое время сохраняются виды, применяемые в севообороте до забрасывания земель (*Dactylis glomerata* L. и *Trifolium pratense* L.). Идет формирование лесной обстановки под пологом древостоя. Различия доказываются критерием Стьюдента при 5% значимости по всем представленным эколого-ценотическим группам: $t_{0,05} = 3,01; 3,70; 3,00$ при табличном $t_{st} = 2,05$ (возраст залежей III–IV, табл. 2).

Видовое разнообразие трав связано как с запасом семян в почвах залежей, так и с заносом их из окружающих ценозов. Залежи всех сроков забрасывания имеют высокое разнообразие трав, что доказывается информационной мерой разнообразия Шеннона (табл. 3), согласно которому разнообразие сообщества тем выше, чем больше в нем количество видов и выше его выравнивание [1]. Это подтверждается показателем выравнивания, указывающим на численное обилие видов, который во всех случаях приближается к 1 ($E = 0,8...0,9$).

Сравнение представленности видов различных ценофлор в динамике залежеобразования (критерий Стьюдента, 5%)

Таблица 2

Эколого-ценотическая группа	Критерий Стьюдента							
	Эмпирические значения, t_{st}				Табличные значения, $t_{0,05}$			
	I*–II	II–III	III–IV	IV–V	I–II	II–III	III–IV	IV–V
Лесные	1,11	0,4	3,01	-2,4	2,09	2,2	2,05	2,1
Луговые	14,2	0,8	3,70	2,2	1,9	2,01	2,05	2,05
Комбинированные (лес – луг)	0,66	0	3,00	-1,3	2,08	2,02	2,05	2,01

Примечание. * – длительность залежи: I – 15–25 лет, II – 25–40 лет, III – 40–60 лет, IV – 60–80 лет, V – 80–130 лет.

Индекс Шеннона биоразнообразия напочвенного покрова (при $t_{0,05} = 1,9$)

Таблица 3

Длительность залежи, лет (группа)	Коэффициент Шеннона и стандартная ошибка, H	Показатель выравнивания коэффициента Шеннона, E	Коэффициент Стьюдента ($t_{0,05}$) между группами залежей разного возраста		
15–25 (I)	3,90 ± 0,72	-0,90	10,9*	0,07	1,14
25–40 (II)	3,41 ± 0,64	-0,86			
40–60 (III)	3,20 ± 0,65	-0,82			
60–80 (IV)	2,96 ± 0,52	-0,80			
80–130 (V)	3,26 ± 0,63	-0,86			6,2

Примечание. * – жирным шрифтом выделены различия индекса Шеннона, доказанные на 5% уровне значимости.

Информационная мера разнообразия – показатель Шеннона – в природных популяциях обычно варьирует в пределах 1,5–3,5, редко превышая эту цифру [1]. В нашем случае на свежих залежах показатель превышает значения природных сообществ и достигает $3,90 \pm 0,72$. Позднее показатель Шеннона закономерно снижается, достигая наиболее низких значений в залежах 60–80 лет ($H = 2,96 \pm 0,52$). Наиболее сильно видовое разнообразие меняется в 15–25 лет, то есть на начальных стадиях сукцессии, и в 60–80 лет, когда происходит стабилизация лесной обстановки. Так, доказано различие (табл. 3) между показателями видового разнообразия залежей I и II сроков забрасывания ($t_{0,05} = 10,9$) и IV и V сроков забрасывания ($t_{0,05} = 6,2$).

В первые годы залежеобразования происходит стабилизация ценоза, тогда как в 40–60 лет после забрасывания полей после пахоты – постепенная смена флористического состава (рис. 3), что подтверждается коэффициентом Жаккара, который показывает сходство видового состава сообществ. Высокий процент сходства установлен между относительно молодыми залежами (15–40 лет) (60%), а также между старыми залежами (60–130 лет) (56%). Снижение показателя сходства наблюдается в период залежеобразования с 40 до 60 лет. Сходство видового состава между молодыми и старыми залежами (начало и конец сукцессии), согласно коэффициенту Жаккара, одинаково низкое и составляет 7%.

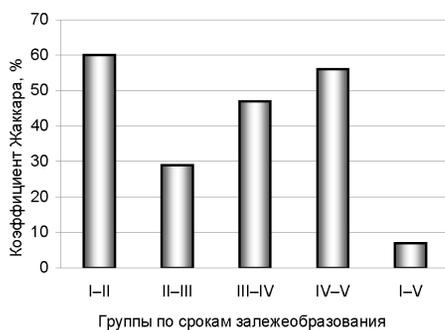


Рис. 3. Оценка видового сходства сообществ по срокам длительности залежи: I – 15–25 лет, II – 25–40 лет, III – 40–60 лет, IV – 60–80 лет, V – 80–130 лет

Таким образом, исследования показали, что на старопахотных залежах происходит смена ценофлоры, или вторичная сукцессия, которая имеет определенные этапы сукцессионного перехода.

В 15–25 лет после забрасывания сельскохозяйственных угодий на стадии залужения формируется Gramineae – Asteraceae – Rosaceae – Leguminosae ассоциация с наибольшим числом сеgetальных растений в ее составе. Разнотравье представлено луговыми травами. Высота травос-

тоя и повышенная плотность сухой ветоши мешают естественному возобновлению древесных пород. На пробных площадях в большей степени растут подлесочные виды вегетативного происхождения, такие как ивы.

В 25–40 лет стадия залужения продолжается с формированием Gramineae – Asteraceae – Rosaceae – Leguminosae ассоциации. В составе разнотравья все также присутствуют луговые светолюбивые виды трав. Высота травостоя сохраняется, что препятствует росту древесного яруса. Смыкания крон древесных пород не происходит. Между 15–40-летними залежами наблюдается высокий процент видового сходства, что объясняется высоким плодородием почвы, сохранившимся после сельскохозяйственного использования, наличием семян трав в почве и отсутствием явной конкуренции видов (большие площади залежных полей).

После 40 лет залежеобразования происходит резкая смена фитоценозов и формируется Rosaceae – Leguminosae ассоциация с включением лесных трав и появлением мохово-лишайникового подъяруса. Напочвенный покров состоит преимущественно из теневыносливых видов. В два раза снижается высота травостоя. Конкурентные отношения между травяным и древесным ярусами исчезают. Происходит смыкание крон древесных пород. Данный период можно считать переходным между луговым и лесным фитоценозом.

На залежах старше 60 лет под пологом древесного яруса формируется лесная обстановка, наступает стабилизация лесного напочвенного покрова. В составе травостоя доминируют аборигенные виды. Сеgetальные виды вымещаются ближе к опушкам или выпадают совсем. Выпадения луговых трав полностью не происходит, но в их числе больше трав теневыносливых и комбинированных (растущих на лугу и в лесу). Древесный ярус полностью сформирован, кроны сомкнуты. Полная смена фитоценозов подтверждается низким коэффициентом Жаккара (7%), между 15-летними и 80–130-летними залежами.

Залежи до 40-летнего срока забрасывания могут быть использованы как сенокосы, под лесокультурное или плантационное лесоразведение, а при необходимости и слабом зарастании древесными породами – восстановлены для активного сельскохозяйственного пользования (пашни). Однако возникнет проблема засоренности полей, подбора технологий создания лесных культур, возможно, подбора гербицидов. Залежи старшего возраста, заросшие лесом, потребуют лесоводственных уходов за древесным ярусом для формирования высокополнотных древостоев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. География и мониторинг биоразнообразия / Под ред. Н. С. Касимова. М., 2002. 432 с.
2. Гнатюк Е. П., Крышень А. М. Методы исследования ценофлор (на примере растительных сообществ вырубок Карелии): Учебно-методическое пособие. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2005. 68 с.

3. Горяинова И. Н., Леонова Н. Б., Феодоритов В. М. Процессы зарастания сельскохозяйственных земель в средней тайге Архангельской области // Вестник Московского университета. М., 2012. Вып. 3. С. 41–47.
4. Люри Д. И., Горячкин С. В., Короваева Н. А. и др. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 426 с.
5. Морозов А. М. Формирование насаждений на землях, исключенных из сельскохозяйственного оборота, в подзоне предлесостепных сосново-березовых лесов Свердловской области: Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. Екатеринбург: Уральский гос. лесотехнический ун-т, 2008. 20 с.
6. Наквасина Е. Н., Шаврина Е. В. Геоботанические исследования. Архангельск: Поморский гос. ун-т, 2001. 43 с.
7. Новоселова Н. Н. Формирование лесных насаждений на землях, вышедших из-под сельскохозяйственного использования, в таежной зоне Пермского края: Автореф. дисс. ... канд. экон. наук. Екатеринбург, 2007. 20 с.
8. Соколов Н. Н. Рост и продуктивность сосновых древостоев по старым пашням // Лесной журнал. 1978. Вып. 4. С. 22–25.
9. Сукачев В. Н. Растительные сообщества (введение в фитоценологию). 4-е изд. Л.; М.: Книга, 1928. 232 с.
10. Черепанов С. К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья, 1995. 992 с.

Golubeva L. V., Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov (Arkhangelsk, Russian Federation)
Nakvasina E. N., Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov (Arkhangelsk, Russian Federation)

GROUND COVER CHANGE ON FALLOW FIELDS OF KARGOPOL DISTRICT OF ARKHANGELSK REGION

The paper analyses old cultivated herbaceous vegetation deposits located in the middle taiga subzone of Arkhangelsk region (Kargopol district), which are characterized by extremely fertile sod podsol on the carbonate moraine base. While carrying out the research, ancient deposits (15–130 years old; sample plots – 27) no longer used for agricultural purposes were investigated. Conventional geobotanic description techniques were applied. The research revealed occurrences of the herbal phytocenosis rotation (secondary succession) with specific succession in transition stages. The change was observed in the old cultivated herbaceous vegetation deposits for a significant period of time (over 100 years). In the early stages, meadow grass grows intensively, and agricultural species used in the crop rotation survive up to 40 years. Simultaneously, Gramineae – Asteraceae – Rosaceae – Leguminosae association is formed, its composition includes the largest number of weed species and forbs composed of meadow grass. Then, an abrupt phytocenosis change takes place after 40 year term of rotation. This conclusion is proven by the analysis of phytocenosis similarities. At this stage, Rosaceae – Leguminosae association including forest grass species and the moss lichen sublevel are formed. The canopy predominantly consists of the shade tolerant species. Furthermore, when the stand canopy closed (60 years later), the native forest species started to dominate in the ground cover. The forest conditions began to stabilize. However, the obtained results showed that meadow grass species invade dominating ground cover.

Key words: fallow fields, ground cover, succession, dynamics, species, similarity coenofloras

REFERENCES

1. *Geografiya i monitoring bioraznoobraziya* [Geography and monitoring of biodiversity]. Moscow, 2002. 432 p.
2. Gnatyuk E. P., Kryshen' A. M. *Metody issledovaniya tseoflor (na primere rastitel'nykh soobshchestv vyrubok Karelii)* [Methods for investigating coenofloras (example of plant communities in harvested forest areas in Karelia)]. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2005. 68 p.
3. Goryainova I. N., Leonova N. B., Feodoritov V. M. Processes of overgrowing of agricultural land in the middle taiga Arkhangelsk region [Protsessy zarastaniya sel'skokhozyaystvennykh zemel' v sredney tayge Arkhangel'skoy oblasti]. *Vestnik Moskovskogo universiteta* [The Moscow University Herald]. 2012. № 3. P. 41–47.
4. Lyuri D. I., Goryachkin S. V., Korovaeva N. A. i dr. *Dinamika sel'skokhozyaystvennykh zemel' Rossii v XX veke i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochv* [Dynamics of Russian agricultural land in the XX century and post-agrogenic recovery of vegetation and soils]. Moscow, GEOS Publ., 2010. 426 p.
5. Морозов А. М. *Formirovanie nasazhdeniy na zemlyakh, isklyuchennykh iz sel'skokhozyaystvennogo oborota, v podzone predlesostepnykh sosново-berezovykh lesov Sverdlovskoy oblasti: Avtoref. diss. ... kand. s.-kh. nauk* [Formation of plantations on lands excluded from agricultural use in the subzone of pine and birch forests of Sverdlovsk region region. PhD in Agriculture. Sci. diss.]. Ekaterinburg, 2008. 20 p.
6. Nakvasina E. N., Shavrina E. V. *Geobotanicheskie issledovaniya* [Geobotanical studies]. Arkhangelsk, 2001. 43 p.
7. Новоселова Н. Н. *Formirovanie lesnykh nasazhdeniy na zemlyakh, vyshedshikh iz-pod sel'skokhozyaystvennogo ispol'zovaniya, v taezhnoy zone Permskogo kraja: Avtoref. diss. ... kand. ekon. nauk* [Formation of forest plantations on lands out of agricultural use in the taiga zone of Perm Krai. PhD in Agriculture. Sci.diss.]. Ekaterinburg, 2007. 20 p.
8. Соколов Н. Н. Growth and productivity of pine stands on old arable land [Rost i produktivnost' sosnovykh drevostoev po starym pashnyam]. *Lesnoy zhurnal* [Journal of forest]. 1978. № 4. P. 22–25.
9. Сукачев В. Н. *Rastitel'nye soobshchestva (vvedenie v fitotsenologiyu)* [Plant communities (introduction to phytocenology)]. Leningrad, Moscow, Kniga Publ., 1928. 232 p.
10. Черепанов С. К. *Sosudistye rasteniya Rossii i sopredel'nykh gosudarstv (v predelakh byvshego SSSR)* [Vascular plants of lands out of agricultural use states (the former USSR)]. St. Petersburg, 1995. 992 p.

Поступила в редакцию 28.03.2014

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

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОЛОЧНОГО ЖИВОТНОВОДСТВА*

Рассматриваются проблемы использования современных информационных технологий, компьютерных программ в молочном животноводстве. Цель работы – показать необходимость, преимущества, процедуру и дать характеристику разработанных за последние годы автоматизированных систем управления производством и селекцией в молочном животноводстве, в частности программы «Селэкс», разработанной Региональным центром ООО «Плино» Ленинградской области. Показаны преимущества этой программы, процедура использования для автоматизации управления производством животноводческой продукции и селекционным процессом, пригодность для информационного обеспечения животноводства на уровне от отдельного хозяйства до страны в целом.

Ключевые слова: информатизация в животноводстве, сельскохозяйственные предприятия, «Селэкс», обработка данных животноводства

На современном этапе развития сельскохозяйственных предприятий одним из условий их успешного функционирования является информационное обеспечение, которое включает сбор и обработку информации, необходимой для принятия обоснованных управленческих решений [2], [3].

В странах с развитым животноводством (США, Канада, Швеция, Голландия, Дания и др.) племенным может считаться только животное, в обязательном порядке зарегистрированное в национальной информационной системе. Перечисленные выше страны составляют костяк Международного комитета информационного обеспечения в племенном животноводстве (ICAR – International Committee in Animal Recording), находящегося в непосредственном ведении Всемирной и Европейской ассоциаций животноводства (WAAP и EAAP). Этой организацией выработаны определенные требования, рекомендации и нормативные документы, обеспечивающие информационное пространство в племенном животноводстве всего мира [4]. Доказано, что одним из методов повышения эффективности животноводства и племенной работы является использование достижений науки и техники на базе информационных технологий, информационных систем племенного молочного скотоводства.

Для анализа данных первичного зоотехнического и племенного учета, результатов разведения, методов отбора и подбора, оценки быков-производителей по качеству потомства, телок по собственной продуктивности специалисты-скотоводы должны обрабатывать в короткий срок огромный цифровой материал. Только при этом

племенная работа может быть эффективной. Учитывая большой объем данных, своевременную и полную обработку полученной информации, проведение анализа без механизации и автоматизации учета провести практически невозможно. В связи с этим все более широкое применение для регулярного сбора информации племенного учета, ее обработки и анализа возлагается на ЭВМ. За годы использования ЭВМ в племенной работе сменилось уже не одно поколение вычислительных машин. В настоящее время ЭВМ выполняет арифметические операции в миллион раз быстрее человека. И эти возможности обработки информации может использовать каждое хозяйство нашей страны. Однако многие специалисты до сих пор недостаточно осведомлены о возможностях, преимуществах и эффективности использования автоматизированных систем управления производством. Целью работы было показать необходимость, преимущество, процедуру и дать характеристику разработанных за последние годы автоматизированных систем управления производством и селекцией в молочном животноводстве, в частности программы «Селэкс».

Уже сегодня автоматические системы могут распознавать каждую корову, определять и учитывать продуктивность при каждом доении, рассчитывать индивидуальные рационы и выполнять множество других операций. Анализ каждого звена в сложных технологических схемах управления животноводством, их интеграция в единую систему управления являются основным требованием к информационно-управляющим системам в животноводстве [2]. Следует отметить, что управление будет наиболее успеш-

ным, если применять информационные технологии, внедренные непосредственно на сельскохозяйственном предприятии, то есть на первом уровне управления.

В управлении селекционно-племенной работой нашей страны широко используется компьютеризированная система «Селэкс», позволяющая автоматизировать многие процессы при ведении племенного учета. Разработчик программы – ООО «Региональный центр информационного обеспечения племенного животноводства Ленинградской области “ПлиноР”». Компания работает в сфере информационных технологий на сельскохозяйственном рынке России уже более 16 лет.

Программа «Селэкс» решает широкий спектр различных задач племенной работы, начиная от способов мечения животных и заканчивая подготовкой сводных заключительных отчетов по бонитировке скота молочных и мясных пород определенных стад, хозяйств регионов и в целом страны, а также разработку селекционных программ по совершенствованию пород и массивов крупного рогатого скота хозяйств, районов, областей, краев, республик РФ. «Селэкс» выполняет также работу по объединению информации о племенной работе, искусственном осеменении, ветеринарии, кормлении, содержании, экономике отраслей молочного и мясного скотоводства.

Авторский коллектив разработчиков (ООО «РЦ “ПлиноР”») обеспечивает оперативную обратную связь с каждым пользователем системы «Селэкс» и при необходимости осуществляет адаптацию функционирующих программ к хозяйственным условиям. Программный комплекс постоянно развивается, к нему подключаются дополнительные программные модули, которые решают новые проблемы в соответствии с требованиями рынка, а также государственных племенных организаций РФ и регионов [2]. Таким образом, «Селэкс» – постоянно изменяющийся и развивающийся программный комплекс, целью которого является комплексное информационное обеспечение животноводства на всех уровнях: хозяйство, район, область (республика) и Федерация в целом [2].

Стержнем программы «Селэкс» являются данные племенного учета, так как только при целенаправленной селекционной работе ведутся наиболее подробные записи о каждом животном стада. Программа позволяет создать замкнутый цикл обработки информации по крупному рогатому скоту в хозяйстве. В базе данных накапливаются все основные сведения по животным: происхождение, генотип, развитие, экстерьер, комплексная оценка, продуктивность, события.

Автоматизация обработки данных первичного учета позволяет: вести электронную картотеку животных; сократить затраты ручного труда на ведение документации; оперативно получать объективную информацию о состоянии каждого

животного и отрасли в целом; получать углубленный анализ информации для руководителей хозяйств различных уровней управления; получать расчеты и прогнозы, недоступные при ручной обработке информации.

Для сбора, подготовки и выдачи информации для управления и принятия решений программой предусмотрены несколько модулей: «Структура картотеки»; Модуль «Молодняк»; Модуль обмена данными (Экспорт и импорт данных); Автономный ввод событий; «Оборот стада»; «Экономика»; «Вакцинация»; «Ветеринария» [2].

В модуле **управление производством** отражается состояние производства в каждом структурном подразделении. Для повышения эффективности оперативного управления животноводством на сельхозпредприятии в «Селэксе» выдается величина упущенного дохода, а также рассчитывается влияние параметров, характеризующих производственное использование животных, на экономическую эффективность животноводства.

В модуле **управление племенной работой** последовательно выдаются аналитические данные, позволяющие специалистам заниматься одновременно экономикой селекционной работы и воспроизводством в стаде. Эти данные накапливаются в течение года, они служат результативной оценкой работы по воспроизводству доярок, ветспециалистов.

Модуль **бонитировка**. На основании базы данных, накопленной в «Селэксе», определяется племенная ценность, то есть проводится бонитировка каждого животного. Любые изменения в методике бонитировки оперативно вносятся в действующий программный комплекс. В результате расчета выдается документ «Характеристика пробонитированных коров», в котором содержатся данные по каждому животному и итоговый комплексный класс.

Модуль **анализ бонитировки** позволяет проводить анализ сохраненных годовых бонитировочных таблиц за ряд лет.

Прогноз продуктивности. На основе баз данных, накопленных в «Селэксе», прогнозируются производственные процессы в животноводстве на любой период (месяц, квартал, год и т. д.). Выходные документы делятся на две группы: индивидуальные прогнозы по коровам и сводные прогнозы продуктивности и производства молока, сводные планы отелов и осеменений по каждой группе, ферме, хозяйству.

Программа «Селэкс» имеет несколько версий, поэтому удобна для разных пользователей.

Селэкс (многохозяйственная версия) предназначена для областных и районных племенных служб и региональных центров с целью просмотра или ведения баз данных подчиненных хозяйств. Позволяет контролировать и полноценно работать с несколькими базами разных хозяйств.

Дает возможность оперативно и своевременно отслеживать селекционный процесс, анализировать полноценность управления производством.

Селэкс (сетевая версия) – для хозяйств, имеющих несколько компьютеров, компьютерную локальную сеть и большое поголовье (более 1000 голов крупного рогатого скота). Позволяет работать одновременно с одной базой данных с нескольких компьютеров, расположенных недалеко друг от друга.

Таким образом, «Селэкс» не только автоматизирует обработку данных, повышает качество информационного обеспечения отдельных служб, но и обеспечивает специалистов удобными для исполнения данными смежных служб.

В животноводческих хозяйствах Республики Карелия уже более 10 лет идет перевод селекционного процесса на компьютерный учет по программе «Селэкс». По данным Министерства сельского, рыбного и охотничьего хозяйства Республики Карелия, 12 хозяйств работают

с программой «Селэкс». Внедрение системы «Селэкс» в полном объеме на племенных заводах по разведению айрширского скота «Мегрега» и «Ильинское» стало важным фактором роста продуктивности коров (до 7700–8000 кг молока). На базе этих стад выведен один из лучших в России Карельский тип айрширской породы, запатентованный и зарегистрированный в Государственном реестре охраняемых селекционных достижений [1].

Использование программы улучшает организацию управления отраслью молочного скотоводства и, как следствие, ведет к улучшению показателей воспроизводства в стаде, увеличению продуктивности животных и повышению экономической эффективности ведения животноводства.

Таким образом, эффективное использование информационных технологий становится одним из ключевых факторов достижения и удержания конкурентного преимущества производства.

* 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. Болгов А. Е. Выведен новый тип «Карельский» айрширской породы скота // Сельскохозяйственные Вести. 2013. № 2. С. 12.
2. Мороз М. Т., Тюренкова Е. Н. Управление молочным животноводством от «Хозяйства» до «Региона» (с применением информационных технологий). СПб., РЦ «Плино», 2013. 152 с.
3. Суrowцев В. Н. Современные подходы к управлению в молочном животноводстве // Сельскохозяйственные Вести. 2013. № 3 (94). С. 60–61.
4. Щепкин С., Щукина И., Куликова Н. Информационные технологии в животноводстве // Животноводство России (Спецвыпуск). 2013. С. 19–21.

Novozhilova O. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

AUTOMATED CONTROL SYSTEMS AS FACTOR OF DAIRY FARMING EFFICIENCY INCREASE

A problem of using modern information technologies, computer programs in dairy farming is studied. The aim of this work was to show the necessity, advantages, and characteristics of the recently developed automated control systems employed by dairy farming for breeding and livestock production. The program “Selex” developed by the Regional Center LLC “Plinor” of Leningrad region is considered. The author substantiates advantages of this program implementation. The procedure for automated control of livestock production and selection process is described. It is proven that advanced information technologies can be effectively used for dairy farming purposes both at the level of individual farms and the whole country.

Key words: informatization in animal husbandry, agricultural enterprises, dairy farming, “Selex”, data processing of livestock, modern dairy farm, computer programs

REFERENCES

1. Bolgov A. E. Breeding of a new type of “Karelian” Ayrshire cattle [Vyveden novyy tip “Karel’skij” ayrshirskoy porody skota]. *Sel’skokhozyaystvennye Vesti*. 2013. № 2. P. 12.
2. Moroz M. T., Tyurenkova E. N. *Upravlenie molochnym zhivotnovodstvom ot “Khozyaystva” do “Regiona” (s primeneniem informatsionnykh tekhnologiy)* [Management of dairy cattle from “farms” to “regions” (with the use of information technology)]. St. Petersburg, RC “Plinor” Publ., 2013. 152 p.
3. Surowtsev V. N. Current approach to management of dairy cattle [Sovremennyye podkhody k upravleniyu v molochnom zhivotnovodstve] *Sel’skokhozyaystvennye Vesti*. 2013. № 3 (94). P. 60–61.
4. Shchepkin S., Shchukina I., Kulikova N. Information technology in cattle breeding [Informatsionnye tekhnologii v zhivotnovodstve] *Zhivotnovodstvo Rossii (Spetsvypusk)*. 2013. P. 19–21.

Поступила в редакцию 13.08.2014

АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ АНДРЕЕВ
аспирант кафедры механики строительного факультета,
Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
AAA.07.04.1989@ya.ru

ГЕННАДИЙ НИКОЛАЕВИЧ КОЛЕСНИКОВ
профессор, зав. кафедрой механики строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
kgn@petsu.ru

АНДРЕЙ АНДРЕЕВИЧ ЧАЛКИН
студент лесинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
chalkin10@yandex.ru

ДРЕВЕСНО-ЦЕМЕНТНЫЙ КОМПОЗИТ С ДОБАВКОЙ СТЕАТИТА КАК КОНСТРУКЦИОННЫЙ И ДЕМПФИРУЮЩИЙ МАТЕРИАЛ*

Экспериментально исследована при одноосном сжатии прочность и жесткость образцов древесно-цементного композита как ортотропного материала. Диаграммы «сила (Н) – деформация (мм)» получены на испытательной машине SHIMADZU AG50kNX. Испытаны образцы в форме куба с ребром 100 мм в возрасте 28 суток. Испытание прекращалось, если деформация сжатия достигала 10 % (10 мм). Компоненты материала: опилки древесные, портландцемент, известь гидратная, жидкое стекло, хлорид кальция, волокно полипропиленовое (отрезки длиной 18 мм), отходы переработки стеатита в виде порошка, вода. Если скорость деформирования $V = 5$ мм/мин, то увеличение добавки стеатита с 10 до 15 % от массы цемента приводит к уменьшению прочности с 3,68 до 3,43 МПа. При этом добавка микрокремнезема уменьшает прочность. Если $V = 90 \dots 120$ мм/мин, то все рассмотренные смеси обеспечивают прочность 3,62...3,72 МПа. При $V = 180$ мм/мин добавки стеатита и микрокремнезема в количестве соответственно 15 и 5 % от массы цемента обеспечивают наибольшую прочность, а также соотношение прочности и жесткости, необходимое в некоторых демпфирующих устройствах. Основная область применения исследованных вариантов древесно-цементного композита – малоэтажное строительство, в том числе при сейсмических и аналогичных техногенных воздействиях.

Ключевые слова: древесно-цементный композит, арболит, ортотропный материал, прочность, жесткость, хлорид кальция, стеатит

ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваемый древесно-цементный композитный материал по классификации ГОСТ Р 54854–2011 относится к легким бетонам на органических заполнителях растительного происхождения. В качестве заполнителя использованы опилки хвойных пород. Результаты исследования и совершенствования арболита и других материалов данного класса хорошо известны [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8]. Однако с течением времени оборудование совершенствуется, соответственно, изменяются характеристики опилок, что влияет на прочность композита и требует продолжения исследований. Кроме того, появляются новые микро- и наномодификаторы [1], [3], применение которых повышает конкурентоспособность древесно-цементных материалов в рамках «зеленой экономики» [9]. По причине сложности объекта исследования известные рекомендации в значи-

тельной мере базируются на обобщении экспериментальных данных с учетом опыта применения материалов данного класса [6]. Указанная сложность объясняется влиянием и взаимовлиянием компонентов материала, его неоднородностью, необходимостью учета изменяющихся в процессе эксплуатации воздействий. Решению появляющихся в этой связи задач способствует накопление и обобщение экспериментальных данных о свойствах новых материалов данного класса. Например, установлено, что добавка микрокремнезема повышает прочность композита [5]. В [8] исследована прочность арболита с учетом анизотропии его механических свойств. Анализ литературы показал, что недостаточно изучены вопросы прочности и жесткости древесно-цементных материалов с добавками порошкообразных отходов камнеобработки, в частности порошка стеатита (рис. 1). Стеатит известен также как талькохлорит, мыльный или горшечный камень.

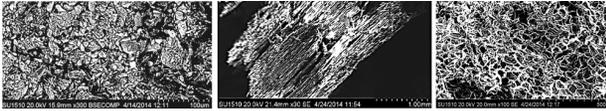


Рис. 1. Структура порошка стеатита, частиц опилок и коры**

Цель работы: экспериментальное исследование прочности и жесткости древесно-цементного композита как ортотропного материала с добавкой отходов переработки стеатита в виде порошка.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования: образцы древесно-цементного композита в форме куба с ребром 100 мм. Образцы испытывались сериями по шесть штук в возрасте 28 суток. Для каждой серии был принят определенный состав смеси. Указанной смесью послойно заполняли металлические формы (рис. 2). При этом визуально смесь воспринималась как полусухая. Каждый слой уплотняли в соответствии с СН 549–82. Образцы в течение 24 часов находились под полиэтиленовой пленкой, затем извлекались из форм и набирали прочность при температуре 15–20 °С. Среднее значение массы образцов через 1, 3, 7, 14 и 28 суток составило 1245, 1101, 892, 844 и 801 г соответственно. Подробности методики изготовления и испытаний образцов содержатся в [1], [2], [3].

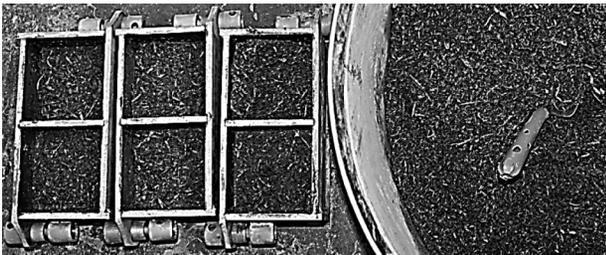


Рис. 2. Заполнение форм смесью

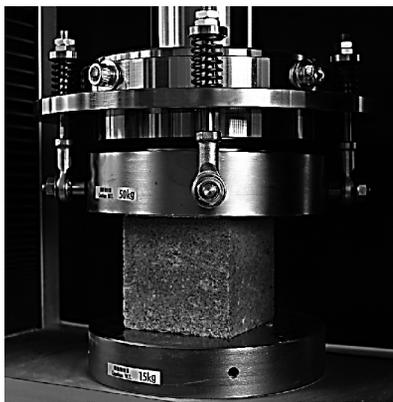


Рис. 3. Образец в испытательной машине

Испытания образцов выполнены на машине SHIMADZU AG50kNX (рис. 3). Скорость деформирования 5, 30 и 180 мм/мин. Исследованы два случая: 1) направление действия силы параллель-

но слоям укладки смеси в формы (см. рис. 2); 2) направление действия силы перпендикулярно данным слоям (рис. 4). Испытания прекращались, если деформация сжатия превышала 10%, то есть 10 мм.

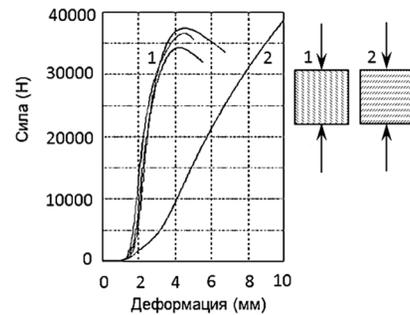


Рис. 4. Диаграммы сжатия в направлениях 1 и 2

Образцы были изготовлены из следующих смесей.

Смесь 1.378. Опилки хвойных пород влажностью 32–38 % 350 кг, портландцемент (М500D0) 300 кг, стеатит 30 кг, жидкое стекло 45 кг, хлорид кальция 17,5 кг, волокно полипропиленовое (отрезки длиной 18 мм) 1 кг, вода 350 л.

Смесь 2.384. Отличается от смеси 1.378 только количеством стеатита: 45 кг (15 % от массы цемента).

Смесь 3.390. Отличается от смеси 1.378 только добавкой микрокремнезема в количестве 15 кг (5 % от массы цемента).

Смесь 4.396. Отличается от смеси 2.384 только добавкой микрокремнезема в количестве 15 кг (5 % от массы цемента).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для четырех вариантов исследованного материала по результатам механических испытаний (см. рис. 3) установлено, что прочность (жесткость) при сжатии образцов вдоль слоев укладки смеси существенно меньше (больше), чем при сжатии поперек этих же слоев (см. рис. 4, образцы из смеси 2.384).

В результате применения сканирующего электронного микроскопа SU-1510 установлено, что разрушение сопровождалось разрывом нитевидных связей между частицами материала (рис. 5).

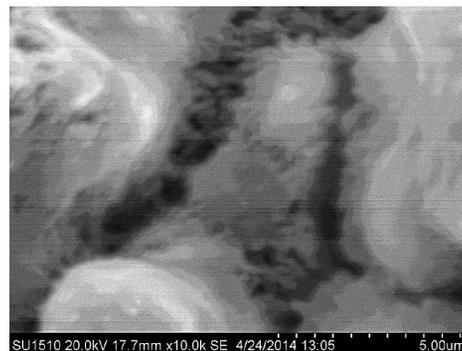


Рис. 5. Частицы древесно-цементного материала

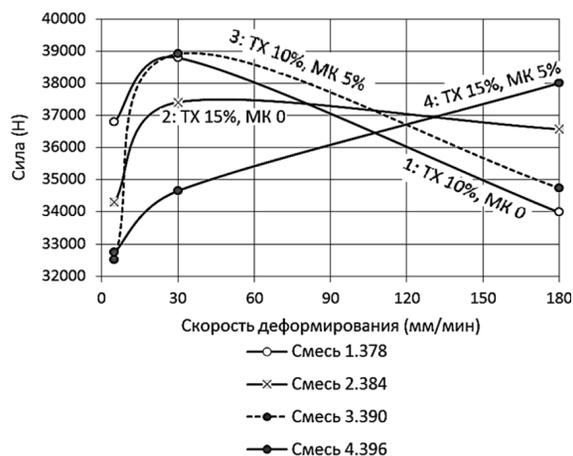


Рис. 6. Результаты испытаний на прочность

Экспериментально (см. рис. 3) определены закономерности влияния и скорости деформирования на прочность (рис. 6).

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В зависимости от компонентов образцы проявляют разнонаправленные тенденции изменения прочности с увеличением скорости деформирования V (см. рис. 6).

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

** Микрофотографии (см. рис. 1 и 5) получены на сканирующем электронном микроскопе SU-1510 при поддержке В. П. Чугина – сотрудника кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета ПетрГУ, зав. кафедрой профессор Г. Б. Стефанович.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев А. А., Васильев С. Б., Колесников Г. Н., Сянонцев В. С. Уточнения к статье «Влияние новой полимерно-минеральной добавки на прочность древесно-цементного материала для малоэтажного строительства» // Сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика». 2014. № 3–4 (8–4). С. 267–268.
- Андреев А. А., Колесников Г. Н. О рациональном соотношении количества опилок и стружки в древесно-цементном композите // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер.: «Естественные и технические науки». 2014. № 4 (141). С. 85–87.
- Андреев А. А., Колесников Г. Н. Совершенствование технологии использования отходов лесопильных предприятий в производстве древесно-цементных материалов для малоэтажного строительства // Фундаментальные исследования. 2014. № 6–6. С. 1139–1143.
- Запруднов В. И., Санаев В. Г. Макроскопические свойства древесно-цементных композитов // Вестник Московского государственного университета леса. Лесной вестник. 2012. № 6 (89). С. 168–171.
- Лукучцова Н. П., Горностаева Е. Ю., Карпиков Е. Г. Древесно-цементные композиции с минеральными микронаполнителями // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2011. № 3. С. 21–23.
- Наназашвили И. Х. Строительные материалы из древесно-цементной композиции. Л.: Стройиздат, 1990. 415 с.
- Пошарников Ф. В., Филичкина М. В. Анализ структуры смеси для опилкобетона на основании многофакторного планирования эксперимента // Вестник Московского государственного университета леса. Лесной вестник. 2010. № 1. С. 111–114.
- Цепаев В. А., Один А. И. Длительная прочность арболита с учетом анизотропии строения // Приволжский научный журнал. 2007. № 1. С. 51–56.
- Svendson G. T. Environmental Reviews and Case Studies: From a Brown to a Green Economy: How Should Green Industries Be Promoted? // Environmental Practice. 2013. № 15 (01). P. 72–78.

Andreev A. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
 Kolesnikov G. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
 Chalkin A. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

WOOD-CEMENT COMPOSITE WITH ADDITION OF STEATITE AS STRUCTURAL AND DAMPING MATERIAL

The strength and stiffness of the wood-cement composite as an orthotropic material was experimentally investigated under uniaxial compression. The diagrams “Force (N) – Deformation (mm)” were obtained with the use of the test-machine SHIMADZU AG-

50kNX for 28 days old samples in the form of a cube with an edge of 10 cm. The test was stopped if a compressive strain reached 10 % (10 mm). Components of the studied material consisted of the following parts: sawdust, Portland cement, hydrated lime, sodium silicate, or calcium chloride, polypropylene fiber (segments of 18 mm length), waste soapstone in the form of powder, and water. If the deformation rate is $V = 5$ mm/min then a decrease in steatite additives from 10 to 15 % in the cement weight leads to a decrease in the strength 3,68 MPa to 3,43 MPa. In this case, additive micro-silica reduces the strength. With the increase in deformation speed by 30 mm/min the strength increases. If $V = 90 \dots 120$ mm/min, all examined mixtures provide strength 3,62–3,72 MPa. However, if $V = 180$ mm/min, a combination of steatite additives and micro-silica in amount of 15 and 5 % from the weight of the cement provides the highest strength. The ratio of the strength and stiffness can be sufficient for new damping devices. The main application of the investigated variants of the wood-crete are low rise buildings, including seismic and similar man-made influences.

Key words: wood-cement composite, wood-crete, orthotropic material, strength, hardness, calcium chloride, steatite

REFERENCES

1. Andreev A. A., Vasil'ev S. B., Kolesnikov G. N., Syunev V. S. Amendments to article "Influence of new polymer-mineral additive on strength of wood-cement material for low-rise building" [Utochneniya k stat'e "Vliyanie novoy polimerno-mineral'noy dobavki na prochnost' drevesno-tsementnogo materiala dlya maloetazhnogo stroitel'stva"]. *Sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhdunarodnoy zaochnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy: Teoriya i praktika"* [Collection of scientific papers by materials of the international extramural scientific and practical conference "Current research trends of the XXI century: Theory and Practice"]. 2014. № 3–4 (8–4). P. 267–268.
2. Andreev A. A., Kolesnikov G. N. On rational ratio of sawdust and shavings in wood-cement composite [O ratsional'nom sootnoshenii kolichestva opilok i struzhki v drevesno-tsementnom kompozite]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences]. 2014. № 4 (141). P. 85–87.
3. 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* [Fundamental Research]. 2014. № 6–6. P. 1139–1143.
4. Zaprudnov V. I., Sanaev V. G. Macroscopic properties of wood-cement composites [Makroskopicheskie svoystva drevesno-tsementnykh kompozitov]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa. Lesnoy vestnik* [Bulletin of the MSFU. Lesnoi Vestnik]. Moscow, Publishing House of the MSFU, 2012. № 6. P. 168–171.
5. Lukutsova N. P., Gornostaeva E. Yu., Karpikov E. G. Wood-cement compositions with mineral microfill [Drevesno-tsementnye kompozitsii s mineral'nymi mikronapolnitelyami]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova* [Herald BSTU behalf V. G. Shukhov]. 2011. № 3. P. 21–23.
6. Nanazashvili I. Kh. *Stroitel'nye materialy iz drevesno-tsementnoy kompozitsii* [Building materials from wood-cement composition]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1990. 415 p.
7. Posharnikov F. V., Filichkina M. V. Analysis of the structure of the mixture for opilkobetona based multifactor experiment planning [Analiz struktury smesi dlya opilkobetona na osnovanii mnogofaktornogo planirovaniya eksperimenta]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa. Lesnoy vestnik* [Bulletin of the MSFU. Lesnoi Vestnik]. 2012. № 1. P. 111–114.
8. Tsepaev V. A., Odin A. I. Long-term strength arbolita considering anisotropy structure [Dlitel'naya prochnost' arbolita s uchetom anizotropii stroeniya]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal]. 2007. № 1. P. 51–56.
9. Svendsen G. T. Environmental Reviews and Case Studies: From a Brown to a Green Economy: How Should Green Industries Be Promoted? // *Environmental Practice*. 2013. № 15 (01). P. 72–78.

Поступила в редакцию 30.06.2014

АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ТАЛБОНЕН

кандидат технических наук, старший научный сотрудник центра математических и информационных технологий Института информационно-телекоммуникационных и нанотехнологий, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
antal@sampo.ru

АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ РОГОВ

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

АННОТИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИЗ ИСТОРИЧЕСКОГО ЦИФРОВОГО АЛЬБОМА С ПОМОЩЬЮ ТЕКСТУР МЕТОДОМ МОМЕНТОВ*

Рассматривается вопрос поиска и распознавания текстур на одноканальных изображениях. При этом решается смежная задача аннотирования изображений, содержащих текстуры, то есть присваивания им текстовых меток, позволяющих выполнять поиск по текстовым запросам. В качестве основных источников изображений в данном исследовании рассматриваются оцифрованные черно-белые фотографии из исторических альбомов, что создает дополнительные ограничения на использование данных. Одним из возможных решений вышеуказанных проблем является предлагаемый в статье классификатор, построенный на основе метода текстурной сегментации с использованием моментов. При этом классификатор требует наличия текстовых меток для каждого из добавленных классов. Проведенные эксперименты показали хорошие результаты поиска с точки зрения полноты, а рассматриваемый метод имеет хорошие перспективы для дальнейшего исследования.

Ключевые слова: текстуры, метод моментов, сегментация, классификатор

ВВЕДЕНИЕ

Существуют различные методы автоматического аннотирования изображений. Как правило, их можно разделить на 2 категории: алгоритмы аннотирования по всему изображению и алгоритмы аннотирования по содержанию. В последних выполняется поиск объектов (участков изображений). Большинство алгоритмов аннотирования работают по одной общей схеме:

1. Определение набора признаков для объектов.
2. Подбор обучающей выборки и обучение классификатора с помощью этой выборки.
3. Классификация коллекции изображений, в результате которой каждому изображению будет соответствовать набор меток.

В данной работе рассматриваются методы аннотирования на основе текстурных характеристик. Анализ методов аннотирования проводился на коллекции фотографий строительства Беломорско-Балтийского канала и альбома Бродаца [2], [3], [4].

В [10] были определены текстурные характеристики, соответствующие человеческому восприятию: грубость, контраст, направленность, линейность, непрерывность и шероховатость. Множество текстурных признаков было предложено в [6]. В [9] рассматривались специальные гистограммы для классификации текстур, в [5],

[11] – текстурный анализ на основе моментов. В [11] был предложен метод сегментации текстур на основе моментов и описан соответствующий математический аппарат. В [7] использовались инвариантные моменты для распознавания символов.

В нашей работе за основу выбран алгоритм сегментации, предложенный в [11], так как он обладает высокой точностью сегментации и возможностью классифицировать текстуры попиксельно.

ОБЩАЯ СХЕМА АННОТИРОВАНИЯ

В данном исследовании рассматривается процесс аннотирования с учетом наличия текстур, который в общем случае включает в себя следующие шаги:

1. Задается набор текстур, каждая из которых принадлежит одному из нескольких заданных классов.
2. Каждому классу присваивается набор меток.
3. Для каждого изображения выполняется поиск текстур из заданного набора.
4. Для каждой найденной текстуры к изображению добавляется набор меток соответствующего класса.

Для выполнения текстурного поиска требуется классификатор. Мы предлагаем классификатор на основе метода моментов.

МЕТОД МОМЕНТОВ

В [11] был предложен метод сегментирования текстур на основе моментов и описан соответствующий математический аппарат. Рассмотрим прямоугольное изображение шириной W и высотой H . Пусть $f(x, y)$ – значение изображения в точке (x, y) , нормализованное на отрезке $[0; 1]$. Метод моментов заключается в том, что для каждой точки изображения $f(x, y)$ рассчитывается набор моментов и производных от них характеристик в пределах некоторого окна с центром в данной точке. Таким образом формируется набор изображений, соответствующих набору признаков.

Момент $M_{p,q}$ с центром в точке (i, j) и размером окна W_M рассчитывается следующим образом:

$$M_{p,q}(i, j) = \sum_{(a,b) \in W_{ij}^M} f(a, b) \cdot x_a^p \cdot y_b^q,$$

где

$$x_a = \frac{a-i}{W_M/2}, \quad y_b = \frac{b-j}{W_M/2},$$

W_{ij}^M – окно размером W_M с центром в точке (i, j) .

В [11] утверждалось, что набор моментов в чистом виде не годится для сегментирования, поэтому автором был предложен улучшенный набор признаков:

$$F_{p,q}(i, j) = \frac{1}{W_F^2} \sum_{(a,b) \in W_{ij}^F} |\tanh(\sigma(M_{p,q}(a, b) - \overline{M_{p,q}}))|. \quad (3)$$

$F_{p,q}(i, j)$ – значение характеристики момента порядка (p, q) в точке (i, j) , где

$$\overline{M_{p,q}}(i, j) = \frac{1}{W_F^2} \sum_{(a,b) \in W_{ij}^F} M_{p,q}(a, b), \quad (4)$$

$\overline{M_{p,q}}(i, j)$ – усредненное изображение момента $M_{p,q}$, W_{ij}^F – окно размером W_F с центром в точке (i, j) .

Степени моментов p и q задаются таким образом, чтобы их сумма не превышала некоторого значения T_o , то есть $p+q \leq T_o$. Тогда общее количество изображений моментов и характеристик моментов будет равно $\frac{(T_o+1)(T_o+2)}{2}$. В данной работе рассматривались моменты порядка не выше 2-го.

Другими параметрами для расчета характеристик являются размеры окон W_M и W_F и коэффициент σ . Авторами этого метода [11] были протестированы значения данных параметров: 9, 49 и 0,01 соответственно. Указанные значения были получены методом проб и ошибок, поэтому в нашей работе был проведен анализ влияния значений параметров W_M , W_F и σ на результат сегментации.

Для экспериментов использовался алгоритм сегментации, являющийся модификацией алгоритма, предложенного в [11] (пример результатов

работы исходного алгоритма сегментации представлен на рис. 1):

1. Тестовое изображение «склеивается» из нескольких текстур (см. рис. 1). Каждая текстура представлена квадратным участком. Площади участков текстур одинаковы.
2. Рассчитываются характеристики, представляющие собой N изображений, где N – число характеристик.
3. Случайно отбираются 6 % точек, равномерно распределенных по изображению.
4. Для выбранных точек производится кластеризация методом k -средних. Число кластеров соответствует числу текстур. Авторская версия данного алгоритма предполагала использование алгоритма кластеризации CLUSTER [8].
5. Полученные центры кластеров как результат работы алгоритма k -средних используются для сегментации всего изображения. Каждому пикселу ставится в соответствие номер того кластера, к которому ближе всего располагается соответствующий вектор признаков.
6. Определим точность сегментации ρ как долю правильно сегментированных пикселей. Поскольку алгоритм k -средних произвольно определяет начальные центры кластеров, к нему добавляется промежуточный шаг, на котором определяется соответствие номеру текстуры и номеру кластера. Будем считать, что кластер с номером i будет соответствовать текстуре j , если большая часть пикселей класса i будет располагаться внутри участка текстуры j .

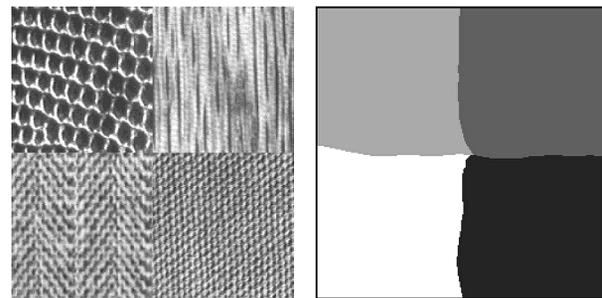


Рис. 1. Пример сегментации составного изображения с помощью метода, предложенного в [11] (взято из [11]): (а) – составное изображение; (б) – результат сегментации составного изображения

В нашем исследовании используемый алгоритм сегментации отличается от алгоритма, предложенного в [11], выбранным алгоритмом кластеризации. Пример сегментации изображения (рис. 2а), «склеенного» из 2 текстур, выполненной по описанному выше модифицированному алгоритму, представлен на рис. 2б. Точность сегментации составила 95,3 %.

Анализ результатов сегментации заключается в сравнении значений точности для определенного набора параметров $\{W_M, W_F, \sigma\}$. Были выбраны следующие диапазоны значений параметров: [9;

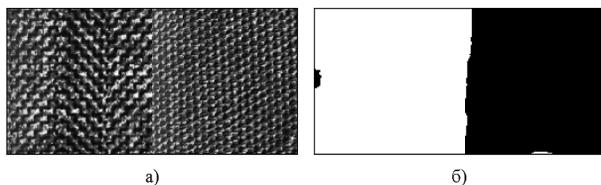


Рис. 2. Изображения, «склеенные» из 2 текстур альбома Бродаца [4]: а) исходное; б) результат бинарной сегментации

49] с шагом 5 для W_M и W_F , [0,005; 0,02] с шагом 0,005 для σ . Анализ осуществлялся над изображением на рис. 2а.

В таблице представлены результаты анализа, отсортированные по убыванию точности сегментации. Поскольку общее количество записей больше 250 (учитывая приведенные диапазоны значений), в таблице представлена только часть полученных результатов.

Результаты анализа влияния параметров на точность сегментации

W_M	W_F	σ	σ (%)
9	49	0,01	95,285
9	39	0,005	95,1782
9	39	0,02	95,1752
14	14	0,02	93,8416
14	14	0,005	93,7103
14	29	0,015	92,395
14	34	0,02	92,3248
24	24	0,02	87,9639
39	19	0,01	87,9639

Таким образом, экспериментально показана правильность значений параметров, предложенных в [11].

КЛАССИФИКАТОР НА ОСНОВЕ МЕТОДА МОМЕНТОВ

Для поиска текстур предлагается следующий классификатор:

1. Для каждой текстуры из обучающей выборки рассчитывается центральный вектор (центр текстуры) как средний вектор среди векторов признаков всех пикселей данной текстуры.
2. Для каждой текстуры из обучающей выборки задается параметр ϵ , который подбирается так, чтобы доля правильно классифицированных пикселей была наибольшей. Если расстояние от вектора признаков данной точки до центра данной текстуры не превышает ϵ , будем считать, что данная точка соответствует данной текстуре.
3. Для каждого изображения вычисляются изображения характеристик моментов $F_{p,q}$. Значения изображений характеристик моментов в точке (i, j) определяют вектор признаков следующим образом: $\{F_{p,q}(i, j) | p+q \leq T_o\}$. Порядок расположения значений признаков внутри вектора фиксируется, напри-

мер, при $T_o = 2$ вектор признаков равен $\{F_{0,0}, F_{0,1}, F_{1,0}, F_{0,2}, F_{1,1}, F_{2,0}\}$.

4. Для каждого изображения вычисляется карта текстур. Размер карты равен размеру изображения. Значением карты для данной точки является номер первой соответствующей данной точке текстуры. Если данной точке не соответствует ни одна из текстур, точка карты принимает значение -1 .
5. Точки полученной карты текстур объединяются в сегменты, которые состоят из соседних точек с одинаковым номером текстуры. Точки со значением -1 в сегменты не объединяются.
6. Для каждого сегмента определяется его размер, равный количеству пикселей. Если размер сегмента равен или превышает некоторое пороговое значение, считается, что соответствующая текстура найдена на текущем изображении. В данной работе использовалось пороговое значение размера сегмента 100.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАБОТЫ КЛАССИФИКАТОРА

Для эксперимента было отобрано 100 изображений из коллекции фотографий строительства Беломорско-Балтийского канала. Для поиска использовались текстуры T_1 и T_2 , представленные на рис. 3.

ID	Имя	Текстура	Ерс.
34	Крыша дома		0,0025
35	Стена дома		0,005
36	Кроны деревь...		0,0035

Рис. 3. Пример текстур, добавленных в классификатор. Изображения, использованные в эксперименте по текстурному поиску: 34 – крыша дома (T_1), 35 – стена дома (T_2)

Эксперимент заключается в выявлении вхождения каждой текстуры T_j в каждое изображение I_i . С помощью эксперта вручную отмечаются вхождения текстур $E_{ij} = \begin{cases} 1, T_j \text{ найдено в } I_i \\ 0, \text{ иначе} \end{cases}$. С другой стороны, с помощью классификатора автоматически определяются вхождения каждой текстуры F_{ij} (аналогично E_{ij}), после чего определяется флаг релевантности текстуры R_{ij} (1 – текстура T_j найдена на изображении I_i и при этом обнаружена экспертом), который рассчитывается как $R_{ij} = E_{ij} \cdot F_{ij}$. Тогда полнота R_e и точность R_r поиска текстур T_j рассчитываются следующим образом [1]:

$$Re_j = \frac{\sum_i R_{ij}}{\sum_i E_{ij}}, Pr_j = \frac{\sum_i R_{ij}}{\sum_i F_{ij}}.$$

Аналогично можно рассчитать общую полноту Re и точность Rr поиска:

$$Re = \frac{\sum_{i,j} R_{ij}}{\sum_{i,j} E_{ij}}, Pr = \frac{\sum_{i,j} R_{ij}}{\sum_{i,j} F_{ij}}.$$

На рис. 4 представлены основные результаты эксперимента.

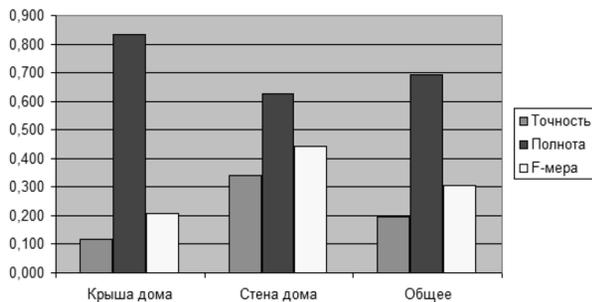


Рис. 4. Результаты поиска текстур

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ КЛАССИФИКАТОРА

На основе метода текстурного поиска и соответствующего классификатора было разработано программное обеспечение в составе программного комплекса для построения поисковых систем для цифровых коллекций исторических изображений.

Реализованный метод текстурного поиска использует набор параметров: $\{W_M = 49, W_F = 9, \sigma = 0,01\}$. Классификатор в своей работе требует наличия базы данных «помеченных» изображений текстур. При этом для каждой текстуры в соответствии с алгоритмом классификации необходимо определить пороговое значение ε . В разработанных инструментах данное значение может задаваться вручную пользователем или рассчитываться автоматически путем подбора на основе обучения. Для этого пользователю требуется выделить на нескольких изображениях участки, соответствующие искомой текстуре. Основным целевым фактором в процессе подбора параметров является суммарная ошибка, которая

вычисляется как доля неправильно классифицированных пикселей среди всех пикселей помеченных пользователем изображений.

Реализованная в системе база данных текстур представляет собой множество «помеченных» классов текстур. При добавлении новой текстуры от пользователя требуется только указать изображение, параметр ε и выбрать класс, к которому изображение принадлежит. Текстовые метки относятся непосредственно к классам текстур. Для работы необходимо иметь возможность составлять различные наборы текстур для классификатора, поэтому в системе классификаторы реализованы как списки текстурных классов, которые пользователь должен определить перед началом работы. Благодаря использованию промежуточных связей с текстурами через классы, формирование альтернативных классификаторов не требует добавления уже существующих текстур. При этом классификатор точно привязывается к набору текстур. На рис. 3 представлен пример текстур классификатора. Алгоритм поиска при обнаружении соответствия какой-либо текстуре, включенной в классификатор, приписывает изображению те метки, которые относятся к классу данной текстуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования на основе метода сегментации, предложенного в [11], был разработан собственный классификатор, позволяющий выполнять поиск текстур на изображениях по обучающей выборке. Однако на данный момент основные показатели качества являются недостаточно высокими, что требует дополнительных исследований этого метода. С другой стороны, предлагаемый алгоритм поиска учитывает особенности вычислений моментов изображений, и его временная сложность составляет $O(W \cdot H \cdot \log WH)$ вместо $O(W \cdot H \cdot M^2)$, что позволяет обрабатывать большие изображения за сравнительно небольшое время. При этом объем классификатора не оказывает существенного влияния на время вычисления, поскольку при больших размерах изображения большая часть времени тратится на вычисление моментов изображений.

* Работа выполняется при финансовой поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев М., Кураленок И. Официальные метрики РОМИП'2004 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://romip.ru/docs/romip_metrics.pdf
2. Талбонен А. Н., Рогов А. А. Анализ машинописных подписей к фотографиям в цифровом историческом альбоме // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2012. № 2 (123). С. 109–113.
3. Талбонен А. Н., Рогов А. А. Модели и методы поиска людей на фотографиях из исторического альбома // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2012. № 6 (127). С. 113–117.
4. Brodatz P. Textures: a Photographic Album for Artists and Designers. New York: Dover Publications, 1966.
5. F1u s s e r J. Moment Invariants in Image Analysis. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.187.8110&rep=rep1&type=pdf>

6. Haralick R. M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural Features for Image Classification // IEEE Transactions on systems, man and cybernetics. 1973. V. SMC-3. № 6. P. 610–621.
7. Hu M. K. Visual pattern recognition by moment invariants // IRE Trans. on Information Theory, IT-8. 1962. P. 179–187.
8. Jain A. K., Dubes R. C. Algorithms for Clustering Data. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.
9. Liu X., Wang D. Texture classification using spectral histograms. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.78.3024&rep=rep1&type=pdf>
10. Tamura H., Mori S., Yamawaki T. Textural Features Corresponding to Visual Perception // IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics. 1978. Vol. SMC-8. No. 6. P. 460–472.
11. Tuceryan M. Moment Based Texture Segmentation Available at: <http://cs.iupui.edu/~tuceryan/pdf-repository/Tuceryan1992.pdf>

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

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

HISTORICAL IMAGE ANNOTATION WITH TEXTURES BASED ON MOMENTS

The article discusses the problem of search and recognition of textures on single-channel images. It also describes a related problem of image tagging, i. e. attaching text labels with texture information that allows searching of text queries. The work examines digitized black-and-white historic albums as main sources of images that restricts the use of data. One possible solution is proposed in this article. It is a construction of a classifier based on the texture segmentation method with the use of moments. This classifier requires a text label per added class. Our experiments showed positive results with about 70 % of completeness (recall) and 20 % of precision. Our method has promising prospects for further research.

Key words: textures, method of moments, segmentation, classifier

REFERENCES

1. Ageev M., Kuralenok I. *Ofitsial'nye metriki ROMIP'2004* [Formal metrics at ROMIP'2004]. Available at: http://romip.ru/docs/romip_metrics.pdf
2. Talbonen A. N., Rogov A. A. Analysis of typewritten captions of photographs in digital historical album [Analiz mashinopisnykh podpisov k fotografiyakh v tsifrovom istoricheskom al'bome]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences]. 2012. № 2 (123). P. 109–113.
3. Talbonen A. N., Rogov A. A. Models and methods of searching people on photographs from historical album [Modeli i metody poiska lyudey na fotografiyakh iz istoricheskogo al'boma]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences]. 2012. № 6 (127). P. 113–117.
4. Brodatz P. Textures: a Photographic Album for Artists and Designers // New York: Dover Publications, 1966.
5. Flusser J. Moment Invariants in Image Analysis. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.187.8110&rep=rep1&type=pdf>
6. Haralick R. M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural Features for Image Classification // IEEE Transactions on systems, man and cybernetics. 1973. V. SMC-3. № 6. P. 610–621.
7. Hu M. K. Visual pattern recognition by moment invariants // IRE Trans. on Information Theory, IT-8. 1962. P. 179–187.
8. Jain A. K., Dubes R. C. Algorithms for Clustering Data. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.
9. Liu X., Wang D. Texture classification using spectral histograms. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.78.3024&rep=rep1&type=pdf>
10. Tamura H., Mori S., Yamawaki T. Textural Features Corresponding to Visual Perception // IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics. 1978. Vol. SMC-8. No. 6. P. 460–472.
11. Tuceryan M. Moment Based Texture Segmentation Available at: <http://cs.iupui.edu/~tuceryan/pdf-repository/Tuceryan1992.pdf>

Поступила в редакцию 13.03.2014

ВЕНИАМИН НИКОЛАЕВИЧ ШИЛОВСКИЙ

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

АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ ПИТУХИН

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

ВЕЙККО АРМАСОВИЧ КЯЛЬВИЙНЕН

кандидат технических наук, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
vek-1987@mail.ru

ВАДИМ МИХАЙЛОВИЧ КОСТЮКЕВИЧ

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
vadim9595@yandex.ru

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Обеспечение уровня эксплуатационной технологичности (ЭТ) лесозаготовительных машин (ЛЗМ) и технологического оборудования является инструментом увеличения эффективности работы лесопромышленного комплекса в целом. Отсутствие нормативно-технических документов по продолжительности и трудоемкости технического обслуживания (ТО) и текущего ремонта затрудняет организацию рациональной технической эксплуатации ЛЗМ и их конкурентоспособную оценку. Для восполнения данного пробела в работе предлагается комплекс оценочных показателей эксплуатационной технологичности ЛЗМ и рассматриваются методы оценки технологичности при проведении ТО. В ходе экспериментальных исследований для форвардеров «Komatsu» определены величины продолжительности и трудоемкости работ по ТО и рассчитаны значения единичных и комплексного показателей эксплуатационной технологичности. Полученное уравнение зависимости величины оперативной трудоемкости плановых видов ТО от числа операций, видов инструментов и минимальной численности исполнителей может быть использовано для прогнозирования оперативной трудоемкости плановых видов ТО ЛЗМ.

Ключевые слова: эксплуатационная технологичность, лесозаготовительные машины, техническое обслуживание

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из приоритетных направлений повышения эффективности лесопромышленного комплекса Российской Федерации является повышение уровня технической эксплуатации используемых машин и оборудования, в том числе путем совершенствования их эксплуатационной технологичности [1], [3].

Современные ЛЗМ, как отечественного, так и зарубежного производства, не имеют нормативно-технических документов, оговаривающих величины продолжительности и трудоемкости выполнения операций их ТО и текущего ремонта, то есть одних из основных показателей эксплуатационной технологичности машин. Это затрудняет организацию рациональной технической эксплуатации ЛЗМ, конкурентоспособную оценку приобретаемой лесозаготовителями техники.

Исследование и оценка эксплуатационной технологичности ЛЗМ позволят ранжировать ее уровень у приобретаемых или выпускаемых машин, определять более совершенную технику, внедрять мероприятия по улучшению ЭТ серийных машин, прогнозировать величины параметров ЭТ на стадии проектирования [7].

Для осуществления оценки ЭТ ЛЗМ необходима систематизация факторов, свойств, параметров, обуславливающих и характеризующих ЭТ, разработка методик ее оценки и прогнозирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обоснование номенклатуры основных показателей, методик их определения и их оценка являются актуальной задачей в деле повышения эффективности как отечественных, так и зарубежных ЛЗМ. Эта задача в настоящее время, возможно, решается самими производителями

машин, однако ее результаты не придаются широкой огласке, не публикуются, поэтому не могут быть использованы широким кругом заинтересованных организаций и учебных учреждений.

Анализ состояния сравнительной, конкурентоспособной оценки ЭТ отечественных и зарубежных ЛЗМ позволил сформулировать основную цель исследования: для реализации потенциала лесозаготовительного производства путем повышения уровня технической эксплуатации отечественных и зарубежных ЛЗМ необходимо в наибольшей технической возможной и экономически целесообразной мере оценивать и повышать уровень их эксплуатационной технологичности.

На рис. 1 представлен перечень оценочных показателей ЭТ ЛЗМ.

Методы оценки технологичности при ТО включают аналитический, графоаналитический, экспериментально-расчетный, комплексный методы [1], [4].

В основе *аналитического* метода оценки лежит положение о том, что между техническими параметрами, характеризующими конструкцию, и показателями ЭТ существует корреляционная связь. Выявленную корреляционную связь можно представить в виде уравнения регрессии, например:

$$Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k,$$

где Y – оперативная трудоемкость ТО; a, b_1, \dots, b_k – коэффициенты уравнения регрессии; X_1, \dots, X_k – конструктивные и эксплуатационно-технологические факторы (число операций ТО, периодичность ТО, число используемых при ТО видов инструментов/приспособлений, численность исполнителей и др.).

По полученным уравнениям регрессии можно определять оперативную трудоемкость ТО на этапе проектирования.

Комплексный метод сравнительной оценки разных вариантов конструкций позволяет одно-

временно учесть влияние нескольких показателей ЭТ машин, следовательно, является наиболее показательным методом. Единичные показатели не дают возможности достаточно полно и объективно оценить разные конструкции при их сравнительном анализе. Так, модернизированный узел может иметь большую периодичность ТО по сравнению с прототипом, но низкий коэффициент унификации масел и смазочных материалов, или для узла с высокой степенью доступности к местам ТО необходима большая разновидность применяемого инструмента. Поэтому для более объективной оценки уровня ЭТ ЛЗМ возможно использование комплексного показателя, определяемого по выражению [2]:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n k_o \phi(i)}{\sum_{i=1}^n \phi(i)},$$

где k_o – относительный показатель значимости; i – номер единичного оценочного показателя; n – общее число оценочных показателей; $\phi(i)$ – функция, нормирующая весомость оценочных показателей, входящих в их ранжированную последовательность.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе разработана методика, обоснованы объекты и условия проведения экспериментальных исследований, в ходе которых впервые определены величины продолжительности и трудоемкости выполнения операций всех плановых видов ТО форвардеров «Komatsu» модели 840.4, перечень используемых инструментов и приспособлений; проведена соответствующая математическая обработка полученных результатов с интервальной оценкой их точности. В качестве исследуемых выбраны плановые виды ТО форвардеров, поскольку они являются наиболее насыщенными по числу и сложности выполняемых операций, а также имеют фиксированную периодичность



Рис. 1. Комплекс оценочных показателей ЭТ ЛЗМ

проведения (в моточасах) и могут быть суммарно оценены за определенную наработку.

Исследования проводились в условиях рядовой эксплуатации машин при поддержке лесозаготовительного предприятия ЗАО «Шуялес». На основании полученных данных по величинам продолжительностей и трудоемкостей выполнения операций плановых видов ТО форвардеров «Komatsu» 840.4 определены средние значения оперативных продолжительностей и трудоемкостей выполнения каждого планового вида ТО исследуемых машин (табл. 1). Различия в значениях продолжительностей и трудоемкостей указывают на то, что при выполнении некоторых операций требуется участие более одного исполнителя.

Из рис. 2 видно, что наибольшая фактическая трудоемкость работ по техническому обслуживанию приходится на периодичность 25 и 50 часов.

В табл. 2 приведены полученные значения единичных оценочных показателей ЭТ форвардеров «Komatsu» 840.4 и тракторов ТБ-1М15 согласно применяемой комплексной методике. Данные по трактору ТБ-1М15 принимались согласно материалам, представленным в [4], [5].

Значение комплексного (обобщающего) оценочного показателя:

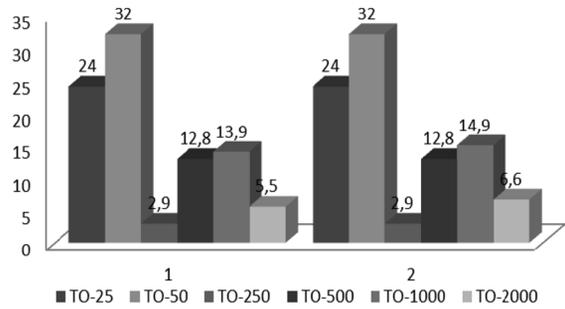


Рис. 2. Оперативная продолжительность 1 (трудоемкость 2) технического обслуживания

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n k_o \cdot \phi(i)}{\sum_{i=1}^n \phi(i)} = \frac{5,4}{3,75} = 1,44 > 1.$$

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного анализа можно заключить:

1. По большинству из рассмотренных оценочных показателей ЭТ (оперативной трудоемкости ТО, числу операций, числу встроенных конт-

Таблица 1
Средние оперативные продолжительности и трудоемкости плановых видов ТО форвардеров «Komatsu» 840.4

Вид ТО (условное обозначение)	Оперативная продолжительность ТО данного вида (сумм. за цикл), час	Оперативная трудоемкость ТО данного вида (сумм. за цикл), чел. час	Число раз выполнения ТО за весь цикл
ТО через 25 моточасов (TO_{25})	0,3 [24]	0,3 [24]	80
ТО через 50 моточасов (TO_{50})	0,8 [32]	0,8 [32]	40
ТО через 250 моточасов (TO_{250})	0,8 / 0,3* [2,9]	0,8 / 0,3* [2,9]	1 / 7
ТО через 500 моточасов (TO_{500})	3,4 / 3* [12,8]	3,4 / 3* [12,8]	2 / 2
ТО через 1000 моточасов (TO_{1000})	7,7 / 6,2* [13,9]	8,2 / 6,7* [14,9]	1 / 1
ТО через 2000 моточасов (TO_{2000})	5,5 [5,5]	6,6 [6,6]	1
Общее за цикл 2000 моточасов	91	93	

Примечание. * – без выполнения некоторых операций (выполняются не каждый раз).

Таблица 2
Величины единичных оценочных показателей ЭТ сравниваемых ЛЗМ

Номер (i) единичного оценочного показателя	Единичный оценочный показатель ЭТ	Значение единичного оценочного показателя		Функция $\phi(i)$	$k_o \cdot \phi(i)$
		Komatsu 840.4	Трактор ТБ1М15		
1	Суммарная оперативная трудоемкость плановых видов ТО (за цикл 2000 моточасов), чел. час	93	141	1	1,52
2	Средневзвешенная периодичность плановых видов ТО	89	208	1	0,43
3	Число всех видов ТО Число плановых видов ТО	8 6	6 3	0,75	0,56 0,38
4	Число операций всех видов ТО Число операций плановых видов ТО	61 50	86 65	0,5	0,71 0,65
5	Число встроенных контрольных приборов	25	10	0,31	0,78
6	Число видов инструмента/приспособлений, используемых при плановых видах ТО	17	33	0,19	0,37
Итого				3,75	5,4

рольных приборов, числу видов инструмента/приспособлений) форвардеры «Komatsu» 840.4 имеют предпочтительные значения в сравнении с тракторами ТБ-1М15.

2. В результате сравнительной комплексной оценки уровня приспособленности сравниваемых ЛЗМ к выполнению операций их ТО, одновременно учитывающей влияние целого ряда параметров, обобщающий показатель (Q) получился равным 1,44 (>1), что, согласно базисной системе оценок данной методики, говорит о преимуществе общего уровня ЭТ (при проведении ТО) форвардеров «Komatsu» в сравнении с тракторами «ОТЗ».

Полученное уравнение зависимости величины оперативной трудоемкости плановых видов ТО (Y) форвардеров «Komatsu» 840.4 от числа операций ТО (X_1), числа видов инструментов/приспособлений (X_2) и минимальной численности

исполнителей (X_3), которое может быть использовано для прогнозирования оперативной трудоемкости плановых видов ТО модернизированных форвардеров:

$$Y = -5,747 + 0,222X_1 - 0,119X_2 + 4,869X_3.$$

Коэффициент детерминации данного уравнения $R^2 = 0,997$, или 99,7%. Критическое значение на уровне значимости 0,05 в случае $n = 6$ наблюдений (видов ТО) и $k = 3$ X-переменных дает $R^2 = 0,966$, или 96,6%. Поскольку полученное значение R^2 больше критического, регрессию следует признать значимой. Также, по F-тесту данной методики, полученное p-значение (значимость F) менее 0,05 ($0,0049 < 0,05$), а значение F больше критического в F-таблице ($205,102 > 19,164$), что подтверждает значимость полученной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кяльвияйнен В. А. Оценка эксплуатационной технологичности лесозаготовительных машин: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2013. 24 с.
2. Михлин В. М., Диков К. И., Стариков О. М. и др. Эксплуатационная технологичность конструкций тракторов. М.: Машиностроение, 1982. 256 с.
3. Питухин А. В., Шиловский В. Н., Скобцов И. Г., Кяльвияйнен В. А. Повышение эксплуатационной технологичности лесозаготовительных машин. Петрозаводск: Петропресс, 2012. 240 с.
4. Положение о техническом обслуживании и ремонте машин и оборудования лесозаготовительной промышленности / ОНТИ ЦНИИМЭ. Химки, 1990. 287 с.
5. Шиловский В. Н., Питухин А. В., Костюкевич В. М. Организация ТО зарубежной лесозаготовительной техники // Электронный журнал «Resources and Technologies». 2013. Вып. 10 (2). С. 129–150 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://rt.petrstu.ru/files/pdf/2621.pdf>
6. Шиловский В. Н., Питухин А. В., Фролова А. А., Серебрянский Н. И. Технологический сервис машин и оборудования: Справочные материалы. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. 114 с.
7. Leiviska K. Process and Maintenance Management. 2nd edition. Published by Finish Paper Engineers' Association. 2009. 379 p.

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

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

Kyal'viyaynen V. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

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

PROVISION OF FOREST MACHINES' MAINTAINABILITY AND RELIABILITY

Improvement of the forest machines (FM) and processing equipment maintainability is a tool helping to increase efficiency of the timber industry as a whole. The lack of regulatory and technical documents on the duration and complexity of maintenance creates difficulties for the organization of rational technical operation of FM and their competitive pricing. To fill this gap a set of performance indicators of FM maintainability is proposed in the paper. Methods for assessing manufacturability during maintenance are discussed. Duration and magnitude of the complexity of activities of maintenance are defined and values of single and integrated maintainability indicators are calculated in experimental studies for forwarders "Komatsu". The resulting equation of the dependence of the complexity of operational planning of maintenance on the number of operations, types of tools, and a minimum number of performers can be used to predict complexity of operational planning of FM maintenance.

Key words: maintainability, forest machines, maintenance

REFERENCES

1. Kyal'viyaynen V. A. *Otsenka ekspluatatsionnoy tekhnologichnosti lesozagotovitel'nykh mashin: Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk* [Rating maintainability of forest machines]. Petrozavodsk, Petrozavodsk State University Publ., 2013. 24 p.
2. Mikhlin V. M., Dikov K. I., Starikov O. M. i dr. *Ekspluatatsionnaya tekhnologichnost' konstruktsiy traktorov* [Maintainability of tractors designs]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 256 p.
3. Pitukhin A. V., Shilovskiy V. N., Skobtsov I. G., Kyal'viyaynen V. A. *Povyshenie ekspluatatsionnoy tekhnologichnosti lesozagotovitel'nykh mashin* [Increasing maintainability of forest machines]. Petrozavodsk, Petropress Publ., 2012. 240 p.
4. *Polozhenie o tekhnicheskoy obsluzhivaniy i remonte mashin i oborudovaniya lesozagotovitel'noy promyshlennosti* [Regulations on the maintenance and repair of the logging industry machinery and equipment] / ONTI TsNIIME. Khimki, 1990. 287 p.
5. Shilovskiy V. N., Pitukhin A. V., Kostyukevich V. M. Organization of foreign logging equipment maintenance [Organizatsiya TO zarubezhnoy lesozagotovitel'noy tekhniki]. *Resources and Technologies*. 2013. Vol. 10. № 2. Available at: <http://rt.petrstu.ru/files/pdf/2621.pdf>
6. Shilovskiy V. N., Pitukhin A. V., Frolova A. A., Serebryanskiy N. I. *Tekhnologicheskyy servis mashin i oborudovaniya: Spravochnyye materialy* [Technological service machines and equipment: Reference materials]. Petrozavodsk, 2008. 114 p.
7. Leiviska K. Process and Maintenance Management. 2nd edition. Published by Finish Paper Engineers' Association. 2009. 379 p.

Поступила в редакцию 13.03.2014

АННА МИХАЙЛОВНА ВОРОНОВА

преподаватель кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*voronova_am@petsu.ru***МАКСИМ АНАТОЛЬЕВИЧ ПИСКУНОВ**

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

piskunov_mp@list.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛЕСОСЕКИ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТНЫХ ПУТЕЙ*

Выявлены зависимости построения системы транспортных путей на лесосеке от состояния грунта и расположения погрузочного пункта на лесосеке. Приведено описание имитационного моделирования показателя категории грунта на лесосеке на основе генерации случайной величины с заданным законом распределения. Проведено исследование для выявления показателей, от которых зависит степень покрытия территории лесосеки системой транспортных путей и качество получаемой схемы волоков, рассчитанной специальным алгоритмом оптимизации. Сделаны выводы относительно выявленных закономерностей. Степень покрытия территории лесосеки не зависит от исходного распределения свойств грунта на лесосеке, однако прослеживается зависимость степени покрытия от выбора места размещения погрузочного пункта на территории лесосеки. Качество получаемых схем освоения лесосек, выраженное в значении целевой функции, зависит как от соотношения устойчивых и неустойчивых грунтов на лесосеке, так и от выбора места размещения погрузочного пункта на территории лесосеки.

Ключевые слова: свойства грунта, схема волоков, погрузочный пункт, покрытие территории, лесосека, зависимость

ВВЕДЕНИЕ

Задача построения системы транспортных путей на лесосеке с учетом особенностей грунта и рельефа конкретной лесосеки и параметров трелевочного оборудования является актуальной [2], [4], [5], [8]. Она включает в себя две связанные подзадачи: выбор места размещения погрузочного пункта и построение связанной с ним схемы волоков.

Для решения задачи построена математическая модель лесосеки в виде гиперсети [1], [3], [6], [7], которая позволяет учитывать неравномерность произрастания леса на лесосеке, перепады высот вдоль линии движения трелевочного трактора, углы наклона при перемещении нагруженного трелевочного трактора, объем пачки древесины. Математическая модель позволяет регулировать количество поворотов трелевочного трактора и вводить запрещенные углы поворота при движении от места погрузки до погрузочного пункта.

Для построения системы транспортных путей на лесосеке разработан комплекс алгоритмов [1], [3], позволяющий находить место размещения погрузочного пункта на лесосеке и строить схему транспортных путей, покрывающую всю территорию лесосеки и учитывающую основные ограничения модели.

Целью исследования является выявление зависимостей показателей алгоритма построения системы транспортных путей: качества целевой функции построенных схем волоков и степени покрытия территории лесосеки схемой волоков – от исходных свойств грунта на лесосеке и от места размещения погрузочного пункта.

МЕТОД ИМИТАЦИОННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Апробация моделей и алгоритмов проведена на данных, собранных в реальных условиях на территории Пряжинского района Республики Карелия, на данных из открытых публикационных источников. Ввиду большой сложности ручного сбора подробных данных, включающих данные о состоянии грунта, рельефа и плотности произрастания леса на лесосеке, предложен метод генерации основных параметров лесосеки псевдослучайным образом. Тестирование алгоритма построения схемы транспортных путей на лесосеке проведено с помощью имитационного эксперимента. В ходе эксперимента, результаты которого изложены в данной статье, проведена генерация показателя состояния грунта на лесосеке; два других показателя: плотность произрастания леса и перепады высот лесосеки – не сильно варьировались в пределах лесосеки небольшой размерности. Плотность произрастания леса принята постоянной, перепады высот – ну-

левые. Размер моделируемой лесосеки 400 × 300 метров, который включает 40 × 30 квадратных участков размером 10 × 10 м. Кратко представим процесс имитационного эксперимента.

Моделируемая категория грунта является дискретной случайной величиной, которая может принимать 4 значения: 1 – текучий грунт, 2 – мягкопластичный, 3 – твердопластичный, 4 – твердый. Для категории грунта заданы частоты встречаемости значений категорий на лесосеке, например, участков с твердым грунтом на лесосеке 20% от общего числа участков, твердопластичных – 40%, мягкопластичных и текучих – по 20%. На первом этапе сгенерирована вспомогательная равномерно распределенная случайная величина, далее получено значение моделируемой категории грунта с заданными частотами встречаемости.

Испытания проведены на разных значениях частот распределения случайной величины категории грунта. В табл. 1 представлены варианты функции распределения случайной величины категории грунта.

Таблица 1
Значения функции распределения случайной величины категории грунта

№	Функция распределения категории грунта			
	Твердый	Твердо-пласт.	Мягко-пласт.	Мягкий
1	0,2	0,4	0,2	0,2
2	0,3	0,3	0,2	0,2
3	0,2	0,3	0,3	0,2
4	0,2	0,2	0,4	0,2
5	0,1	0,4	0,3	0,2

В ходе испытаний сгенерировано 10 лесосек с распределением категорий грунта вида № 1, № 2, № 3, № 4, № 5. Всего произведено 50 испытаний.

На выходе алгоритма получено визуальное представление лесосеки, где разными оттенками цвета окрашены участки лесосеки с разными свойствами грунта, помечен участок размещения погрузочного пункта, рассчитана и прорисована схема волоков на лесосеке, для которой толщиной линии (чем толще линия, тем глубже колея) выделены категории глубины колеи, образуемой после проезда трелевочной техники (рис. 1). Для лесосеки произведен расчет количества волоков по каждой категории глубины колеи, рассчитан процент обработанных участков лесосеки – это процент таких участков, с которых полностью собран и транспортирован лес до погрузочного пункта по построенной схеме волоков.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Исследование 1. Алгоритм построения системы транспортных путей на лесосеке является приближенным и в общем случае может не выдавать 100% покрытия территории. Целью проведе-

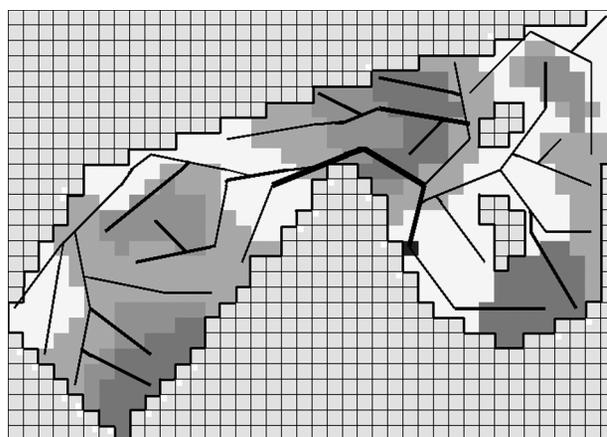


Рис. 1. Визуальное представление лесосеки с рассчитанной схемой волоков

ния испытаний является исследование алгоритма на параметр покрытия территории лесосеки для всех типов экспериментов.

Вывод. Процент обработанных участков лесосеки, с которых полностью собран и транспортирован лес до погрузочного пункта, не зависит от распределения категорий грунта. На рис. 2 видно, что графики количества обработанных участков для лесосек с распределениями разных видов перекрывают друг друга, расположены скученно. Для 95% всех испытаний процент сбора древесины принимает значение в диапазоне от 80 до 93%. Минимальное значение 77% зарегистрировано на лесосеке с категорией распределения № 2. Максимальное распределение 93,5% также зарегистрировано на лесосеке с категорией распределения № 2. Среднее значение процента сбора древесины для всех лесосек составляет 87,4%.



Рис. 2. Количество (%) обработанных участков для лесосек с распределением вида № 1–5

Исследование 2. Целью исследования является изучение влияния размещения погрузочного пункта на основной параметр покрытия территории лесосеки алгоритмом.

Вывод. Процент обработанных участков лесосеки зависит от расположения погрузочного пункта на территории лесосеки. Для рассматриваемой конфигурации лесосеки прямоугольной формы размерами 40×30 элементарных участков в ходе испытаний было обнаружено несколько наилучших точек, пригодных для расположения погрузочного пункта и обеспечивающих наибольший сбор древесины с территории лесосеки. Сбор пачки древесины осуществляется с нескольких участков лесосеки. В рассматриваемых примерах для формирования полной пачки древесины необходимо от 9 до 11 элементарных участков лесосеки. Поэтому расположение погрузочного пункта влияет на возможные варианты объединения элементарных участков в области, которые обеспечивают полную рейсовую нагрузку трелевочного трактора. И, наоборот, при неудачном выборе места размещения погрузочного пункта возможно появление небольших областей лесосеки, трудно доступных для прокладки волоков в связи с недостаточным запасом древесины для формирования полной пачки древесины.

При проведении испытаний в 14 случаях из 50 (0,28 – доля испытаний от общего числа) место расположения погрузочного пункта установлено не в выделенных наилучших точках. Назовем такие испытания испытаниями типа А. В 36 испытаниях из 50 (0,72 – доля испытаний от общего числа испытаний) место расположения погрузочного пункта установлено в одной из выделенных точек. Назовем такие испытания испытаниями типа В. Для испытаний типа А минимальный, максимальный и средний проценты сбора ниже, чем для испытаний типа В. В табл. 2 представлены минимальный, максимальный и средний проценты для испытаний типа А и В.

Таблица 2
Проценты для испытаний типа А и В

	Испытания А	Испытания В
1. Доля испытаний от общего числа	0,28	0,72
2. Минимальный процент сбора, %	77	78
3. Максимальный процент сбора, %	88	93,5
4. Средний процент сбора, %	83,57	88,83

Из табл. 2 видно, что для испытаний, в которых погрузочный пункт расположен в одной из возможных наилучших точек для данной конфигурации лесосеки, получены большие параметры сбора древесины с территории лесосеки.

Исследование 3. Целью исследования является изучение зависимости качества получаемой системы транспортных путей от соотношения устойчивых и неустойчивых грунтов.

Вывод. Целевая функция – количество волоков для категорий глубины колеи (критической,

недопустимо глубокой, глубокой, рекомендуемой) – зависит от распределения свойств грунта на лесосеке. Чем больше соотношение категорий грунта в пользу твердых и твердопластичных грунтов, тем меньше по количеству волоков с критической, недопустимо глубокой и глубокой колеи.

Если объединить волоки с критической, недопустимо глубокой и глубокой колеи в одну группу волоков с нерекондуемой колеи и сравнить между собой количественные значения по всем видам распределения категорий грунта на диаграмме (рис. 3), то выделяется распределение категорий грунта № 4, для которого характерно наибольшее количество волоков с нерекондуемой колеи по всем испытаниям. Для лесосек вида № 4 соотношение устойчивых и неустойчивых грунтов составляет 60% : 40%, то есть преобладают неустойчивые грунты. Кроме того, видно, что лесосеки с распределением категорий грунта № 1 и 2 (соотношение устойчивых и неустойчивых грунтов 60% : 40%) имеют схожие показатели друг с другом, как и лесосеки с распределением категорий грунта № 3 и 5 (соотношение устойчивых и неустойчивых грунтов 50% : 50%).

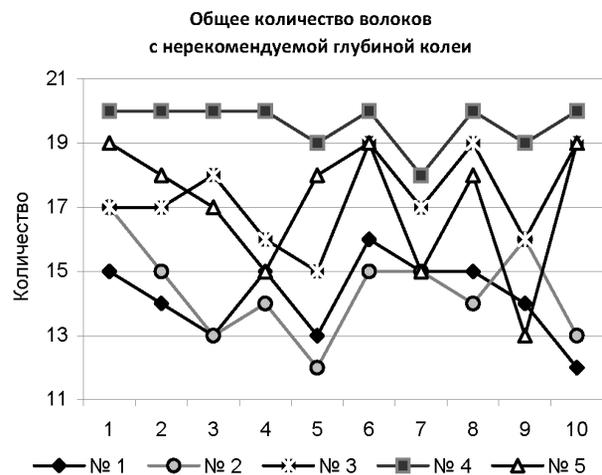


Рис. 3. Общее количество волоков с нерекондуемой глубиной колеи для испытаний вида № 1–5

Исследование 4. Данный эксперимент нацелен на изучение зависимости качества получаемой системы транспортных путей на лесосеке от места размещения погрузочного пункта.

Вывод. Количество волоков с недопустимой глубиной колеи (критической, недопустимо глубокой), входящих в состав целевой функции, зависит не столько от категории грунта в непосредственном месте расположения погрузочного пункта, сколько от подъездов к данному погрузочному пункту, то есть наличия или отсутствия твердых участков, расположенных вблизи от погрузочного пункта, по которым осуществляется транспортировка основного потока древесины.

Этот вывод обуславливает необходимость тщательного изучения свойств грунта на лесосеке перед началом лесозаготовительных работ. Недостаточно в ходе подготовительных работ на лесосеке определить участок лесосеки с твердым грунтом для размещения погрузочного пункта. Важно определить возможные подъезды к погрузочному пункту, так как именно по ним будет осуществляться основной проезд техники, в случае же отсутствия таких подъездов неизбежно образование глубокой колеи при проведении трелевочных работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье сформулированы четыре основных вывода, полученных в ходе тестирования алгоритма построения системы транспортных путей на лесосеке. Выводы касаются выявленных зависимостей основных показателей полученных схем волоков – количества обработанных участков лесосеки и количества волоков с разными категориями образованной колеи от места

размещения погрузочного пункта на лесосеке и от исходного распределения свойств грунта на лесосеке.

Процент покрытия участков лесосеки не зависит от исходного распределения свойств грунта на лесосеке, что подтверждает устойчивость работы алгоритма от входных данных. Процент покрытия участков лесосеки зависит от выбора места размещения погрузочного пункта на территории лесосеки.

Качество получаемых схем освоения лесосек (целевая функция) зависит как от исходного распределения свойств грунта на лесосеке, так и от размещения погрузочного пункта на территории лесосеки.

Заметим, что в процессе лесозаготовительных работ исходное состояние грунта на территории лесосеки не может быть улучшено. В этой связи важной задачей остается выбор места размещения погрузочного пункта для получения качественной и полной покрывающей сети на территории лесосеки.

* Статья подготовлена в рамках Программы стратегического развития Петрозаводского государственного университета на 2012–2016 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронова А. М., Воронов Р. В., Пискунов М. А. Моделирование схемы волоков при помощи покрытия гиперсети взвешенным корневым деревом // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2012. № 2 (123). С. 114–117.
2. Воронова А. М., Воронов Р. В., Пискунов М. А., Васильев В. Н. Распределение проходов по длине волока и расчет рейсовых нагрузок трелевочного трактора при движении по грунтам с низкой несущей способностью на примере хлыстовой технологии заготовки леса // Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 77 (03) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/03/pdf/43.pdf>
3. Воронова А. М., Воронов Р. В., Пискунов М. А., Щеголева Л. В. Алгоритм оптимального размещения волоков из условия минимизации повреждения грунта // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 9. С. 33–35.
4. Григорьев И. В., Жукова А. И. Пути совершенствования технологических процессов лесосечных работ на северо-западе Российской Федерации // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы международной научно-технической конференции. Вологда: ВоГТУ, 2009. С. 19.
5. Григорьев И. В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: СПбГЛТА, 2006. 236 с.
6. Попков В. К. Математические модели и методы оптимизации городских транспортных систем // Материалы 2-й Всероссийской конференции «Проблемы оптимизации и экономические приложения». Омск, 2009. С. 80–81.
7. Попков В. К., Токтошов Г. Ы. Гиперсетевая технология оптимизации инженерных сетей в горной или пересеченной местности // Вестник Бурятского государственного университета. 2010. № 9. С. 276–282.
8. Салминен Э. О., Гуров С. В., Большаков Б. М. Размещение волоков на заболоченных лесосеках // Лесная промышленность. 1988. № 3. С. 3.

Voronova A. M., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Piskunov M. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

MODELING OF CUTTING AREA PARAMETERS FOR ALGORITHM TESTING OF TRANSPORT ROUTES' NETWORK CONSTRUCTION

The article reveals existing dependences of the transport routes' network construction in the cutting area from the soil properties and location of the upper landing on the cutting area. A description of the imitating modeling of the soil properties' indicators in the cutting area is given on the basis of the random variables' generation with the specified distribution law. The study was conducted to identify indicators that determine a degree of the cutting area cover by the transport routes' network and the quality of obtained skid trails. The quality was calculated by a special algorithm of optimization. The obtained conclusions provide findings regarding identified dependencies. The cover for the cutting area does not depend on the initial distribution of soil properties in the cutting area. It depends on the upper landing location on the territory of the cutting area. The quality of the skid trail network, expressed in the value of the objective function, depends on the ratio of stable and unstable soils in the cutting area and on the upper landing location on the territory of the cutting area.

Key words: soil properties, skid trail network, upper landing, cover for area, cutting area, dependence

REFERENCES

1. Voronova A. M., Voronov R. V., Piskunov M. A. Modeling of skid trail network by covering hypernetwork by covering hypernetwork by weighted root tree [Modelirovanie skhemy volokov pri pomoshchi pokrytiya giperseti vzveshennym kornevym derevom]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences]. 2012. № 2 (123). P. 114–117.
2. Voronova A. M., Voronov R. V., Piskunov M. A., Vasil'ev V. N. Distribution of passages along the length of the skid trail and calculation of voyage skidder loads when driving on soils with low bearing capacity on the example of whiplash logging technology [Raspredelenie prokhodov po dline voloka i raschet reysovykh nagruzok trevechnogo traktora pri dvizhenii po gruntam s nizkoy nesushchey sposobnost'yu na primere khlystovoy tekhnologii zagotovki lesa]. *Nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Scientific Journal of Kuban State Agrarian University]. 2012. № 77 (03). Available at: <http://ej.kubagro.ru/2012/03/pdf/43.pdf>
3. Voronova A. M., Voronov R. V., Piskunov M. A., Shchegoleva L. V. The algorithm for optimal location of skid trail network to minimize damage of the soil properties [Algoritm optimal'nogo razmeshcheniya volokov iz usloviya minimizatsii povrezhdeniya grunta]. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and Agricultural Machines]. 2013. № 9. P. 33–35.
4. Grigor'ev I. V., Zhukova A. I. Ways of improving the process of logging operations in the north-west of the Russian Federation [Puti sovershenstvovaniya tekhnologicheskikh protsessov lesosechnykh rabot na severo-zapade Rossiyskoy Federatsii]. *Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Actual problems of forest sector development: proceedings of the international scientific conference]. Vologda, VoGTU Publ., 2009. P. 19.
5. Grigor'ev I. V. *Snizhenie otritsatel'nogo vozdeystviya na pochvu kolesnykh trevechnykh traktorov obosnovaniem rezhimov ikh dvizheniya i tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Reduction of negative impact on soil caused by wheeled skidders and rationale for regimes of motion and process equipment]. St. Petersburg, SPbGLTA Publ., 2006. 236 p.
6. Popkov V. K. Mathematical models and methods of optimization the city transport systems [Matematicheskie modeli i metody optimizatsii gorodskikh transportnykh sistem]. *Materialy 2-y Vserossiyskoy konferentsii "Problemy optimizatsii i ekonomicheskie prilozheniya"* [Proceedings of the 2nd National Conference «Problems of optimization and economic applications»]. Omsk, 2009. P. 80–81.
7. Popkov V. K., Toktoshov G. Y. Hypernetwork optimization technology for engineering networks in mountainous and rugged terrain [Gipersetevaya tekhnologiya optimizatsii inzhenernykh setey v gornoy ili peresechennoy mestnosti]. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Buryat State University]. 2010. № 9. P. 276–282.
8. Salminen E. O., Gurov S. V., Bol'shakov B. M. Accommodation of skid trails in waterlogged cutting areas [Razmeshchenie volokov na zabolochennykh lesosekakh]. *Lesnaya promyshlennost'* [Timber industry]. 1988. № 3. P. 3.

Передана в редакцию 07.04.2014

АНАТОЛИЙ ИЛЬИЧ КАЛАШНИК

кандидат технических наук, зав. лабораторией, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук (Апатиты, Российская Федерация)
kalashnik@goi.kolasc.net.ru

НАДЕЖДА АНАТОЛЬЕВНА КАЛАШНИК

научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук (Апатиты, Российская Федерация)
nadezhda-kalashnik28@rambler.ru

ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ЗАПОРОЖЕЦ

ведущий инженер, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук (Апатиты, Российская Федерация)
Zaporozec@goi.kolasc.net.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ НАСЫПНОГО ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО
СООРУЖЕНИЯ НА МОРЕННОМ ОСНОВАНИИ**

Рассмотрены насыпные грунтовые гидротехнические сооружения с точки зрения требований к ответственным объектам. Проведены комплексные георадарные и сейсмотомографические исследования плотины на р. Пиренга, на основании чего построена ее геомеханическая модель и выполнено компьютерное моделирование. Проведенные работы позволили оценить состояние плотины, трассировать депрессионную плоскость и выявить локальные зоны повышенного влагонасыщения и фильтрации. Результаты проведенных исследований представляют собой методологическую и научно-техническую основу для прогнозирования наиболее уязвимых мест (зон) насыпного грунтового гидротехнического сооружения на моренном основании для условий Мурманской области и Северной Карелии.

Ключевые слова: насыпные грунтовые гидротехнические сооружения, плотина, георадар, исследования, компьютерное моделирование, оценка состояния

ВВЕДЕНИЕ

Основные гидротехнические сооружения на территории Кольского полуострова и Карелии представляют собой насыпные грунтовые плотины или дамбы хвостохранилищ, возведенные на естественном основании, представляющем собой моренные отложения. Как правило, такие сооружения являются потенциально опасными объектами, эксплуатация которых должна выполняться в строгом соответствии с требованиями промышленной безопасности (117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» [8], СНиП 33–01–2003 «Гидротехнические сооружения» [7]). Нарушение устойчивости и функциональности насыпных грунтовых плотин и ограждающих дамб хвостохранилищ может привести к аварийной ситуации и значительному социально-экономическому ущербу населению, гражданским и промышленным зданиям, дорогам, инженерно-техническим коммуникациям и т. п., а также к финансовым потерям (недополученная прибыль вследствие остановки ГЭС или горно-обогатительной фабрики), дополнительным затратам (ремонтно-восстановительные работы: плотин, дамб, пульпопроводов, дорог, линий электропередачи, пьезометрических станций, устройств и механизмов и др.; лик-

видация последствий аварии; восстановление окружающих природных систем) и штрафам за загрязнение окружающей среды и экологический ущерб [1], [2].

**АВАРИИ НАСЫПНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ
СООРУЖЕНИЙ**

Мировой опыт эксплуатации насыпных грунтовых плотин и дамб имеет многочисленные примеры возникновения чрезвычайных ситуаций и аварий, наиболее известные из которых: плотины: Боулдерхэд (Великобритания), Фонтенель (США), Курейской ГЭС (РФ); дамбы: Качканарского ГОКа (РФ), рудника Эль-Кобра (Чили), Карамкенского ГМК (РФ), углеобогачительной фабрики в Буффало-Крик (США), шахты «Преставель» (Италия), шламохранилища завода «MAL Hungarian Aluminum» в Колонтаре (Венгрия), ОАО «Аммофос» (РФ) и др. [6], [11].

В Мурманской области, которая является крупным горнорудным, металлургическим и энергетическим регионом, имеется более 100 ГТС соответствующего профиля. Анализ их состояния показывает, что системные исследования надежности ГТС Мурманской области до настоящего времени фактически не выполнялись. Вместе с тем опасные и чрезвычайные ситуации,

связанные с эксплуатацией насыпных плотин и дамб, возникали в данном регионе ранее и могут возникнуть в будущем на особо проблемных объектах.

Так, в 1999, 2001 и 2002 годах в результате прорыва дамбы помехохранилища было сброшено около 96 000 т пометного ила на поля, в р. Кола и озера Рогозеро и Большое, из которых осуществляется водозабор питьевой воды для Мурманска [9]. Город был временно отключен от водоснабжения из-за угрозы возникновения эпидемии. Непосредственно в черте города образовались зловонные участки на местности, которые при весеннем снеготаянии до настоящего времени являются источниками экологического загрязнения окружающей природной среды. Нет данных о принятии научно обоснованных инженерных мер по обеспечению безаварийного функционирования помехохранилища и природоохранным мероприятиям, что косвенно может свидетельствовать о возможных повторениях аварий.

В ноябре 2012 года произошли интенсивные протечки дамбы № 1 хвостохранилища ОАО «Ковдорский ГОК», приведшие практически к аварийной ситуации гидротехнического сооружения (рис. 1). Проведенные Горным институтом КНЦ РАН специальные комплексные исследования, прежде всего инновационные георадарные зондирования дамбы, позволили локализовать зоны повышенной фильтрации и выдать рекомендации по укреплению нижнего склона. Комбинат оперативно выполнил необходимые работы по укреплению нижнего склона дамбы, что позволило снять остроту проблемы.



Рис. 1. Протечки на ограждающей дамбе № 1 хвостохранилища Ковдорского ГОКа

В соседней Финляндии 4 ноября 2012 года на руднике «Талвиваара» (расположенном в области Кайнуу) дал течь резервуар со сточными водами [10]. Отходы, содержащие уран, попали в водную систему; на сайте STUK имеется сообщение, согласно которому концентрация урана в водных источниках выросла более чем в 50 раз. По мне-

нию финских специалистов, эта авария стала одной из крупнейших для страны, повлекшей большие экологические последствия.

Анализ этих и других инцидентов показывает, что основной причиной аварий стало локальное или полное разрушение ограждающих насыпных (или намывных) грунтовых сооружений вследствие скрыто формирующихся в их теле зон повышенной фильтрации, водопроводящих каналов и последующего интенсивного размыва нижнего склона. Проблема заключается в том, что зоны повышенной фильтрации, развивающиеся в теле насыпных грунтовых сооружений, на начальных этапах визуально и традиционными методами не обнаруживаются. Перерастая в дальнейшем в фильтрационно-деформационные зоны, эти процессы проявляются в виде интенсивных протечек и размывов, то есть фактически создают чрезвычайную ситуацию с реальной угрозой аварии, требующую безотлагательного принятия защитных и укрепляющих мер. Это предопределяет применение специальных исследований и мониторинга, позволяющих выявить и, самое главное, локализовать зоны повышенной фильтрации на ранних стадиях их формирования. Такие исследования, базирующиеся на применении георадаров, выполняются Горным институтом КНЦ РАН [5].

В частности, в связи с проявившейся повышенной проницаемостью плотины на реке Пиренга, Горным институтом были проведены комплексные экспериментальные и компьютерные исследования, что позволило выполнить количественную и качественную оценку состояния плотины, определить и трассировать депрессионную плоскость и выявить скрытые зоны повышенной фильтрации.

ПИРЕНГСКАЯ ПЛОТИНА

Пиренгская плотина является одной из плотин каскада Нивских ГЭС-1, расположенной у истока реки Пиренга, в нежилом поселке Пиренга. Река берет начало в озере Нижняя Пиренга на высоте 137,1 м над уровнем моря, протекает по территории городского округа г. Полярные Зори Мурманской области и впадает в озеро Имандра на высоте 127,5 м.

Плотина насыпана моренным грунтом на моренное основание с предварительной срезкой на нем растительного слоя на глубину до 0,7 м. Моренные грунты, слагающие как основание, так и саму плотину, представлены в основном гравелистым песком, местами с небольшими прослойками легкой супеси, песчаного гравия, среднезернистого и мелкозернистого песка. По инженерно-геологическим и геодезическим данным был построен геолого-структурный разрез плотины, на котором указаны основные ее элементы, геометрические размеры, абсолютные отметки гребня, уступов, поверхности основания,

зоны повышенной фильтрации: три в левобережной и две в правобережной части плотины. Над плоскостью депрессии, до 2–4 м, также идентифицировано несколько зон повышенного водонасыщения (и, возможно, фильтрации) – вероятно, «верховодка».

СЕЙСМОТОМОГРАФИЯ

Совместно с георадиолокационным зондированием Пиренгской плотины были выполнены сейсмотомографические измерения (работы по сейсмотомографическим наблюдениям выполнены канд. техн. наук Н. Н. Абрамовым (Гои КНЦ РАН)), при этом профили георадарных и сейсмотомографических исследований по гребню плотины совпадали. Это позволило сопоставить результаты, полученные двумя волновыми методами, и повысить их надежность и достоверность.

В результате сейсмотомографического обследования были получены значения скоростей продольных и поперечных сейсмических волн и их распределение в продольном сечении плотины. Было выявлено, что верхняя часть грунтов от дневной поверхности до отметок 131 м характеризуется достаточно равномерно распределенными скоростями до 0,4–0,8 км/с. На глубинах с отметками 131–129 м зафиксирован рост градиента скоростей в среднем на 50–60%. С учетом показаний пьезометров на данном участке плотины было принято, что здесь локализуется зона перехода от грунтов с естественной влажностью к влагонасыщенным и в срединной части ее формируется депрессионная плоскость. Кроме того, выполнение сейсмотомографических работ позволило, на основании полученных данных о прохождении продольной и поперечной волн в теле плотины, дополнительно определить механические характеристики слагающих ее и подстилающего моренного основания грунтов.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

На основании экспериментальных данных авторами построена геомеханическая модель плотины [1], [3], [4], которая была исследована в упругопластической постановке методами компьютерного моделирования при различных уровнях воды и формирования соответствующей нагрузки, имитируемой фазами нагружения. В результате моделирования получены расчетные значения и траектории перемещений грунтов плотины (рис. 4). Особое внимание уделялось анализу избыточного (активного) порового давления, оказывающего большое влияние на положение депрессионной плоскости в теле исследуемой плотины и распределение результирующих напряжений и перемещений. На рис. 4 также указаны сечения, по которым по результатам расчетов были построены эпюры напряжений и перемеще-

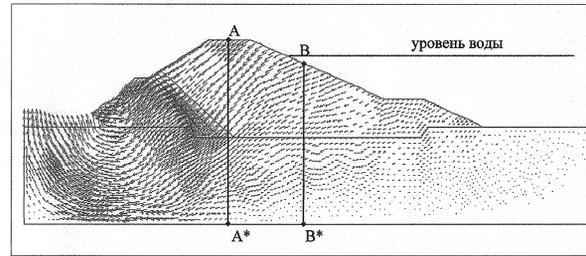


Рис. 4. Компьютерное моделирование насыпной грунтовой плотины, общие перемещения грунтов плотины (с указанием сечений для построения графиков)

ний (рис. 5) и выполнялся анализ состояния насыпной грунтовой плотины.

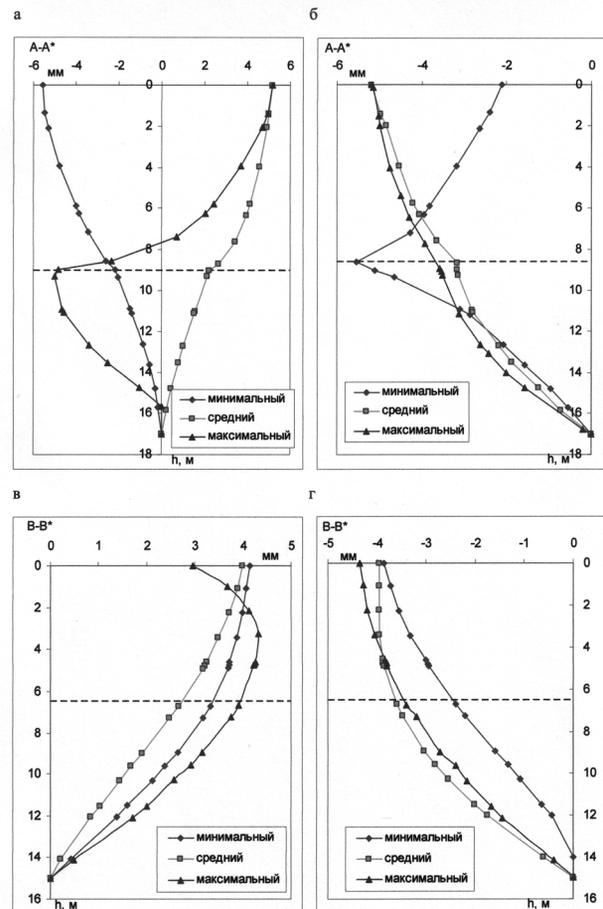


Рис. 5. Вертикальные (а, в) и горизонтальные (б, г) перемещения грунтов по вертикальным сечениям (см. рис. 4) насыпной земляной плотины: а, б – в центральной части гребня; в, г – в середине верхнего откоса

В результате всех вариантов расчетов установлены закономерности деформирования и смещения плотины, а также формирования кривой депрессии в ее теле в зависимости от свойств слагающих грунтов и уровня внешней водной нагрузки. Рис. 4 и 5 наглядно иллюстрируют, что процессы деформирования захватывают не только тело самой плотины, но и подстилающее моренное основание на глубину, примерно равную

высоте плотины (для исследуемого случая). Причем на начальной стадии нагружения (минимальный уровень воды) в центральной части плотины происходит уплотнение (усадка), но в последующем проявляется ее «выпучивание» примерно на величину усадки (см. рис. 5а). Горизонтальные перемещения гребня плотины аппроксимируются зависимостью $h = 0,15u^2 + 0,17u + 17$ и возрастают с увеличением нагрузки (уровня воды) до относительных значений 5×10^{-2} (см. рис. 5б).

Горизонтальные перемещения нагружаемого склона плотины аналогичны перемещениям гребня с достижением максимальных величин примерно 4×10^{-2} (см. рис. 5г). Вертикальные перемещения при промежуточном нагружении также имеют аналогичный характер, но при максимальном нагружении, когда уровень воды повышается и достигает уровня гребня плотины, графики вертикальных перемещений свидетельствуют об образовании в приповерхностной части зоны разуплотнения (мощностью до 0,2 высоты плотины) и далее зоны уплотнения (мощностью до 0,5 высоты плотины) (см. рис. 5в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены насыпные грунтовые гидротехнические сооружения на моренном основании с точки зрения требований к ответственным объектам. Выполнен краткий анализ аварий насыпных грунтовых плотин и дамб хвостохранилищ Мурманской области, а также резервуара со

сточными водами рудника «Талвиваара» (Финляндия).

Применительно к плотине на р. Пиренга проведены комплексные георадарные и сейсмомографические исследования, результаты которых позволили оценить состояние плотины, трассировать депрессионную плоскость и выявить локальные зоны повышенного водонасыщения и фильтрации.

На основе экспериментальных исследований построена геомеханическая модель плотины, которая исследована с использованием специальной компьютерной программы. По результатам компьютерного моделирования установлены закономерности вертикальных и горизонтальных перемещений центральной части и низового склона плотины, а также моренного основания в зависимости от свойств слагающих грунтов и уровня воды.

Результаты проведенных исследований представляют собой методологическую и научно-техническую основу для прогнозирования наиболее уязвимых мест (зон) насыпного грунтового гидротехнического сооружения на моренном основании для условий Мурманской области и Северной Карелии. В практическом приложении результаты работы использованы для оценки состояния плотины на р. Пиренга в связи с проявившейся повышенной проницаемостью как самой плотины, так и ее сопряжения с моренным основанием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К а л а ш н и к А. И., К а л а ш н и к Н. А. Исследования ограждающего насыпного гидротехнического сооружения как прототипа дамбы хвостохранилища горно-обогатительного предприятия // Вестник КНЦ. 2013. № 1. С. 27–30.
2. К а л а ш н и к Н. А. Геоэкономические последствия при повреждении нефтепроводов: аспекты для Мурманской области // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2010. Т. 2. № 26. С. 101а–106.
3. К а л а ш н и к Н. А.. Компьютерное моделирование насыпной земляной плотины как прототипа ограждающей дамбы хвостохранилища // Международный научно-исследовательский журнал. Екатеринбург. 2012. № 4. С. 52–54.
4. К а л а ш н и к Н. А. Разработка автоматизированной информационной системы для решения задач геомеханики // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2007. № 11. С. 2–5.
5. М е л ь н и к о в Н. Н., К а л а ш н и к А. И. Инновационные георадарные технологии изучения подповерхностной структуры и состояния природно-технических систем // Вестник КНЦ, 2010. № 3. С. 4–8.
6. Причины аварий и повреждений плотин и их предупреждение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://engineeringsystems.ru/proektirovanie-kamenno-zemljanih-plotin/prichini-avariy.php>.
7. Строительные нормы и правила Российской Федерации «Гидротехнические сооружения. Основные положения» СНиП 33–01–2003. Ввод в действие с 01.01.2004. М.: Госстрой России, 2004. 30 с.
8. Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений» от 23 июня 1997 г. № 117-ФЗ.
9. http://alyurdrop.ucoz.ru/publ/obezvrezhivanie_pomjotokhranilishha_utilizacija_svezhikh_pomjotnykh_mass_i_nakoplenij_na/ptf_quot_murmanskaja_quot_obezvrezhivanie_pomjotokhranilishha/17-1-0-19
10. <http://www.tetralab.ru/display/QW/Talvivaara+mine>.
11. Ritcey G. M. Tailings management. Elsevier; Amsterdam; Oxford; New-York; Tokyo, 1989.

Kalashnik A. I., Mining Institute of the Kola centre of Science of RAS (Apatity, Russian Federation)
Kalashnik N. A., Mining Institute of the Kola centre of Science of RAS (Apatity, Russian Federation)
Zaporozhets D. V., Mining Institute of the Kola centre of Science of RAS (Apatity, Russian Federation)

EVALUATION OF BULK EARTH STRUCTURE ON MORAINIC FOUNDATION

The bulk earth hydrotechnical structures are considered from the standpoint of requirements maintained for important facilities. Complex georadar and seismic tomography studies were performed on the dam of the River Pirenga. The obtained research results were used to construct a geomechanic model and to carry out purposeful computer modeling. Performed works allowed to make estimation of the dam condition, to site depression plane, and to reveal local zones of high water saturation and filtration. The research results can be used as a methodological and scientific-engineering basis for substantiated prediction of the most sensi-

tive areas (zones) of the earth bulk hydrotechnical facility erected on morainic foundation in conditions of Murmansk region and Northern Karelia.

Key words: bulk earth hydrotechnical structures; dam; georadar; studies; computer modeling; evaluation

REFERENCES

1. Kalashnik A. I., Kalashnik N. A. Study of a bulk hydraulic engineering construction as prototype for a tailing dam of mining and dressing enterprise [Issledovaniya ograzhdayushchego nasypnogo gidrotekhnicheskogo sooruzheniya kak prototipa damby khvostokhranilishcha gorno-obogatitel'nogo predpriyatiya]. *Vestnik KNTs* [Newsletter of Kola Science Centre]. 2013. № 1. P. 27–30.
2. Kalashnik N. A. Geoeconomic consequences of oil pipelines damage: aspects for Murmansk region [Goeekonomicheskie posledstviya pri povrezhdenii nefteprovodov: aspekty dlya Murmanskoy oblasti]. *Sever i rynek: formirovaniye ekonomicheskogo poryadka* [The North and the market: development of economic order]. 2010. Vol. 2. № 26. P. 101a–106.
3. Kalashnik N. A. Computer modelling of the bulk earth dam as a prototype for dam tailing [Komp'yuternoe modelirovaniye nasypnoy zemlyanoy plotiny kak prototipa ograzhdayushchey damby khvostokhranilishcha]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International scientific and research journal]. 2012. № 4. P. 52–54.
4. Kalashnik N. A. Design of automated informational system for solving geomechanical problems [Razrabotka avtomatizirovannoy informatsionnoy sistemy dlya resheniya zadach geomekhaniki]. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti* [Automation, telemechanization and communication in oil industry]. 2007. № 11. P. 2–5.
5. Mel'nikov N.N., Kalashnik A. I. Innovative georadar research technologies for subsurface structure and state of natural-technical systems [Innovatsionnye georadarnye tekhnologii izucheniya podpoverkhnostnoy struktury i sostoyaniya prirodno-tekhnicheskikh sistem]. *Vestnik KNTs* [Vestnik of Kola Science Centre]. 2010. № 3. P. 4–8.
6. *Prichiny aviariy i povrezhdeniy plotin i ikh preduprezhdenie* [Causes of accidents and damages of dams, and preventive measures]. Available at: <http://engineeringssystem.ru/proektirovaniye-kamenno-zemljanih-plotin/prichini-aviariy.php>
7. *Stroitel'nye normy i pravila Rossiyskoy Federatsii "Gidrotekhnicheskiy sooruzheniya. Osnovnyye polozheniya"* SNiP 33–01–2003 [RF Construction codes and regulations «Hydraulic engineering constructions. Main principles» SNiP 33–01–2003]. Start-up 01.01.2004 Moscow, The Russian Federation State Committee for Construction, Architectural and Housing Policy Publ., 2004. 30 p.
8. *Federal'nyy zakon "O bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy ot 23 iyunya 1977 g. № 117-FZ"* [Federal law “On Safety of Hydraulic engineering constructions”] June 23, 1997. № 117-FL
9. http://alyudrop.ucoz.ru/publ/obezvrezhivaniye_pomjotokhranilishha_utilizatsiya_svezhikh_pomjotnykh_mass_i_nakoplenij_na_ptf_quot_murmanskaja_quot_obezvrezhivaniye_pomjotokhranilishha/17-1-0-19
10. <http://www.tetralab.ru/display/QW/Talvivaara+mine>.
11. Ritcey G. M. *Tailings management*. Elsevier; Amsterdam; Oxford; New-York; Tokyo, 1989.

Поступила в редакцию 03.04.2014

СЕРГЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ БАКУШЕВ

доктор технических наук, профессор кафедры механики Инженерно-строительного института, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (Пенза, Российская Федерация)
tim-graf_penza@rambler.ru

ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНЫЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ-НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ ДЕФОРМАЦИЙ

Рассматривается задача построения дифференциальных уравнений характеристик и соотношений на них, а также определения скоростей распространений продольно-поперечных волн деформаций в сплошной среде, механическое поведение которой описывается геометрически-нелинейными аналогами произвольных перекрестных зависимостей между первыми инвариантами тензоров и вторыми инвариантами девиаторов обобщенных напряжений и деформаций. Исследуются условия возникновения чисто продольных и чисто поперечных волн. В качестве примера строятся векторные диаграммы продольно-поперечных геометрически-нелинейных волн деформаций для трех геометрически-нелинейных аналогов математических моделей сплошной среды.

Ключевые слова: волны деформаций, плоская задача, физическая нелинейность, геометрическая нелинейность

Задача определения напряженно-деформированного состояния полупространства при действии на его поверхности изменяющихся во времени нормальных $p(t)$ и касательных $q(t)$ нагрузок (рис. 1) сводится, вообще говоря, к определению параметров продольно-поперечных волн деформаций, распространяющихся в сплошной среде.

Для сплошной среды, механическое поведение которой описывается уравнениями теории пластического течения, либо уравнениями динамики грунтов С. С. Григоряна, либо уравнениями билинейной теории пластичности, обзор решений данной задачи изложен в монографии [3].

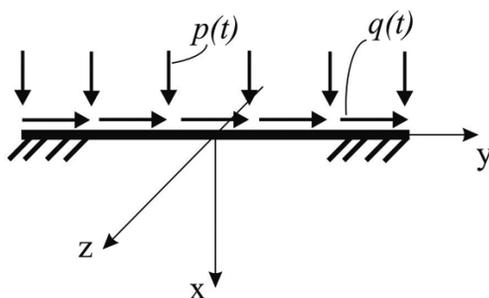


Рис. 1

В данной работе рассматриваются сплошные среды, механическое поведение которых описывается геометрически-нелинейными аналогами произвольных перекрестных зависимостей между первыми инвариантами тензоров σ^* и ϵ^* и вторыми инвариантами девиаторов T^* и Γ^* обобщенных напряжений и деформаций:

$$\sigma^* = 3K^*(\epsilon^*, \Gamma^*) \epsilon^*; T^* = G^*(\epsilon^*, \Gamma^*) \Gamma^*, \quad (1)$$

здесь $K^*(\epsilon^*, \Gamma^*)$ – геометрически-нелинейный аналог модуля объемного расширения (сжатия),

$G^*(\epsilon^*, \Gamma^*)$ – геометрически-нелинейный аналог модуля сдвига.

Пусть на поверхности полупространства действуют равномерно-распределенные нагрузки, бесконечно протяженные в направлении осей y и z (см. рис. 1). Полупространство будет находиться в условиях плоской задачи:

$$u = u(x), v = v(x), w = 0. \quad (2)$$

Тогда [1]:

$$\begin{aligned} \epsilon_x^* &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] = \epsilon_x^*(x), \\ \epsilon_y^* &= \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\gamma_{xy}^* = \gamma_{yx}^* = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial x} = \gamma_{xy}^*(x).$$

При этом $\epsilon^* = \epsilon_x^* + \epsilon_y^* = \epsilon_x^*$,

$$\Gamma^* = \sqrt{4(\epsilon_x^*)^2 + 3(\gamma_{xy}^*)^2} / \sqrt{3}. \quad (4)$$

Физические уравнения для геометрически-нелинейной модели сплошной среды имеют вид:

$$\begin{aligned} \sigma_x^* &= \left(K^* + \frac{4}{3} G^* \right) \epsilon^*; \quad \tau_{xy}^* = G^* \gamma_{xy}^*; \\ \sigma_y^* &= \left(K^* - \frac{2}{3} G^* \right) \epsilon^*; \quad \tau_{yz}^* = 0; \\ \sigma_z^* &= \left(K^* - \frac{2}{3} G^* \right) \epsilon^*; \quad \tau_{zx}^* = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Подставляя соотношения (5) в динамические уравнения равновесия без учета объемных сил

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \sigma_x^* + \frac{\partial u}{\partial y} \tau_{xy}^* \right] + \\
& + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \tau_{yx}^* + \frac{\partial u}{\partial y} \sigma_y^* \right] = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\
& \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial v}{\partial x} \sigma_x^* + \left(1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \tau_{xy}^* \right] + \\
& + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial v}{\partial x} \tau_{yx}^* + \left(1 + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \sigma_y^* \right] = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}
\end{aligned} \tag{6}$$

и учитывая зависимости (1) и (4), получим два уравнения, описывающих процесс распространения продольно-поперечных геометрически-нелинейных волн деформаций:

$$\begin{aligned}
& \left\{ \left(K^* + \frac{4}{3} G^* \right) \left[\varepsilon_x + \frac{1}{2} (\varepsilon_x^2 + \gamma_{xy}^2) \right] + (1 + \varepsilon_x)^2 A \right\} \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial x} + \\
& + (1 + \varepsilon_x) (A \varepsilon_x + B) \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial x} = \rho \frac{\partial v_x}{\partial t}; \\
& (1 + \varepsilon_x) (\gamma_{xy} A + C) \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial x} + \\
& + \left\{ \left(K^* + \frac{4}{3} G^* \right) \left[\varepsilon_x + \frac{1}{2} (\varepsilon_x^2 + \gamma_{xy}^2) \right] + \right. \\
& \left. + \gamma_{xy} (A \gamma_{xy} + B) + (C \gamma_{xy} + D) \right\} \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial x} = \rho \frac{\partial v_x}{\partial t}.
\end{aligned} \tag{7}$$

Здесь введены обозначения:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x}, \quad v_x = \frac{\partial u}{\partial t}, \quad v_y = \frac{\partial v}{\partial t}. \tag{8}$$

Значения коэффициентов A, B, C, D равны:

$$\begin{aligned}
A &= \left(K^* + \frac{4}{3} G^* \right) + \left(\frac{\partial K^*}{\partial \varepsilon^*} + \frac{4}{3} \frac{\partial G^*}{\partial \varepsilon^*} \right) \varepsilon^* + \\
& + \frac{4(\varepsilon^*)^2}{3 \Gamma^*} \left(\frac{\partial K^*}{\partial \Gamma^*} + \frac{4}{3} \frac{\partial G^*}{\partial \Gamma^*} \right); \\
B &= \frac{\varepsilon^* \gamma_{xy}^*}{\Gamma^*} \left(\frac{\partial K^*}{\partial \Gamma^*} + \frac{4}{3} \frac{\partial G^*}{\partial \Gamma^*} \right); \\
C &= \gamma_{xy}^* \left(\frac{\partial G^*}{\partial \varepsilon^*} + \frac{4 \varepsilon^*}{3 \Gamma^*} \frac{\partial G^*}{\partial \Gamma^*} \right); \\
D &= G^* + \frac{(\gamma_{xy}^*)^2}{\Gamma^*} \frac{\partial G^*}{\partial \Gamma^*}.
\end{aligned} \tag{9}$$

Присоединяя к уравнениям (7) уравнения совместности

$$\frac{\partial \varepsilon_x}{\partial t} = \frac{\partial v_x}{\partial x}, \quad \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial t} = \frac{\partial v_y}{\partial x}, \tag{10}$$

получаем систему четырех дифференциальных уравнений первого порядка в частных производных относительно величин

$$\frac{\partial \varepsilon_x}{\partial x}, \quad \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial x}, \quad \frac{\partial v_x}{\partial t}, \quad \frac{\partial v_y}{\partial t}; \quad \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial t}, \quad \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial t}, \quad \frac{\partial v_x}{\partial x}.$$

В матричной форме система уравнений (7), (10)

имеет вид:

$$\mathbf{A} \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial x} + \mathbf{B} \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} = 0. \tag{11}$$

Здесь матрицы \mathbf{A} и \mathbf{B} равны:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\rho & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\rho \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

причем

$$\begin{aligned}
a_{11} &= \left(K^* + 4G^*/3 \right) \left[\varepsilon_x + (\varepsilon_x^2 + \gamma_{xy}^2)/2 \right] + \\
& + (1 + \varepsilon_x)^2 A; \\
a_{12} &= (1 + \varepsilon_x) (A \gamma_{xy} + B); \\
a_{21} &= (1 + \varepsilon_x) (\gamma_{xy} A + C); \\
a_{22} &= \left(K^* + 4G^*/3 \right) \left[\varepsilon_x + (\varepsilon_x^2 + \gamma_{xy}^2)/2 \right] + \\
& + \gamma_{xy} (A \gamma_{xy} + B) + (C \gamma_{xy} + D).
\end{aligned} \tag{12}$$

Вектор-столбец $\bar{\mathbf{u}}$ имеет следующую структуру: $\bar{\mathbf{u}} = \left[\varepsilon_x \quad \gamma_{xy} \quad v_x \quad v_y \right]^T$.

Характеристические кривые уравнения (11) определяются путем решения уравнения $|\mathbf{A} - \alpha \mathbf{B}| = 0$ или в развернутой форме:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \alpha \rho & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & \alpha \rho \\ -\alpha & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -\alpha & 0 & -1 \end{vmatrix} = 0,$$

вещественные решения которого задают характеристические кривые, описываемые дифференциальными уравнениями:

$$\alpha_{i,j} = \frac{dx}{dt}, \quad i=1,2; \quad j=1,2. \tag{13}$$

Здесь

$$\alpha_{1,1} = +\sqrt{M_1/(2\rho)}, \quad \alpha_{1,2} = -\sqrt{M_1/(2\rho)},$$

$$\alpha_{2,1} = +\sqrt{M_2/(2\rho)}, \quad \alpha_{2,2} = -\sqrt{M_2/(2\rho)},$$

причем

$$M_{1,2} = (a_{11} + a_{22}) \pm \sqrt{(a_{11} - a_{22})^2 + 4a_{12}a_{21}}. \quad (14)$$

Дифференциальные уравнения (13) определяют, вообще говоря, четыре семейства характеристических кривых. Система уравнений (7), (10) будет гиперболического типа, если все $\alpha_{i,j}$ будут вещественными.

Найдем соотношения вдоль характеристических направлений. Введем вектор $\bar{\mathbf{I}} = [l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4]$. Компоненты вектора $\bar{\mathbf{I}}$ являются решением уравнения $\bar{\mathbf{I}} \cdot (\mathbf{A} - \alpha \mathbf{B}) = 0$, откуда находим:

$$\left. \begin{aligned} (a_{11} - \alpha^2 \rho) \cdot l_1 + a_{21} \cdot l_2 &= 0; \\ (a_{22} - \alpha^2 \rho) \cdot l_2 + a_{12} \cdot l_1 &= 0; \\ l_3 - \alpha \rho \cdot l_1 &= 0; \\ l_4 - \alpha \rho \cdot l_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Соотношения вдоль характеристик найдем на основании уравнения $\bar{\mathbf{I}} \cdot \mathbf{B} \cdot \left(\frac{d\bar{\mathbf{u}}}{dt} \right) = 0$, откуда

$$l_3 \frac{d\varepsilon_x}{dt} + l_4 \frac{d\gamma_{xy}}{dt} - \rho l_1 \frac{dv_x}{dt} - \rho l_2 \frac{dv_y}{dt} = 0. \quad (16)$$

Используя далее зависимости (15), уравнение (16) приведем к виду:

$$a_{21}(\alpha^2 \rho - a_{22})(\alpha d\varepsilon_x - dv_x) + \alpha(\alpha^2 \rho - a_{11})(\alpha^2 \rho - a_{22})d\gamma_{xy} - a_{12}a_{21}dv_y = 0. \quad (17)$$

Итак, вдоль четырех семейств характеристик (13) выполняются соотношения (17).

Запишем систему уравнений (7), (10) в терминах перемещений. Используя соотношения (8), систему (7) приведем к виду:

$$\left. \begin{aligned} a_{11} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a_{12} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \\ a_{21} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a_{22} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Система (10) при этом удовлетворяется тождественно.

Пусть $\omega(x, t) = 0$ – уравнение поверхности разрыва [4]. Применяя кинематические условия совместности $\left[\frac{\partial^2 u}{\partial x_j \partial x_k} \right] = \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_k} \lambda_u$ к системе (18),

получим динамические условия совместности:

$$\left. \begin{aligned} \left[a_{11} \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \right)^2 - \rho \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} \right)^2 \right] \lambda_u + a_{12} \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \right)^2 \lambda_v &= 0; \\ a_{21} \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \right)^2 \lambda_u + \left[a_{22} \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \right)^2 - \rho \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} \right)^2 \right] \lambda_v &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Поскольку значения скоростей распространения волн N по нормали к фронту определяются соотношением:

$$N^2 = \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} \right)^2 / \left[\left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \right)^2 \right],$$

а направляющие косинусы l_i вектора нормали к фронту волны в локальной системе координат, совпадающей с главными осями, равны

$$l_1^2 = \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \right)^2 / \left[\left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \right)^2 \right],$$

$$l_2^2 = \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \right)^2 / \left[\left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \right)^2 \right],$$

то система (19) после элементарных преобразований получает вид:

$$\left. \begin{aligned} (a_{11} l_1^2 - \rho N^2) \lambda_{u_1} + a_{12} l_1^2 \lambda_{u_2} &= 0; \\ a_{21} l_1^2 \lambda_{u_1} + (a_{22} l_1^2 - \rho N^2) \lambda_{u_2} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Приравнявая к нулю определитель системы (20), то есть полагая для коэффициентов прерывности λ_{u_1} и λ_{u_2} существование ненулевых решений, получим:

$$2\rho N_{1,2}^2 = l_1^2 \left[(a_{11} + a_{22}) \pm \sqrt{(a_{11} - a_{22})^2 + 4a_{12}a_{21}} \right]. \quad (21)$$

Формула (21) определяет две независимые скорости распространения продольно-поперечных волн деформаций в сплошной среде.

Выпишем коэффициенты, входящие в формулы (19) и, соответственно, в формулу (21). При этом будем помнить, что в главных осях

$$\gamma_{xy}^* = \gamma_{yx}^* = 0, \text{ однако } \frac{\partial \gamma_{xy}^*}{\partial x} \neq 0 \text{ и } \frac{\partial \gamma_{xy}^*}{\partial y} \neq 0.$$

Кроме того, для данной задачи $\gamma_{xy}^* = \gamma_{yx}^*$.

На основании соотношений (4) получаем $\varepsilon^*/\Gamma^* = \sqrt{3/4}$. Теперь коэффициенты A, B, C, D , определяемые соотношениями (9), будут равны:

$$A = \left(K^* + \frac{4}{3} G^* \right) + \left(\frac{\partial K^*}{\partial \varepsilon^*} + \frac{4}{3} \frac{\partial G^*}{\partial \varepsilon^*} \right) \sqrt{\frac{3}{4}} \Gamma^* + \left(\frac{\partial K^*}{\partial \Gamma^*} + \frac{4}{3} \frac{\partial G^*}{\partial \Gamma^*} \right) \Gamma^*;$$

$$B = 0; \quad C = 0; \quad D = G^*.$$

Следовательно,

$$a_{11} = \left(K^* + \frac{4}{3} G^* \right) \sqrt{\frac{3}{4}} \Gamma^* + (1 + \sqrt{3} \Gamma^*) \left[\left(K^* + \frac{4}{3} G^* \right) + \left(\frac{\partial K^*}{\partial \varepsilon^*} + \frac{4}{3} \frac{\partial G^*}{\partial \varepsilon^*} \right) \sqrt{\frac{3}{4}} \Gamma^* + \left(\frac{\partial K^*}{\partial \Gamma^*} + \frac{4}{3} \frac{\partial G^*}{\partial \Gamma^*} \right) \Gamma^* \right]; \quad (22)$$

$$a_{12} = 0; \quad a_{21} = 0;$$

$$a_{22} = \left(K^* + \frac{4}{3} G^* \right) \sqrt{\frac{3}{4}} \Gamma^* + G^*.$$

С учетом соотношений (22) формула (21) получает вид:

$$2\rho N_1^2 = l_1^2 (2a_{11}); \quad 2\rho N_2^2 = l_2^2 (2a_{22}). \quad (23)$$

Рассмотрим условия возникновения и распространения чисто продольных и чисто поперечных волн деформаций.

В локальной системе координат, совпадающей в каждой точке сплошной среды с направлениями главных деформаций (напряжений), введем вектор $\bar{\lambda}$ с составляющими $(\lambda_{u_1}, \lambda_{u_2})$ в каждой точке сплошной среды. Пусть λ_n – проекция вектора $\bar{\lambda}$ на нормаль к переднему фронту волны (рис. 2), то есть $\lambda_n = \lambda_{u_1} l_1 + \lambda_{u_2} l_2$, где $l_1 = \cos(\alpha)$, $l_2 = \sin(\alpha)$; l_1 и l_2 – направляющие косинусы нормали к переднему фронту волны.

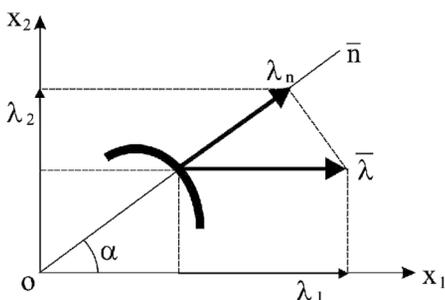


Рис. 2

Случай 1. Пусть $l_1 = 1, l_2 = 0$, то есть главное направление x_1 совпадает с направлением нормали к фронту волны ($\alpha = 0$). Система (20) получает вид:

$$\left. \begin{aligned} (a_{11} - \rho N^2) \lambda_{u_1} &= 0; \\ (a_{22} - \rho N^2) \lambda_{u_2} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Отсюда получаем: $N_1^2 = a_{11}/\rho, N_2^2 = a_{22}/\rho$.

Рассмотрим распространение волны N1. Если $N = N1$, то система (24) приводится к виду:

$$\left. \begin{aligned} 0 \cdot \lambda_{u_1} &= 0; \\ (a_{22} - \rho N^2) \lambda_{u_2} &= 0, \end{aligned} \right\}$$

то есть так как $a_{22} \neq \rho N_1^2$, то $\lambda_{u_2} = 0$. Это означает, что из двух составляющих вектора $\bar{\lambda}$ одна равна нулю, то есть проекции λ_n и λ_{u_1} совпадают с самим вектором $\bar{\lambda}$, то есть главное направление x_1 и нормаль к фронту волны \bar{n} совпадают с вектором скорости N_1 . Имеет место чисто продольная волна.

При рассмотрении распространения волны N_2 , то есть $N = N_2$, система (24) получает вид:

$$\left. \begin{aligned} (a_{11} - \rho N_2^2) \lambda_{u_1} &= 0; \\ 0 \cdot \lambda_{u_2} &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Это означает, так как $a_{11} \neq \rho N_2^2$, что $\lambda_{u_1} = 0$, то есть проекции λ_n и λ_{u_2} совпадают с самим вектором $\bar{\lambda}$. Следовательно, главное направление x_1 и нормаль к фронту волны \bar{n} перпендикулярны к вектору скорости N_2 . Имеет место чисто поперечная волна.

Случай 2. Пусть $l_1 = 0, l_2 = 1$, то есть главное направление x_2 совпадает с направлением нормали к фронту волны ($\alpha = 90^\circ$). Система (19) получает вид:

$$\left. \begin{aligned} -\rho N^2 \lambda_{u_1} &= 0; \\ -\rho N^2 \lambda_{u_2} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Отсюда следует, что $N = 0$, то есть в направлении главного направления x_2 волна не распространяется.

На рис. 3 показаны векторные диаграммы мгновенных скоростей продольно-поперечных геометрически-нелинейных волн деформаций, построенные по уравнениям (23) для трех математических моделей сплошной среды.

Модель 1. Механическое поведение сплошной среды описывается линейным законом, то есть деформационные зависимости (1) имеют вид:

$$\sigma^* = K_0 \varepsilon^*; \quad \Gamma^* = G_0 \Gamma^*. \quad (26)$$

Модель 2. Механическое поведение сплошной среды описывается квадратичным законом в от-

ношении сдвиговых деформаций. Деформационные зависимости (1) в этом случае равны:

$$\sigma^* = K_0 \varepsilon^*; T^* = G_0 (1 - \Gamma^* / (2\Gamma_s)) \Gamma^*. \quad (27)$$

Модель 3. Механическое поведение сплошной среды описывается перекрестными зависимостями между инвариантами напряженного и деформированного состояний:

$$\begin{aligned} \sigma^* &= K_0 \left[1 - (q/\varepsilon^*) (2 - \Gamma^*/\Gamma_s)^2 (\Gamma^*/\Gamma_s)^2 \right] \varepsilon^*; \\ T^* &= \left[G_0 (1 - \Gamma^*/(2\Gamma_s)) + K_0 f (q/\Gamma_s) (2 - \Gamma^*/\Gamma_s)^2 (\Gamma^*/\Gamma_s) - \right. \\ &\quad \left. - K_0 f (\varepsilon^*/\Gamma^*) \right] \Gamma^*. \end{aligned} \quad (28)$$

Модель 1 соответствует геометрически-нелинейному аналогу линейной теории упругости, модель 2 соответствует геометрически-нелинейному аналогу теории малых упруго-пластических деформаций, модель 3 соответствует геометрически-нелинейному аналогу деформационной теории пластичности сыпучей среды [1], [2].

На рис. 3 сплошная линия соответствует приведенным скоростям $2\rho N_1^2/G_0$, пунктирная – скоростям $2\rho N_2^2/G_0$.

В формулах (26), (27), (28) имеем: K_0 – начальный модуль объемного расширения (сжатия); G_0 – начальный модуль сдвига при чистом сдвиге; f – аналог коэффициента внутреннего трения; q – коэффициент дилатансии; Γ_s – предельная интенсивность деформаций сдвига, причем $0 \leq \Gamma^*/\Gamma_s \leq 1$.

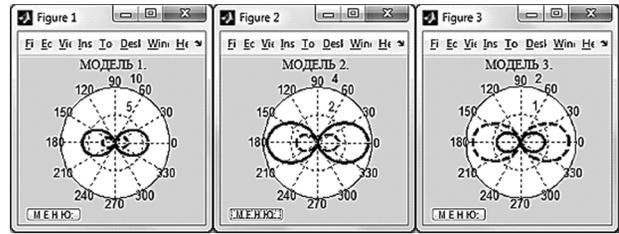


Рис. 3. Векторные диаграммы мгновенных скоростей продольно-поперечных геометрически-нелинейных волн деформаций

Исходные данные:

$$\begin{aligned} K_0/G_0 &= 1,1547; q/\Gamma_s = 1; \Gamma^*/\Gamma_s = 0,75; \\ \Gamma_s &= 0,1155; f = 0,5. \end{aligned}$$

Численные исследования показывают, что скорости распространения продольно-поперечных волн деформаций существенно зависят как от рассматриваемого направления распространения волны, так и от уровня напряженного и деформированного состояния в рассматриваемой точке среды, а также от величины физических констант материала сплошной среды.

Изложенные в статье результаты могут быть использованы при построении алгоритмов расчета напряженно-деформированного состояния геометрически и физически нелинейных полупространств, находящихся в условиях плоской деформации, от действия на поверхности динамических, в том числе ударных, нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакушев С. В. Геометрически и физически нелинейная механика сплошной среды: Плоская задача. М.: Книжный дом «Либроком», 2013. 312 с.
2. Гениев Г. А. К вопросу о деформационной теории пластичности сыпучей среды // Строительная механика и расчет сооружений. 1974. № 4. С. 8–10.
3. Новацкий В. К. Волновые задачи теории пластичности / Пер. с польского В. А. Шачнева; Под ред. Г. С. Шапиро. М.: Мир, 1978. 307 с.
4. Смирнов В. И. Курс высшей математики. Т. 4. Ч. 2. М.: Наука, 1981. 550 с.

Bakushev S. V., Penza State University of Architecture and Construction (Penza, Russian Federation)

LONGITUDINAL-CROSS GEOMETRICAL NON-LINEAR WAVES OF DEFORMATION

The author considers the task of constructing differential equations' characteristics and relations on them. The other task was to define the speed of propagation of longitudinal-cross deformation waves in continuum, mechanical behavior of which is described by arbitrary cross relations between the first invariants of tensors and second invariants of stress and deformation deviators. Conditions of the origin of purely longitudinal and pure cross-waves were researched. As an example, the vector diagrams of long cross-waves' deformation for three mathematical models of continuum are constructed.

Key words: waves of deformations, plane problem, physical non-linearity, geometric non-linearity

REFERENCES

1. Bakushev S. V. *Geometricheski i fizicheski nelineynaya mekhanika sploshnoy sredy: Ploskaya zadacha* [Geometrically and physically nonlinear mechanics of continuum: flat]. Moscow, Librokom Publ., 2013. 312 p.
2. Geniev G. A. To the question of deformation theory of granular media of plasticity [K voprosu o deformatsionnoy teorii plastichnosti sypuchey sredy]. *Structural mechanics and calculation of structures*. 1974. № 4. P. 8–10.
3. Novatskiy V. K. *Volnovye zadachi teorii plastichnosti* [Wave problems of plasticity theory] / Translated from the Polish by V. A. Shachneff; Ed. G. S. Shapiro. Moscow, Mir Publ., 1978. 307 p.
4. Smirnov V. I. *Kurs vysshey matematiki* [A course of higher mathematics]. Vol. 4. Part 2. Moscow, Nauka Publ., 1981. 550 p.

Поступила в редакцию 19.02.2014

АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ВЕЛИЧКО

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники и электроэнергетики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
velichko@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

АЛЕКСАНДР БОРИСОВИЧ ЧЕРЕМИСИН

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники и электроэнергетики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
alexiii1982@mail.ru

ГЕНРИХ БОЛЕСЛАВОВИЧ СТЕФАНОВИЧ

доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
gstef@psu.karelia.ru

РЕНТГЕНОВСКИЙ ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ АНАЛИЗ АНОДНЫХ ПЛЕНОК ОКСИДА ВАНАДИЯ*

В статье приведены результаты рентгеновского фотоэлектронного анализа анодных пленок оксида ванадия при воздействии на них плазменного, рентгеновского и ультрафиолетового излучений. Впервые исследована непосредственная (*ab initio*) восстановительная модификация поверхности пленки метастабильного оксида в вакууме и оценена доля оксидных фаз материала.

Ключевые слова: оксиды переходных металлов, оксиды ванадия, рентгеновский фотоэлектронный анализ, модификация

В последние годы благодаря интенсивным экспериментальным и теоретическим исследованиям в технологии тонких пленок достигнут значительный прогресс. Тонкие пленки оксидов металлов и полупроводников можно получить различными способами. Простым и часто применяемым способом является термическое окисление. Так, термическое окисление кремния – основной метод получения буферных пленок SiO₂ при производстве интегральных микросхем. Однако этот метод, как правило, требует высокотемпературной обработки подложек с металлическими или полупроводниковыми прекурсорами, что не всегда допустимо. Поэтому разработаны достаточно низкотемпературные методы получения пленок, основанные на различных формах внешнего осаждения оксидов или их компонентов на подложки.

Электрохимическое (анодное) окисление [3] – это низкотемпературный процесс получения оксидных пленок на поверхности металлов и полупроводников при анодной поляризации в кислородосодержащих средах с ионной проводимостью: в растворах и расплавах электролитов, в плазме газового разряда в кислороде, а также в контакте с

твердыми электролитами. По сравнению с другими способами получения собственных оксидов на поверхности металлов (термическое, химическое окисление) анодное окисление (АО) имеет ряд преимуществ. В частности, является одним из наиболее удобных способов получения тонких пленок оксидов переходных металлов в неравновесных условиях с образованием метастабильных структурных и химических фаз.

Ранее было показано [2], что перспективными для разработки неорганических литографических резистов являются метастабильные аморфные пленки диоксида ванадия, полученные методом АО и имеющие высокую чувствительность к фотонному и электронному облучениям и демонстрирующие высокое разрешение (<100 нм).

Структура анодных оксидных пленок (АОП) ванадия исследовалась в [5], где показано, что выбранные режимы окисления формируют диоксид ванадия с неупорядоченной структурой, область ближнего порядка которой не превышает 10–11 Å. Моделирование структуры ближнего порядка показало, что это не рутил, характерный для металлической фазы VO₂, и не моноклинное искажение струк-

туры рутила, наблюдаемое в полупроводниковой фазе. Рентгеноструктурные исследования оксида с оптимальными параметрами для литографических приложений подтвердили выводы работы [5].

Анодный оксид ванадия может быть, таким образом, охарактеризован как аморфный диоксид ванадия с метастабильным ближним порядком и наличием на внешней границе тонкого слоя высших оксидов.

Одной из актуальных и до сих пор нерешенных задач в разработке неорганических резистов на основе оксидов переходных металлов является исследование стехиометрического и фазового состава АОП в процессе (*ab initio*) их плазменной, электронной и фотонной модификации. Отсутствие систематизированных предствлений о влиянии модифицирующего воздействия на структуру и свойства резистивного материала затрудняет их дальнейшее развитие в плане подбора оптимальных условий литографического процесса, улучшения их плазменной и термической стойкости.

Метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФС), реализованный на базе платформы НАНОФАБ 25 (ФТИМ СПбГПУ, г. Санкт-Петербург), дает уникальную возможность проводить физико-химический анализ метастабильных аморфных пленок непосредственно после воздействия на них корпускулярных и фотонных излучений. Наличие сверхвысоковакуумного радиального транспортного модуля обеспечивает проведение многосторонних исследований наноструктур с атомарным разрешением, включая лучевые (электронная и ионная спектроскопия) и зондовые (АСМ и СТМ) методы.

В данной работе с помощью РФС исследуется АОП ванадия с целью установления их стехиометрического состава до и после плазменной, рентгеновской и ультрафиолетовой (УФ) модификаций.

МЕТОД РФС

Метод РФС является мощным методом химического анализа поверхностных и приповерхностных слоев (до 5 nm) диэлектрических пленок на проводящих подложках. По существу анализ представляет собой сравнение спектров фотоэлектронной эмиссии с эталонными зависимостями для реально достижимых чистых образцов.

Метод РФС основан на эффекте фотоэмиссии электронов из образца под действием рентгеновского излучения. При ионизации внутренней или валентной оболочки атома кинетическая энергия фотоэлектрона (E_k) определяется как разница между энергией возбуждающего излучения ($h\nu$) и энергией связи электрона в атоме (E_a), а также работой выхода (ϕ): $E_k = h\nu - E_a - \phi$.

Это соответствует случаю проводящего образца, когда уровни Ферми прибора и образца выравниваются при электрическом контакте. В случае непроводящих образцов добавляется дополнительный член уравнения, определяемый величиной положительной зарядки поверхности образца.

Поскольку атомы разного сорта имеют уникальный набор энергетических уровней, то получаемый спектр фотоэлектронов позволяет определить элементный состав образца на поверхности. Глубина анализируемого слоя определяется длиной свободного пробега фотоэлектрона с определенной энергией и не превышает 50 Å. Измеряя площадь фотоэлектронной линии и учитывая факторы элементной чувствительности, можно рассчитать относительную атомную концентрацию элементов на поверхности. Погрешность метода в определении состава поверхностного слоя обычно не превышает 10–15 отн. %. Чувствительность метода обычно составляет 0,1 отн. ат. %, или один атом на тысячу для легких элементов. Для тяжелых элементов типа W, Au, Pb чувствительность значительно выше.

Поскольку химическое состояние атома определяется распределением валентных электронов, то это заметно влияет на степень экранировки ядра оставшимися электронами и на энергию связи электрона в атоме. Поэтому по сдвигу линии соответствующей фотоионизации с определенной оболочки атома относительно стандартного положения можно судить о химическом состоянии атомов на поверхности. Большое количество литературных и каталожных данных позволяет быстро определить соответствие положения линии на спектре и определенного химического состояния. В случае если атомы на поверхности образца находятся в различных химических состояниях, фотоэлектронный спектр представляет собой суперпозицию вкладов от каждого химического состояния. Таким образом, метод РФС позволяет определять относительное количество атомов в различных химических состояниях.

Поскольку используемые рентгеновские источники создают излучение (обычно Ag-K α или Mg-K α), представляющее собой дублет двух близко расположенных рентгеновских линий, то для получения лучшего разрешения по энергиям используется монохроматизация рентгеновского излучения за счет пространственного разделения рентгеновских линий при дифракции на кристалле кварца. Это позволяет в два раза увеличить энергетическое разрешение на спектрах, что особенно важно при анализе сложных линий, соответствующих различным состояниям атомов на поверхности образца.

Предварительно полученные спектры РФС аппроксимируются суммой гауссовых функций, по которым оцениваются частотные пики энер-

гии связи электронов с атомами, их интенсивности, ширина и сдвиги относительно эталонных спектров. В результате можно рассчитать в исследуемом образце (вблизи поверхности) относительную концентрацию элементов, а также качественно оценить окружение (влияние) отдельных атомов. Последний вариант анализа особенно важен в связи с задачей данной работы, так как позволяет сделать выводы о степени окисления оксида переходного металла.

Отметим, что для исследования модификации важно, чтобы сам метод измерения не становился модифицирующим воздействием на материал.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

АО ванадия, полученного методом лазерной абляции, проводилось по методике, подробно описанной в [4]. Были синтезированы два образца АОП ванадия на подложке кремния для проведения РФС-анализа до и после модификации в вакууме и воздухе.

Исходная (немодифицированная) пленка

Образец № 1 представлял собой пленку, половина которой была анодирована, а другая половина не анодирована.

Наличие кислорода более 50 % (табл. 1) в неанодированной части пленки (ванадий) говорит о значительном окислении в воздухе приповерхностного слоя пленки. По стехиометрическому составу исследуемая область близка (на 60 %) к VO_2 , на что указывает детальный спектр энергетического уровня $V2p$ (3/2).

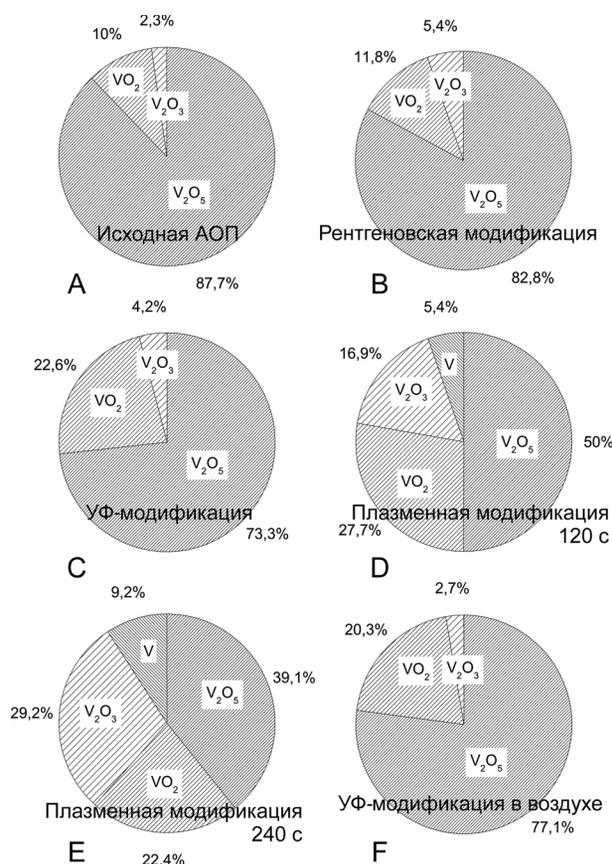
Таблица 1
Параметры спектра РФС ванадия и анодного оксида ванадия

Образец № 1	Позиция пиков, eV	Отн. площадь гауссова пика, %	Позиция, близкая к эталонному пику
Неанодированная пленка (ванадий)	516,60	58,194	VO_2
	512,68	15,845	V (металл)
	515,03	18,836	V_2O_3
	513,74	7,126	V (металл)
Исходная (немодифицированная) АОП ванадия (рисунок, А)	517,11	87,72	V_2O_5
	516,73	10,010	VO_2
	515,64	2,268	V_2O_3

Анодированная часть пленки образца № 1 представляет собой по поверхностному слою чистый оксид ванадия, который почти на 90 % имеет стехиометрический состав V_2O_5 (рисунок, А, табл. 1).

Модификация в вакууме

В ходе эксперимента тестировался образец № 1 в следующем порядке: исходная АОП → рентгеновская модификация (1 ч.) → УФ-модификация (жесткий ультрафиолет, 600 с) → плазменная модификация (120 с) → плазменная модификация (240 с) с РФС-измерением после каждого шага.



После рентгеновской модификации излучением мощностью ~500 W на площади пятна ~10 mm² в течение одного часа наблюдается (рисунок, В, табл. 2) незначительное перераспределение кислорода между фазами оксида ванадия (V_2O_5 , VO_2 и V_2O_3) с фактически отсутствием

Таблица 2
Параметры спектра РФС модифицированных в вакууме АОП ванадия

Образец № 1	Позиция пиков, eV	Отн. площадь гауссова пика, %	Позиция, близкая к эталонному пику
Рентгеновская модификация в вакууме АОП ванадия (рисунок, В)	517,18	82,767	V_2O_5
	516,73	11,836	VO_2
	515,80	5,397	V_2O_3
УФ-модификация в вакууме АОП ванадия (рисунок, С)	517,20	73,283	V_2O_5
	516,78	22,551	VO_2
	515,57	4,166	V_2O_3
Плазменная модификация в вакууме АОП ванадия (120 с) (рисунок, D)	517,18	50,04	V_2O_5
	516,37	27,69	VO_2
	515,61	16,91	V_2O_3
	514,70	5,36	V (металл)
Плазменная модификация в вакууме АОП ванадия (240 с)	517,23	39,15	V_2O_5
	516,69	22,45	VO_2
	515,84	29,18	V_2O_3
	514,67	9,22	V (металл)

восстановления пленки (то есть ухода кислорода). Данная процедура имела целью проверку воздействия рентгеновского излучения на поверхность образца в процессе РФС-измерения. Таким образом, было показано, что указанное воздействие является незначительным (с учетом длительности процесса модификации по сравнению со временем измерения ~ 5 мин).

Значительная модификация АОП ванадия наблюдается при воздействии жесткого ультрафиолета (рисунок, С, табл. 2) с энергией кванта 21 eV, мощностью $\sim 1,5$ mW на площади пятна ~ 10 mm² в течение 10 мин, что дает оценочную величину энергетической дозы ~ 10 J/cm². В результате УФ-облучения идет интенсивный разрыв связей V-O с уходом кислорода либо в вакуум, либо внутрь пленки и частичное восстановление поверхности от высшего оксида ванадия (V₂O₅) к низшим (V₂O₃ и VO₂).

Плазменная модификация АОП проводилась пучком ионов аргона с энергией 1 keV и плотностью тока ~ 10 μ A/cm², что дает оценочную величину ионной дозы $\sim 4 \cdot 10^{14}$ и $\sim 8 \cdot 10^{14}$ ион/cm² для времен экспонирования 120 с и 240 с соответственно. Как видно из рисунка, D и E, наблюдается существенная восстановительная модификация поверхности материала, прогрессирующая с увеличением ионной дозы.

Частичное восстановление до V₂O₃, VO₂, VO может свидетельствовать о значительном распылении приповерхностного слоя. При этом детальный анализ наличия других элементов показывает практическое отсутствие аргона (менее 1 %), внедряемого в пленку в процессе модификации.

Модификация на воздухе мягким ультрафиолетом

Тестировался образец № 2. АОП ванадия при РФС-диагностике (табл. 3) дает почти совпадающие результаты с образцом № 1 (рисунок, А, табл. 1 и 2), что говорит о хорошей воспроизводимости метода АО.

После воздействия мягкого ультрафиолета (частота 254 nm, энергетическая доза ~ 10 J/cm²) степень восстановления оксида ванадия (рисунок, F, табл. 3) практически идентична случаю модификации в вакууме жестким ультрафиолетом (рисунок, С, табл. 2).

ВЫВОДЫ

По результатам РФС-анализа модификации анодных пленок оксида ванадия можно сделать следующие выводы:

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

Таблица 3

Параметры спектра РФС исходной и модифицированной АОП ванадия мягким УФ модификации в воздухе

Образец № 2	Позиция пиков, eV	Отн. площадь гауссова пика, %	Позиция, близкая к эталонному пику
Исходная (немодифицированная) АОП ванадия	517,11	86,386	V ₂ O ₅
	516,67	12,100	VO ₂
	515,47	1,514	V ₂ O ₃
УФ-модификация в воздухе АОП ванадия	517,19	77,063	V ₂ O ₅
	516,78	20,265	VO ₂
	515,6	2,672	V ₂ O ₃

1. Анодирование в электролите обеспечивает хорошую воспроизводимость аморфных пленок оксида ванадия по их стехиометрическому составу.

2. Установлено, что сам процесс измерения (РФС) не имеет модифицирующего воздействия на исследуемый материал.

3. Наиболее эффективная модификация АОП ванадия наблюдается, как и следовало ожидать, при плазменном воздействии; она прогрессирует с увеличением ионной дозы.

4. Сравнение двух режимов УФ-модификаций анодных пленок (жесткого в вакууме и мягкого на воздухе) дает практически идентичные результаты, несмотря на более чем четырехкратное отличие в длинах излучения.

Как обнаружено в [1], эффективная УФ-модификация аморфного оксида ванадия может происходить и в ближнем ультрафиолете (402 nm). Таким образом, существенную роль в этом процессе играет не длина волны, а доза облучения, которая в обоих вариантах была одинаковой (~ 10 J/cm²). По всей видимости, наличие или отсутствие воздуха при модификации также несущественно, так как адсорбированные на поверхности АОП молекулы воды являются надежным буферным слоем между пленкой и воздухом, предотвращающим быстрый приток кислорода извне. Процесс окисления поверхности пленки, конечно же, идет, но его скорость значительно ниже и определяется часами, если не сутками.

Ввиду многофакторности условий, влияющих на оба эксперимента, необходимо проведение дальнейших исследований.

Выражаем благодарность А. М. Шахмину (ФТИМ СПбГПУ, г. Санкт-Петербург) за предоставление установки НАНОФАБ 25, помощь в проведении эксперимента и обсуждении результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Величко А. А., Дутиков Д. А., Кулдин Н. А., Кундозерова Т. В., Параничев Д. К., Пергамент А. Л., Путролайн В. В., Стефанович Г. Б., Черемисин А. Б. Разработка методов микро- и нанолитографии по оксидным пленкам переходных металлов // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2009. № 11 (105). С. 82–94.

- Ильин А. М., Пергамент А. Л., Стефанович Г. Б., Хахаев А. Д. Лазерно-стимулированная модификация свойств оксидов переходных металлов // Оптика и спектроскопия. 1997. Т. 82. № 1. С. 32–38.
- Одынец Л. Л. Анодные оксидные пленки. Л.: Наука, 1990. 200 с.
- Стефанович Г. Б., Пергамент А. Л., Величко А. А., Стефанович Д. Г., Кулдин Н. А., Борисков П. П. Аморфный оксид ванадия – резист для нанолитографии // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5. № 11. С. 33–38.
- Chudnovskii F. A., Stefanovich G. B. Metal-insulator transition in disordered VO₂ // J. Solid State Chem. 1992. Vol. 98. P. 137–145.

Velichko A. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Boriskov P. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Cheremisin A. B., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Stefanovich G. B., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

RAY PHOTOELECTRON ANALYSIS OF VANADIUM OXIDE ANODIC FILMS

The XPS analysis results of vanadium oxide anodic films exposed to the plasma, X-ray and ultraviolet radiation are presented. For the first time directly (ab initio) reduced modification in vacuum of metastable oxide films surface was studied and the proportion of oxide phases of the material was estimated.

Key words: transition metal oxides, vanadium oxides, XPS analysis, modification

REFERENCES

- Velichko A. A., Dutikov D. A., Kuldin N. A., Kundozerova T. V., Paranych D. K., Pergament A. L., Putrolaynen V. V., Stefanovich G. B., Cheremisin A. B. Development of methods micro- and nanolithography on oxide films of transitional metals [Razrabotka metodov mikro- i nanolitografii po oksidnym plenkam perekhodnykh metallov]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2009. № 11 (105). P. 82–94.
- Il'in A. M., Pergament A. L., Stefanovich G. B., Khakhaev A. D. Laser-induced modification of properties of transition metal oxides [Laserno-stimulirovannaya modifikatsiya svoystv oksidov perekhodnykh metallov]. *Optika i spektroskopiya* [Optics and spectroscopy.] 1997. Vol. 82. № 1. P. 32–38.
- Odynets L. L. *Anodnye oksidnye plenki* [Anodic oxide films]. Leningrad, Nauka Publ., 1990. 200 p.
- Stefanovich G. B., Pergament A. L., Velichko A. A., Stefanovich D. G., Kuldin N. A., Borisikov P. P. Amorphous vanadium oxide – resist for nanolithography [Amorfnyy oksid vanadiya – rezist dlya nanolitografii]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2009. Vol. 5. № 11. P. 33–38.
- Chudnovskii F. A., Stefanovich G. B. Metal-insulator transition in disordered VO₂ // J. Solid State Chem. 1992. Vol. 98. P. 137–145.

Поступила в редакцию 28.01.2014

ДМИТРИЙ ВИКТОРОВИЧ ЖУРКИНаспирант кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
*zhurkin_dm@mail.ru***АЛЕКСАНДР ЛЬВОВИЧ РАБИНОВИЧ**доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической биохимии, Институт биологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
rabinov@krc.karelia.ru

ОЦЕНКА ФОРМЫ ЦЕПНЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ МОЛЕКУЛ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО*

Изучение физических и химических свойств углеводородных цепных молекул очень важно для развития многих технологических областей и для углубления понимания структурных особенностей и функционирования различных биологических систем. При описании разных явлений (вязкого потока молекул, адсорбции на поверхностях, абсорбции и диффузии в пористых системах и т. д.) важно учитывать форму молекул. В настоящей работе методом Монте-Карло при температурах $T = 293, 303$ и 313 К исследовано конформационное поведение 65 цепных углеводородных молекул следующего строения: $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_a - (\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2)_d - (\text{CH}_2)_b - \text{CH}_3$ (где a, b, d – целые); количество атомов углерода в остове цепей $N = 16, 18, 20, 22$, количество *cis*-двойных связей $d = 0, 1, \dots, 6$. Прототипы молекул – остатки жирных кислот молекул фосфолипидов. Моделирование всех молекул проводили единообразно, в невозмущенном состоянии, использовали «классическую гибкую модель» цепи. При генерировании значений торсионных углов использовали метод существенной выборки в диапазоне $0-360^\circ$, с учетом взаимозависимости каждых трех углов вдоль по цепи. Проведена аппроксимация конформаций каждой молекулы прямоугольными параллелепипедами и вычислены средние характеристики формы («спэны»). Изучены зависимости рассчитанных характеристик от количества атомов углерода в цепи, количества двойных связей и их положения в молекулах (зависимости между структурой и свойствами). В их основе лежат характерные особенности внутренних вращений в цепях рассмотренного химического строения.

Ключевые слова: цепные молекулы, ненасыщенные углеводороды, конформационный анализ, метод Монте-Карло, невозмущенное состояние, форма молекул

ВВЕДЕНИЕ

Углеводородные цепные молекулы (молекулы, состоящие из групп CH_n ($n = 1, 2, 3$), валентно связанных в цепь) являются объектами исследования многих областей науки: физики конденсированного состояния, физики высокомолекулярных соединений (полимеров), молекулярной физики, биофизики и т. д. Кроме того, такие молекулы широко применяются в производстве, например, поверхностно-активных веществ [6], синтетических волокон [22], [26], [35], эластомеров [23], [24], [32], лакокрасочных материалов, изделий [4]. Углеводородные цепи остатков жирных кислот входят в состав молекул фосфолипидов [2], [12], [25], которые в природе образуют бислоиные и другие структурные образования (мембраны, мицеллы и т. п.). Таким образом, изучение физических и химических свойств углеводородных цепных молекул имеет большое значение как для развития многих технологических областей, так и для углубления понимания свойств различных биологических систем.

Важную роль в теоретических интерпретациях поведения и свойств цепных молекул в разно-

образных молекулярных системах играет учет их формы [1], [19], [28], [29], [31] (последняя была изучена впервые в работе [21], было показано, что форма усредненной по конформациям полимерной цепи не является сферической). Учет формы важен, например, при описании вязкого потока [33] молекул, при адсорбции на поверхностях, при абсорбции и диффузии в пористых системах [30], [34]. Информация о форме отдельных углеводородных цепей липидов позволяет оценивать степень их совместимости, комплементарности при сосуществовании в бислое при разных условиях [8], [10], [11]. Для исследования формы молекул удобно применять методы компьютерного моделирования: метод молекулярной динамики (МД), метод Монте-Карло (МК), поскольку они позволяют извлечь любую детальную информацию об исследуемых системах.

Жирнокислотные цепи в липидах биомембран могут различаться по химическому строению [2], [12], [25] (мембраны, как правило, гетерогенны, в них сосуществуют десятки липидных молекул разной структуры). В настоящей работе рассмотрены лишь неразветвленные углеводо-

В данном алгоритме конфигурационное пространство трех торсионных углов каждого из фрагментов, из которых состоит рассматриваемая цепь, разбивают на 1 000 000 состояний («параллелепипедов») так, что вероятности их

$$\bar{H} = \frac{\sum_{\nu=1}^{\omega} \left\{ H(\{\varphi\}^{\nu}) \cdot \exp\left[-U_{short}(\{\varphi\}^{\nu})/k_B T\right] \cdot \left[(L_1)_{m_1, \lambda_{1,1}^{\nu}} \cdot (L_2)_{m_1, \lambda_{2,1}^{\nu}} \cdot (L_3)_{m_1, \lambda_{3,1}^{\nu}} \right] \cdot \prod_{\gamma=2}^{N-3} \left[(L_3)_{m_{\gamma}, \lambda_{3,\gamma}^{\nu}} \right] \right\}}{\sum_{\nu=1}^{\omega} \left\{ \exp\left[-U_{short}(\{\varphi\}^{\nu})/k_B T\right] \cdot \left[(L_1)_{m_1, \lambda_{1,1}^{\nu}} \cdot (L_2)_{m_1, \lambda_{2,1}^{\nu}} \cdot (L_3)_{m_1, \lambda_{3,1}^{\nu}} \right] \cdot \prod_{\gamma=2}^{N-3} \left[(L_3)_{m_{\gamma}, \lambda_{3,\gamma}^{\nu}} \right] \right\}} \quad (3)$$

Здесь ν – номер текущей конформации; ω – объем выборки конформаций; $\{\varphi\}^{\nu}$ – координаты случайной точки в пространстве торсионных углов, выбираемой с плотностью вероятностей $p(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{N-1})$ из выражения (2); величины $(L_1)_{m_{\gamma}, \lambda_{1,\gamma}^{\nu}}$, $(L_2)_{m_{\gamma}, \lambda_{2,\gamma}^{\nu}}$, $(L_3)_{m_{\gamma}, \lambda_{3,\gamma}^{\nu}}$ – длины сторон, в угловых единицах, того параллелепипеда, который был выбран случайно в процедуре МК в конформации номер ν во фрагменте номер γ типа m . Для вычисления энергии ближних взаимодействий исследуемых молекул использовали силовое поле CHARMM27 [15] с поправками [20]. Для большинства исследованных цепных молекул при вычислении оценок средних характеристик (по формуле (3)) с заданной точностью были использованы выборки в 129 600 000 000 конформаций. В случае пентаеновых и гексаеновых цепей выборки были увеличены в 10 раз, поскольку поверхности потенциальной энергии почти всех их фрагментов характеризуются наиболее полными минимумами [8].

Для оценки формы молекул в литературе используется несколько подходов (см., например, [19]). В настоящей работе использовали метод аппроксимации формы параллелепипедом. Для этого в каждой конформации данной цепи находили систему координат $O'x'y'z'$ с началом O' в центре масс этой конформации и осями $O'x'$, $O'y'$, $O'z'$, совпадающими с главными осями инерции данной конформации (рис. 1). Алгоритм поиска системы координат $O'x'y'z'$ состоял в следующем. В исходной системе координат $Oxyz$ (см. рис. 1) вычисляли координаты всех атомов текущей конформации цепи, затем координаты ее центра масс O' и осуществляли параллельный перенос исходной системы $Oxyz$, совмещая начало с центром масс. В этой системе вычисляли компоненты тензора инерции [5] рассматриваемой конформации, проводили его диагонализацию и в итоге определяли направления главных осей инерции данной конформации. Надлежащим поворотом осей координат в точке O' совмещали их с осями инерции, переходя в итоге в искомую систему $O'x'y'z'$. Обозначения $O'x'$, $O'y'$, $O'z'$ ее осей проводили одинаково в каждой конформации: ось $O'x'$ всегда отвечала наибольшему главному моменту инерции (то есть $O'x'$ – ось минимальной протяженности конформации), а ось $O'z'$ – наименьше-

реализации одинаковы, а затем генерируют конформации этой цепи с помощью полученных разбиений. Оценку \bar{H} величины $\langle H \rangle$ при использовании этого алгоритма МК следует вычислять согласно выражению [7]

му главному моменту инерции (то есть $O'z'$ – ось максимальной протяженности конформации). Затем в текущей конформации цепи вычисляли разности между максимальными и минимальными проекциями атомов углерода и водорода на каждую ось $O'x'$, $O'y'$ и $O'z'$. Обозначали полученные разности через g_1 , g_2 , g_3 соответственно. Их можно рассматривать как минимальные размеры ребер параллелепипеда (ориентированного параллельно главным осям инерции), в который конформация молекулы может поместиться целиком (см. рис. 1). В итоге компьютерного моделирования вычисляли средние величины $\langle g_1 \rangle$, $\langle g_2 \rangle$, $\langle g_3 \rangle$ и средние произведения двух размеров $\langle g_1 g_2 \rangle$ (в определенном смысле – это площадь поперечного сечения исследуемой молекулы).

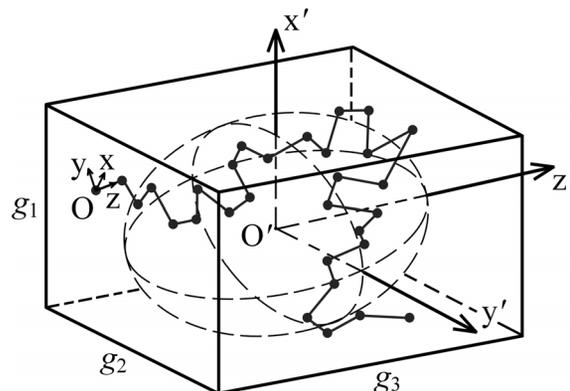


Рис. 1. Расположение «молекулярной» системы координат $O'x'y'z'$, которая определяется главными осями инерции $O'x'$, $O'y'$, $O'z'$ данной конформации цепной молекулы, представленной на рисунке только остовом – ломаной линией, соединяющей атомы углерода (\bullet). Переход в систему $O'x'y'z'$ осуществлялся в каждой конформации из некоторой исходной системы координат ($Oxyz$). Пунктирные линии – трехосный эллипсоид инерции данной конформации цепи, O' – ее центр масс. Главные оси инерции обозначали так, чтобы ось инерции $O'z'$ отвечала направлению наибольшего протяжения конформации цепи (то есть наименьшему собственному значению ее тензора инерции), а ось $O'x'$ – наименьшему протяжению. Величины g_1 , g_2 , g_3 – минимальные размеры ребер параллелепипеда, построенного по следующему правилу: его грани выбраны перпендикулярно главным осям инерции данной конформации цепной молекулы (ребро g_1 параллельно оси $O'x'$, g_2 – оси $O'y'$, g_3 – оси $O'z'$) таким образом, чтобы центры всех атомов углерода и водорода молекулы в данной конформации поместились внутри параллелепипеда

Для удобства представления результатов расчетов целесообразно указывать местоположение нескольких двойных связей в цепи с помощью лишь одного параметра. В качестве такового было использовано (аналогично работе [27]) среднее арифметическое номеров всех атомов углерода, участвующих в образовании двойных связей в цепи (атомы углерода нумеровали вдоль по цепи, начиная от одного из концевых). Этот параметр, обозначенный в работе [27] через X , характеризует положение «центра» двойных связей в цепи. Наряду с этим в ряде случаев вместо параметра X оказалось удобным использовать параметр Δ [27] – номер атома углерода, ближайшего к заданному концу цепи и участвующего в образовании первой (от данного конца цепи) двойной связи. Соответствие местоположений всех двойных связей в молекулах параметру X или параметру Δ указано в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Химическое строение любой из рассмотренных молекул идентифицируется тремя параметрами – N , d и X (или Δ), и поэтому сравнение между собой любых характеристик для разных молекул требует изучения конкуренции этих трех параметров. Учет влияния всех трех на заданную характеристику эквивалентен задаче рассмотрения 4-мерной гиперповерхности; это весьма затруднительно. Исследование 3-мерных зависимостей (поверхностей) данного свойства от отдельных пар параметров не всегда эффективно, поскольку поверхности могут пересекаться

в пространстве. Поэтому наиболее целесообразно проводить анализ зависимостей свойств от одного из параметров при фиксировании двух других. На рис. 2, 3 приведены полученные в настоящей работе по итогам компьютерных экспериментов при $T = 293$ К зависимости оценок средних размеров $\langle g_1 \rangle$, $\langle g_2 \rangle$, $\langle g_3 \rangle$ и средней «площади поперечного сечения» $\langle g_1 \cdot g_2 \rangle$ от параметра X , а на рис. 4, 5 – от количества d двойных связей в цепи. Доверительные интервалы на всех представленных графиках (они меньше размеров символов) отвечают 95%-ной надежности согласно t -распределению Стьюдента. Анализ полученных кривых позволил выявить ряд закономерностей:

I. При смещении центра X группы из d двойных связей от концов к середине цепи при $N = \text{Const}$, $d = \text{Const}$ для всех исследованных молекул ($N = 16, 18, 20, 22$) с количеством $d = 1-4$, а также для молекул $N = 22$, $d = 5$ средний размер $\langle g_3 \rangle$ уменьшается (см. рис. 2). В молекулах $N = 20$, $d = 5$ величина $\langle g_3 \rangle$ меняется незначительно.

II. Зависимости величин $\langle g_1 \cdot g_2 \rangle$ и $\langle g_2 \rangle$ от X для молекул с количеством $d = 1-3$ симбатны (см. рис. 2, 3): при смещении центра X от концов к середине цепи обе величины растут. С увеличением количества d зависимости от X ослабевают: для тетраеновых ($d = 4$) молекул с $N = 20, 22$ величина $\langle g_1 \cdot g_2 \rangle$ при смещении X от концов к середине еще растет, но для $N = 18$ уже почти не меняется. Величина размера $\langle g_2 \rangle$ тетраенов почти не зависит от X для всех изученных N ($N = 16, 18, 20, 22$). В пентаеновых ($d = 5$) молекулах зависимость от X очень слаба и для величин $\langle g_1 \cdot g_2 \rangle$,

Соответствие положений метиленпрерывающихся двойных связей (d – их количество) в углеводородных цепях значениям параметров Δ и X

Номера атомов С, участвующих в образовании двойных связей	Δ	X	Номера атомов С, участвующих в образовании двойных связей		Номера атомов С, участвующих в образовании двойных связей		Δ	X
			Δ	X	Δ	X		
3, 4 ($d=1$)	3	3.5	3, 4, 6, 7 ($d=2$)	3	5	3, 4, 6, 7, 9, 10 ($d=3$)	3	6.5
4, 5 ($d=1$)	4	4.5	4, 5, 7, 8 ($d=2$)	4	6	4, 5, 7, 8, 10, 11 ($d=3$)	4	7.5
5, 6 ($d=1$)	5	5.5	5, 6, 8, 9 ($d=2$)	5	7	5, 6, 8, 9, 11, 12 ($d=3$)	5	8.5
6, 7 ($d=1$)	6	6.5	6, 7, 9, 10 ($d=2$)	6	8	6, 7, 9, 10, 12, 13 ($d=3$)	6	9.5
7, 8 ($d=1$)	7	7.5	7, 8, 10, 11 ($d=2$)	7	9	7, 8, 10, 11, 13, 14 ($d=3$)	7	10.5
8, 9 ($d=1$)	8	8.5	8, 9, 11, 12 ($d=2$)	8	10	...		
9, 10 ($d=1$)	9	9.5	9, 10, 12, 13 ($d=2$)	9	11	3, 4, 6, 7, 9, 10, 12, 13 ($d=4$)	3	8
10, 11 ($d=1$)	10	10.5	10, 11, 13, 14 ($d=2$)	10	12	4, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 14 ($d=4$)	4	9
11, 12 ($d=1$)	11	11.5	11, 12, 14, 15 ($d=2$)	11	13	5, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 15 ($d=4$)	5	10
12, 13 ($d=1$)	12	12.5	12, 13, 15, 16 ($d=2$)	12	14	...		
13, 14 ($d=1$)	13	13.5	13, 14, 16, 17 ($d=2$)	13	15	3, 4, 6, 7, 9, 10, 12, 13, 15, 16 ($d=5$)	3	9.5
14, 15 ($d=1$)	14	14.5	14, 15, 17, 18 ($d=2$)	14	16	4, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 16, 17 ($d=5$)	4	10.5
15, 16 ($d=1$)	15	15.5	15, 16, 18, 19 ($d=2$)	15	17	5, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 15, 17, 18 ($d=5$)	5	11.5
16, 17 ($d=1$)	16	16.5	16, 17, 19, 20 ($d=2$)	16	18	6, 7, 9, 10, 12, 13, 15, 16, 18, 19 ($d=5$)	6	12.5
17, 18 ($d=1$)	17	17.5		
18, 19 ($d=1$)	18	18.5				3, 4, 6, 7, 9, 10, 12, 13, 15, 16, 18, 19 ($d=6$)	3	11
19, 20 ($d=1$)	19	19.5				4, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 16, 17, 19, 20 ($d=6$)	4	12
...						

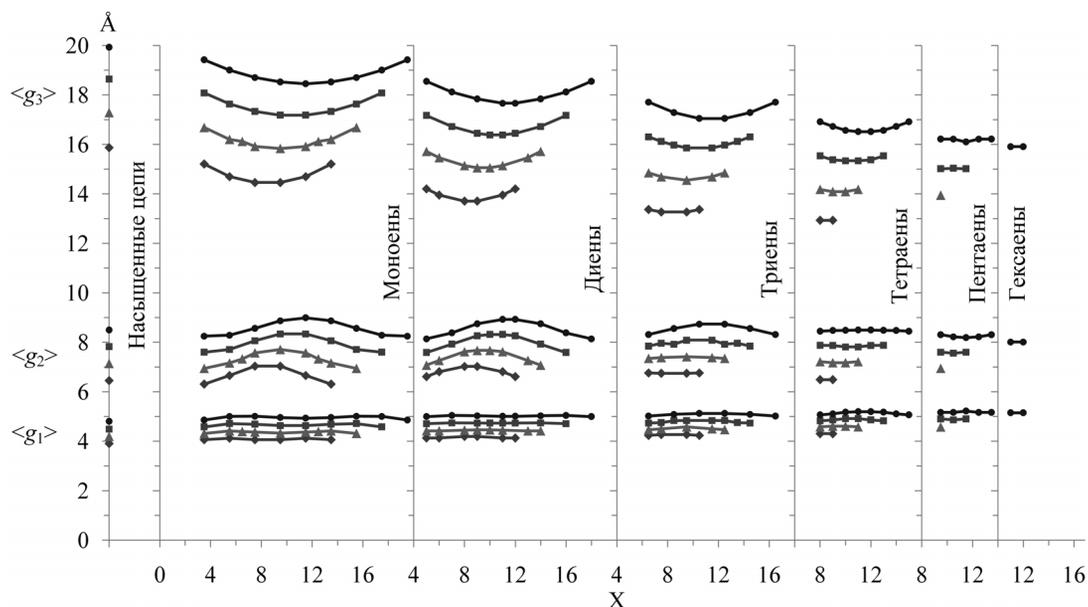


Рис. 2. Зависимости средних размеров $\langle g_1 \rangle$, $\langle g_2 \rangle$, $\langle g_3 \rangle$ ребер прямоугольного параллелепипеда для невозмущенных углеводородных молекул с количеством N атомов углерода в цепи 16 (—●—), 18 (—▲—), 20 (—■—) и 22 (—◆—), по группам молекул с одинаковым количеством d двойных связей *cis* (насыщенные, $d = 0$; моноены, $d = 1$; диены, $d = 2$; триены, $d = 3$; тетраены, $d = 4$; пентаены, $d = 5$; гексаены, $d = 6$), от местоположения в цепи «центра» метиленпрерывающихся двойных связей – параметра X . Соответствие значений параметра X положениям всех двойных связей в молекулах указано в таблице. Расчет методом МК при температуре $T = 293$ К

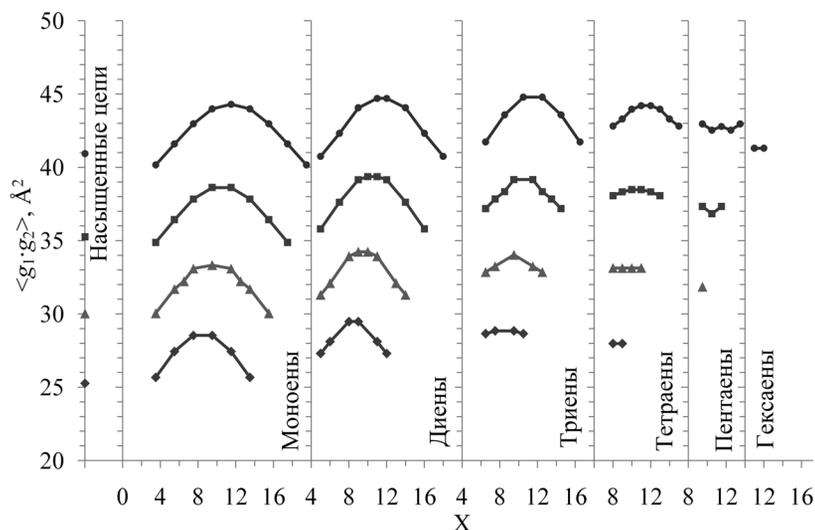


Рис. 3. Зависимости величин средней «площади поперечного сечения» $\langle g_1 g_2 \rangle$ невозмущенных углеводородных молекул от параметра X . Условия и обозначения, как на рис. 2

и для $\langle g_2 \rangle$. Средний размер $\langle g_1 \rangle$ для молекул со всеми рассмотренными N и d почти не зависит от X .

III. С ростом d при $N = \text{Const}$, $\Delta = \text{Const}$ (для всех рассмотренных N и Δ) величина $\langle g_3 \rangle$ уменьшается, $\langle g_1 \rangle$ увеличивается (хотя и слабо), а величины $\langle g_2 \rangle$, $\langle g_1 g_2 \rangle$ изменяются немонотонно (см. рис. 4, 5), и результат зависит как от N , так и от Δ . Немонотонность в большей степени проявляет зависимость от d величины $\langle g_1 g_2 \rangle$, а для цепей с $\Delta = 3$ она «S-образна» (имеет участки убывания и возрастания). В каждой совокупности

молекул с одинаковым N , которые содержат разное количество d , от нуля до максимально возможного ($d = 0, 1, 2, \dots, d_{\text{max}}$), метиленпрерывающихся двойных связей с одинаковым расположением $\Delta = 3$, существует молекула с количеством двойных связей d_1 (не обязательно равным нулю), площадь $\langle g_1 g_2 \rangle$ которой минимальна, и молекула с количеством двойных связей d_2 (не равным d_{max}), площадь $\langle g_1 g_2 \rangle$ которой максимальна; конкретные значения d_1 и d_2 зависят от N (см. рис. 5).

IV. С ростом N при $d = \text{Const}$, $\Delta = \text{Const}$ средние значения величин $\langle g_1 \rangle$, $\langle g_2 \rangle$, $\langle g_3 \rangle$, $\langle g_1 g_2 \rangle$

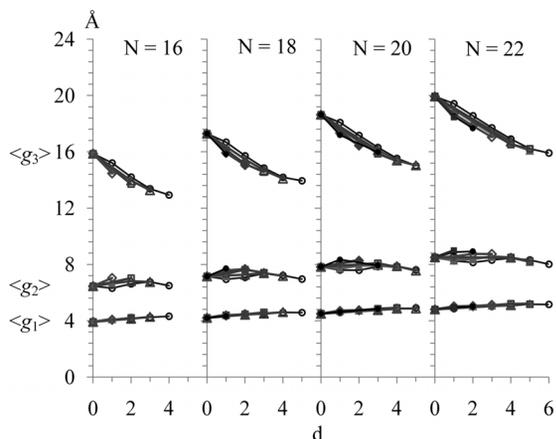


Рис. 4. Зависимости средних размеров $\langle g_1 \rangle$, $\langle g_2 \rangle$, $\langle g_3 \rangle$ (сплошн., рис. 1) от количества d двойных связей *cis* для невозмущенных углеводородных молекул с параметром $\Delta = 3$ (—○—), 4 (—△—), 5 (—▲—), 6 (—□—), 7 (—◇—), 8 (—◆—), 9 (—●—), 11 (—■—) по группам молекул с одинаковым количеством N атомов углерода в остове цепи. Параметр Δ — это номер атома углерода, участвующего в образовании первой двойной связи от конца цепи. Соответствие значений параметра Δ положениям всех двойных связей в молекулах указано в табл. 1. Расчет методом МК при температуре $T = 293$ К.

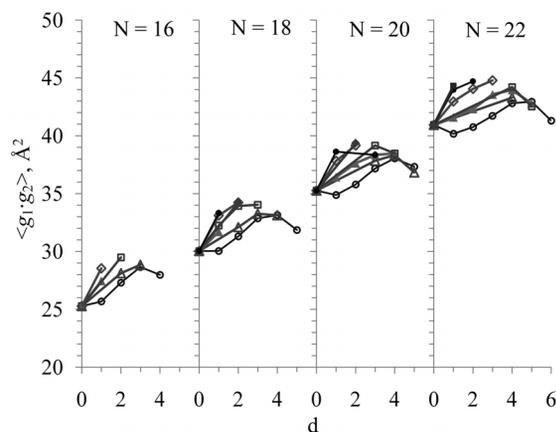


Рис. 5. Зависимости величин средней «площади поперечного сечения» $\langle g_1 \cdot g_2 \rangle$ от количества d двойных связей *cis* для невозмущенных углеводородных молекул. Условия и обозначения, как на рис. 4.

растут для всех рассмотренных вариантов цепей с параметрами $d = 0-5$ и $\Delta = 3-11$ (данные не представлены), что и ожидалось для коротких цепей в невозмущенном состоянии [9].

Обсуждаемые зависимости отражают сложность и неоднозначность результата конкуренции во влиянии на свойства молекул трех структурных параметров. Однако анализ молекулярных основ внутреннего вращения в цепях рассматриваемого строения позволяет понять причины основных тенденций и влияния того или иного параметра структуры на свойства цепи. Ряд причин обсужден ниже.

Наиболее вероятной в каноническом ансамбле конформацией цепи является конформация, отвечающая глобальному минимуму ее потенци-

альной энергии. Такая конформация насыщенной цепи — это «транс-зигзаг» [3], [9], когда цепь предельно вытянута, а все атомы углерода лежат в одной плоскости. Из соображений симметрии следует, что ось $O'z'$ конформации «транс-зигзаг» лежит в плоскости углеродного остова цепи и направлена от атома углерода одного ее конца к атому углерода другого; ось $O'y'$ также принадлежит плоскости остова и перпендикулярна оси $O'z'$, а ось $O'x'$ перпендикулярна плоскости остова; размер g_3 соответствующего параллелепипеда будет максимальным, а $g_1 \ll g_3$, $g_2 \ll g_3$. Конформации, отвечающие минимумам потенциальной энергии ненасыщенных цепей с метиленпрерывающимися двойными связями *cis*, являются более свернутыми, поскольку атомы углерода участков с двойными связями одной плоскости не принадлежат [3], [7], [9]. Чем больше таких двойных связей при $N = \text{Const}$ содержит молекула, тем короче ее насыщенные участки (низкоэнергетические конформации которых являются вытянутыми) с одной и/или другой стороны от группы двойных связей, поэтому меньше становится общий размер g_3 , меньше разница между g_3 и размерами g_1 , g_2 . Эти закономерности сохраняются и для средних величин $\langle g_1 \rangle$, $\langle g_2 \rangle$, $\langle g_3 \rangle$, что согласуется с данными рис. 4. Зависимость расчетных характеристик от местоположения метиленпрерывающихся двойных связей в цепях также объяснима. Действительно, пусть $d = 1$ и двойная связь в молекуле расположена у одного из концов цепи. Тогда большинство атомов углерода приходится на насыщенный участок, а в наиболее низкоэнергетической конформации они лежат в одной плоскости, влияние «свернутости» малого концевой участка на конформацию цепи минимально. Если же $d = 1$ и двойная связь в молекуле расположена вблизи середины цепи, то тенденция к «свернутости» конформации, наоборот, проявляется максимально: молекула имеет два наиболее протяженных насыщенных участка (по обе стороны от двойной связи), их конформации «транс-зигзаг» принадлежат двум разным плоскостям, под углом друг к другу. Очевидно, размер g_3 второй моноеновой молекулы будет в итоге существенно меньше (а размеры g_2 , g_1 — больше), чем соответствующие размеры первой. Такие же соотношения следует ожидать и для средних значений $\langle g_3 \rangle$, $\langle g_2 \rangle$, $\langle g_1 \rangle$, что подтверждается результатами расчетов (см. рис. 2). Можно также ожидать, что обсуждаемое влияние двойной связи будет возрастать по мере перехода от предельного варианта 1 к варианту 2, то есть при смещении двойной связи от любого конца цепи к ее середине (см. рис. 2). Эти же соображения объясняют сходные зависимости расчетных характеристик от X , наблюдающиеся в полиеновых молекулах ($d > 1$), с учетом того, что с увеличением d в цепи влияние местоположения двойных связей ослабевает, поскольку участок цепи,

на котором можно изменить положения двойных связей, сокращается.

Среди всех изученных в настоящей работе молекул в Θ -условиях существуют совокупности, молекулы в которых, будучи различными по строению (то есть имея различные N , d , Δ), обладают тем не менее соизмеримыми, сравнительно близкими «продольными» размерами $\langle g_3 \rangle$. Если задавать различные интервалы значений $\langle g_3 \rangle$ (по оси ординат на рис. 2), то можно выделять совокупности молекул, размеры $\langle g_3 \rangle$ которых попадают в заданные интервалы. Зададим, например, отклонения $\pm 5\%$ от величины $\langle g_3 \rangle$ молекулы 16:0. Можно убедиться, что в этот интервал значений попадают величины $\langle g_3 \rangle$ молекул 18:1 ω 9*cis*, 18:2 ω 6*cis*, 18:3 ω 3*cis*, 20:3 ω 6*cis*, 20:4 ω 6*cis*, 20:5 ω 3*cis*, 22:5 ω 3*cis*, 22:6 ω 3*cis* и ряда других (см. рис. 2); эти молекулы образуют одну из упомянутых совокупностей. Параметры N , d , Δ молекул с метиленпрерывающимися двойными связями *cis* указаны здесь согласно « ω -номенклатуре», через сокращенную формулу $N: d\omega\Delta$ *cis*. Важно отметить, что все молекулы в приведенном примере, как оказалось, входят в список таких цепей, которые встречаются в биологических мембранах в качестве компонентов молекул фосфолипидов наиболее часто [2], [12], [25]. Очевидно, в бислоях в жидкокристаллическом состоянии продольные размеры этих цепей (проекция на нормаль к поверхности бислоя) должны быть согласованы друг с другом. Результаты наших расчетов свидетельствуют об их «предрасположенности» к аналогичной комплементарности и в невозмущенном состоянии.

Подобный результат ранее уже был отмечен в литературе при МК-моделировании и расчетах величин $\langle g_3 \rangle$ молекул [27]. При этом использованная в [27] модель цепи и алгоритм МК существенно отличались от таковых настоящей работы

[7]. В частности, при генерировании конформаций цепей в [27] учитывалась взаимозависимость каждых 2 последовательных торсионных углов основной цепи, а не 3, как в настоящей модели [7]; поверхность потенциальной энергии молекулярных фрагментов, зависящих от пар углов, разбивалась в [27] на 1 600 равновероятных состояний, тогда как энергии фрагментов, зависящие от троек углов, были разделены в [7] на 1 000 000 равновероятных состояний; различны также и параметры силовых полей, использованные в [27] и [7]; наконец, расчеты $\langle g_1 \rangle$, $\langle g_2 \rangle$, $\langle g_3 \rangle$ в [27] осуществлялись с учетом только атомов углерода, а в настоящей работе по модели [7] – с учетом атомов углерода и водорода. В итоге и численные значения соответственных величин $\langle g_1 \rangle$, $\langle g_2 \rangle$, $\langle g_3 \rangle$ одних и тех же молекул, рассчитанные в [27] и в настоящей работе, различаются существенно (на ~20–35%). Однако перечисленные выше закономерности качественно, в главном сохраняются, и в этом состоит их основная ценность. Устойчивость обсуждаемых зависимостей и тенденций к деталям используемой модели и к параметрам силового поля свидетельствует о том, что они отражают фундаментальные соотношения между структурой и свойствами данных молекул, в основе которых лежат характерные особенности внутренних вращений в цепях рассмотренного химического строения.

Совокупности цепей, отвечающих разным диапазонам размеров $\langle g_3 \rangle$, могут, по-видимому, примерно соответствовать основным жирнокислотным составам липидов в мембранах разных биологических объектов, разных органов и тканей.

Прогнозирование свойств молекул заранее заданного строения представляет собой весьма сложную задачу, поэтому компьютерное моделирование конкретных молекул и выявленные в настоящей работе зависимости имеют большую ценность.

* Работа выполнена при поддержке программ президента РФ «Ведущие научные школы» (гранты НШ-1642.2012.4, НШ-1410.2014.4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волькенштейн М. В. Конфигурационная статистика полимерных цепей. М.; Л.: АН СССР, 1959. 468 с.
2. Геннис Р. Биомембраны: Молекулярная структура и функции. М.: Мир, 1997. 624 с.
3. Дашевский В. Г. Конформации органических молекул. М.: Химия, 1974. 428 с.
4. Лакокрасочные материалы и покрытия. Теория и практика / Пер. с англ. Л. Н. Машляковского и др.; Под ред. Р. Ламбуна. СПб.: Химия, 1991. 512 с.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. 1: Механика: Учеб. пособие для вузов. 5-е изд., стереотип. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 224 с.
6. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах / К. Холмберг, Б. Йёнссон, Б. Кронберг, Б. Линдман; Пер. с англ. Г. П. Ямпольской; Под ред. Б. Д. Сумма. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2007. 528 с.
7. Рабинович А. Л., Журкин Д. В. Существенная выборка при моделировании непрерывного спектра конформаций макромолекул методом Монте-Карло // Труды КарНЦ РАН. Сер. «Математическое моделирование и информационные технологии». 2013. Вып. 4. С. 96–111.
8. Рабинович А. Л. Цепные молекулы как компоненты мембранных систем: компьютерное моделирование // Методы компьютерного моделирования для исследования полимеров и биополимеров / Отв. ред.: В. А. Иванов, А. Л. Рабинович, А. Р. Хохлов. М.: Книжный дом ЛИБРОКОМ, 2009. С. 410–454.
9. Флори П. Статистическая механика цепных молекул. М.: Мир, 1971. 440 с.
10. Applegate K. R., Glomset J. A. Effect of acyl chain unsaturation on the packing of model diacylglycerols in simulated monolayers // J. Lipid Res. 1991. Vol. 32. P. 1645–1655.
11. Brockman H. L., Applegate K. R., Momsen M. M., King W. C., Glomset J. A. Packing and Electrostatic Behavior of *sn*-2-Docosahexaenoyl and -Arachidonoyl Phosphoglycerides // Biophys. J. 2003. Vol. 85. P. 2384–2396.

12. Cook H. W., McMaster C. R. Fatty acid desaturation and chain elongation in eukaryotes // *New comprehensive biochemistry* / G. Bernardi (gen. ed.). Vol. 36: Biochemistry of Lipids, Lipoproteins and Membranes / Eds.: D. E. Vance, J. E. Vance. 4th ed. S. I.: Elsevier, 2002. P. 181–204.
13. Dettenmaier M. Conformation of n-alkane molecules in the melt and in cyclohexane solution studied by small-angle neutron scattering // *J. Chem. Phys.* 1978. Vol. 68, № 5. P. 2319–2322.
14. Echenique P., Cavasotto C. N., Garcia-Risueno P. The canonical equilibrium of constrained molecular models // *Eur. Phys. J. Special Topics*. 2011. Vol. 200. P. 5–54.
15. Feller S. E., Gawrisch G., MacKerell Jr. A. D. Polyunsaturated Fatty Acids in Lipid Bilayers: Intrinsic and Environmental Contributions to Their Unique Physical Properties // *J. Am. Chem. Soc.* 2002. Vol. 124, № 2. P. 318–326.
16. Flory P. J. Foundations of Rotational Isomeric State Theory and General Methods for Generating Configurational Averages // *Macromolecules*. 1974. Vol. 7, № 3. P. 381–392.
17. Gould H., Tobochnik J., Christian W. An Introduction to Computer Simulation Methods: Applications to Physical Systems. San Francisco etc.: Pearson, 2007. 796 p.
18. Gö N., Scheraga H. A. On the Use of Classical Statistical Mechanics in the Treatment of Polymer Chain Conformation // *Macromolecules*. 1976. Vol. 9, № 4. P. 535–542.
19. Hadizadeh S., Linhananta A., Plotkin S. S. Improved Measures for the Shape of a Disordered Polymer To Test a Mean-Field Theory of Collapse // *Macromolecules*. 2011. Vol. 44. P. 6182–6197.
20. Högberg C. J., Nikitin A. M., Lyubartsev A. P. Modification of the CHARMM Force Field for DMPC Lipid Bilayer // *J. Comput. Chem.* 2008. Vol. 29. P. 2359–2369.
21. Kuhn W. Über die Gestalt fadenförmiger Moleküle in Lösungen // *Kolloid-Z.* 1934. Vol. 68. P. 2–15.
22. Malpass D. B. Introduction to Industrial Polyethylene. Properties, Catalysts, Processes. New Jersey: Wiley-Scrivener, 2010. 156 p.
23. Mark J. E., Erman B., Eirich F. R. Science and Technology of Rubber. 3d ed. Amsterdam etc.: Elsevier, 2005. 762 p.
24. Mark J. E., Erman B. Rubberlike elasticity. A molecular primer. 2d ed. Cambridge etc.: Cambridge University Press, 2007. 272 p.
25. Nelson D. L., Cox M. M. Lehninger Principles of Biochemistry. 5th ed. N. Y.: Freeman W. H. and Co., 2008. Ch. 10. P. 343–370.
26. Peacock A. J. Handbook of polyethylene. Structures, properties, and applications. N. Y.; Basel: Marcel Dekker, Inc., 2000. 539 p.
27. Rabinovich A. L., Ripatti P. O. Monte Carlo simulations of hydrocarbon oligomeric chains. Shape and dimension characteristics // *Proc. SPIE*. 2001. Vol. 4348. P. 225–236.
28. Rubin R. J., Mazur J. Ordered spans of unrestricted and self-avoiding random-walk models of polymer chains. I. Space-fixed axes // *J. Chem. Phys.* 1975. Vol. 63, № 12. P. 5362–5374.
29. Rubin R. J., Mazur J. Spans of polymer chains measured with respect to chain-fixed axes // *Macromolecules*. 1977. Vol. 10, № 1. P. 139–149.
30. Svelle S., Børgeren M. Selective Catalysts for Petrochemical Industry. Shape Selectivity in Microporous Materials // *Selective Nanocatalysts and Nanoscience: Concepts for Heterogeneous and Homogeneous Catalysis* / Eds.: A. Zecchina, S. Bordiga, E. Groppo. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA., 2011. P. 237–269.
31. Šolc K. Shape of flexible polymer molecules // *Polymer News*. 1977. Vol. 4, № 2. P. 67–74.
32. Treloar L. R. G. The physics of rubber elasticity. 3d ed. Oxford; N. Y.: Oxford University Press, 2005. 323 p.
33. Tsolou G., Stratikis N., Baig C., Stephanou P. S., Mavrantzas V. G. Melt Structure and Dynamics of Unentangled Polyethylene Rings: Rouse Theory, Atomistic Molecular Dynamics Simulation, and Comparison with the Linear Analogues // *Macromolecules*. 2010. Vol. 43. P. 10692–10713.
34. Van Santen R. A., Neurock M. Molecular Heterogeneous Catalysis: A Conceptual and Computational Approach. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006. 488 p.
35. White J. L., Choi D. D. Polyolefins: Processing, Structure Development and Properties. Munich: Carl Hanser Verlag, 2004. 271 p.
36. Yoon D. Y., Flory P. J. Small angle neutron scattering by n-alkane chains // *J. Chem. Phys.* 1978. Vol. 69, № 6. P. 2536–2538.

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

Rabinovich A. L., Institute of Biology of Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

MONTE CARLO EVALUATION OF HYDROCARBON CHAIN MOLECULES' SHAPE

The study of physical and chemical properties of hydrocarbon chains is important for development of many technological fields and understanding of the structure and function features of biological systems. The shape of the molecules should be taken into account in the description of various phenomena, such as viscous flow of molecules, adsorption on surfaces, absorption and diffusion in porous systems. In this paper, conformational properties of 65 hydrocarbon chains $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_a-(\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2)_d-(\text{CH}_2)_b-\text{CH}_3$ (where a, b, d are integer) were studied at temperatures $T = 293, 303$ and 313 K, using Monte Carlo simulations. The number of carbons was 16, 18, 20, and 22, the number of cis double bonds was 0, 1, ..., 6. Prototypes of the molecules are residues of fatty acids of phospholipids. The simulations of the molecules were carried out in an unperturbed state; the "classical flexible model" of chain was used. The torsion angles were generated in 0–360 deg range using important sampling technique based on three-wise interdependence of torsions along the chain. All generated conformations were approximated by rectangular parallelepipeds, and average shape characteristics ("spans") were calculated. Dependencies of the calculated characteristics on the carbon number, the number of double bonds, and their location in the molecules (i. e., interdependencies between structure and properties) were studied. They are caused by certain features of internal rotations in chains of the considered structure.

Key words: chain molecules, unsaturated hydrocarbons, conformational analysis, Monte Carlo simulation, unperturbed state, molecular shape

REFERENCES

1. Volkenshtein M. V. Configuration Statistics of Polymer chains. N. Y.: Wiley-Interscience, 1963. 562 p.
2. Gennis R. Biomembranes. Molecular structure and functions. N. Y., etc: Springer, 1989. 533 p.

3. Dashevskiy V. G. *Konformatsii organicheskikh molekul* [Conformations of Organic Molecules]. Moscow, Khimiya Publ., 1974. 428 p.
4. Paint and surface coatings: theory and practice / R. Lambourne, eds. N. Y. etc.: Wiley, 1987. 696 p.
5. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Mechanics. Course of theoretical physics. Vol. I.* Oxford etc.: Butterworth-Heinemann, 1976. 197 p.
6. *Surfactants and Polymers in Aqueous Solution* / K. Holmberg, B. Jönsson, B. Kronberg, B. Lindman, eds. Chichester: Wiley, 2003. 562 p.
7. Rabinovich A. L., Zhurkin D. V. Significant sampling for Monte Carlo simulation of a continuous spectrum of conformations of macromolecules [Sushchestvennaya vyborka pri modelirovanii nepreryvnogo spektra konformatsiy makromolekul metodom Monte-Karlo]. *Trudy KarNTs RAN. Seriya "Matematicheskoe modelirovanie i informatsionnye tekhnologii"* [Mathematical modeling and information technologies]. 2013. Vol. 4. P. 96–111.
8. Rabinovich A. L. Chain molecules as constituents of membrane systems: computer simulations [Tsepnye molekuly kak komponenty membrannykh sistem: komp'yuternoe modelirovanie]. *Metody komp'yuternogo modelirovaniya dlya issledovaniya polimerov i biopolimerov* [Computer Simulation Methods of Polymer and Biopolymer Researches] / *Otv. red.: V. A. Ivanov, A. L. Rabinovich, A. R. Khokhlov.* Moscow, Knizhnyy dom LIBROKOM Publ., 2009. P. 410–454.
9. Flory P. J. *Statistical Mechanics of Chain Molecules.* N. Y. etc.: Interscience Publ., 1969. 432 p.
10. Applegate K. R., Glomset J. A. Effect of acyl chain unsaturation on the packing of model diacylglycerols in simulated monolayers // *J. Lipid Res.* 1991. Vol. 32. P. 1645–1655.
11. Brockman H. L., Applegate K. R., Momsen M. M., King W. C., Glomset J. A. Packing and Electrostatic Behavior of *sn*-2-Docosahexaenoyl and -Arachidonoyl Phosphoglycerides // *Biophys. J.* 2003. Vol. 85. P. 2384–2396.
12. Cook H. W., McMaster C. R. Fatty acid desaturation and chain elongation in eukaryotes // *New comprehensive biochemistry* / G. Bernardi (gen. ed.). Vol. 36: Biochemistry of Lipids, Lipoproteins and Membranes / Eds.: D. E. Vance, J. E. Vance. 4th ed. S. I.: Elsevier, 2002. P. 181–204.
13. Dettenmaier M. Conformation of n-alkane molecules in the melt and in cyclohexane solution studied by small-angle neutron scattering // *J. Chem. Phys.* 1978. Vol. 68, № 5. P. 2319–2322.
14. Echenique P., Cavaotto C. N., Garcia-Risueno P. The canonical equilibrium of constrained molecular models // *Eur. Phys. J. Special Topics.* 2011. Vol. 200. P. 5–54.
15. Feller S. E., Gawrisch G., MacKerell Jr. A. D. Polyunsaturated Fatty Acids in Lipid Bilayers: Intrinsic and Environmental Contributions to Their Unique Physical Properties // *J. Am. Chem. Soc.* 2002. Vol. 124, № 2. P. 318–326.
16. Flory P. J. Foundations of Rotational Isomeric State Theory and General Methods for Generating Configurational Averages // *Macromolecules.* 1974. Vol. 7, № 3. P. 381–392.
17. Gould H., Tobochnik J., Christian W. *An Introduction to Computer Simulation Methods: Applications to Physical Systems.* San Francisco etc.: Pearson, 2007. 796 p.
18. Gö N., Scheraga H. A. On the Use of Classical Statistical Mechanics in the Treatment of Polymer Chain Conformation // *Macromolecules.* 1976. Vol. 9, № 4. P. 535–542.
19. Hadizadeh S., Linhananta A., Plotkin S. S. Improved Measures for the Shape of a Disordered Polymer To Test a Mean-Field Theory of Collapse // *Macromolecules.* 2011. Vol. 44. P. 6182–6197.
20. Höggberg C. J., Nikitin A. M., Lyubartsev A. P. Modification of the CHARMM Force Field for DMPC Lipid Bilayer // *J. Comput. Chem.* 2008. Vol. 29. P. 2359–2369.
21. Kuhn W. Über die Gestalt fadenförmiger Moleküle in Lösungen // *Kolloid-Z.* 1934. Vol. 68. P. 2–15.
22. Malpass D. B. *Introduction to Industrial Polyethylene. Properties, Catalysts, Processes.* New Jersey: Wiley-Scrivener, 2010. 156 p.
23. Mark J. E., Erman B., Eirich F. R. *Science and Technology of Rubber.* 3d ed. Amsterdam etc.: Elsevier, 2005. 762 p.
24. Mark J. E., Erman B. *Rubberlike elasticity. A molecular primer.* 2d ed. Cambridge etc.: Cambridge University Press, 2007. 272 p.
25. Nelson D. L., Cox M. M. *Lehninger Principles of Biochemistry.* 5th ed. N. Y.: Freeman W. H. and Co., 2008. Ch. 10. P. 343–370.
26. Peacock A. J. *Handbook of polyethylene. Structures, properties, and applications.* N. Y.: Basel, 2000. 539 p.
27. Rabinovich A. L., Ripatti P. O. Monte Carlo simulations of hydrocarbon oligomeric chains. Shape and dimension characteristics // *Proc. SPIE.* 2001. Vol. 4348. P. 225–236.
28. Rubin R. J., Mazur J. Ordered spans of unrestricted and self-avoiding random-walk models of polymer chains. I. Space-fixed axes // *J. Chem. Phys.* 1975. Vol. 63, № 12. P. 5362–5374.
29. Rubin R. J., Mazur J. Spans of polymer chains measured with respect to chain-fixed axes // *Macromolecules.* 1977. Vol. 10, № 1. P. 139–149.
30. Svelle S., Bjørgen M. *Selective Catalysts for Petrochemical Industry. Shape Selectivity in Microporous Materials // Selective Nanocatalysts and Nanoscience: Concepts for Heterogeneous and Homogeneous Catalysis* / Eds.: A. Zecchina, S. Bordiga, E. Groppo. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA., 2011. P. 237–269.
31. Šolc K. Shape of flexible polymer molecules // *Polymer News.* 1977. Vol. 4, № 2. P. 67–74.
32. Treloar L. R. G. *The physics of rubber elasticity.* 3d ed. Oxford; N. Y.: Oxford University Press, 2005. 323 p.
33. Tsolou G., Stratikis N., Baig C., Stephanou P. S., Mavrantzas V. G. Melt Structure and Dynamics of Unentangled Polyethylene Rings: Rouse Theory, Atomistic Molecular Dynamics Simulation, and Comparison with the Linear Analogues // *Macromolecules.* 2010. Vol. 43. P. 10692–10713.
34. Van Santen R. A., Neurock M. *Molecular Heterogeneous Catalysis: A Conceptual and Computational Approach.* Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006. 488 p.
35. White J. L., Choi D. D. *Polyolefins: Processing, Structure Development and Properties.* Munich: Carl Hanser Verlag, 2004. 271 p.
36. Yoon D. Y., Flory P. J. Small angle neutron scattering by n-alkane chains // *J. Chem. Phys.* 1978. Vol. 69, № 6. P. 2536–2538.

АРТЕМ ОЛЕГОВИЧ НОВИЧОНОК

научный сотрудник, ФПА «Ка-Дар» (Москва, Российская Федерация), младший научный сотрудник астрономической обсерватории, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
artnovich@inbox.ru

РИЧАРД КОВАЛЬСКИЙ

наблюдатель обзора Mt. Lemmon, Аризонский университет (Туксон, США)
kowalski@lpl.arizona.edu

C/2012 S1 (ISON): EARLY OBSERVATIONS AT MT. LEMMON SURVEY

Comet C/2012 S1 (ISON) promises to be a great comet in November-December 2013, near its perihelion. At the moment of its discovery it was already quite bright, with a well-defined coma. The CCD-images of the comet, taken by Mt. Lemmon sky survey nine months before it was officially discovered, have been thoroughly examined. At that time the object was located at a distance of 8.67 A.U. from the Sun. The examination of the images revealed well-marked comet activity: the share of the coma into the integrated brightness of the comet exceeded hundredfold the share of the nucleus. The coma of comet was no more than 60 000 km in diameter.

Key words: comet C/2012 S1 (ISON), Mt. Lemmon, comet activity, great comet

INTRODUCTION

Comet C/2012 S1 (ISON), discovered on September 21, 2012 by V. Nevsky and A. Novichonok [4], belongs to the rare type of sungrazers, or circumsolar comets. It was passing its perihelion point on November 28, 2013 at a distance of 0.012 A.U. from the Sun [11]. Based on the orbital elements of C/2012 S1 [12] we can make a logical conclusion that the ISON is Oort-cloud comet that enters the inner part of the Solar system for the first time, since $1/a_{\text{orig}}$ of its orbit no larger than 0.00005 (equals to near 0.00000852 [10], [12]).

At the time of its discovery the total brightness of the comet was brighter than 18^m , it displayed a compact but well-defined coma, being located at a distance of 6.29 A.U. from the Sun [4].

But it turned out that two sky survey telescopes – Mt. Lemmon (Arizona, U.S.A.) and PANSTARRS (the Hawaiian Islands, U.S.A.) – had already detected this object nine and eight months respectively before it was discovered, failing to recognize it as a new comet [11].

The present work analyses the images of C/2012 S1, taken at Mt. Lemmon observatory nine months before the official discovery. The main question that was raised in the work is – whether one can speak for sure of any activity at such a considerable heliocentric distance (8.67 A.U.).

Thanks to the emergence of automatic sky surveys (the most productive of which currently being Catalina, Mt. Lemmon, PANSTARRS, all of them – in the USA), the observation and discoveries of comets at a considerable distance from the Sun are becoming more and more frequent. Some specific research and exploration are also being done in this direction [eg., 7]. Despite that, such observation is still sporadic, only a few comets (mainly short-period ones) at a considerable distance from the Sun have been studied and characterized in detail. Thus, this work aims to expand our knowledge about the activ-

ity of the comet, that has come from Oort cloud at a considerable distance from the Sun.

METHODS

The images that are being analyzed were obtained by R. Kowalski on December 28, 2011 with a 1.5-m f/2 telescope of Mt. Lemmon observatory (the University of Arizona) with a CCD sensor SI 600–386 (maximum sensitivity while shooting without filters in the red region). Altogether there were four photographs with a 30-s exposure, without filters (the limiting magnitude of images reaches approximately 20.7CR, the scale is 0.96»/px). Images were calibrated (darks and flat fields). The aperture photometry of the comet was done in the Astrometrica software tool, comparison star catalogue – NOMAD (R-stars).

The effective diameter of the nucleus was calculated according to the Jewitt formula [6] in Ferrin simplification [1] for images made in the R-filter:

$$\text{Log} \left[\frac{P_r \times D_{\text{eff}}^2}{4} \right] = 5.510 - 0.4R_N(1,1,0),$$

P_r – the geometrical albedo of the nucleus in the R-light. D_{eff} – the effective diameter of the nucleus [1], km. $R_N(1,1,0)$ – the absolute brightness of the nucleus in R-light (at a distance of 1 A.U. from the Sun and Earth and the phase angle of 0 degrees).

The value of the albedo was assumed equal to 4% [2]. In the process of determining the absolute brightness of the nucleus the phase coefficient was assumed equal to 0.04 [7].

This formula should be applied with reserve, because it is only possible to determine the nucleus effective diameter of a comet with certainty, when the comet is absolutely inactive. And in this case one must have in mind that even when the comet in its appearance looks like a star (its FWHM approximately amounts to that of a star in the same images),

it can have a coma, which remains undetectable due to the low resolution of the equipment used. In this investigation a reversed reduction is done: since we know roughly the nucleus diameter of a comet, our objective is to independently determine the effective diameter based on our own observation and, having compared it with the known diameter, to draw a conclusion about the presence or absence of any activity at a considerable distance from the Sun.

RESULTS AND DISCUSSION

The FWHM of the comet in the sum of three photographs equaled to $3.2''$, which was not statistically different from the value for stars of the same brightness as the comet ($3.1''$ on average). Thus, based on these photographs, one cannot speak of any stated diffuseness of the object (Fig.).

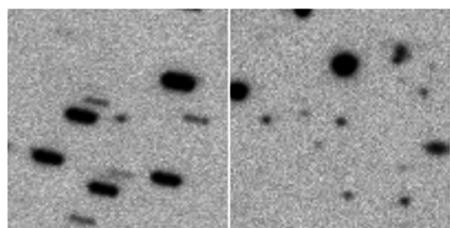


Fig. The sum of 3 CCD-images with a 30-sec exposure each in the direction of the comet motion (left) and the stars (right)

The comet brightness was 18.9 CR. Based on this brightness and with the assumption that it was fully provided by the input of the nucleus, the estimated absolute brightness and the effective diameter of the comet nucleus were determined – 9.5CR and 72 km respectively. There are some error in these calculations, due to the fact that the photographs were taken without filters. However the primary investigation of the data obtained recently by the Hubble space telescope showed that the diameter of the nucleus of C/2012 S1 totaled 5–7 km [5], which corresponds to

the absolute brightness of around 15–16 R. Therefore it becomes obvious, that even at such a great distance from the Sun the comet activity of C/2012 S1 was well-marked: the input of the coma into the integrated brightness of the object was one hundred times bigger that the input of the nucleus.

Apparently, the comet diffuseness cannot be seen due to the mediocre seeing. Nevertheless, we estimated the maximum possible physical diameter of the coma – 60 000 km. If it were bigger, the outer diffuseness of the comet could have been recorded in the CCD-images of Mt. Lemmon survey. The images of PANSTARRS observatory taken on January 28, 2012 [9] represent a high potential for further detailization of ours result.

Such well-marked activity at such great distances from the Sun is not a rare case for those comets that approach the Sun for the first time. That was the case, for instance, with comet C/2011 L4 (PANSTARRS), which on the day of its discovery in June, 6, 2011 was at 7.9 A.U. away from the Sun, but, however, displayed demonstrable comet activity [3].

CONCLUSION

Based upon the analysis of the CCD-images of comet C/2012 S1 (ISON), made 9 months before its official discovery at Mt. Lemmon observatory, the following conclusions were made:

1. Even at a distance of 8.67 A.U. the activity of C/2012 S1 (ISON) was well-defined, which confirms the findings that the object entered the inner part of the Solar system for the first time.

2. The physical dimension of the coma of C/2012 S1 at a distance of 8.67 A.U. from the Sun was no more than 60 000 km across.

For further study of the details of the comet activity and motion at a long distance from the Sun it is recommended to study the photographs of PANSTARRS observatory made on January 28, 2012, exactly one month later than the ones we have studied.

Novichonok A. O., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Kowalski R., University of Arizona (Tucson, United States of America)

REFERENCES

1. Ferrin I. Atlas of Secular Light Curves of Comets. Merida, 2009. 110 p. Access mode: arxiv.org/pdf/0909.3498
2. Fitzsimmons A. et al. A spectroscopic survey of D-type asteroids // *Astronomy & Astrophysics*. 1994. Vol. 282. P. 634–642.
3. Green D. Comet C/2011 L4 (PANSTARRS) // *International Astronomical Union Circular*. 2011. No. 9215.
4. Green D. Comet C/2012 S1 (ISON) // *Central Bureau Electronic Telegrams*. 2012. No. 3238. Access mode: <http://www.cbat.eps.harvard.edu/iau/cbet/003500/CBET003238.txt>
5. Hubble Captures Comet ISON // *Hubblesite news release*. 2013. No. STScI-2013-14. Access mode: <http://hubblesite.org/news-center/archive/releases/2013/14/>
6. Jewitt D. C. Cometary Photometry // *Comets in the post-Halley era*. 1991. Vol. 1. P. 19–65.
7. Lowry S. C., Weissman P. R. CCD-observations of distant comets from Palomar and Steward Observatories. *Lowry // Icarus*. 2003. Vol. 164. P. 492–503.
8. Luu J. X., Jewitt D. C. Near-Aphelion CCD Photometry of Comet P/Schwassmann Wachmann 2 // *Astronomical Journal*. 1992. Vol. 104. P. 2243–2249.
9. Marcus J. N. Forward-Scattering Enhancement of Comet Brightness. II. The Light Curve of C/2006 P1 (McNaught) // *International Comet Quarterly*. 2007. Vol. 29 P. 119–130.
10. Sekanina Z., Marsden B. On the distribution of “original” orbits of comets of large perihelion // *Astronomical Journal*. 1992. Vol. 78. № 10. P. 1118–1124.
11. Williams G. Comet C/2012 S1 (ISON) // *M.P.E.C.* 2012. No. S63. Access mode: <http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K12/K12S63.html>
12. Williams G. Observations and orbits of comets // *M.P.E.C.* 2013. № H38. Access mode: <http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K13/K13H38.html>

Поступила в редакцию 13.05.2014

АЛЕКСЕЙ БОРИСОВИЧ СЕМЕНЦОВ

директор Центра коллективного пользования научным оборудованием, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
alsementsov@gmail.com

АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ ВОРОБЬЕВ

аспирант кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
alexn.vorobyev@gmail.com

МАРИЯ АЛЕКСАНДРОВНА СЕРЕЖИНА

аспирант кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
serejinam@gmail.com

АЛГОРИТМ ПОИСКА СВЯЗНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА БИНАРНОМ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИИ ЧЕРЕССТРОЧНОЙ РАЗВЕРТКИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В FPGA*

Представлена модификация аппаратно ориентированных алгоритмов поиска связных областей на бинарном видеоизображении, предназначенная для чересстрочной развертки. Предложен вариант сканирующего окна для чересстрочной развертки и алгоритм его конвейерной обработки в FPGA, позволяющий проводить вычисления в потоковом режиме с частотой кадров 25 Гц без их буферизации. Применение других известных алгоритмов потребует буферизации кадров, так как они ориентированы на прогрессивную развертку.

Ключевые слова: видеоизображение с чересстрочной разверткой, поиск связных областей, однопроходной алгоритм, сканирующее окно, FPGA

ВВЕДЕНИЕ

В данной статье представлено описание аппаратно ориентированного алгоритма поиска связных областей бинарной маски и описывающих их прямоугольников на видеоизображении. Под связной областью понимается область изображения, где пиксели примыкают друг к другу (соседствуют) и при этом имеют некоторые схожие свойства, например цвет.

Задача решалась в рамках проекта по созданию «Устройства обнаружения пламени на видеоизображении» (использовался стандарт PAL 720x576, 25 Гц). В ходе проекта была разработана программная модель обнаружения пламени [1] в среде Simulink (Matlab), для обеспечения работы в режиме реального времени алгоритмы переведены на программируемые логические интегральные схемы FPGA (англ. field-programmable gate array).

Суть алгоритма поиска пламени сводится к поиску пикселей, имеющих цвет, сходный по цветовой гамме с пламенем, выделению таких пикселей в восьмисвязные прямоугольные области, объединению пересекающихся областей в области интереса с последующим вычислением и анализом для них динамических характеристик. Объединение пересекающихся связных областей позволяет надежно объединять языки одного пламени в единое целое.

В среде Simulink для поиска связных областей и описывающих эти области прямоугольников использовалась встроенная функция «Blob Analysis», работающая с записанным в оперативную память кадром.

Разрабатываемое устройство должно работать с потоковыми видеоданными чересстрочной развертки без буферизации и пропуска кадров. Функция «Blob Analysis» не соответствует этим требованиям и не может быть использована.

Обзор существующих методов выделения связных областей, ориентированных на работу в FPGA, показал, что поиск в них осуществляется либо по уже записанному кадру, что требует больших объемов оперативной памяти для задержки видео [3], [5], либо в потоковом видеосигнале, но для прогрессивной развертки [2], [4]. Стоит отметить, что основной задачей указанных алгоритмов является нумерация бинарной маски и составление таблицы связности, которую требуется далее анализировать; практически отсутствует информация о нахождении координат прямоугольников, описывающих связные области, что является основной задачей разрабатываемого алгоритма.

В итоге было принято решение разработать собственный однопроходной алгоритм составления предварительной таблицы координат связных областей. При этом постараться достичь

минимального количества предварительно найденных связных областей, так как это существенно влияет на время работы последующего блока поиска пересечений, который должен успевать обрабатывать данные менее чем за кадр.

МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ СВЯЗНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Аппаратный поиск восьмисвязных пикселей в основном решается использованием одно- и двухпроходных алгоритмов, а также метода «выжигания области» (описаны в [4]).

Двухпроходной алгоритм потребует буферизации в памяти результатов первого прохода для двух кадров (объем не менее 10 Мбит), а также приведет к необходимости буферизировать исходные кадры и все данные для дальнейшего анализа. Метод «выжигания области» также требует буферизации кадров: исходного и хранящего промежуточный результат. Использование дополнительных банков внешней памяти в проекте нецелесообразно, поэтому два этих метода не рассматривались.

В существующих однопроходных алгоритмах для прогрессивной развертки [2], [4] используется сканирующее окно (рис. 1а), в котором текущая ячейка «В2» проходит последовательно каждый пиксель кадра. В ходе прохода формируется таблица связности, которая в процессе прохода и по его окончании анализируется.

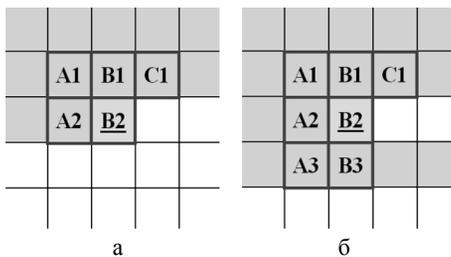


Рис. 1. Сканирующие окна

В чересстрочной развертке вначале выводятся нечетные строки кадра (1, 3, ...), а затем четные (2, 4, ...). Маркировка метками (нумерация) пикселей в каждом поле (как в [2]) приведет к резкому росту количества используемых меток при проходе первого поля, так как будет отсутствовать информация о пикселях второго поля. Это увеличит размерность таблицы координат связных областей в несколько раз, что приведет к многократному росту времени поиска в ней возможных пересечений. Поэтому анализ окружения для текущего пикселя и составление таблицы координат областей осуществляются только по приходящим пикселям четных строк, когда во временную память уже записаны нечетные строки кадра.

На рис. 1б показан выбранный для анализа вариант сканирующего окна. В2 является текущим бинарным пикселем четного поля, А2 – предыдущим. А1, В1, С1 – значения меток для пикселей

верхней нечетной строки. А3, В3 – бинарные пиксели нижней нечетной строки. На каждом шаге происходит перезапись единичных значений пикселей меткой с минимальным номером среди соседей, если соседи присутствуют (рис. 2а, в). В случае отсутствия соседства – новой меткой с более высоким по очереди номером (рис. 2б), для чего предусмотрен указатель текущего свободного номера метки.

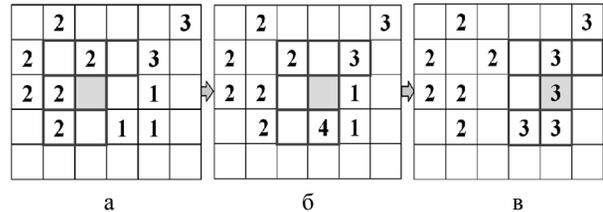


Рис. 2. Проход сканирующего окна

На текущем пикселе из оперативной памяти требуется считать только значения С1 и В3, все остальные значения элементов берутся от предыдущего шага, а именно: А1 = В1, В1 = С1, А2 = В2, А3 = В3. Исключение составляют пиксели за границами изображения, они обнуляются.

Значение С1 считывается из буферной памяти строки, запись в которую производилась при проходе предыдущей строки четного поля промаркированными элементами А3. В случае первой четной строки данные значения равны либо 0, либо 1 и считываются из буферной памяти маски первого поля. Значение В3 считывается из буферной памяти маски первого поля.

Особенность выбранного окна в том, что используется выступ С1, метка которого уже известна из анализа предыдущей четной строки. Это позволяет уменьшить количество создаваемых меток.

Таблица координат меток обновляется только по значениям А1 и А2. Считанные из таблицы текущие значения координаты области сверяются с текущими координатами А1 и А2, если данные пиксели расширяют эту область, то координаты перезаписываются.

Использование варианта обновления только по двум пикселям А1 и А2 позволяет исключить ситуацию, изображенную на рис. 2б, когда формируется новая метка («4»), а на следующем такте она переименовывается (в «3»). Количество пикселей для метки «4» не обновляется и остается равным нулю. При последующей отправке данных таблицы в блок поиска пересечений такие нулевые элементы фильтруются. Обновление по А1, А2 позволяет считывать и обновлять на каждом шаге только один элемент в памяти таблицы, это сводит к минимуму количество обращений к памяти и тем самым уменьшает время обработки.

Когда вывод второго поля завершится, таблица будет готова для дальнейшего поиска в ней

пересекающихся областей. Она является предварительной, так как один последовательный проход не позволяет разметить одной меткой такие элементы на изображении, как, например, буква «Ш» (подробное описание таких случаев представлено в [2]). В данной работе обработка таких ситуаций происходит совместно с поиском пересечений областей, это позволяет объединить области, которые при проходе не были объединены, но являются соседями.

Разработанный на языке Verilog модуль для FPGA работает на частоте 54 МГц, что в 4 раза больше пиксельной частоты. Он производит конвейерную обработку и состоит из трех процессов (рис. 3). Первый процесс захватывает входные данные (1, 2), второй анализирует и маркирует пиксели в окне (3, 4), а третий обновляет координаты области в таблице (5, 6, 7).

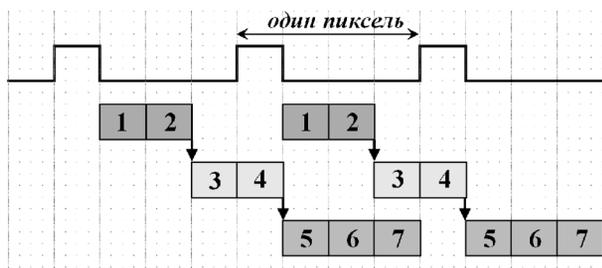


Рис. 3. Конвейерная обработка

1. Захват координат и маски. Операции $A1 = B1$, $A2 = B2$, $B3 = V3$, $B1 = C1$;
2. Чтение из памяти $C1$, $V3$. Проверка и выполнение граничных условий;
3. Анализ меток в окне;
4. Анализ меток в окне. Выставление адреса чтения для таблицы. Запись $A3$;
5. Ожидание данных из таблицы;
6. Анализ расширения области и подсчет количества пикселей;
7. Обновление координат области.

Объем использованной внутренней памяти (таблица) составляет не более 5% встроенной памяти для используемой микросхемы Altera Cyclone V 149K.

Объем задействованной памяти

Наименование памяти	Объем, Кбит
Бинарная маска первого поля	256
Буфер верхней строки	10
Таблица координат областей	60
ИТОГО	326

По результатам компиляции в среде Quartus прирост логических ячеек после внедрения описанного алгоритма в общий проект составил 4%.

ВАРИАНТ ОКНА С 10 ПИКСЕЛЯМИ

Так как в варианте окна с 7 пикселями существует запас по времени работы процесса анализа и маркировки меток, было рассмотрено сканирующее окно из 10 пикселей (рис. 4б).

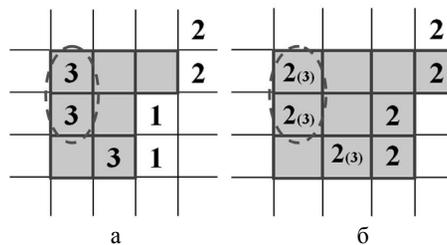


Рис. 4. Пример обработки конвейерного окна на 7 (а) и 10 (б) пикселей

На рис. 4б представлена ситуация, когда данный вариант позволяет оставить в таблице нулевым элемент № 3, в отличие от окна на рис. 4а. При реализации потребовалась частота в 7 раз больше пиксельной (94,5 МГц), так как увеличилось время анализа окна. Основные принципы: работа с таблицей по $A1$ и $A2$, а также запись в буфер строки только значения $A3$ – были сохранены. С учетом фильтрации элементов с нулевым количеством пикселей применение окна с 10 пикселями позволило сократить на 3–10% количество элементов таблицы по сравнению с окном из 7 пикселей. Дальнейшее удлинение окна по горизонтали позволяет еще снизить количество элементов таблицы. Расширение окна еще до 13 пикселей возможно при несущественных изменениях в разработанном алгоритме и его аппаратной реализации. Дальнейшее расширение возможно до определенной стадии за счет дробления на более мелкие процессы. Поиск предельного значения не производился, так как окно из 10 пикселей обеспечивает требуемое быстродействие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В реализации на FPGA было отмечено улучшение точности выделения пламени по сравнению с моделью в Matlab, где для поддержания приемлемого быстродействия (до 3 кадров/с) была установлена фильтрация малых областей в Blob Analysis, обеспечившая максимальное количество возможных областей на выходе не более 50. В аппаратной реализации фильтрация по размерам была проведена после поиска пересечений, в результате – также менее 50 областей, но с быстродействием уже 25 кадров/с.

Описание применяемого метода поиска пересечений выходит за рамки данной статьи, но можно отметить, что аппаратно реализованный алгоритм поиска связанных областей совместно с последующим блоком поиска пересечений обеспечил требуемое потоковое выделение областей интереса для созданного устройства обнаруже-

ния пламени. При тестировании максимальное количество областей в таблице для окна с 10 пикселями достигало 615, для большинства изображений – в среднем 120. Для таблицы, содержащей 615 областей, поиск пересечений выполнялся за время вывода 65 строк видеоизображения, тогда как обновление таблицы для следующего кадра начинается через 337 строк (первое поле и два

гасящих импульса). В итоге вычисления производятся с запасом по времени.

Алгоритм реализован на семействе микросхем FPGA Altera низкого ценового диапазона без применения внешних микросхем памяти. При незначительных доработках алгоритм может быть адаптирован под более высокое разрешение.

* Работы выполнялись по заказу ЗАО «Инженерный центр пожарной робототехники “ЭФЭР”» г. Петрозаводск.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев А. Н., Семенов А. Б., Мошевикин А. П. Разработка программной модели распознавания огня на видеоизображении // Материалы 65-й научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2013. С. 166–167.
2. Bailey D. G., Johnston C. T. Single Pass Connected Components Analysis. Proceedings of Image and Vision Computing New Zealand 2007. Hamilton, New Zealand, 2007. P. 282–287.
3. Trein J., Th. Schwarzbacher A., Hoppe B. FPGA Implementation of a Single Pass Real-Time Blob Analysis Using Run Length Encoding, MPC-Workshop, Ravensburg-Weingarten, Germany, 2008. P. 71–77.
4. Walczyk R., Armitage A., Binnie T. D. Comparative Study on Connected Component Labeling Algorithms for Embedded Video Processing Systems, IPCV, CSREA Press, VOL. 2, 2010.
5. Yasuaki Ito, Koji Nakano. Low-Latency Connected Component Labeling Using an FPGA. Int. J. Found. Comput. Sci. 21, 2010. P. 405–425.

Sementsov A. B., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Vorob'ev A. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Serezhina M. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

CONNECTED COMPONENT LABELING ALGORITHM ON BINARY INTERLACED VIDEO FOR USE IN FPGA

This article presents a modification of the known hardware-oriented algorithms for finding connected components in the binary video image, designed for interlaced scanning. The proposed variant of a scanning window for interlaced scanning and an algorithm of its pipeline processing in FPGA allow carrying out calculations in a streaming mode at the frame rate of 25 Hz without buffering. The existing algorithms require frame buffering as they are intended for progressive scanning.

Key words: interlaced video, connected component labeling, single pass algorithm, scanning window, FPGA

REFERENCES

1. Vorob'ev A. N., Sementsov A. B., Moshchevikin A. P. Development of the software model of fire detection in video [Razrabotka programmnoy modely raspoznavaniya ognya na videoizobrazhenii]. *Materialy 65-y nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Proceedings of the 65th scientific conference of students and young scientists]. Petrozavodsk, PetrSUPubl., 2013. P. 166–167.
2. Bailey D. G., Johnston C. T. Single Pass Connected Components' Analysis. Proceedings of Image and Vision Computing New Zealand 2007. Hamilton, New Zealand, 2007. P. 282–287.
3. Trein J., Th. Schwarzbacher A., Hoppe B. FPGA Implementation of a Single Pass Real-Time Blob Analysis Using Run Length Encoding, MPC-Workshop, Ravensburg-Weingarten, Germany, 2008. P. 71–77.
4. Walczyk R., Armitage A., Binnie T. D. Comparative Study on Connected Component Labeling Algorithms for Embedded Video Processing Systems, IPCV, CSREA Press, VOL. 2, 2010.
5. Yasuaki Ito, Koji Nakano. Low-Latency Connected Component Labeling Using an FPGA. Int. J. Found. Comput. Sci. 21, 2010. P. 405–425.

Поступила в редакцию 26.05.2014

CONTENTS

BIOLOGY

- Ivanter E. V., Moiseeva E. A., Leont'ev I. A.*
 ECOLOGY OF ROOT VOLE (MICROTUS
 OECONOMUS SPALL.) IN ANTHROPOGEN-
 IC LANDSCAPE OF KARELIA 7
- Kitaev S. P., Savosin E. S.*
 ESTIMATION OF MACROZOOBENTHOS
 OF LAKE ECOSYSTEMS AFFECTED
 BY COMMERCIAL RAINBOW TROUT
 CULTIVATION 13
- Tumanov I. L.*
 BIOLOGICAL FEATURES AND BRAUN
 BEAR NUMERICAL STRENGTH ON
 SOUTHERN KURIL ISLANDS. 16
- Kuchko Ya. A., Kuchko T. Yu., Il'mast N. V.*
 ZOOPLANKTON AS INDICATOR OF LAKE
 KAMENNOE ECOSYSTEM CONDITION 22
- Medvedeva M. V., Fedorets N. G., Il'inov A. A.*
 BIOLOGICAL ACTIVITY OF SOILS
 IN GENETIC RESERVES OF NORTHERN
 LADOGA AREA 27
- Smirnov L. P., Sukhovskaya I. V.*
 GLUTATHIONE ROLE IN ANTIOXIDANT
 PROTECTION AND IN FUNCTIONING
 OF BIOTRANSFORMATION SYSTEM 34

MEDICAL SCIENCE

- Elpaeva E. A., Pisareva M. M., Nikitina O. E., Kizhlo S. N.,
 Grudinin M. P., Dudanova O. P.*
 ROLE OF HEPATITIS B VIRUS MUTANT
 FORMS IN PROGRESSIVE COURSE OF
 CHRONIC HEPATITIS B 41
- Korneva V. A., Kuznetsova T. Yu., Bogoslovskaya T. Yu.,
 Mandel'shtam M. Yu., Vasil'ev V. B.*
 FAMILIAL HYPERCHOLESTEROLEMIA IN
 KARELIA: OCCURRENCE, SPREADING,
 CLINICAL, AND GENETIC PECULIAR-
 ITIES, THERAPY (10 YEARS MANAGE-
 MENT EXPERIENCE) 47
- Lesonen A. S., Loskutova E. E., Vinogradova I. A.*
 ANTI-ALLERGIC ANTIHISTAMINES MAR-
 KET RESEARCH 58
- Fedorovych V. S., Markelov Yu. M., Karbauskene S. I.,
 Bakunovich T. V.*
 RESULTS ON TUBERCULOSIS DETEC-
 TION IN CHILDREN AND ADOLESCENTS
 IN KARELIAN REPUBLIC AND EVALU-
 ATION TESTS WITH PREPARATION "DI-
 ASKINTEST" IN RISK GROUPS FOR TU-
 BERCULOSIS 62

EARTH SCIENCE

- Golubeva L. V., Nakvasina E. N.*
 GROUND COVER CHANGE ON FALLOW
 FIELDS OF KARGOPOL DISTRICT OF
 ARKHANGELSK REGION 67
- Novozhilova O. A.*
 AUTOMATED CONTROL SYSTEMS AS
 FACTOR OF DAIRYFARMING EFFICIENCY
 INCREASE 72

ENGINEERING SCIENCE

- Andreev A. A., Kolesnikov G. N., Chalkin A. A.*
 WOOD-CEMENT COMPOSITE WITH AD-
 DITION OF STEATITE AS STRUCTURAL
 AND DAMPING MATERIAL 75
- Talbonen A. N., Rogov A. A.*
 HISTORICAL IMAGE ANNOTATION WITH
 TEXTURES BASED ON MOMENTS. 79
- Shilovskiy V. N., Pitukhin A. V., Kyal'viyaynen V. A.,
 Kostyukevich V. M.*
 PROVISION OF FOREST MACHINES'
 MAINTAINABILITY AND RELIABILITY 84
- Voronova A. M., Piskunov M. A.*
 MODELING OF CUTTING AREA PARAM-
 ETERS FOR ALGORITHM TESTING OF
 TRANSPORT ROUTES' NETWORK
 CONSTRUCTION 88
- Kalashnik A. I., Kalashnik N. A., Zaporozhets D. V.*
 EVALUATION OF BULK EARTH
 STRUCTURE ON MORAINIC
 FOUNDATION 93

PHYSICS AND MATHEMATICS

- Bakushev S. V.*
 LONGITUDINAL-CROSS GEOMETRICAL
 NON-LINEAR WAVES OF DEFORMATION ... 99
- Velichko A. A., Boriskov P. P., Cheremisin A. B.,
 Stefanovich G. B.*
 RAY PHOTOELECTRON ANALYSIS
 OF VANADIUM OXIDE ANODIC FILMS. 104
- Zhurkin D. V., Rabinovich A. L.*
 MONTE CARLO EVALUATION
 OF HYDROCARBON CHAIN
 MOLECULES' SHAPE 109
- Novichonok A. O., Kowalski R.*
 C/2012 S1 (ISON): EARLY OBSERVATIONS
 AT MT. LEMMON SURVEY 118
- Sementsov A. B., Vorob'ev A. N., Serezhina M. A.*
 CONNECTED COMPONENT LABELING
 ALGORITHM ON BINARY INTERLACED
 VIDEO FOR USE IN FPGA. 120