
Министерство образования и науки
Российской Федерации

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

№ 4 (125). Июнь, 2012

Серия: Естественные и технические науки

Главный редактор

А. В. Воронин, доктор технических наук, профессор

Зам. главного редактора

В. Б. Акулов, доктор экономических наук, профессор

Э. К. Зильбер, доктор медицинских наук, профессор

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

И. Р. Шегельман, доктор технических наук, профессор

Ответственный секретарь журнала

Н. В. Ровенко, кандидат филологических наук

Перепечатка материалов, опубликованных
в журнале, без разрешения редакции запрещена.
Статьи журнала рецензируются.

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

uchzap.petrso.ru

Редакционный совет

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

Редакционная коллегия серии
«Естественные и технические науки»

- А. Е. БОЛГОВ**
доктор сельскохозяйственных наук,
профессор (Петрозаводск)
- В. В. ВАПИРОВ**
доктор химических наук, профессор (Петрозаводск)
- Е. Ф. МАРКОВСКАЯ**
доктор биологических наук, профессор (Петрозаводск)
- Н. Н. НЕМОВА**
доктор биологических наук,
профессор, член-корреспондент
РАН (Петрозаводск)
- В. И. ПАТЯКИН**
доктор технических наук, профессор (Санкт-Петербург)
- Е. И. РАТЬКОВА**
ответственный секретарь серии (Петрозаводск)
- А. А. РОГОВ**
доктор технических наук, профессор (Петрозаводск)
- В. И. СЫСУН**
доктор физико-математических наук,
профессор (Петрозаводск)
- В. С. СЮНЁВ**
доктор технических наук,
профессор (Петрозаводск)
- В. В. ЩИПЦОВ**
доктор геолого-минералогических наук,
профессор (Петрозаводск)

Ministry of Education and Science
of the Russian Federation

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

№ 4 (125). June, 2012

Natural & Engineering Sciences

Chief Editor

Anatoly V. Voronin, Doctor of Technical Sciences, Professor

Chief Deputy Editor

Vladimir B. Akulov, Doctor of Economic Sciences, Professor

Elmira K. Zilber, Doctor of Medical Sciences, Professor

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

Il'ya R. Shegelman, Doctor of Technical Sciences, Professor

Executive Secretary

Nadezhda V. Rovenko, Candidate of Philological Sciences

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

The Editor's Office Address

185910, Lenin Avenue, 33. Tel. +7 (8142) 769711

Petrozavodsk, Republic of Karelia

E-mail: uchzap@mail.ru

uchzap.petrSU.ru

Editorial Council

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

Editorial Board of the Series "Natural & Engineering Sciences"

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

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЯ

- Немова Н. Н., Богдан В. В., Шкляревич Г. А.
Амфиподы как индикаторы характера
воздействия антропогенных факторов на
прибрежные акватории Белого моря 7
- Рожков С. П., Горюнов А. С.
Кластеризация белковых молекул в вод-
но-солевых растворах лизоцима. 13
- Евдокимова Е. В., Новичонок А. О., Марковская Е. Ф.,
Курбатова Ю. А.
Особенности водного режима некоторых
видов растений в тропическом лесу на
юге Вьетнама во влажный сезон 19
- Канцера Л. В., Кузнецов О. Л.
Динамика растительности подтоплен-
ных придорожных участков Южной Ка-
релии 25
- Суцук А. А., Груздева Л. И.
Сообщества почвенных нематод в усло-
виях загрязнения среды тяжелыми ме-
таллами 29
- Давыдов Д. А., Мелехин А. В., Боровичев Е. А.
Цианопротокариоты, лишайники и пече-
ночники Айновых островов (Кандалак-
шский заповедник, Мурманская область) . . . 33

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

- Полторак А. Н.
Механизмы врожденного иммунитета.
Изучение с использованием мышиной
модели. 39
- Андреев В. П., Зачиняева А. В., Ремизова Л. А.
Бактерицидные и фунгицидные свойс-
тва ацетиленовых четвертичных аммо-
ниевых солей 47
- Новикова Л. А., Ишеков Н. С., Соловьев А. Г.
Взаимосвязь вариабельности сердечного
ритма с центральной и мозговой гемоди-
намикой при употреблении пива учащи-
мися 12–17 лет. 52
- Рябова Н. Л., Везикова Н. Н., Рябков В. А.
Активность воспалительного процесса
при ревматоидном артрите в условиях
коморбидных инфекций 58

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Кулешевич Л. В., Дмитриева А. В.
Минералы и источники редкоземельных
элементов в Карелии 62
- Рыбаков Д. С., Слукковский З. И.
Геохимические особенности загрязнен-
ных донных осадков зарегулированной
городской реки 67
- Собисевич А. В.
Карта Олонцкого уезда как источник
социально-экономической информации
по территории Карелии первой четверти
XVIII века 74

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

- Карпечко Ю. В., Мясникова Н. А.
Расчет фитомассы древостоя 77
- Лаур Н. В., Царёв А. П.
Исследование генетических ресурсов
Larix sukaczewii на западном пределе ее
естественного ареала. 82

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Levin V. M., Kanaun S. K.
Generalized Maxwell method for cal-
culation of effective conductivity of matrix
composite materials 87
- Колесников Г. Н., Кувшинов Д. А.
Алгоритм декомпозиции конечно-эле-
ментной модели механической системы
с односторонними контактами 91
- Шиловский В. Н., Гольштейн Г. Ю., Кяльвийянен В. А.
Экспериментальная оценка организации
технического обслуживания и ремонта
лесозаготовительных машин 93
- Дербин В. М., Морозов И. В.
Влияние лесной сертификации на техно-
логию разработки делянок на примере со-
хранения неэксплуатационных площадей . . . 96
- Скрыпник В. И., Кузнецов А. В., Ратманова Ю. А.
Способы минимизации затрат на пер-
вичный транспорт леса 98
- Рыбников П. С.
Оптимальное размещение погрузочных
пунктов вдоль лесовозного уса 102

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Данилов С. В., Фофанов А. Д.
Моделирование многослойных углерод-
ных нанотрубок 107
- Сидорова О. В., Алешина Л. А., Калинин А. М.,
Калинкина Е. В.
Ближний порядок в механоактивирован-
ных титанитах 112
- Шелестов А. С., Гостев В. А.
Исследование спектрального состава
плазменного потока 117

ЮБИЛЕИ

- К 70-летию В. В. Луканина
К 80-летию И. Н. Григovichа
К 60-летию В. В. Старкова 119
- Информация для авторов 120
- Contents 121

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

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

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ РАН

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

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

Учредитель: ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет»

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

Подписано в печать 18.06.2012. Формат 60х90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
10 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. (1-й завод – 170 экз.) Изд. № 147.

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

НИНА НИКОЛАЕВНА НЕМОВА

доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, директор Института биологии, Карельский научный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
nemova@krc.karelia.ru

ВАЛЕНТИНА ВАСИЛЬЕВНА БОГДАН

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института биологии, Карельский научный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
krupnova@krc.karelia.ru

ГАЛИНА АНДРЕЕВНА ШКЛЯРЕВИЧ

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

АМФИПОДЫ КАК ИНДИКАТОРЫ ХАРАКТЕРА ВОЗДЕЙСТВИЯ АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА ПРИБРЕЖНЫЕ АКВАТОРИИ БЕЛОГО МОРЯ

Проведено сравнительное изучение морфометрических характеристик, липидного, фосфолипидного и жирнокислотного состава литоральных амфипод Белого моря при разных типах загрязнения. Комплексные исследования биохимического состава липидов и морфометрических особенностей амфипод показали степень ответной реакции организмов на действие поллютантов в условиях Крайнего Севера.

Ключевые слова: амфиподы, размерные классы, ксенобиотики, соленость, липиды, Кандалакшский залив, Белое море

В связи с наблюдаемой трансформацией экосистемы Белого моря актуальна оценка роли антропогенной составляющей в этих процессах и поиск методов их индикации. Основным фактором, определяющим нарушение стабильности экосистемы Белого моря, является загрязнение различными поллютантами. Объем сбрасываемых сточных вод в поверхностные водные объекты бассейна Белого моря постоянно увеличивается. Например, в 2005 году он составлял более 79 млн м³, причем 12,5 % сточных вод сброшены без предварительной очистки [6]. Ксено-биотки поступают в водные организмы из воды и донных осадков, а также по пищевым цепям, причем в условиях низких температур отмечается слабая и медленная деструкция загрязняющих веществ.

В основе биологических методов оценки качества вод лежит изучение эффектов воздействия на экосистемы и их структурные элементы (отдельные организмы, популяции, сообщества). Выбор параметров и индикаторов для мониторинга сопряжен не только с важностью сохранения компонентов природной среды, но и с получением достоверной и качественной информации о ее состоянии. Особое значение представляет изучение функционирования прибрежных экосистем, которые являются наиболее продуктивными, но и особо уязвимыми. Несколько последних десятилетий характеризуются значительным ростом углубленных исследований фауны беспозвоночных животных Белого моря, продемонстрировавших трансформацию прибрежных экосистем. Межгодовые мониторинговые исследования локальных поселений отдельных видов из сообществ ли-

торального макрозообентоса в Кандалакшском заливе Белого моря показывают наличие резких флюктуаций основных биомических количественных показателей (плотность и биомасса), особенно четко проявляющихся у амфипод [17], [20], [21], [22]. Но они лишь констатируют факты различных процессов и явлений, происходящих в природных экосистемах, не позволяя разграничить комплексы вызывающих их причин на естественные и антропогенные. Гаммариды часто используются как индикаторы качества окружающей среды, так как быстро и четко отвечают на действие ксенобиотиков органической и неорганической природы [26].

Для систематического биомониторинга целесообразно оценивать изменения биохимических показателей клеточного метаболизма, которые считаются ранними и тонкими индикаторами воздействия неблагоприятных факторов среды на функциональные системы организма. В настоящее время рассмотрение особенностей антропогенного воздействия на метаболизм гидробионтов становится невозможным без расшифровки их влияния на структуру и функции клеток. При этом важная роль отводится липидам, выполняющим структурную, запасную и регуляторную функции. Полифункциональность липидов позволяет использовать их количественные показатели в качестве объективных критериев «степени благополучия» гидробионтов в различных условиях обитания.

Учитывая вышесказанное, изучали морфометрические и биохимические характеристики литоральных частей популяций амфипод Белого моря в условиях разной загрязненности и солености.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материал был собран в 2001 году на литорали. Исследования проведены на заповедной Беломорской акватории Кандалакшского государственного заповедника в вершине Кандалакшского залива. Рисунок карты-схемы Кандалакшского залива с границами охраняемых территорий и акваторий Кандалакшского государственного природного заповедника и указанием мест сбора материала для работ приведен в предшествующей работе [4]. Все измерения и определения проводились на материале, фиксированном в 4 % растворе формалина. Проводилась идентификация всех собранных животных с помощью бинокля МБИ-2.

В исследуемых районах Кандалакшского залива самым массовым видом был *Lagunogammarus oceanicus*, поэтому мы имели основание сравнивать липидный состав проб из разных районов, поскольку он значительно различается у разных видов литоральных амфипод [4]. С целью исследования влияния загрязнения на размерно-возрастные показатели отбирали только особей этого вида. Каждый гаммарус после обсушивания на фильтровальной бумаге взвешивался на торсионных весах с точностью до 1 мг. Длина тела определялась от переднего края головы (рострума) до основания тельсона с помощью штангенциркуля с точностью до 0,1 мм. Особи с длиной тела менее 20 мм измерялись под биноклем с помощью окуляра-микрометра.

Определение возраста амфипод, пойманных в природе, обычно бывает затруднительно из-за отсутствия у них структур экзоскелетных образований, регистрирующих возрастные и сезонные (в период зимней приостановки роста) изменения. Поэтому возраст амфипод исследуют с помощью косвенных методов, основанных на сопоставлении различных размерных групп особей изучаемой части популяции [10]. Возраст литоральных амфипод с длиной тела до 10 мм определяется до 2–3 месяцев, от 5 до 19 мм – сеголетки, 20–30 мм – годовики, более 30 мм – двухгодовики [10].

Для определения липидного состава пробы амфипод (20–30 экз.) фиксировали 96 % этанолом. Липиды экстрагировали смесью хлороформа с метанолом (2:1) [7]. Фракционирование липидов проводили методом тонкослойной хроматографии на пластинках «Силуфол» в системе растворителей: петролейный эфир – серный эфир – уксусная кислота (90:10:1). Количественно липидные фракции определяли гидроксаматным методом [16]. Разделение основных классов фосфолипидов осуществляли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии [24]. Метилловые эфиры жирных кислот липидов получали прямым метилированием [19] и анализировали методом газожидкостной хроматографии на приборе «Хроматэк Кристалл-5000.1».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние разных типов ксенобиотиков

Среди основных поллютантов, загрязняющих акваторию Белого моря, можно выделить вещества неорганической природы, органические вещества, нефтяные углеводороды. Из неорганических загрязнителей тяжелые металлы при высокой токсичности и выраженном кумулятивном эффекте являются потенциально наиболее опасными. Для водоемов Крайнего Севера показано, что в тканях гидробионтов концентрация тяжелых металлов определяется главным образом уровнем их содержания в воде и донных отложениях, при этом в организмах их содержание в несколько раз ниже, чем в воде. Для прибрежных районов характерно накопление в гидробионтах таких тяжелых металлов (ТМ), как Cu, Ni, Zn, Cr, Pb.

В изучаемой части Белого моря существуют также проблемы органической перегрузки и эвтрофикации [25]. Органические загрязнители можно отнести к следующим категориям: природное органическое вещество – гумусовые кислоты, образующиеся при гниении древесины, и антропогенные органические загрязнители, чаще всего детергенты, жирные кислоты, присутствующие в бытовых стоках, фенолы, пестициды, а также нефтепродукты.

Нефтяное загрязнение Белого моря при ежегодном сбрасывании в воду до 40 т нефтепродуктов является наиболее сильным антропогенным воздействием, приводящим к перестройке видовой структуры [8]. При комплексном изучении действия загрязняющих веществ важная роль отводится нефтяным углеводородам – алифатическим и полициклическим ароматическим, которые концентрируются в поверхностных водах, толще воды, в осадках, во взвешях, в снеге, во льдах [15]. Наиболее токсичны полиароматические углеводороды [13], обладающие высокой токсичностью, канцерогенностью и максимальной растворимостью и входящие в международный перечень потенциально опасных веществ.

Для проведения сравнительных исследований зоны сбора проб были дифференцированы нами по принципу повышенной концентрации определенного типа поллютанта.

Акватория в районе г. Кандалакша – комбинированное загрязнение с преобладанием органических ксенобиотиков: сточные воды механического завода с высоким содержанием органики, древесные опилки с лесозавода, бытовые отходы и бытовые сточные воды. Район Лупчострова – загрязнение преимущественно веществами неорганической природы, в основном ТМ, входящими в стоки залива, обогащенными соединениями из состава апатитового концентрата. Акватория о. Малый – значительное нефтяное загрязнение. Контролем служили особи из условно чистой зоны – о. Ряшкво.

Результаты анализа липидов показали как общие, так и специфические различия в содержании общих липидов и отдельных липидных фракций у амфипод в мониторинговых точках (см. таблицу). Под влиянием загрязнителей разной природы у опытных особей оказалось ниже количество общих липидов (при расчете к сухой массе вещества), чем в чистой зоне. При этом происходило уменьшение содержания фракции мембранных липидов – фосфолипидов (ФЛ). Содержание холестерина также снижалось относительно контрольных значений. У всех опытных амфипод также отмечено уменьшение количества запасных липидов (триацилглицеринов и эфиров холестерина). Использование запасных липидов на энергетические нужды считается защитной реакцией гидробионтов при длительном стрессе (см. таблицу).

Липидный состав амфипод из разных мониторинговых полигонов (липиды – в % к сухой массе, жирные кислоты – в % от суммы)

Показатели	о. Ряш-ков, контроль	г. Канда-лакша	о. Луп-чостров	о. Малый
Общие липиды	9,9	8,7	7,0	5,7
Фосфолипиды	6,6	6,0	4,7	2,8
Триацилглицерины	1,5	1,7	1,5	1,2
Эфиры холестерина	1,6	0,9	0,7	1,6
Холестерин	0,16	0,14	0,15	0,10

В структуре мембран показаны изменения в соотношениях индивидуальных фосфолипидов в условиях загрязнения по сравнению с чистой зоной (рис. 1). Общим для всех типов загрязнения являлось уменьшение уровня фосфатидилхолина (ФХ) при разнонаправленных изменениях в содержании лизопродукта. При менее значительных количественных отклонениях от нормы концентрации фосфатидилэтаноламина (ФЭА) величина отношения ФХ / ФЭА оказалась в условиях загрязнений ниже, чем в чистой зоне. Известно, что жидкость мембран увеличивается при снижении величины отношения ФХ / ФЭА, что может служить показателем адаптивных перестроек, обеспечивающих нормальное функционирование многих мембраносвязанных ферментных систем в неблагоприятных ситуациях. Во всех опытных вариантах отмечено также уменьшение концентрации кислых фосфолипидов (фосфатидилсерин, фосфатидилинозитол) относительно контроля. Снижение их уровня обуславливает уменьшение активности Na,K-АТФ-азы и нарушение водно-солевого обмена, что является одним из первичных патогенетических звеньев токсикоза. Подобные изменения отмечались нами у рыб при некоторых токсических воздействиях [3].

Результаты исследования жирнокислотного состава липидов у амфипод из загрязненных районов Белого моря показали изменения по относительному содержанию как доминирующих, так и минорных жирных кислот, а также по суммарному содержанию кислот, сгруппированных по степени насыщенности по сравнению с чистой зоной. Так, опытные амфиподы содержали меньше насыщенных кислот, а уровень моноеновых кислот был выше, чем у контрольных (см. таблицу). У них также была снижена величина отношения докозагексаеновой кислоты к эйкозапентаеновой (ДГК / ЭПК).

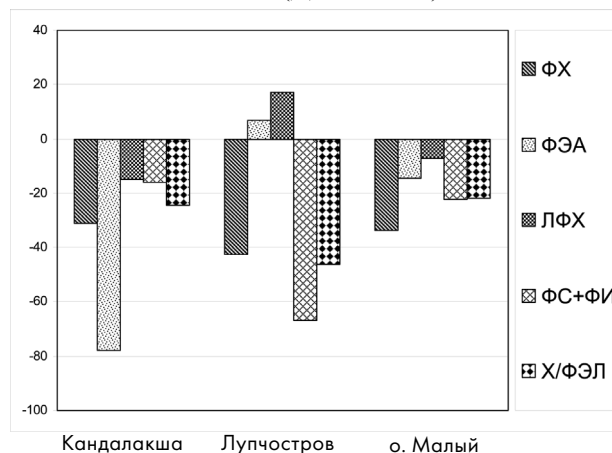


Рис. 1. Изменение фосфолипидного состава амфипод в разных районах (в % к контролю)

Наряду с отмеченной выше общей направленностью изменений в содержании липидов и жирных кислот у амфипод из загрязненных зон следует отметить и характерные различия в содержании структурных и запасных компонентов клеток в зависимости от преобладающих токсикантов. При сильном загрязнении неорганическими веществами в фосфолипидах отмечено наибольшее уменьшение уровня фосфатидилхолина (ФХ), преобладающего в наружном листке бислоя, при некотором повышении ФЭА, располагающегося преимущественно во внутреннем листке бислоя. Следует отметить и наибольший уровень лизофосфатидилхолина (ЛФХ). Изучение характера адаптивных перестроек мембранных липидов у гидробионтов к условиям интоксикации показало, что если действие раздражителя велико по силе и продолжительности, то в цитоплазме и плазме крови постоянно присутствуют гемолитически активные продукты. Увеличение лизофосфолипидов мы наблюдали у рыб при различных экологических модуляциях [3]. Это может быть причиной нарушения функций биомембран, снижения физиологической эффективности энергетического и угнетения пластического обмена у гидробионтов. Известно, например, что ЛФХ в повышенных концентрациях выступает как ингибитор некоторых мембраносвязанных ферментов [5].

Механизм образования ЛФХ в разных случаях может иметь различные биохимические сочетания, но всегда должен включать активизацию фосфолипазы А₂, гидролизующей ФХ. Обнаруженное нами у амфипод из района Лупчостров значительное повышение содержания ЛФХ может быть результатом действия тяжелых металлов на активность фосфолипазы А₂. При этом также отмечено наименьшее содержание кислых фосфолипидов. Следует отметить, что при действии ксенобиотиков органической природы (органические вещества и нефть) наблюдалось сходство в изменчивости всех фосфолипидных фракций (рис. 2). Учитывая регуляторную роль индивидуальных ФЛ, можно полагать, что их различные отклонения от нормы обуславливают специфические изменения в отдельных звеньях метаболизма в клетках в зависимости от типа доминирующих ксенобиотиков.

При сильном загрязнении неорганическими веществами величина соотношения ФХ / ФЭА была наименьшей по сравнению с контролем и другими вариантами опыта, обуславливая уменьшение микровязкости мембран. Однако более показательной в этом плане представляется величина отношения холестерина к фосфолипидам, от которой зависит состояние многих клеточных процессов. Существует точка зрения, что нарушение их оптимального соотношения приводит к развитию патологических процессов. Так, увеличение индекса холестерин / фосфолипиды при преимущественном воздействии неорганических веществ влечет за собой уменьшение проницаемости мембран и снижение скорости некоторых ферментативных реакций. Наибольшие изменения в фосфолипидном обмене обнаружены у амфипод под влиянием нефтепродуктов. Значительное уменьшение содержания структурных липидов, фосфолипидов, было связано с торможением их синтеза.

Функциональное состояние мембран во многом определяется составом связанных жирных кислот. Во всех исследуемых вариантах альтерации в содержании высоконасыщенных длинноцепочечных кислот (ПНЖК) были незначительны (2–4 %). Но считается, что для модификации свойств мембраны важна не величина отклонения от нормы, а направленность изменений [5]. Некоторое увеличение доли полиеновых ацилов в липидах амфипод за счет эйкозапентеновой кислоты (ЭПК) мы обнаружили при значительном органическом загрязнении. При преимущественном действии неорганических веществ практически не было различий в уровнях жирных кислот по сравнению с контролем, что свидетельствует об их слабом воздействии в существующих концентрациях на метаболизм жирных кислот, возможно, вследствие антагонистических взаимодействий отдельных ТМ. Отсутствие изменений в жирнокислотном составе мембранных липидов наблюдалось и у мол-

люсков при действии сублетальных доз тяжелых металлов [1]. В опытных вариантах наименьшая доля ненасыщенных длинноцепочечных кислот в липидах отмечалась при преимущественном действии нефти. Поскольку ненасыщенные жирные кислоты являются главными субстратами перекисного окисления липидов, уменьшение их содержания при нефтяном загрязнении по сравнению с чистой зоной свидетельствует об индукции окислительного стресса у амфипод. В результате указанных модификаций в структуре мембран у амфипод может быть снижена двигательная активность, взаимосвязь которой с уровнем полиеновых жирных кислот в липидах рыб была установлена в работах Шульмана с соавторами [23]. Подтверждением этому служит малая подвижность амфипод, которая отмечалась при действии нефтепродуктов в экспериментальных и природных условиях [9], [12].

Известно, что характер соматического роста беспозвоночных является важным показателем состояния прибрежных экосистем. Проведенное сравнение морфометрических характеристик осенних амфипод из районов в черте г. Кандалакши, Лупчострова, о. Малый показало значительное уменьшение процента размерных классов больше 20 мм по сравнению с литоралью о. Ряшков относительно чистой зоны (рис. 2). Особи из этих полигонов содержали пониженный уровень фосфолипидов по сравнению с контрольной группой. Преобладание в указанных выше районах мелких особей, содержащих значительно меньше структурных липидов, вероятно, является результатом значительного антропогенного загрязнения Кандалакшского залива. При этом наибольшее снижение размерных характеристик и мембранных фосфолипидов происходило у литоральных амфипод в районе о. Малый в условиях значительного нефтяного воздействия. Снижение темпов соматического роста могло быть связано не только с дефицитом структурных липидов, но и белковых компонентов [2]. Ранее показано влияние различных концентраций тяжелых металлов на размеры амфипод [27].

Нарушение биохимического состава клеток обуславливает изменение физиологических реакций организмов, которые вызывают изменения функционального состояния особей и целых размерно-возрастных группировок видовых популяций. В исследованной нами части популяции литоральных *Lagunogammarus oceanicus* происходит преждевременная элиминация в результате значительного воздействия ксенобиотиков. Эта часть популяции, обитающая в загрязненной акватории, находится в процессе становления адаптации к сокращенному жизненному циклу. Такая же закономерность обнаружена в популяциях рыб при антропогенных нагрузках в условиях Кольского Севера, которая проявлялась в сжимании структурных рядов – размер-

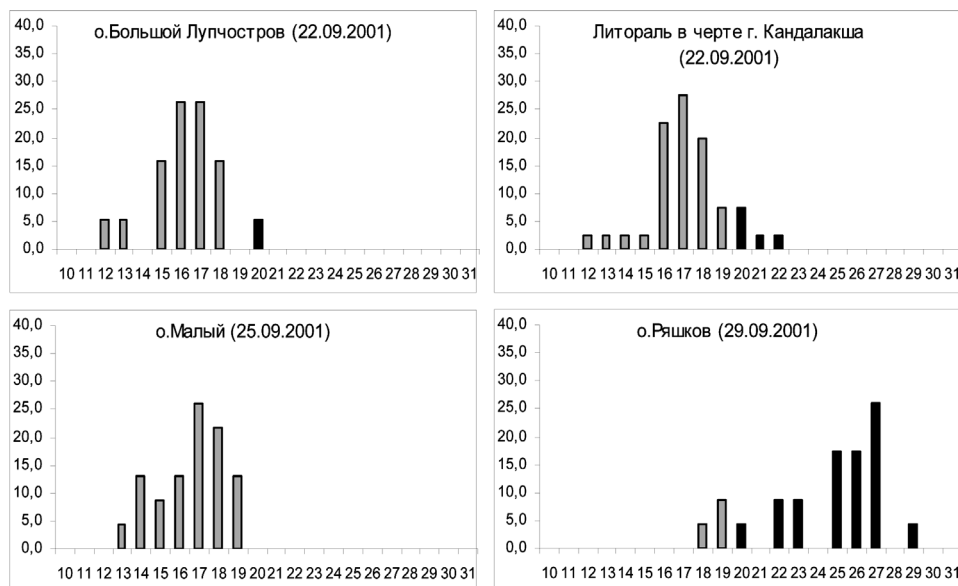


Рис. 2. Изменения размеров амфипод в различных по степени чистоты и загрязнения районах Кандакшского залива Белого моря в осенний сезон

ных возрастных, нерестовых, что было связано с сокращением более энергоемких функций [14].

Таким образом, при различных типах загрязнения (органическое, неорганическое, нефтяное) отмечены общие и специфические изменения в составе липидных фракций и жирнокислотных радикалов, отражающие как защитные, так и дестабилизирующие процессы в организме амфипод. Особенности воздействия поллютантов проявляются как в количественных отклонениях показателей от нормы, так и в разной направленности изменений отдельных параметров. При этом нефтяное загрязнение приводило к наиболее выраженным нарушениям в липидном метаболизме клеток.

Отмеченные биохимические нарушения у особей в условиях загрязнения могут приводить и к изменениям в структуре популяций амфипод. Биометрический анализ литоральной части популяции *Lagunogammarus oceanicus* кутовой части Кандакшского залива по сравнению с таковой из более мористой и чистой его части показал, что происходит уменьшение размеров тела и сокращение жизненного цикла амфипод, обитающих в условиях хронического комплексного загрязнения, особенно при воздействии нефтеуглеводородов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Трансформация экосистемы Белого моря обусловлена загрязнением воды токсикантами различной природы, изменением солености, характера питания, зараженности. Прибрежные экосистемы Кандакшского залива Белого моря подвержены усиливающемуся антропогенному воздействию. В этих условиях эколого-морфологические и биохимические исследования яв-

ляются неотъемлемой частью мониторинговых работ, приобретая особую важность в заповедных районах.

На основании морфометрических и биохимических показателей была проведена оценка состояния прибрежных акваторий в условиях различных антропогенной составляющих. В качестве тест-объектов биомониторинга использованы литоральные амфиподы *Lagunogammarus oceanicus*, достигающие в пробах более 80 %. Морфометрический анализ показал преобладание в мониторинговых зонах мелких особей, содержащих значительно меньше структурных липидов, что является результатом сильного загрязнения акватории Кандакшского залива.

Обмен липидов тесно связан с резистентностью к неблагоприятным воздействиям, он вовлекается в специфические реакции защитно-приспособительного характера. На основании результатов липидного анализа отмечены как количественные отклонения от фоновых значений, так и изменение направленности в содержании отдельных липидных фракций, а также в жирнокислотном составе липидов у осенних амфипод в различных условиях обитания в Белом море. Характер изменений при влиянии разных типов ксенобиотиков дает основание говорить о специфических особенностях их воздействия на липидный обмен. Негативный эффект обусловлен в основном нарушением структурной организации клеточных мембран. Реализация адаптивных биохимических механизмов обеспечивается преимущественно за счет снижения вязкостных свойств мембран, определяемых уровнем связанных ненасыщенных жирных кислот и соотношением отдельных мембранных фракций липидов, увеличивающих функциональную активность клеток. Ранее у ракообразных при незначитель-

ных токсических нагрузках обнаруживалась стимуляция физиологических функций, а при усилении токсического воздействия – их угнетение [11]. Комплексная оценка с использованием молекулярных биомаркеров для прогнозирования состояния прибрежных экосистем при экологических модуляциях должна включать наряду с показателями пластического обмена и параметрами энергетического обмена. В качестве адаптивной реакции при неблагоприятных воздействиях служит увеличение энергетических трат вследствие изменения направленности большинства

метаболических систем организма и обмена веществ в целом, чему может препятствовать дефицит запасных липидов в клетках при длительном стрессовом воздействии.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаем благодарность администрации Кандалакшского государственного природного заповедника за предоставленную возможность сбора материала на акватории Кандалакшского залива Белого моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельчева Н. Н., Челомин В. П. Влияние сублетальных доз тяжелых металлов на обмен гидрофобного матрикса мембранных структур клеток жабр морского двусторчатого моллюска. Владивосток: Дальнаука, 1988.
2. Богдан В. В. Липидный состав высших ракообразных Северных морей // Современные проблемы физиологии и биохимии водных организмов. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2005. С. 8–13.
3. Богдан В. В., Сидоров В. С., Зекина Л. М. Липиды рыб при адаптации к различным экологическим условиям // Экологические проблемы онтогенеза рыб: физиолого-биохимические аспекты. М.: МГУ, 2001. С. 188–202.
4. Богдан В. В., Шкляревич Г. А. Оценка состояния прибрежных экосистем Белого моря по эколого-биологическим и биохимическим показателям у амфипод // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2008. № 1. С. 61–73.
5. Бурлакова Е. Б. Влияние липидов мембран на ферментативную активность // Липиды. Структура, биосинтез, превращения и функции. М.: Наука, 1977. С. 16–27.
6. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2005 году / М-во сел., рыбного хоз-ва и экологии Респ. Карелия. Петрозаводск: ПетроПресс, 2006. 344 с.
7. Кейтс М. Техника липидологии: Пер. с англ. М.: Мир, 1975. 322 с.
8. Корякин А. С., Юрченко С. В. Сбросы загрязняющих веществ беломорской нефтебазой в Кандалакшский залив в 2004–2006 гг. // Экологические исследования беломорских организмов. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. С. 59–60.
9. Лаптева А. М. Закономерности реагирования бокоплавов на изменение химического состава воды // Проблемы рыбохозяйственной науки в творчестве молодых. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 1985. С. 197–206.
10. Луппова Е. Н. Особенности экологии литоральных бокоплавов *Lagunogammarus oceanicus* (Segerstråle, 1974) и *Gammarus duebeni duebeni* (Lilljeborg, 1851) в Баренцевом и Белом морях // Фауна беспозвоночных Карского, Баренцева и Белого морей (информатика, экология, биогеография). Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2003. С. 240–325.
11. Львова Т. Г. Особенности токсического воздействия на *Daphnia magna* солей тяжелых металлов // Современные проблемы физиологии и биохимии водных организмов. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2004. С. 86–87.
12. Миронов О. Г. Загрязнение нефтью // Общая экология. Биоценология. Гидробиология. М.: ВИНТИ, 1976. Т. 3.
13. Миронов О. Г., Писарева Н. А., Щекатурина Т. Л., Лапин Б. П. Исследование состава аренов в черноморских мидиях методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) // Гидробиологический журнал. Киев: Наукова думка, 1990. Т. 26. № 4. С. 59–62.
14. Моисеенко Т. И. Стратегия адаптивных ответов организмов и популяций на антропогенный стресс // Биологические основы изучения, освоения и охраны животного и растительного мира, почвенного покрова Восточной Финноскандии. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1999. С. 143.
15. Немировская И. А., Новигатский А. Н., Шевченко В. П. Оценка состояния экосистемы Белого моря (нефтяные углеводороды) // Современные экологические проблемы Севера (к 100-летию со дня рождения О. И. Семенова-Тян-Шанского. Ч. 2. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2006. С. 92–94.
16. Сидоров В. С., Лизенко Е. И., Болгова О. М., Нефедова З. А. Липиды рыб. 1. Методы анализа // Лососевые (Salmonidae) Карелии. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1972. С. 152–163.
17. Фауна беспозвоночных Карского, Баренцева и Белого морей (информатика, экология, биогеография). Апатиты, 2003.
18. Цветкова Н. Л. Прибрежные гаммариды северных и дальневосточных морей СССР и сопредельных вод. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1975. 257 с.
19. Цыганов Э. П. Метод прямого метилирования липидов после ТСХ без элюирования с силикагеля // Лабораторное дело. 1971. № 8. С. 490–493.
20. Шкляревич Г. А. Межгодовая динамика массовых видов бентоса на литорали Кандалакшского залива Белого моря // Биология моря. 1980. № 5. С. 26–32.
21. Шкляревич Г. А. Экология сообществ макробентоса Белого моря: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Петрозаводск, 2002.
22. Шкляревич Г. А., Разновская С. В. Литоральные амфиподы Кандалакшского залива Белого моря // Современные проблемы науки и образования. 2007. № 6. С. 168–172.
23. Шульман Г. Е., Юнева Т. В. Роль докозагексаеновой кислоты в адаптациях рыб (Обзор) // Гидробиологический журнал. 1990. Т. 26. № 4. С. 43–51.
24. Arduini A., Peschiera A., Dottori S., Sciarroni A., Serafini F., Calvani M. High performance liquid chromatography of long-chain acilcarnitine and phospholipids in fatty acid turnover studies // J. of Lipid Research. 1996. Vol. 37. P. 684–689.
25. Bryazgin V., Klimov A. Evaluation of the present state of the Pomor and Karelian coast and the Onega Bay of the White Sea // The Projects of the Investment Programs developed for the Republic of Karelia by NEFCO/AMAR. Information Paper. Petrosavodsk, 1995. P. 6.
26. Rinderhagen M., Ritterhoff J., Zauke G.-P. Crustaceans as bioindicators // Biomonitoring of Pollutant Water – Reviews on Actual Topics. Environmental Research Forum. 2000. Vol. 9. P. 161–194.
27. Wang X., Zauke G.-P. Relationship between growth parameter of the amphipod *Gammarus zaddachi* and the permeable body surface area determined by the acid-base titration method // Hydrobiologia. 2002. Vol. 482. P. 179–189.

СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ РОЖКОВ

доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник
Института биологии, Карельский научный центр РАН
(Петрозаводск, Российская Федерация)
rozhkov@krc.karelia.ru

АНДРЕЙ СЕРГЕЕВИЧ ГОРЮНОВ

кандидат физико-математических наук, ведущий научный
сотрудник Института биологии, Карельский научный
центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
goryunov@krc.karelia.ru

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ БЕЛКОВЫХ МОЛЕКУЛ В ВОДНО-СОЛЕВЫХ РАСТВОРАХ ЛИЗОЦИМА

Методом электронного парамагнитного резонанса показано, что среднее расстояние между спин-мечеными молекулами лизоцима (35 мг/мл) немонотонно и обратимо изменяется в зависимости от концентраций NaCl в диапазоне от 0 до 3 моль/л параллельно с изменениями гетерогенности раствора. Полученные результаты интерпретируются на основе представления о непрерывных закритических фазовых переходах и формировании различных типов белковых кластеров.

Ключевые слова: дипольное взаимодействие спин-меток, кластеры белка, фазовая диаграмма

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в связи с развитием прецизионных структурных методов исследования сложных микрогетерогенных биологических дисперсий все большее внимание уделяется проблеме возникновения в растворах глобулярных белков надмолекулярных структур – белковых кластеров различного типа. К ним относятся перманентные кластеры белковых макромолекул – олигомеры [31], динамические [25] и мезоскопические кластеры размерами в десятки и сотни нанометров [15], [24], [33], кинетические агрегаты размером в сотни и более нанометров [12], а также плотные жидкие фазы микроскопических размеров с концентрацией белка, на порядок большей, чем средняя по объему [10], [14], [20], зародыши кристаллической фазы, микрокристаллы и, наконец, гель [12]. Изучение таких белковых образований необходимо для решения ряда важных проблем биотехнологии, биологии и медицины, в числе которых кристаллизация белка [21], патогенез заболеваний, связанных с конденсацией белка [18], устойчивость белковых препаратов медицинского назначения [8], [23], регуляция осмотического гомеостаза висцеральных жидкостей [6], [7].

Ярким примером конденсации белка в водной среде является кристаллизации лизоцима в присутствии NaCl. Водно-солевые растворы этого белка подробно изучались разнообразными методами, в том числе с помощью теоретических моделей, с целью выяснить механизмы зародышеобразования и роста кристаллов [10], [12], [14], [20], [31]. При этом были построены фазовые диаграммы растворимости и разработаны экспериментальные и теоретические подходы, позволяющие установить соответствие между разными типами белковых ассоциатов в растворе и участками фазовой диаграммы, где они воз-

никают. Это способствовало значительно более глубокому пониманию явления фазового перехода типа жидкость – жидкость и перманентных белковых кластеров размером до 10 нм [31].

Однако результаты, полученные разными методами, не позволяют дать однозначный ответ на самый общий вопрос о том, чем же являются обнаруженные концентрационные неоднородности [17], [22], [24], [31], [33]. Ряд авторов считают их статическими (перманентными, равновесными) кластерами [13], [31]. В то же время другие исследователи считают их динамическими [26], [30]. Поэтому актуальность привлечения дополнительных экспериментальных физических методов исследования концентрационных неоднородностей в белковых растворах, а также дальнейшего анализа данных, получаемых с помощью этих методов, на основе фазовых диаграмм сохраняется, несмотря на прогресс в решении ряда методических проблем, возникающих при изучении явлений кластеризации белков [32].

Уширение линий спектра ЭПР, обусловленное диполь-дипольным взаимодействием спин-меток, связанных с молекулой белка, нередко используют для оценки расстояния между парамагнитными центрами [2], [4], [18], [19]. Уширение можно зарегистрировать в спектрах ЭПР застеклованных матриц белков, если расстояние между парамагнитными центрами не превышает 6–8 нм [2]. Поскольку среднее расстояние между молекулами белка в плотной фазе (или в кластере) составляет 0,6–1 нм [24], то образование кластеров должно приводить к уширению спектров ЭПР спиновых меток. В настоящей работе ставилась задача зарегистрировать надмолекулярные формирования – от белковых кластеров до геля – путем оценки относительных изменений среднего расстояния между макромолекулами методом ЭПР спин-метки. Важной

задачей также было обсуждение полученных результатов на основе представления о разных типах белковых кластеров, возникающих в закритической области фазовой диаграммы тройной системы вода – белок – соль.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Конъюгацию спиновой метки 4-(2-iodoacetamido)-2,2,6,6-tetramethylpiperidine 1-oxyl (Takeda Chemical Industries) с лизоцимом из белка куриных яиц (Sigma) проводили, следуя методике Лихтенштейна и др. [5]. При этом происходит избирательная модификация остатка аминокислоты гистидина-15 молекулы лизоцима (коэффициент посадки – 0,8) [5]. Для получения растворов с различной ионной силой в исходный раствор белка, приготовленного на основе 0,01 М фосфатного буфера, pH 6,4, добавлялись разные количества NaCl. Конечная концентрация белка в образцах составляла 35 мг/мл. Спектры ЭПР регистрировались с помощью радиоспектрометра Bruker EMX 6/1 (модуляция 100 кГц, амплитуда 1 Гс). Перед снятием спектров образцы выдерживали 6–8 часов при 20 °С для формирования возможной структурной организации раствора. При температуре 20 °С оценивали времена корреляции τ_c вращения метки, связанной с белком, для разных концентраций соли на основе модели быстрого вращения радикала [4], используя отношение амплитуд низкопольной и центральной линии спектра, а также ширину центральной линии.

Уширение линий спектра ЭПР, обусловленное диполь-дипольным взаимодействием спиновых меток, исследовалось в замороженных (77 К) растворах спин-меченого белка. Температура 77 К в образце устанавливалась после мгновенного помещения кюветы в наполненный жидким азотом сосуд дьюара резонатора. Показано [34], что концентрационные неоднородности в растворах макромолекул сохраняются при мгновенном замораживании, поскольку лимитирующим фактором их сохранения является трансляционная диффузия молекул, сопряженная с преодолением достаточно больших потенциальных барьеров.

Амплитуду крайних компонент спектра $d_{\parallel}$ и центральной компоненты d и их отношение определяли для образцов с разным содержанием соли при 77 К в зависимости от СВЧ-мощности. Параметр $d_{\parallel}/d$, чувствительный к диполь-дипольному взаимодействию нитроксильных радикалов, может быть использован при концентрациях нитроксильных радикалов более 7×10^{-3} М для характеристики изменений среднего расстояния между спин-метками [4] и, соответственно, между спин-мечеными молекулами белков в условиях одного центра посадки спин-метки на белке. При понижении концентрации нитроксильных радикалов параметр $d_{\parallel}/d$ стано-

вится слабо чувствителен к расстоянию между ними [2], поэтому при концентрации радикалов менее 7×10^{-3} М для оценки их взаимодействия может быть использована форма кривой насыщения СВЧ-сигнала [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Зависимости амплитуды центральной линии спектра ЭПР спин-меченого лизоцима от мощности СВЧ поля, представленные на рис. 1 для разных концентраций NaCl при 77, позволяют разбить рассматриваемый диапазон концентрации соли m_3 (М/л) на три части по характеру насыщения сигнала: (1) $0 < m_3 < 0,15$ М/л; (2) $0,3 \text{ М/л} < m_3 < 1,5 \text{ М/л}$; (3) $m_3 > 1,5 \text{ М/л}$. При малых концентрациях соли (1) кривая насыщения менее пологая, чем в контроле (растворе белка без NaCl), при средних концентрациях (2) – более пологая, чем в контроле, в условиях высаливания (3) – снова менее пологая. Более пологие кривые насыщения отвечают и более близкому расположению спиновых меток [4]. Это позволяет использовать форму кривой насыщения для контроля изменений среднего расстояния взаимодействия между спиновыми метками l . Следовательно, можно полагать, что в 1-й части диапазона концентрации соли среднее расстояние l между спин-метками больше, чем в контроле, во 2-й – меньше, в 3-й – снова больше.

Увеличение СВЧ-мощности приводит к изменению параметров сигнала ЭПР и позволяет выявить различия между величинами $d_{\parallel}/d$ для растворов спин-меченого лизоцима с разной концентрацией соли при 77 К. Если в условиях без насыщения (0,63 мВт) зависимость $d_{\parallel}/d$ от концентрации соли проявляется слабо, то в условиях умеренного насыщения (12,4 мВт) зависимость становится более выраженной (рис. 2). Поскольку $d_{\parallel}/d \sim l^{-1}$, то данные, представленные на рис. 1 и 2, указывают, что с ростом концентрации соли до 0,15 М среднее расстояние l между связанными с белком спиновыми метками увеличивается, затем уменьшается и вновь возрастает по достижении концентрации NaCl 3 М, которая является высаливающей.

Эти результаты, а также тот факт, что при общей концентрации спин-меток (и спин-меченого белка) $2,5 \times 10^{-3}$ М параметр $d_{\parallel}/d$ сохраняет чувствительность к изменению условий и СВЧ-мощности, свидетельствуют о том, что в растворе лизоцима образуются концентрационные неоднородности, в составе которых локальная концентрация превышает 7×10^{-3} М.

Образование вязкого белого геля в условиях высаливания лизоцима – известный эффект [12], [20], который наблюдали и мы еще до погружения образца в жидкий азот. Образец белка при добавлении 3 М NaCl мгновенно превращался в гель и оставался в состоянии геля белого цвета в течение 4 суток при 20 °С. Образцы белка,

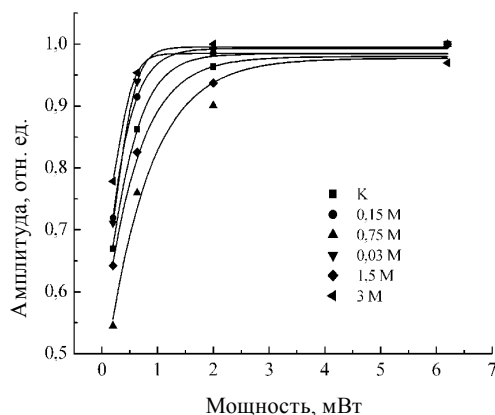


Рис. 1. Нормированные значения амплитуд центральной компоненты спектра ЭПР спин-меченого лизоцима в зависимости от насыщающей СВЧ-мощности при разных концентрациях NaCl в растворе белка

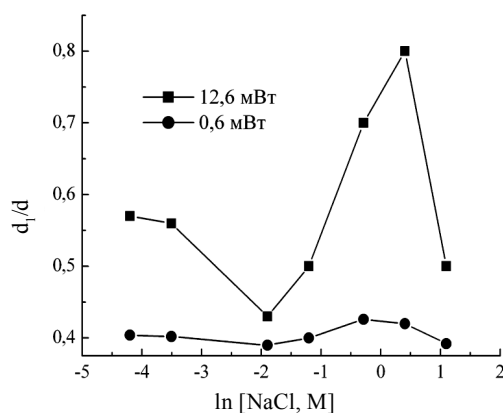


Рис. 2. Зависимость параметра $d_{||}/d$ от концентрации NaCl (M) как $\ln(\text{NaCl})$ при значениях СВЧ-мощности 12,6 мВт – (1) и 0,6 мВт – (2). Размер символа соответствует стандартной погрешности

содержавшие менее 0,3 М NaCl, сохраняли прозрачность. В изначально прозрачных образцах, содержащих от 0,3 до 1,5 М NaCl, через 4 суток наблюдалась выраженная опалесценция, которая была тем более заметна, чем выше исходная концентрация NaCl. Постепенное уменьшение расстояния между молекулами белка в диапазоне 0,3–1,5 М NaCl, выявляемое на основе анализа спектров ЭПР спин-меченого лизоцима, можно связать с проявлением сильного взаимодействия белок – белок, которое, как предполагается, в этих условиях может приводить к формированию различных агрегатов, кластеров плотной фазы и даже зародышей кристаллической фазы [12], [14], [20]. Однако поскольку зародыши новой фазы обычно появляются лишь через несколько суток, следует предположить, что обнаруженное по спектрам ЭПР через 6–8 часов уменьшение расстояния в диапазоне 0,3–0,8 М NaCl, поначалу не сопровождающееся визуально наблюдаемой опалесценцией, обусловлено формированием белковых кластеров и/или

агрегатов вследствие потери системой термодинамической устойчивости.

На рис. 3 эффективное время корреляции вращения спиновой метки, определяющееся отношением амплитуд линий спектра ЭПР [4], представлено в зависимости от концентрации соли при 20 °С. Как время корреляции, так и ширина центральной линии спектра монотонно возрастают во всем рассматриваемом диапазоне солей. Однако в растворе без соли время корреляции (горизонтальная линия на рис. 3) больше, чем в низкосолевых растворах. Поскольку в спектрах ЭПР в первую очередь проявляется наиболее быстрый тип подвижности спиновой метки, эти изменения времени корреляции отражают изменения микровязкости белковой глобулы в области локализации метки.

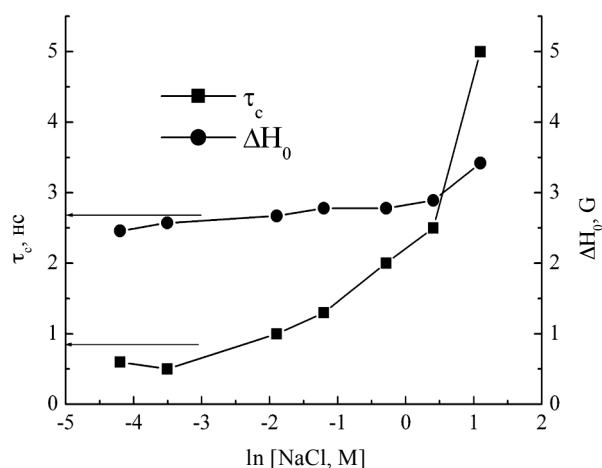


Рис. 3. Зависимости изменения времени корреляции (τ_c) спин-метки, связанной с молекулой лизоцима, и ширины центральной компоненты (ΔH_0) спектра ЭПР спин-метки от концентрации NaCl. Горизонтальными отрезками показаны уровни τ_c и ΔH_0 в растворе белка без соли. Размер символа соответствует стандартной погрешности

Первые две точки обеих зависимостей рис. 3 лежат ниже уровня значений, соответствующих раствору белка без соли (пунктир). Благодаря этому можно сделать вывод, что при концентрациях менее 0,05 М NaCl имеет место некоторое снижение микровязкости в области спин-метки, которое может быть связано с разрыхлением структуры белковой глобулы в этих условиях. Однако в дальнейшем значения обоих параметров возрастают и превышают уровень бессолевого раствора, что указывает на постепенную солью индуцируемую стабилизацию структуры белка в области спин-метки. Весьма вероятно, эти изменения сопряжены в том числе с усилением взаимодействия между молекулами белка при образовании высокосолевых мезоскопических кластеров, а впоследствии и при формировании зародышей кристаллической фазы.

Вблизи верхней границы рассматриваемого диапазона – при 3 М NaCl в условиях высали-

вания при 20 °С в спектре ЭПР спин-меченого лизоцима – появляется широкая линия, и время корреляции существенно увеличивается. Это может указывать на сильное увеличение вязкости в системе, поскольку аналогичная линия наблюдается, например, в растворе 35 % сахарозы [3]. Однако среднее расстояние между спиновыми метками и молекулами белка при этом не уменьшается, как можно было бы ожидать, а остается на том же уровне, что и при физиологических концентрациях соли (рис. 2). Это говорит об отсутствии кристаллической фазы в геле и о том, что гель является целлюлярной, достаточно рыхлой структурой.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 4 представлена фазовая диаграмма раствора лизоцима, которая наряду с линиями бинодалей (1–3), полученными ранее экспериментально для фиксированных концентраций соли [20], содержит предлагаемую нами линию бинодалей для концентрации 3 М NaCl (кривая 4). С увеличением концентрации соли критическая точка бинодалей и спинодалей (рис. 4) смещается все выше по оси температур, и область, ранее являвшаяся однофазной, оказывается на границе бинодалей. При этом происходит фазовый переход типа жидкость – жидкость, связанный с образованием плотной и разбавленной фаз [20]. Соответственно, в растворах лизоцима при малых концентрациях NaCl бинодаль окажется в области низких температур, а с ростом концентрации соли до 1,5 М при содержании белка 35 мг/мл она сдвинется к 20 °С. При дальнейшем повышении концентрации соли до 3 М NaCl в результате быстрого кинетического процесса спинодального распада [14] вместо концентрированной, но прозрачной фазы (или микрокапель плотной фазы) образуется вязкий гель (см. рис. 1 в работе [12]).

Обычно в присутствии высоких концентраций солей раствор белка теряет термодинамическую устойчивость. Переход в устойчивое состояние может приводить к образованию зародышей кристаллической фазы или вязкого геля, установление равновесия в котором требует значительного времени. Образование вязкого геля белого цвета сопровождается сильной иммобилизацией спиновой метки относительно белка, которая приводит к появлению второй (широкой) линии в спектре ЭПР и к резкому возрастанию времени корреляции (рис. 3). Однако сохраняющееся сравнительно большое расстояние между молекулами белка (рис. 1 и 2) позволяет предположить, что пространственная сетка геля при этом формируется в виде ячеистой фрактальной структуры из белковых кластеров за счет межмолекулярных взаимодействий различной природы [14]. Возможно, часть кластеров появляется в результате некоторого разворачивания структуры белковой молекулы.

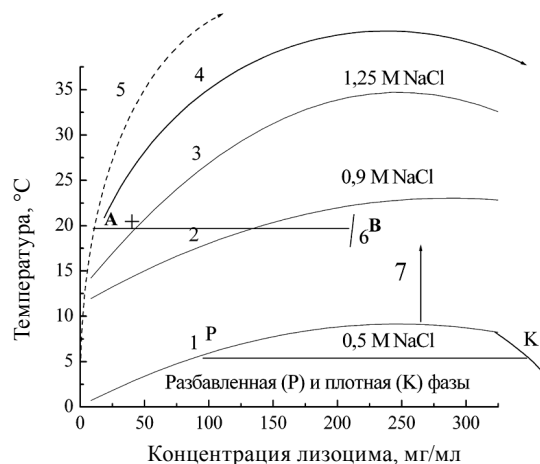


Рис. 4. Схематическая фазовая диаграмма раствора лизоцима: 1–3 – экспериментальные бинодали как линии равновесия фаз при соответствующей концентрации NaCl согласно [20]; 4 – предполагаемое положение бинодалей при концентрации соли 3 М NaCl; 5 – линия растворимости белка при 0,5 М NaCl согласно [20]; 6 – предполагаемая линия гелеобразования при 3 М NaCl. А и В – концентрация белка в разбавленной фазе и в геле соответственно; 7 – предполагаемая квазиспинодаль для кривой 1. Критической точке соответствует около 270 мг/мл белка. Состояние исследуемого раствора лизоцима на фазовой диаграмме показано крестиком

В области физиологических концентраций соли фазовое разделение в наших экспериментах не обнаруживается. Следовательно, экспериментальная точка, соответствующая 20 °С и 35 мг/мл лизоцима, располагается выше линии бинодалей. При этом изменения концентрации соли во всем диапазоне ее низких значений, включая физиологические, заметно сказываются на диполь-дипольном взаимодействии между спин-метками и, таким образом, на среднем расстоянии между молекулами белка. Это, вероятно, связано с существованием концентрационных неоднородностей. Они обнаруживаются и другими методами: светорассеяния, МУРР и МУНР – также в заведомо однофазной области – в окрестности линии растворимости, то есть выше и линии бинодалей, и температуры критической точки [24], [31], и интерпретируются как белковые кластеры. Мы предполагаем, что добавление NaCl вызывает постепенное замещение одних кластеров (1-го типа с размерами до 10 нм), которые доминируют в растворах без соли [31], другими кластерами (2-го типа с размерами около 100 нм), появляющимися при добавлении солей [24].

Данные рис. 3 позволяют предположить, что такой переход от одних кластеров к другим должен сопровождаться постепенным переходом белковой глобулы к более рыхлой структуре с повышенной гибкостью. Это может быть обусловлено тем, что по мере роста концентрации NaCl взаимодействие ионов Cl^- с центрами сорбции белковой глобулы усиливается, а в связи с этим увеличивается осмотическое давление

в водно-белковой матрице, способствующее ее разрыхлению из-за снижения удельной поверхностной энергии. Считается, что анионы хлора, помимо участия в экранировке положительно заряженных групп, также активно сорбируются специфическими неполярными участками молекул лизоцима и других белков благодаря устройству своей электронной оболочки и способности к поляризации [11]. Число таких адсорбированных анионов хлора может достигать десятка [27]. Однако при больших концентрациях соли, когда центры адсорбции насыщены, увеличение концентрации солей ведет к росту удельной поверхностной энергии вследствие эффектов предпочтительной гидратации [9].

Зависимость критической температуры системы вода – белок – соль от критического состава – соотношения молярных концентраций белка m_2 и соли m_3 ($X = (m_2/m_3)_{кр}$) (рис. 5) показывает, что и в области закритических состояний могут возникать условия для фазового перехода типа жидкость – жидкость [28], [29], который реализуется как флуктуационное мезофазное состояние. Это означает, что максимальные флуктуации концентрации будут иметь место в области квазиспинодали фазовой диаграммы в закритической области, то есть там, где и обнаруживаются экспериментально метастабильные мезоскопические кластеры белков [24].

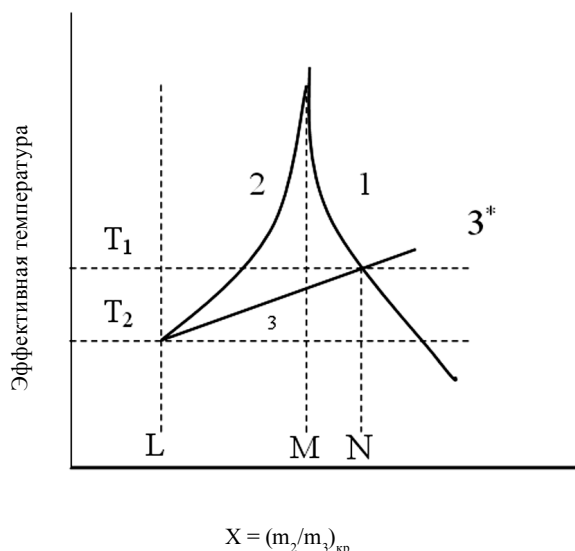


Рис. 5. Линии критических точек, устанавливающие соответствие критического состава $X = (m_2/m_3)_{кр}$ и эффективной температуры T . Кривые 1 и 2 построены для концентраций соли, при которых производная от коэффициента активности соли по концентрации отрицательна и положительна соответственно. При $(m_2/m_3) > N$ квазиспинодаль (кривая 3*) выходит в закритическую область фазовой диаграммы. При $(m_2/m_3) < N$ кривая 3 может характеризовать положение линии бинодали [29]. Температуре T_2 соответствует тройная точка, где $(m_2/m_3) = L = 2/\nu$ и ν – число адсорбированных на белке анионов электролита

В соответствии с закономерностями термодинамики непрерывных фазовых переходов в закритической области система в целом является однородной, но при этом она постепенно теряет свойства двухфазной системы [1]. Эта трансформация может занимать значительную область фазовой диаграммы вдоль квазиспинодали и представлять собой область закритических фазовых переходов, захватывая линию растворимости. В этом случае флуктуирующая смесь кластеров белка является остаточным явлением низкотемпературного двухфазного состояния системы и представляет собой особое макроскопически однородное мезофазное состояние.

С другой стороны, если есть квазиспинодаль, то, вероятно, существует и квазибинодаль [1], то есть возможны такие условия, при которых во внешне однородных растворах будут существовать метастабильные белковые кластеры. Можно предположить, что кластеры – олигомеры лизоцима размерами до 10 нм являются гелеподобными квазичастицами [24], а мезоскопические кластеры – частью фрактальных агрегатов гелевой фазы. Поскольку гель образуется мгновенно после добавления избытка соли, естественно предположить, что еще до момента гелеобразования в растворе уже существует некоторая динамическая структура, имеющая отношение к мезоскопической кластерной организации. В области квазиспинодали в некотором диапазоне температур кластеры двух типов могут существовать одновременно, хотя и не находиться при этом в равновесии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наблюдаемые методом спиновой метки при комнатных температурах солью индуцированные изменения среднего расстояния между молекулами лизоцима в области физиологических концентраций NaCl, сопровождаемые увеличением гибкости молекул белка, могут быть обусловлены прохождением системы вода – белок – электролит области квазиспинодали ее фазовой диаграммы. В этом состоянии пониженной термодинамической устойчивости система при макроскопической однородности будет представлять собой особое мезофазное состояние – смесь флуктуационных кластеров обеих граничных фаз – золь и геля. При концентрациях соли выше физиологических в растворе белка развивается термодинамическая неустойчивость, приводящая к формированию различных неустойчивых надмолекулярных структур типа фрактальных кластеров белка и зародышей кристаллической фазы. В области «высаливающих» концентраций соли имеет место фазовый переход золь – гель, приводящий систему к термодинамически устойчивому состоянию геля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базаров И. П. Термодинамика. М.: Высш. шк., 1983. 344 с.
2. Вассерман А. М., Коварский А. Л. Спиновые метки и зонды в физикохимии полимеров. М.: Наука, 1986. 246 с.
3. Кяйвярйнен А. И., Рожков С. П. Сравнительный анализ времен корреляции молекул лизоцима и лизоцима в комплексе с ингибитором в области физиологических температур методом спиновой метки // Биофизика. 1987. Т. 32. № 1. С. 22–25.
4. Лихтенштейн Г. И. Метод спиновых меток в молекулярной биологии. М.: Наука, 1974. 256 с.
5. Лихтенштейн Г. И., Ахмедов Ю. Д., Иванов Л. В., Криницкая Л. А., Коханов Ю. В. Изучение молекул лизоцима методом спиновых меток // Молекулярная биология. 1974. Т. 8. № 1. С. 48–57.
6. Рожков С. П. Трехкомпонентная система вода-биополимер-ионы как модель молекулярных механизмов осмотического гомеостаза // Биофизика. 2001. Т. 46. № 1. С. 53–59.
7. Рожков С. П. Критические явления, фазовые равновесия и структурно-температурный оптимум гомеостаза в модельной системе вода-биополимер-электролит // Биофизика. 2005. Т. 50. № 2. С. 115–122.
8. Семенченко В. К. Избранные главы теоретической физики. М.: Просвещение, 1966. 396 с.
9. Ahrer K., Buchacer A., Iberer G., Jungbauer A. Thermodynamic stability and formation of aggregates of human immunoglobulin G characterized by differential scanning calorimetry and dynamic light scattering // J. Biochem. Biophys. Methods. 2006. Vol. 66. № 1–3. P. 73–86.
10. Arakawa T., Timasheff S. N. Mechanism of protein salting in and salting out by divalent salts: balance between hydration and salt binding // Biochemistry. 1984. Vol. 23. № 25. P. 5912–5923.
11. Asherie N. Protein crystallization and phase diagrams // Methods. 2004. Vol. 34. № 3. P. 266–272.
12. Bostrom M., Williams D. R. M., Ninham B. W. Specific ion effects: why the properties of lysozyme in salt solutions follow a Hofmeister series // Biophys. J. 2003. Vol. 85. № 2. P. 686–694.
13. Dumetz A. C., Chockla A. M., Kaler E. W., Lenhoff A. M. Protein phase behavior in aqueous solutions: crystallization, liquid-liquid phase separation, gels, and aggregates // Biophys. J. 2008. Vol. 94. № 2. P. 570–583.
14. Fukasawa T., Sato T. Versatile application of indirect Fourier transformation to structure factor analysis: from X-ray diffraction of molecular liquids to small angle scattering of protein solutions // Phys. Chem. Chem. Phys. 2011. Vol. 13. № 8. P. 3187–3196.
15. Georgalis Y., Umbach P., Soumpasis D. M., Saenger W. Dynamic and microstructure formation during nucleation of lysozyme solutions // J. Am. Chem. Soc. 1998. Vol. 120. № 22. P. 5539–5548.
16. Glico O., Pan W., Katsonis P., Neumaier N., Galkin O., Weinkauff S., Vekilov P. G. Metastable liquid clusters in super and undersaturated protein solutions // J. Phys. Chem. B. 2007. Vol. 111. № 12. P. 3106–3114.
17. Hill S. E., Robinson J., Matthews G., Muschol M. Amyloid protofibrils of lysozyme nucleate and grow via oligomer fusion // Biophys. J. 2009. Vol. 96. № 9. P. 3781–3790.
18. Igarashi K., Azuma M., Kato J., Ooshima H. The initial stage of crystallization of lysozyme: a differential scanning calorimetric (DSC) study // J. Cryst. Growth. 1999. Vol. 204. № 1–2. P. 191–200.
19. Ionita P., Caragheorghopol A., Gilbert B. C., Chechik V. Dipole-dipole interactions in spin-labeled Au nanoparticles as a measure of interspin distances // J. Phys. Chem. B. 2005. Vol. 109. № 9. P. 3734–3742.
20. Mevorat-Kaplan K., Veiner L., Sheves M. Spin-labeling of Natronomonas pharaonis halorhodopsin: Probing the cysteine residues environment // J. Phys. Chem. B. 2006. Vol. 110. № 17. P. 8825–8831.
21. Muschol M., Rozenberger F. Liquid-liquid phase separation in supersaturated lysozyme solutions and associated precipitate formation/crystallization // J. Chem. Phys. 1997. Vol. 107. № 6. P. 1953–1962.
22. Nanev C. N. On slow protein crystal nucleation: cluster-cluster aggregation on diffusional encounters // Cryst. Res. Technol. 2009. Vol. 44. № 1. P. 7–12.
23. Niimura N., Minezaki Y., Ataka M., Katsura T. Aggregation in supersaturated lysozyme solution studied by time-resolved small angle neutron scattering // J. Cryst. Growth. 1995. Vol. 154. № 1–2. P. 136–144.
24. Nishi H., Miyajima M., Nakagami H., Noda M., Uchiyama S., Fukui K. Phase separation of an IgG1 antibody solution under a low ionic strength condition // Pharm. Res. 2010. Vol. 27. № 7. P. 1348–1360.
25. Pan W., Vekilov P. G., Lubchenko V. Anomalous mesoscopic phases in protein solutions // J. Phys. Chem. B. 2010. Vol. 114. № 22. P. 7620–7630.
26. Piazza R. Protein interaction and association: an open challenge for colloid science // Curr. Opin. Colloid Interface Sci. 2004. Vol. 8. № 6. P. 515–522.
27. Porcar L., Falus P., Chen W.-R., Faraone A., Fratini E., Hong K., Baglioni P., Liu Y. Formation of the dynamic clusters in concentrated lysozyme protein solutions // J. Phys. Chem. Lett. 2010. Vol. 1. № 1. P. 126–129.
28. Retailliau P., Ries-Kautt M., Ducruix A. No salting in of lysozyme chloride observed at low ionic strength over a large range of pH // Biophys. J. 1997. Vol. 73. № 4. P. 2156–2163.
29. Rozhkov S. P. Phase transitions and precrystallization processes in a water-protein-electrolyte system // J. Cryst. Growth. 2004. Vol. 273. № 1–2. P. 266–279.
30. Rozhkov S. P., Goryunov A. S. Effects of inorganic salts on the structural heterogeneity of serum albumin solutions // Eur. Biophys. J. 2000. Vol. 28. № 8. P. 639–645.
31. Rozhkov S. P., Goryunov A. S. Thermodynamic study of protein phases formation and clustering in model water-protein-salt solutions // Biophys. Chem. 2010. Vol. 151. № 1–2. P. 22–28.
32. Shukla A., Mylonas E., Di Cola E., Finet S., Timmins P., Narayanan T., Svergun D. I. Absence of equilibrium cluster phase in concentrated lysozyme solutions // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2008. Vol. 105. № 13. P. 5075–5080.
33. Stradner A., Cardinaux F., Schurtenberger P. A small-angle scattering study on equilibrium clusters in lysozyme solutions // J. Phys. Chem. B. 2006. Vol. 110. № 42. P. 21222–21231.
34. Trehwella J. The different views from small angles // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2008. Vol. 105. № 13. P. 4967–4968.
35. Vekilov P. G. Metastable mesoscopic phases in concentrated protein solutions // Ann. N. Y. Acad. Sci. 2009. Vol. 1161. № 4. P. 377–386.
36. Weber S., Wolff T., von Bunau G. Molecular mobility in liquid and in frozen micellar solutions. EPR spectroscopy of nitroxide free radicals // J. Colloid Interface Sci. 1996. Vol. 184. № 1. P. 163–169.

ЕЛЕНА ВАЛЕНТИНОВНА ЕВДОКИМОВА

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

evdokimova1@inbox.ru

АРТЕМ ОЛЕГОВИЧ НОВИЧОНОК

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

artnovich@inbox.ru

ЕВГЕНИЯ ФЕДОРОВНА МАРКОВСКАЯ

доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

volev10@mail.ru

ЮЛИЯ АЛЕКСАНДРОВНА КУРБАТОВА

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

kurbatova.j@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ ВОДНОГО РЕЖИМА НЕКОТОРЫХ ВИДОВ РАСТЕНИЙ В ТРОПИЧЕСКОМ ЛЕСУ НА ЮГЕ ВЬЕТНАМА ВО ВЛАЖНЫЙ СЕЗОН

Рассматриваются основные параметры водного обмена (интенсивность транспирации, водный дефицит, насыщающее содержание воды) 6 видов растений подлеска и подроста муссонного тропического леса во влажный сезон. Выделены 2 группы видов: первая, хорошо адаптированная, характеризуется относительной стабильностью водного режима; вторая – не имеет стабильного водного режима в связи с конкуренцией с другими видами этого сообщества.

Ключевые слова: транспирация, водный дефицит, насыщающее содержание воды, подлесок, подрост, муссонный тропический лес

Древостой влажного тропического леса имеет сложную структуру. В вертикальном строении прослеживаются несколько подъярусов, что приводит к сильной трансформации факторов внешней среды. Прежде всего это касается потоков солнечной радиации, а также температуры и влажности воздуха.

Наиболее характерной экологической чертой растений подлеска в тропическом лесу являются адаптационные особенности, связанные с существованием в условиях слабой освещенности, – изменения в содержании пигментов и CO_2 -газообмена [2]. Кроме недостатка света лимитирующую роль в развитии растений играет избыточное содержание влаги в почве во влажный период. Избыток влаги в почве вызывает изменение устойчивой проводимости [15] и приводит к снижению ассимиляции углерода [16], [17]. Вопрос о влиянии лимитирующих факторов на развитие растений остается в настоящее время по-прежнему дискуссионным. На основании большого системного исследования, проведенного С. Н. Шереметьевым на широком диапазоне градиента влажности почв, был сделан вывод, что нет местообитаний, которые принято называть стрессовыми. Виды в каждом местообитании полностью соответствуют эко-

логической и фитоценотической обстановке [12]. Выводы были получены для травяного покрова. Исследование не включало зону влажных тропических лесов.

Цель настоящего исследования состояла в оценке основных параметров водного обмена растений сезонно-влажного тропического леса, произрастающих в условиях избыточного увлажнения, что можно рассматривать как вариант гумидных условий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование было проведено в Национальном парке Кат Тиен, расположенном на юге Вьетнама (11° с. ш, 107° в. д.). Климат на территории национального парка относится к мягкому муссонному тропическому типу [13]. Среднегодовая температура воздуха составляет $25,4^\circ\text{C}$, колебания между самыми жаркими и самыми прохладными месяцами не превышают $3\text{--}4^\circ\text{C}$. В то же время суточная амплитуда температуры воздуха может составлять более 10°C . Во время влажного сезона (май – октябрь) выпадает до 90 % годовой нормы осадков (~ 2000 мм) [13]. В вертикальном строении древостоя парка прослеживается от трех до пяти ярусов. В качестве объектов исследования были выбраны 6 видов

растений разных экологических групп, имеющих разные стратегии развития и произрастающих на данной стадии онтогенетического развития в нижнем ярусе сезонно-влажного тропического леса: *Lagerstremia calyculata* Kurz – подрост доминанта верхнего яруса, *Hibiscus sp.*, *Dalbergia sp.*, – подрост второго-третьего ярусов, *Phyllanthus sp.* – вид нижнего яруса, *Ancistrocladus tectorius* Lour. (Merr.), *Calamus sp.* – лианы.

Исследования были выполнены на 5–7 растениях каждого вида. *Lagerstremia calyculata*, *Hibiscus sp.* и *Dalbergia sp.* находились на виргинильном этапе развития, *Phyllanthus sp.*, *Ancistrocladus tectorius*, *Calamus sp.* – на генеративном. Для определения интенсивности транспирации с каждого растения со средней части кроны отбирали по 2–5 листьев; для определения водного дефицита и степени оводненности – по 5 листьев для одной пробы. Все показатели определяли в 3–5-кратной повторности. Интенсивность транспирации листьев определяли методом быстрого взвешивания [5]. Для этого измеряли массу листьев сразу после сбора и через 3 минуты. Интенсивность транспирации (E) рассчитывали по формуле:

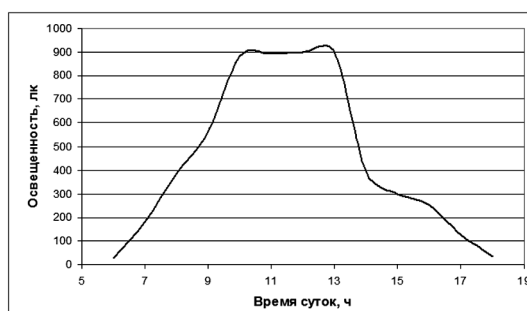
$$E = (M_0 - M_3) \cdot 20/S \text{ (г/м}^2 \cdot \text{ч)},$$

где M_0 и M_3 – масса листьев сразу после сбора и через 3 минуты соответственно, S – площадь листьев, 20 – коэффициент пересчета минут в часы.

Одновременно с измерением транспирации собирали листья для определения дефицита водного насыщения и насыщающего содержания воды. Сразу после сбора измеряли свежую массу листьев. Для определения массы листьев при насыщении листья регидрировали во влажном поролоне в течение 24 часов. Затем листья высушивали в сушильном шкафу при 60 °С до постоянной массы и определяли сухую массу листьев. Дефицит водного насыщения (WSD) и насыщающее содержание воды (WC_s) в листе рассчитывали по формулам:

$$WSD = (W_s - W_f) / (W_s - W_d) \cdot 100 (\%),$$

$$WC_s = W_s - W_f / W_d \text{ (г/г)},$$



где W_f и W_d – свежая и сухая масса листьев, W_s – масса листьев при насыщении.

Исследования были проведены в июле – августе 2011 года в дневное время суток (6–18 ч.) с интервалом измерений в один час. Транспирационные циклы для каждого растения проводились в 3-кратной повторности.

Параллельно с измерением транспирации регистрировали метеорологические параметры: освещенность, влажность и температуру воздуха. Пространственная изменчивость метеорологических параметров, особенно освещенности, под пологом леса высокая, поэтому их регистрация проводилась непосредственно в месте измерения транспирации. Освещенность измеряли с помощью люксметра «ТКА-ЛЮКС». Для измерения температуры использовали цифровой термометр «Checktemp 1», относительной влажности воздуха – цифровую метеостанцию «Anymetre JR 900».

Статистическую обработку полученных результатов проводили с использованием программы Statgraphics 2.1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основными экологическими факторами, оказывающими влияние на водный обмен растений, являются интенсивность фотосинтетически активной радиации, температура и относительная влажность воздуха [7]. Измерение освещенности (J) в период проведения исследований (влажный сезон) показало, что она имеет четкий суточный ход и достигает максимальных значений в 11 часов утра (рис. 1), восход солнца происходит в 05:40, заход – в 18:15 (1 августа). Максимальные значения относительной влажности воздуха (H) отмечаются в утренние и вечерние часы (рис. 1). Минимальная влажность воздуха на высоте 1 м наблюдается в 13 часов. Изменение влажности воздуха в течение суток незначительное и составляет 7–8 %. Перепад температуры воздуха (T) в течение суток составляет 3–4 °С (рис. 1).

Интенсивность транспирации

Анализ дневной динамики интенсивности транспирации исследуемых видов растений показал увеличение скорости транспирации с вос-

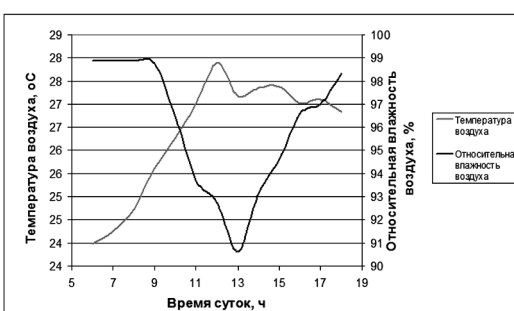


Рис. 1. Средняя суточная динамика освещенности, температуры и влажности воздуха под пологом леса на высоте 1 м в июле – сентябре 2011 года (Вьетнам, Национальный парк Кат Тиен)

ходом солнца. При этом у растений *Ancistrocladus tectorius* и *Phyllanthus sp.* почти сразу после восхода солнца (6 часов утра) отмечался высокий уровень транспирации, достигающий почти 80 % от максимума. Максимальная интенсивность транспирации (*E_{max}*) у растений *Ancistrocladus tectorius* и *Phyllanthus sp.* наблюдалась в 11–13 и 9–12 часов соответственно (рис. 1). Сопоставление дневного хода интенсивности транспирации растений *Phyllanthus sp.* и освещенности показало несовпадение максимумов

их фаз. Наибольшая интенсивность транспирации наблюдалась на 2 часа раньше, чем максимум освещенности.

Корреляционный анализ показал сильное влияние освещенности, температуры и относительной влажности воздуха на суточный ритм транспирации *Ancistrocladus tectorius* (табл. 1) и отсутствие зависимости между скоростью транспирации у *Phyllanthus sp.* и факторами внешней среды. Анализ дневной динамики скорости транспирации растений *Dalbergia sp.*

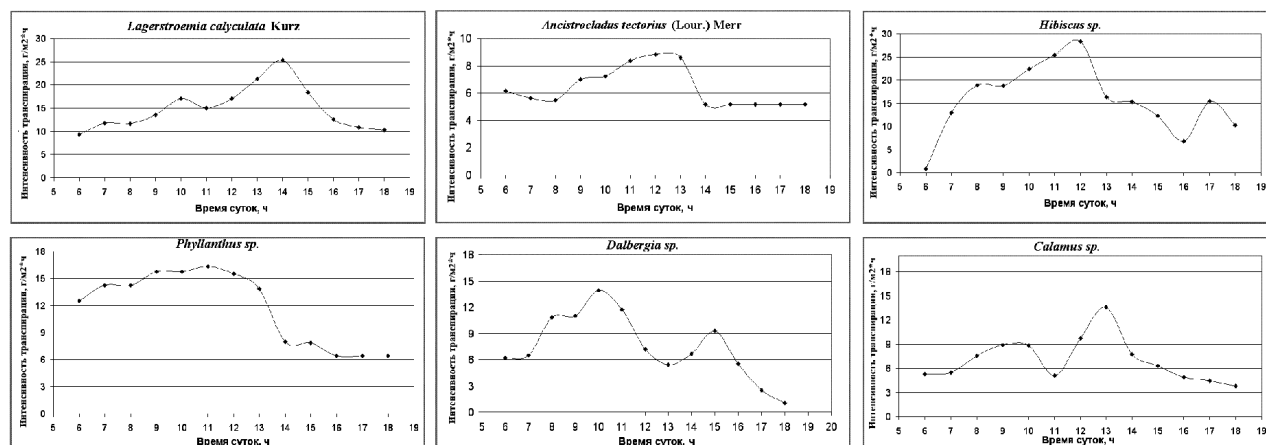


Рис. 2. Средняя суточная динамика интенсивности транспирации растений в июле – сентябре 2011 года (Вьетнам, Национальный парк Кат Тиен)

Таблица 1

Зависимость между интенсивностью транспирации и экологическими факторами

Вид	Экологический фактор	Коэффициент корреляции (r^2)	Коэффициент детерминации (R^2)	p -Value
<i>Ancistrocladus tectorius</i>	Температура воздуха	0,66	43,20	0,0030
	Относительная влажность воздуха	-0,71	50,04	0,0010
	Освещенность	0,75	56,49	0,0003
<i>Phyllanthus sp.</i>	Температура воздуха	0,15	2,18	0,36
	Относительная влажность воздуха	-0,22	4,83	0,17
	Освещенность	0,31	9,54	0,05
<i>Dalbergia sp.</i>	Температура воздуха	0,003	0,0007	0,99
	Относительная влажность воздуха	0,01	0,02	0,97
	Освещенность	0,83	69,5	0,0004
<i>Calamus sp.</i>	Температура воздуха	0,30	4,4	0,24
	Относительная влажность воздуха	-0,26	6,9	0,15
	Освещенность	0,34	11,96	0,15
<i>Hibiscus sp.</i>	Температура воздуха	0,33	11,14	0,27
	Относительная влажность воздуха	-0,33	11,08	0,27
	Освещенность	0,68	46,85	0,0099
<i>Lagerstroemia calyculata</i>	Температура воздуха	0,65	41,9	0,0152
	Относительная влажность воздуха	-0,75	56,9	0,0032
	Освещенность	0,77	59,05	0,0021

и *Calamus sp.* показал, что у этих видов также отмечаются высокие значения транспирации утром сразу после восхода солнца, но они ниже и составляют около 40 % от суточного максимума. Вечером, после захода солнца, транспирация у *Calamus sp.* еще держится на относительно высоком уровне, а у *Dalbergia sp.* снижается до нуля. Кривые дневного хода транспирации у этих видов имеют два пика максимума, которые приходится на разное время (у *Calamus sp.* на 9–10 и 13 ч., а у *Dalbergia sp.* на 10 и 15 ч.). При этом стоит отметить, что у *Calamus sp.* не было выявлено зависимости между интенсивностью транспирации и факторами среды, а на транспирацию *Dalbergia sp.* оказывает влияние только освещенность (табл. 1). Из данных видов по интенсивности транспирации выделяются растения *Phyllanthus sp.*, которые показали максимальные значения – 16,3 г/м²ч, средние – 13,5 г/м²ч. У остальных видов данной группы максимальные и средние значения скорости транспирации ниже и соответствуют: *Calamus sp.* – 14,0 и 7,1 г/м²ч; *Ancistrocladus tectorius* – 9,0 и 6,9 г/м²ч; *Dalbergia sp.* – 14,0 и 7,5 г/м²ч.

Существуют некоторые особенности дневной динамики транспирации у *Hibiscus sp.* Суточная кривая транспирации имеет один высокий пик в 12 ч. и небольшое увеличение в 17 ч. Интенсивность транспирации у *Hibiscus sp.* наибольшая из всех изученных видов: максимальные – 28,3 г/м²ч, средние – 15,7 г/м²ч. Для этого вида выявлена довольно сильная корреляционная связь между скоростью транспирации и освещенностью (табл. 1).

Суточный ход транспирации у подростка *Lagerstroemia calyculata* имеет один максимум в 14 ч. Уже с восходом солнца отмечаются высокие значения транспирации, которые после достижения максимума начинают снижаться, но и после захода солнца остаются на уровне, сходном с утренними значениями. Максимальные значения транспирации у *Lagerstroemia calyculata* достигают 25,3 г/м²ч, среднее значение – 14,9 г/м²ч. Наиболее сильное влияние на суточный ход транспирации *Lagerstroemia calyculata* оказывают освещенность и влажность воздуха (табл. 1).

Дефицит водного насыщения

Дневная динамика дефицита водного насыщения у разных видов была сходной: наиболее низкие значения водного дефицита наблюдали в утренние и вечерние часы. В дневное время с понижением влажности воздуха и увеличением температуры водный дефицит увеличивался. Время формирования максимального водного дефицита различается у разных видов и варьирует между 11 и 13 ч. (табл. 2). Диапазон дефицита водного насыщения у всех изученных видов изменялся в пределах от 5 до 35 %. У *Phyllanthus sp.*, *Lagerstroemia calyculata*, *Ancistrocladus sp.*

и *Calamus sp.* водный дефицит практически не формируется, и его величина составляет от 5 до 12–15 % (табл. 2). Для двух видов, являющихся подростом второго-третьего ярусов (*Dalbergia sp.*, *Hibiscus sp.*), отмечены высокие значения водного дефицита. У *Hibiscus sp.* наблюдаются наибольшие по сравнению с остальными изученными видами значения водного дефицита (36 %).

Таблица 2

Средние (WSD) и максимальные (WSD_{max}) значения водного дефицита листьев растений сезонно-влажного тропического леса во влажный период

Вид	WSD , %	WSD_{max} , %	Время наступления WSD_{max} , часы
<i>Hibiscus sp.</i>	$20,6 \pm 2,57$	36,3	12
<i>Lagerstroemia calyculata</i>	$8,0 \pm 0,68$	12,2	12
<i>Phyllanthus sp.</i>	$4,2 \pm 0,38$	5,6	11
<i>Ancistrocladus tectorius</i>	$10,8 \pm 1,05$	14,4	13
<i>Calamus sp.</i>	$5,2 \pm 0,55$	8,2	13
<i>Dalbergia sp.</i>	$19,2 \pm 1,64$	24,4	13

Насыщающее содержание воды

Максимальные значения насыщающего содержания воды наблюдаются у *Phyllanthus sp.* (3,4 г/г) и *Hibiscus sp.* (2,7 г/г), а минимальные – у *Calamus sp.* (1,00 г/г). У остальных видов (*Ancistrocladus tectorius*, *Dalbergia sp.* и *Lagerstroemia calyculata*) значения насыщающего содержания воды находятся примерно на одном уровне – около 2 г/г (табл. 3). По этому показателю не выявлено отличий между разными группами растений. Значения насыщающего содержания воды зависят от многих факторов, в том числе от биологических особенностей видов и, в частности, от анатомо-морфологической структуры.

Таблица 3

Средние значения насыщающего содержания воды в листьях растений сезонно-влажного тропического леса во влажный период

Вид	Насыщающее содержание воды, г/г
<i>Hibiscus sp.</i>	$2,71 \pm 0,09$
<i>Lagerstroemia calyculata</i>	$2,20 \pm 0,04$
<i>Phyllanthus sp.</i>	$3,39 \pm 0,06$
<i>Ancistrocladus tectorius</i>	$1,90 \pm 0,10$
<i>Calamus sp.</i>	$1,00 \pm 0,04$
<i>Dalbergia sp.</i>	$2,00 \pm 0,14$

ОБСУЖДЕНИЕ

В работе исследованы виды, которые различаются по жизненной стратегии: *Phyllanthus sp.* является типичным видом подростка и постоянно растет в условиях очень низкой освещенности и высокой влажности воздуха и почвы, особенно во влажный сезон. Три других древесных вида

(*Lagerstroemia calyculata*, *Hibiscus sp.*, *Dalbergia sp.*) произрастают в этих условиях только на ранних этапах онтогенеза, а затем они должны достичь верхнего (*Lagerstroemia calyculata*) или второго-третьего (*Hibiscus sp.*, *Dalbergia sp.*) ярусов. Лианы – *Ancistrocladus tectorius* и *Calamus sp.* могут достигать второго-третьего и верхнего ярусов соответственно.

Проведенная работа показала, что исследуемые виды включают виды с высокими – 25–30 (*Lagerstroemia calyculata*, *Hibiscus sp.*), средними – 14–16 (*Phyllanthus sp.*, *Dalbergia sp.*, *Calamus sp.*) и низкими – 9 г/м²ч (*Ancistrocladus tectorius*) значениями *E_{max}*. Эти данные поддерживают представления С. Н. Шереметьева о том, что в гумидных местообитаниях сосуществуют виды с разной скоростью транспирации при слабом экологическом отборе, но при более конкурентных отношениях между видами [12].

Высокие значения водного дефицита были обнаружены у *Hibiscus sp.* и *Dalbergia sp.* Самые низкие значения водного дефицита были получены у *Phyllanthus sp.* и *Calamus sp.* Сильное варьирование показателя оводненности листьев в пределах одного типа леса на небольшой территории также согласуется с представлениями С. Н. Шереметьева о том, что в гумидных экотопах снижается сходство видов и увеличивается разнообразие [12].

Вопрос о связи дневных колебаний интенсивности транспирации с факторами среды активно изучается, но имеющиеся данные достаточно противоречивы. В ряде работ показана тесная связь скорости транспирации с температурой [6], [11] и другими факторами [9]. Однако имеются работы, в которых не отмечается связи между транспирацией и факторами среды [3], [4]. Высказывается мнение, что связь между дневным ходом транспирации и гидрометеорологическими параметрами обусловлена степенью увлажнения экотопа: при достаточном увлажнении эта связь есть, а при недостатке она нарушается [1], [7], [10]. Во влажный период в сезонно-влажном лесу растения произрастают в условиях высокой влажности воздуха и почвы. Однако даже в этих условиях выделяются три группы видов. Так, у *Ancistrocladus tectorius* и *Lagerstroemia calyculata* скорость транспирации зависит от всех изученных факторов среды. Однако у *Phyllanthus sp.* и *Calamus sp.* нет корреляции транспирации ни с одним из факторов среды. Эти виды имеют такие механизмы внутренней регуляции, которые, по-видимому, успешно работают и в условиях благоприятного увлажнения. У *Dalbergia sp.* и *Hibiscus sp.* отмечается зависимость транспирации только от освещенности, что может свидетельствовать о ведущей роли этого фактора в коррекции водного режима в условиях подлеска.

В литературе широко обсуждается вопрос о форме дневных колебаний транспирации. По мнению С. Н. Шереметьева, для растений гумидной зоны характерна одновершинная кривая с максимумом в околополуденное время, а для аридных условий наблюдаются многовершинные кривые [12]. В полученных нами данных имеются как одно-, так и двuverшинные кривые. Последние получены у *Calamus sp.* и *Dalbergia sp.* – двух видов, которые различаются между собой по другим показателям водного обмена. По гипотезе Г. Ш. Нахуцришвили [9], двuverшинность кривых суточного хода транспирации может свидетельствовать об активном регулировании водного режима указанными видами. Этот тезис хорошо согласуется с данными по *Calamus sp.* – виду, интенсивность транспирации которого не зависит от факторов среды.

Проведенное исследование показало, что типичные для подлеска виды, такие как *Ancistrocladus tectorius*, *Phyllanthus sp.*, хорошо адаптированы к условиям среды и занимают определенную экологическую нишу в подлеске. Они различаются по интенсивности водного режима: у *Phyllanthus sp.* сравнительно высокая интенсивность транспирации, отсутствует водный дефицит и максимальные значения насыщающего содержания воды, а у *Ancistrocladus tectorius* низкая скорость транспирации, отсутствует водный дефицит и средние значения насыщающего содержания воды. От этих видов отличаются два других вида подлеска, которые имеют двuverшинные кривые суточного ритма скорости транспирации. Динамика этого процесса слабо связана с факторами среды: у *Dalbergia sp.* сравнительно высокие значения транспирации, присутствует водный дефицит, средние значения насыщающего содержания воды, у *Calamus sp.* сравнительно высокие значения транспирации, не формируется водный дефицит, наиболее низкие значения насыщающего содержания воды. Эти параметры водного обмена свидетельствуют о менее благоприятных для этих двух видов условиях произрастания. Что касается *Hibiscus sp.*, то высокая скорость транспирации, хорошо синхронизированная с динамикой освещенности, способна компенсировать высокие значения водного дефицита, которые отмечаются у этого вида. Это может свидетельствовать о высокой конкурентоспособности вида в борьбе за освещенность, что соответствует и его положению в подлеске. Особого внимания заслуживает подпрост *Lagerstroemia calyculata* – растения, для которых характерны максимальные значения транспирации при отсутствии водного дефицита. Растения хорошо адаптированы к условиям произрастания, в том числе к световым, и не участвуют в конкуренции за свет. Высокий уровень зависимости от температуры и влажности воздуха подтверждает их высокий уровень адаптации.

Таким образом, в системе подлеска выявлены две группы видов. Одна группа (*Ancistrocladus tectorius*, *Phyllanthus sp.*, *Lagerstroemia calyculata*) хорошо адаптирована к этим условиям и занимает определенную экологическую нишу, что обеспечивает относительную стабильность

водного режима. Виды второй группы (*Dalbergia sp.*, *Hibiscus sp.*, *Calamus sp.*) не имеют стабильного водного режима в связи с их участием в конкурентных взаимоотношениях с другими видами этого растительного сообщества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеенко Л. Н. Водный режим луговых растений в связи с условиями среды. Л.: ЛГУ, 1976. 198 с.
2. Вальтер Г. Растительность земного шара: Пер. с нем. Т. 1: Тропические и субтропические зоны. М.: Прогресс, 1968. 550 с.
3. Витко К. Р. Экологическая характеристика гырнецовой дубравы в южной Молдавии: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Кишинев, 1963. 18 с.
4. Горшкова А. А. Эколого-морфологические особенности и водный режим степных растений Забайкалья: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Новосибирск, 1970. 57 с.
5. Иванов Л. А., Силина А. А., Цельникер Ю. Л. О методе быстрого взвешивания для определения транспирации в естественных условиях // Ботанический журнал. 1950. Т. 35. № 2. С. 171–185.
6. Иванов Л. А., Силина А. А., Цельникер Ю. Л. О транспирации ползающих полос в условиях Деркульской степи // Ботанический журнал. 1953. Т. 38. № 2. С. 167–184.
7. Копытова Л. Д. Запас воды в степных сообществах Забайкалья и ее расход на транспирацию: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Иркутск, 1974. 22 с.
8. Лархер В. Экология растений: Пер. с нем. М.: Мир, 1978. 384 с.
9. Нахуцришвили Г. Ш. Экология высокогорных травянистых растений и фитоценозов Центрального Кавказа: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Тбилиси, 1972. 52 с.
10. Савинкин А. П. Водный режим пустынных пастбищ и богарных посевов в подзоне бурых почв Казахстана: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Алма-Ата, 1962. 28 с.
11. Свешникова В. М. Водный режим растений и почв высокогорных пустынь Памира // Труды Института ботаники АН Таджикской ССР. Душанбе, 1962.
12. Шереметьев С. Н. Травы на градиенте влажности почвы (водный обмен и структурно-функциональная организация). М.: Товарищество научных изданий КМК, 2005. 271 с.
13. Blanc L., Maury-Lechon G., Pascal J.-P. Structure, floristic composition and natural regeneration in the forests of Cat Tien National Park, Vietnam: an analysis of the successional trends // Journal of biogeography. 2000. Vol. 27 (1). P. 141–157.
14. Ehleringer J. R., Field C. B. Scaling physiological processes: Leaf to Globe. San Diego: Academic Press, 1993. 388 p.
15. Herrera A., Tezara W., Marin O., Rengifo E. Stomatal and non-stomatal limitations of photosynthesis in trees of a tropical seasonally flooded forest // Physiologia Plantarum. 2008. Vol. 134 (1). P. 41–48.
16. Kozłowski T. T. Responses of woody plants to flooding and salinity // Tree Physiology Monograph. 1997. Vol. 1. P. 1–29.
17. Kreuzwieser J., Papadopoulou E., Rennenberg H. Interaction of flooding with carbon metabolism of forest trees // Plant Biology. 2004. Vol. 6 (3). P. 299–306.

ЛЮБОВЬ ВИКТОРОВНА КАНЦЕРОВА

аспирант лаборатории болотных экосистем Института биологии, Карельский научный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
kancerova.l@mail.ru

ОЛЕГ ЛЕОНИДОВИЧ КУЗНЕЦОВ

доктор биологических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией болотных экосистем Института биологии, Карельский научный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
kuznetsov@krc.karelia.ru

ДИНАМИКА РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПОДТОПЛЕННЫХ ПРИДОРОЖНЫХ УЧАСТКОВ ЮЖНОЙ КАРЕЛИИ

В статье приводятся результаты исследования динамики растительности подтопленных придорожных участков Южной Карелии. На основании обработки 200 геоботанических описаний выделены 10 ассоциаций. С помощью методов ординации прослежены динамические связи ассоциаций и основные факторы, определяющие их флористическое разнообразие, – богатство питания и степень увлажнения почвы.

Ключевые слова: растительность, придорожные участки, динамика, Карелия

Одним из динамических процессов растительности является трансформация и деградация сообществ вследствие влияния антропогенного фактора. В результате неправильно спроектированной системы дренажа автомобильной дороги или даже его полного отсутствия происходит изменение естественного стока, повышение уровня грунтовых вод, подтопление и переувлажнение придорожного участка. Это приводит к постепенному заболачиванию, преобразованию растительности и изменению биогеоценоза в целом. На нарушенных участках идет восстановительная динамика растительного покрова, представляющая собой серии сообществ. Ход восстановительных сукцессий отличается в зависимости от степени действия на сообщество. До настоящего времени специальных работ, касающихся изучения динамики растительного покрова подтопленных придорожных участков в Карелии, не проводилось.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования выполнялись маршрутным методом в течение полевых сезонов 2009–2010 годов на территории Южной Карелии вдоль автомобильных дорог в Прионежском, Кондопожском, Пряжинском и Пудожском районах (рис. 1). Были изучены 135 придорожных участков с разным режимом увлажнения, выполнены 200 геоботанических описаний на временных пробных площадях (в среднем 10×10 м). Сообщества, развивающиеся как на минеральных, так и на торфяных почвах, рассматривались на разных стадиях сукцессии. Большинство описаний выполнены уже в довольно сформировавшихся сообществах, возраст которых более 20–30 лет.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Всего в исследованных сообществах выявлен 171 вид сосудистых растений, относящихся к 105 родам, 46 семействам, а также 46 видов



Рис. 1. Карта района исследования: ▲ – подтопленные придорожные участки

Видовой состав ассоциаций придорожных участков Южной Карелии

№ ассоциации	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Количество описаний	26	39	52	27	13	13	11	10	6	3
Видовое богатство	85	102	143	113	61	70	60	55	63	30
Видовая насыщенность	12	16	16	15	13	16	15	14	18	14
Количество видов с III–V классами постоянства	6	8	9	11	7	12	14	8	13	9
<i>Betula pubescens</i>	I +	II +	II +	I +		IV 1	I +		I +	IV 1
<i>Salix cinerea</i>	II 1	III 2	II 3	II 4	I 1	IV 3	III 1	I +	I 2	II 1
<i>Salix myrsinifolia</i>	IV 3	II 1	III 4	III 3	II 1	IV 3	V 3	I +	II 2	V 3
<i>Salix phylicifolia</i>	III 3	II 1	III 3	III 1	III 2	II +	IV 2	II 1	III 1	V 25
<i>Salix pentandra</i>	II 1	II +	II 1	II +	II +	II +	I +	I +		V 10
5*. Carex rostrata	V 37	IV 14	III 5	III 2	II +	I 1	III 1	II 4	II 1	
<i>Sphagnum fallax</i>	I +	IV 30	I +							
8. Equisetum fluviatile	III 4	III 6	V 27	IV 3	IV 2	III +	IV 5	IV 2	II 1	II +
<i>Eriophorum angustifolium</i>	I +	II 1	I +				I +	I +		IV 2
9. Calamagrostis purpurea	II 1	II 1	I +	I +	II 1		III +	I +	II +	
<i>Carex canescens</i>	II 1	III 1	III 2	II +	I +	IV 1	II 1	II 2	IV 1	V 11
<i>Carex elongata</i>	I 1		II 2	I +	I +	V 13	II 2		III +	
<i>Filipendula ulmaria</i>	II +		II +	IV 5	IV +		III 2	I +	IV +	II +
<i>Phragmites australis</i>	I +	I +	I 1	I 1	V 45			II 1	I +	
<i>Ranunculus repens</i>		I +	I +	I +					III +	IV +
<i>Scirpus sylvaticus</i>	III 2	I +	II 2	V 37	IV 8		III 2	II +	I 2	
<i>Sphagnum squarrosum</i>	II 2	II 1	III 13	I 1		IV 4	I +		I +	
10. Calamagrostis neglecta	I +	I +	II +	I +	I +	III +	I +			II 1
<i>Carex vesicaria</i>	II 3	I 1	I 1	I 1		I 2			V 34	
<i>Comarum palustre</i>	V 7	II 2	III 5	III 3	IV 3	IV 2	V 31	I +	III 1	
<i>Galium palustre</i>	II +	I +	III +	III +	II +	IV +	IV +	I +	V +	II +
<i>Juncus filiformis</i>	II +	II 1	I +	II +	I +	IV 1		II +	III +	
<i>Thyselium palustre</i>	I +		II +	II +	III +		III +	I +	I +	
<i>Sphagnum riparium</i>	I 1	IV 32	I 1	I +		I +				
11. Epilobium palustre	II +	II +	III +	III +	II +	I +	V +	III +	II +	
12. Carex brunescens	I +	I +	I +	I +		II 1	I +	I +	III +	IV 1
<i>Deschampsia cespitosa</i>	I +	I +	II +	III +	II +		III +	III +	I +	
12a. Calamagrostis epigeios	I +	I +	I +	I +	II 1		I 2		III +	
<i>Juncus conglomeratus</i>	I +	I +	I +	II +	II +		I +	IV +		II 1
13. Alisma plantago-aquatica	I +	I +	II +	II +	I +			III 2	III +	
<i>Typha latifolia</i>	II 2	II 1	II 3	III 3	II 2		III 2	V 45		

Примечание. Ассоциации: 1 – *Carex rostrata* – *Comarum palustre*; 2 – *C. rostrata* – *Sphagnum fallax*; 3 – *Equisetum fluviatile*; 4 – *Scirpus sylvaticus*; 5 – *Phragmites australis* – *Equisetum fluviatile*; 6 – *Carex elongata*; 7 – *Comarum palustre*; 8 – *Typha latifolia*; 9 – *Carex vesicaria* – *Carex canescens*; 10 – *Salix phylicifolia* – *Carex canescens*.

* – Номера ЭЦГ.

листочекных мхов и 5 видов печеночников. Формирование растительного покрова влажных нарушенных местообитаний происходит в основном за счет активного расселения аборигенных видов растений.

Во всей совокупности описаний придорожных участков были выделены 10 ассоциаций, 9

из которых являются травяными, 1 – кустарниково-травяная. Некоторые ассоциации разбиты на более мелкие внутриаассоциационные единицы (субассоциации). Большинство из них описаны также и на других типах трансформированных местообитаний Карелии [2]. Ассоциации выделены и названы по доминирующим и содо-

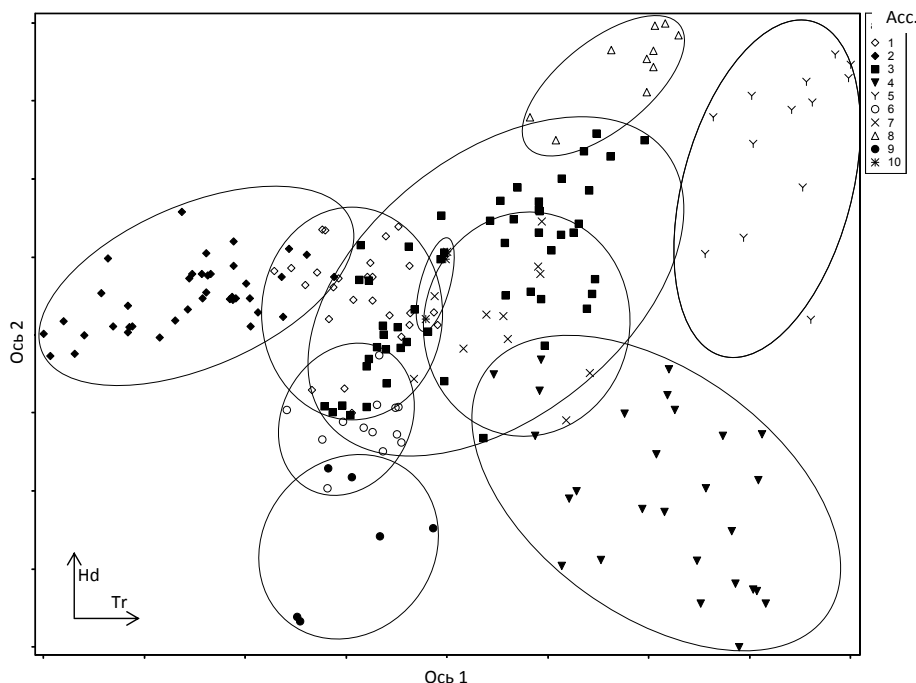


Рис. 2. Ординационная диаграмма описаний придорожных местообитаний (линиями обведены ассоциации, номер и названия которых приведены в примечании к таблице)

минирующим видам и представленности эколого-ценотических групп видов (ЭЦГ) [3]. Группы были несколько изменены и дополнены в целях адаптации к изучаемому объекту (см. таблицу).

Для определения положения описанных сообществ в экологическом пространстве, а также статуса выделенных синтаксонов использован бестрендовый анализ соответствия (DCA) [4]. Ординационная диаграмма (рис. 2) демонстрирует достаточно хорошую распределенность синтаксонов и возможность интерпретации результатов в классификации сообществ. Ось 1, по-видимому, соответствует экологическому фактору «трофность почвы» (нагрузка по Сьерсену – 21 %), а ось 2 – фактору «влажность почвы» (нагрузка по Сьерсену – 8 %). Невысокая суммарная нагрузка на две оси является отражением факта, что сообщества ассоциаций в совокупности образуют незначительный градиент вдоль данных экологических факторов.

На рисунке ось ординат отражает увеличение фактора трофности, ось абсцисс – увеличение влажности. Описания сообществ придорожных участков распределились практически по всей ординационной диаграмме, при этом ареалы синтаксонов почти не перекрываются. Сгущение в центральной части объясняется большой долей описаний осоково-сабельниковых (ассоциация 1) и хвощовых (ассоциация 3) сообществ в общем массиве. Это указывает на существование континуума растительности придорожных местообитаний.

Общей тенденцией изменений растительности под влиянием чрезмерного увлажнения и подтопления придорожных участков, образованных в результате неправильной прокладки дороги, является увеличение их площадей. Такие изменения происходят в одном направлении. Характер их происхождения находится в прямой зависимости от уровня воды после подтопления, амплитуды ее колебания и степени минерализации. Наиболее резкие смены растительных сообществ отмечены в местах с длительным затоплением. В первые 2–3 года на месте гелофитной растительности, не способной переносить новые условия местопроизрастаний, формируются временные сообщества, которые через 5–20 лет сменяются ценозами, образованными видами крупных гигрофитов [1]. Это пионерные сообщества ассоциаций *Equisetum fluviatile*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis* – *Equisetum fluviatile* (см. таблицу). Последующие сукцессии идут в направлении формирования болотной растительности.

Для сообществ ассоциации *Typha latifolia* характерен довольно густой ярус рогоза. Он произрастает на богатых минеральных почвах широкими полосами до 5 м вдоль придорожных участков либо целиком занимает весь участок. В данных сообществах обилие других видов ничтожно мало. При снижении трофности и сохранении того же увлажнения появляются *Equisetum fluviatile* или *Comarum palustre*, которые постепенно вытесняют *Typha latifolia* и образуют уже новые сообщества с хвощом либо с сабель-

ником. Рогоз широколистный встречается в них либо единично, либо совсем отсутствует.

Сукцессии сообществ ассоциаций *Phragmites australis* и *Scirpus sylvaticus* проходят по тому же типу, что и для ассоциации *Typha latifolia*, но в данных сообществах *Equisetum fluviatile*, *Comarum palustre* и *Carex rostrata* уже изначально встречаются довольно часто, хотя их обилие еще мало. В составе сообществ, образованных *Phragmites australis*, хвощ отмечен в качестве содоминанта, поэтому выделенная ассоциация названа *Phragmites australis* – *Equisetum fluviatile*.

Сообщества с доминированием *Equisetum fluviatile* рассматриваются как одни из основных и пионерных ценозов придорожных участков. На первых порах это почти чистые густые заросли хвоща, позже в них появляются *Comarum palustre*, *Carex rostrata*. В другие сообщества *Equisetum fluviatile* внедряются мхи, однако большое проективное покрытие отмечено только для *Sphagnum squarrosum* (выделена отдельная субассоциация *Equisetum fluviatile* – *Sphagnum squarrosum*); также появляются отдельные дернинки *Sph. angustifolium*, *Sph. fallax*, *Sph. riparium*. Широкое распространение сабельника, осоки вздутой и сфагновых мхов свидетельствует о прогрессирующем процессе заболачивания. На ординационной диаграмме ассоциация

Equisetum fluviatile занимает центральное положение, что свидетельствует о ее динамических связях со всеми сообществами других ассоциаций: осоковыми, осоково-сфагновыми, сабельниковыми, камышовыми, рогозовыми и ивово-осоковыми.

Динамика сабельниковых сообществ (ассоциация 7) при уменьшении трофности и увлажнения идет в одном направлении. Сначала образуются осоково-сабельниковые сообщества (с *C. rostrata*), а затем и типичные болотные мезоолиготрофные осоково-сфагновые сообщества со *Sphagnum fallax*, *Sph. riparium*. Такие местообитания являются оптимальными для этих видов мхов.

На основе обобщенной характеристики сообществ и состава ЭЦГ можно сделать вывод, что наиболее распространенными и флористически богатыми на подтопленных придорожных участках являются хвощовые мезоевтрофные и мезотрофные сообщества на минеральных грунтах, а также осоково-сфагновые сообщества (ассоциация *C. rostrata* – *Sphagnum fallax*) на торфяных почвах.

Более детально динамика таких сообществ может быть восстановлена при анализе стратиграфии торфяных отложений, что будет сделано в дальнейшем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубынина Д. В. Антропогенная динамика высшей водной растительности Украины // Гидробиотаника. Ярославль: Принт Хауз, 2010. С. 9–13.
2. Канцера Л. В. Классификация растительности трансформированных влажных местообитаний Карелии // Развитие геоботаники: история и современность. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2011. С. 50–51.
3. Кузнецов О. Л. Тополого-экологическая классификация растительности болот Карелии (омбротрофные и олиготрофные сообщества) // Труды КарНЦ РАН. Вып. 8. Биоразнообразие, динамика и ресурсы болотных экосистем восточной Финляндии. Петрозаводск: Изд-во КНЦ РАН, 2005. С. 15–46.
4. Hill M. O., Gauch N. G. Detrended correspondence analysis: an improved ordination technique // Vegetatio. 1980. Vol. 42. P. 47–58.

АННА АЛЕКСЕЕВНА СУЩУК

кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории паразитологии животных и растений Института биологии, Карельский научный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
anna_sushchuk@mail.ru

ЛЮДМИЛА ИВАНОВНА ГРУЗДЕВА

кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории паразитологии животных и растений Института биологии, Карельский научный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
gruzdeva@krc.karelia.ru

СООБЩЕСТВА ПОЧВЕННЫХ НЕМАТОД В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ СРЕДЫ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

Изучена фауна и структура сообществ почвенных нематод городской зоны с высоким уровнем загрязнения тяжелыми металлами. В условиях загрязнения отмечены высокие значения плотности популяций нематод, возрастание численности паразитических видов, снижение разнообразия фауны и индекса зрелости сообществ нематод. Показана возможность использования нематод в качестве индикаторов состояния нарушенных почвенных экосистем.

Ключевые слова: почвенные нематоды, загрязнение почвы, тяжелые металлы, биоиндикация, структура сообществ нематод

Среди множества экологических проблем, возникающих в связи с возрастающим антропогенным прессом на биосферу, проблема охраны почв должна рассматриваться в первую очередь [1], [5]. В городах интенсивное загрязнение почвы металлами наблюдается вблизи промышленных зон, на территории бывших и действующих свалок. Тяжелые металлы (ТМ) вовлекаются в биологический круговорот, передаются по трофическим цепям и вызывают целый ряд негативных последствий для растений, животных и человека [4], [9], [10]. Изучение экологического состояния трансформированного почвенного покрова городов является важной практической задачей с точки зрения мониторинга и определения путей оздоровления экологической обстановки урбанизированных территорий.

Для оценки состояния почвы и мониторинга любых антропогенных изменений необходимо выявление видов-индикаторов состояния среды [5]. Нематоды заслуживают внимания в качестве удобного биологического теста различных нарушений среды, в том числе загрязнения почвы тяжелыми металлами [3], [12], [14], [15]. Преимущество использования нематод в качестве биоиндикаторов – повсеместность распространения, высокая выносливость и наличие большого количества видов с разнообразными типами питания. Нематоды могут быть отобраны в почве любого региона независимо от времени года. При этом не требуется больших по объему образцов и не происходит нарушения исследуемого биотопа [3]. Под воздействием поллютантов изменяется структура сообществ нематод, что отражают разработанные экологические индексы [11], [13], [16].

Цель настоящей работы – изучить фауну и структуру сообществ нематод почвы с высоким уровнем загрязнения тяжелыми металлами в зоне влияния промышленного предприятия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В течение 4 лет исследованы фауна и структура сообществ почвенных нематод территорий, прилегающих к Онежскому тракторному заводу. Пробы почвы отобраны по генетическим горизонтам (органогенный 0–5 см и минеральный 5–10 см) на различном расстоянии от завода: 50 и 500 м. Точки отбора проб выбраны на основании имеющихся данных по содержанию тяжелых металлов в почве [8], [9].

Нематод выделяли вороночным методом Бермана из навесок почвы в 30 г в 3-кратной повторности, экспозиция выделения – 48 часов. Фиксатор – ТАФ (триэтаноламин : формалин : вода, в соотношении 2 : 7 : 91). Численность нематод рассчитывали на 100 г сырой почвы. Идентификацию нематод до рода (для половозрелых особей – до вида) проводили на временных глицериновых препаратах. Устанавливали систематическую принадлежность 100 особей из пробы. Каждый таксон нематод относили к одной из шести эколого-трофических групп: бактериотрофы (Б), микотрофы (М), политрофы (П), хищники (Х), нематоды-фитотрофы – паразиты растений (Пр) и ассоциирующие с растением (Аср) [17]. Для оценки состояния сообществ нематод использованы следующие параметры: плотность популяций нематод (кол-во экз. / 100 г почвы), таксономическое разнообразие фауны, эколого-трофическая структура. Применены индексы: биоразнообразия Шеннона H' , доминирования Симпсона C [6], зрелости сообществ нематод ΣMI , основанный на экологических характеристиках таксонов [11], структурирования SI и обогащения пищевой сети EI [13].

Каждый таксон имеет значение от 1 до 5 по с-р шкале Бонгера [11]. Роды нематод с короткими жизненными циклами, большой способ-

ностью к колонизации, высокой устойчивостью к токсикантам (г-стратегии в широком смысле) имеют значения 1, 2 по шкале с–р. Нематоды с низкой репродуктивной способностью, повышенной чувствительностью к условиям среды, сокращающие численность при стрессовых ситуациях (К-стратегии в широком смысле), имеют значения 4, 5. Индексы, характеризующие пищевую сеть, рассчитаны на основании формул, предложенных Феррисом с соавторами [13].

Индекс обогащения пищевой сети (Enrichment index, EI) основан на чувствительности групп-оппортунистов к возрастанию доступности пищевого ресурса, характеризует обогащение почвы органикой или уровень плодородия. При его определении учитываются бактериотрофы, имеющие значение 1, и микотрофы со значением 2 по с–р шкале Бонгера, то есть группы, связанные в своей трофике с активностью первичных потребителей детрита. Индекс структурирования пищевой сети (Structure index, SI) отражает сложность и стабильность пищевой сети, которая определяется функциональными группами с высокими значениями (3–5) по с–р шкале (B_{3-5} , M_{3-5} , P_{4-5} , X_{3-5}).

Все таксоны нематод были распределены в функциональные группы на основе типа трофики и положения по с–р шкале.

Условия почвенной пищевой сети могут быть изображены в двумерном пространстве, в котором значения индексов SI и EI откладываются по осям абсцисс и ординат соответственно. Полученный фаунистический профиль состоит из 4 квадратов, характеризующих нарушенные (квадрат А), зрелые (В), деградированные (D) и структурированные (С) условия почвенной пищевой сети и данной почвенной экосистемы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Зона с высоким уровнем загрязнения почвы тяжёлыми металлами (50 м от литейного цеха ОТЗ)

Анализ почвенных образцов, отобранных в 50 м от ОТЗ, выявил высокое содержание свинца, составляющее около 60 ПДК. Содержание цинка, кобальта и хрома также превышает фоновые концентрации по Карелии [8], [9].

В зоне максимального загрязнения отмечены высокие значения плотности популяций нематод в органогенном горизонте (до 35 733 экз. / 100 г почвы). В естественных биоценозах Карелии этот показатель составляет в среднем 2–3 тыс. экз./100 г в зависимости от типа почвы. Фауна нематод загрязненного биотопа характеризуется малым таксономическим разнообразием (22–30 родов – в органогенном горизонте, 21–25 – в минеральном) и низкими значениями индекса Шеннона H' (2,8–3,2). В луговых (фоновых) биоценозах окрестностей Петрозаводска биоразнообразие намного выше – обитают нематоды 45 родов [2].

Отмечена высокая степень доминирования отдельных таксонов в фауне (С до 0,47). В зоне, постоянно подвергающейся выбросам литейного цеха, обнаружена высокая численность нематод, связанных с живыми растениями. Это представители родов *Malenchus*, *Tylenchus*, *Paratylenchus*. Трофическая группа фитотрофов является доминирующей в структуре нематодного сообщества. Так, на их долю в минеральном горизонте приходится от 69 до 82 % от общего количества нематод (рис. 1).

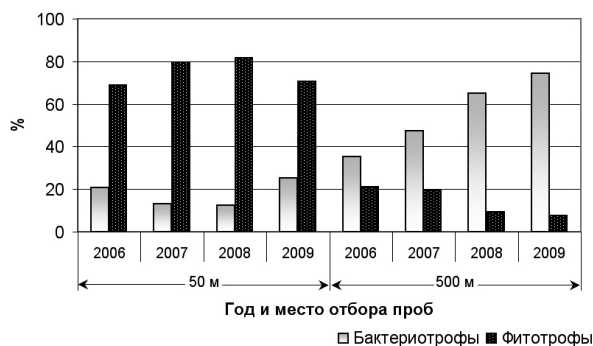


Рис. 1. Вклад трофических групп – бактериотрофов и фитотрофов – в сообщества нематод минерального горизонта почвы биотопов с разным уровнем загрязнения

По мнению ряда исследователей, увеличение численности облигатных паразитов растений связано с процессами деградации окружающей среды [15], [16]. Преобладание фитогельминтов специфического патогенного эффекта наблюдалось в почве, подверженной влиянию выбросов металлургического комплекса в Белоруссии [10]. Супердоминирование видов рода *Paratylenchus* выявлено в условиях луговых экосистем Польши, подвергающихся трансформации, и признается индикатором нарушенности почв [16]. В нашем исследовании обнаружено повышенное содержание паразитов растений при загрязнении почвы отходами литейного цеха, содержащими ТМ.

Высказывается предположение, что выживаемость нематод-тиленхид в антропогенно нарушенных условиях можно объяснить низкой проницаемостью их кутикулы [7]. Возможно, это связано с тем, что фактор загрязнения воздействует опосредованно, через растение. Паразиты растений зависимы от корней растений, поэтому нельзя ожидать быстрой их реакции на нарушение среды обитания. По другой гипотезе, увеличение численности паразитов растений обусловлено подавлением или полной элиминацией некоторых их антагонистов (симбиотических бактерий и грибов-микоризообразователей), или большей уязвимостью растений для нематод в условиях загрязнения почвы [16].

Для почв, загрязненных ТМ, характерны низкие показатели зрелости сообществ нематод, что связано с преобладанием в фауне нематод со значениями 1, 2 по с–р шкале Бонгера. В исследованном нами биоценозе средние значения

индекса $\Sigma MI = 2,3-2,4$ (рис. 2). В ненарушенных луговых биоценозах индекс $\Sigma MI = 2,8-3,0$.

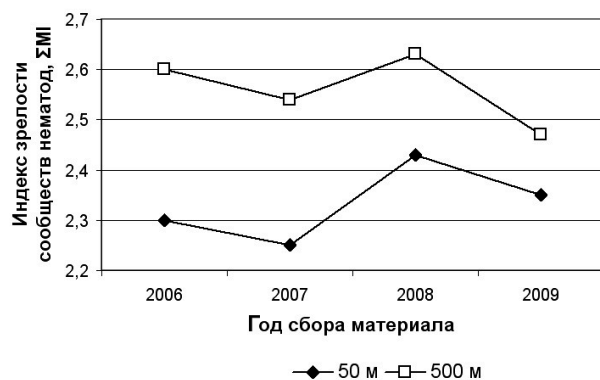


Рис. 2. Индекс зрелости сообществ нематод биотопов с разным уровнем загрязнения (средние значения для 2 горизонтов)

Зона с низким уровнем загрязнения почвы тяжелыми металлами (500 м от механического цеха ОТЗ)

В 500 м от завода концентрация свинца в почве значительно ниже – на уровне 1,5 ПДК, а дозы других ТМ – не выше ПДК [10]. Популяции нематод, обитающие в почве данного биоценоза, характеризуются мало изменяющимися на протяжении 4 лет наблюдений показателями плотности: 3100–3800 экз. / 100 г почвы, и только в 2008 году отмечено снижение до 1200 экз.

Фауна характеризуется высоким разнообразием (31–40 родов) нематод, населяющих оба горизонта. Значения индекса Шеннона остаются постоянно на высоком уровне ($H' = 4,4-4,7$).

Доминирующие таксоны относятся к различным трофическим группам. В 4 случаях из 8 это бактериотрофы (*Rhabditis*, *Acrobeloides*, *Plectus*), в 2 – нематоды-фитотрофы (*Filenchus*, *Tylenchorynchus*). Микотроф *Aphelenchoides* и хищник *Clarcus* преобладали в одном случае из 8. При этом вклад любого рода-доминанта в фауну не превышал 22 %. Снижение степени доминирования таксонов подтверждает индекс Симпсона ($C = 0,04-0,08$), который достоверно ниже такового (0,11–0,47) в загрязненной зоне ($P < 0,05$).

На расстоянии 500 м от источника загрязнения в почве обнаружены личинки нового для Карелии вида из рода *Longidorus*, имеющего, по литературным данным, северную границу распространения по широте Вологды (широта 59°13' N, долгота 39°54' E). Виды этого рода представляют большой интерес, так как являются специфично патогенными, эктопаразитическими вредителями корней растений. Кроме того, они способны к инокуляции вирусных инфекций. Обнаружение лонгидорид, вероятнее всего, связано с озеленением территории, прилегающей к заводу, где был разбит сквер и высажены декоративные растения-интродуценты.

Индекс зрелости нематодного сообщества остается на высоком уровне в течение 4 лет, варьируя в среднем от 2,5 до 2,6 (рис. 2).

В структуре сообществ нематод представлены все 6 эколого-трофических групп. Бактериотрофы доминируют в обоих горизонтах почвы на протяжении всего срока наблюдения, составляя от 35 до 74 % общей численности нематод (рис. 1). Они активно участвуют в процессах разложения органического вещества наряду с микотрофами и почвенной микрофлорой. Микотрофы составляют вторую по численности трофическую группу (14,6–27,1 % фауны) в 6 случаях из 8 и занимают третью позицию в ряду доминирования (8,6–18,9 %) в остальных случаях. Подобная трофическая структура фауны характерна для ненарушенных луговых биотопов Карелии [2].

Таким образом, для сообществ почвенных нематод, достаточно удаленных от источника загрязнения, характерны стабильные показатели плотности популяций и зрелости сообщества, высокое разнообразие фауны, полночленная эколого-трофическая структура.

Использование экологических индексов для оценки состояния почвенной экосистемы

Для оценки состояния почвенной трофической сети и данной почвенной экосистемы использованы индексы, предложенные Феррисом с соавторами [13] и основанные на анализе фауны нематод. Положение сообщества нематод в фаунистическом профиле указывает на степень нарушенности почвенной экосистемы.

Расчет экологических индексов для максимально загрязненной почвенной экосистемы выявил низкие значения индекса структурирования SI в течение 4 лет. Индекс обогащения пищевой сети EI возрастает в последние два года наблюдений. На основе этих показателей в 2006–2007 годах почвенная трофическая сеть оказывается в *квадрате D* фаунистического профиля и рассматривается как деградированная, а почвенная экосистема в целом находится в условиях стресса. В 2008–2009 годах в связи с повышением значений индекса EI почвенная трофическая сеть перемещается в *квадрат A*, который характеризуется обогащением почвенной экосистемы органикой, но система оценивается как высоко нарушенная (рис. 3).

В зоне с низким уровнем загрязнения в течение 4 лет сохраняются высокие значения индекса SI. Индекс EI не превышает 50 % в 2006–2008 годах. Вследствие этого почвенная трофическая сеть располагается в *квадрате C* фаунистического профиля и считается структурированной, а почвенная экосистема – ненарушенной. В 2009 году, в связи с увеличением доступности пищевых ресурсов ($EI = 75,5 \%$) трофическая сеть помещается в *квадрат B* фаунистического профиля и оценивается как зрелая, степень нарушенности почвенной экосистемы низкая (рис. 3).

Таким образом, экологические индексы, характеризующие трофические сети почв, инфор-

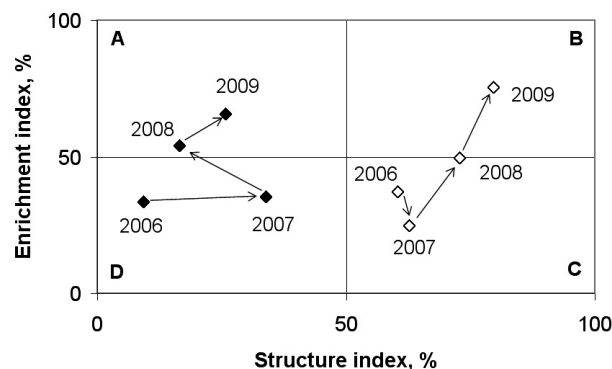


Рис. 3. Фаунистический профиль, характеризующий почвенную пищевую сеть трансформированного биоценоза (■ — в 50 м от источника загрязнения, □ — в 500 м от источника загрязнения)

мативны и могут быть использованы для оценки состояния нарушенных почвенных экосистем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Почвенные нематоды являются организмами, чувствительными к загрязнению среды тяжелыми металлами. В условиях загрязнения отмечены аномально высокие значения плотности популяций нематод. Повышение содержания тяжелых металлов в почве приводит к снижению индекса зрелости сообществ нематод ($P < 0,05$), индекса разнообразия фауны ($P < 0,05$), возрастанию степени доминирования таксонов ($P < 0,05$).

Повышенное содержание ТМ в почве вызывает структурные перестройки в сообществе

нематод, проявляющиеся в возрастании численности популяций паразитических видов. Механизм данного явления пока недостаточно ясен и требует дальнейших исследований. Высказываются некоторые предположения, касающиеся проницаемости кутикулы нематод-фитотрофов, их трофической зависимости от корней растений (опосредованное воздействие ТМ), повышения уязвимости растений к паразитам в условиях загрязнения среды [7], [14]. С уменьшением концентрации тяжелых металлов в среде наблюдается стабилизация сообщества: увеличивается видовое и эколого-трофическое разнообразие фауны, возрастает индекс зрелости сообществ нематод. Проведенное нами многолетнее исследование подтверждает возможность использования почвообитающих нематод в качестве биоиндикаторов загрязнения почвы тяжелыми металлами. Показателями, характеризующими нарушение почвенной экосистемы, являются: плотность популяций нематод, численность нематод-фитотрофов, индекс зрелости сообществ нематод, таксономическое разнообразие фауны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований ОБН РАН «Биологические ресурсы России: оценка состояния и фундаментальные основы мониторинга» № 01200955238, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» № П 1299 и 02.740.11.0700.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гиляров М. С. Зоологический метод диагностики почв. М.: Наука, 1965. 278 с.
2. Груздева Л. И. Фауна почвообитающих нематод в естественных и трансформированных биоценозах Карелии // Эколого-паразитологические исследования животных и растений Европейского Севера. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2001. С. 64–68.
3. Груздева Л. И., Матвеева Е. М., Коваленко Т. Е. Влияние солей тяжелых металлов на сообщества почвообитающих нематод // Почвоведение. 2003. № 5. С. 596–606.
4. Евдокимова Г. А., Кислых Е. Е., Мозгова Н. П. Биологическая активность почв в условиях аэротехногенного загрязнения на Крайнем Севере. Л.: Наука, 1984. 120 с.
5. Кривошук Д. А. Почвенная фауна в экологическом контроле. М.: Наука, 1994. 272 с.
6. Одум Ю. Экология: Пер. с англ. Т. 2. М.: Мир, 1986.
7. Парамонов А. А. Основы фитогельминтологии. Т. 1. М.: Наука, 1962. 480 с.
8. Сушук А. А., Груздева Л. И., Иешко Е. П. Воздействие тяжелых металлов на фитопаразитических нематод // Труды Карельского научного центра РАН. Биогеография. Современные проблемы паразитологии. Вып. 13. Петрозаводск, 2008. С. 84–88.
9. Федорец Н. Г., Медведева М. В. Эколого-микробиологическая оценка состояния почв города Петрозаводска. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2005. 96 с.
10. Хотько Э. И., Ветрова С. Н., Матвеев А. А., Чумаков Л. С. Почвенные беспозвоночные и промышленное загрязнение. Минск: Наука и техника, 1982. 264 с.
11. Bongers T. The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition // Oecologia. 1990. Vol. 83. P. 14–19.
12. Bongers T., Ilieva-Maculec K., Ekschmitt K. Acute sensitivity of nematode taxa to CuSO_4 and relationships with feeding-type and life-history classification // Environmental Toxicology and Chemistry. 2001. Vol. 20. № 7. P. 1511–1516.
13. Ferris H., Bongers T., de Goede R. G. M. A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept // Applied Soil Ecology. 2001. Vol. 18. P. 13–29.
14. Georgieva S. S., McGrath S. P., Hooper D. J., Chambers B. S. Nematode communities under stress: the long-term effects of heavy metals in soil treated with sewage sludge // Applied Soil Ecology. 2002. Vol. 20. P. 27–42.
15. Pen-Mouratov S., Shukurov N., Steinberger Y. Influence of industrial heavy metal pollution on soil free-living nematode population // Environmental Pollution. 2008. Vol. 152. P. 172–183.
16. Wasilewska L. Soil invertebrates as bioindicators, with special reference to soil-inhabiting nematodes // Russian Journal of Nematology. 1997. Vol. 5. № 2. P. 113–126.
17. Yeates G. W., Bongers T., de Goede R. G. M., Freckman D. W. & Georgieva S. S. Feeding habits in soil nematode families and genera: An outline for soil ecologists // J. of Nematology. 1993. Vol. 25. № 3. P. 315–331.

УДК 582.232, 582.32, 582.29, 579.26 (470.21)

ДЕНИС АЛЕКСАНДРОВИЧ ДАВЫДОВ

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории флоры и растительных ресурсов Полярно-альпийского ботанического сада-института, Кольский научный центр РАН (Апатиты, Мурманская область, Российская Федерация)

d_disa@mail.ru

АЛЕКСЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ МЕЛЕХИН

кандидат биологических наук, инженер лаборатории флоры и растительных ресурсов Полярно-альпийского ботанического сада-института, Кольский научный центр РАН (Апатиты, Мурманская область, Российская Федерация)

melichen@yandex.ru

ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ БОРОВИЧЕВ

инженер лаборатории флоры и растительных ресурсов Полярно-альпийского ботанического сада-института, Кольский научный центр РАН, и. о. младшего научного сотрудника лаборатории наземных экосистем Института проблем промышленной экологии Севера, Кольский научный центр РАН (Апатиты, Мурманская область, Российская Федерация)

borovichyok@mail.ru

ЦИАНОПРОКАРИОТЫ, ЛИШАЙНИКИ И ПЕЧЕНОЧНИКИ АЙНОВЫХ ОСТРОВОВ (КАНДАЛАКШСКИЙ ЗАПОВЕДНИК, МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

На основании собственных и литературных данных во флоре Айновых островов выявлено 12 таксонов цианопрокариот, 14 видов печеночников, 100 видов лишайников. Семь видов лишайников (*Absconditella lignicola* Vezda et Pisut, *Lecidea lapicida* (Ach.) Ach., *Lichenomphalia umbellifera* (L.) Fr. Redhead et al., *Porpidia glaucophaea* (Korb.) Hertel et Knoph, *Rhizocarpon leptolepis* Anzi, *R. polycarpum* (Hepp) Th. Fr., *Verrucaria striatula* Wahlenb.), один вид печеночников (*Lophozia savicziae* Schljakov) и 6 видов цианопрокариот впервые приводятся для Кандалакшского государственного природного заповедника. Лишайник *Absconditella lignicola* – новый вид для Мурманской области. Уровень видового разнообразия изученных групп, с одной стороны, определяется небольшими размерами территории, низким разнообразием экотопов, высокой конкуренцией с высшими сосудистыми растениями, с другой – является следствием негативного орнитогенного влияния.

Ключевые слова: Мурманская область, Кандалакшский заповедник, цианопрокариоты, лишайники, печеночники, биоразнообразие

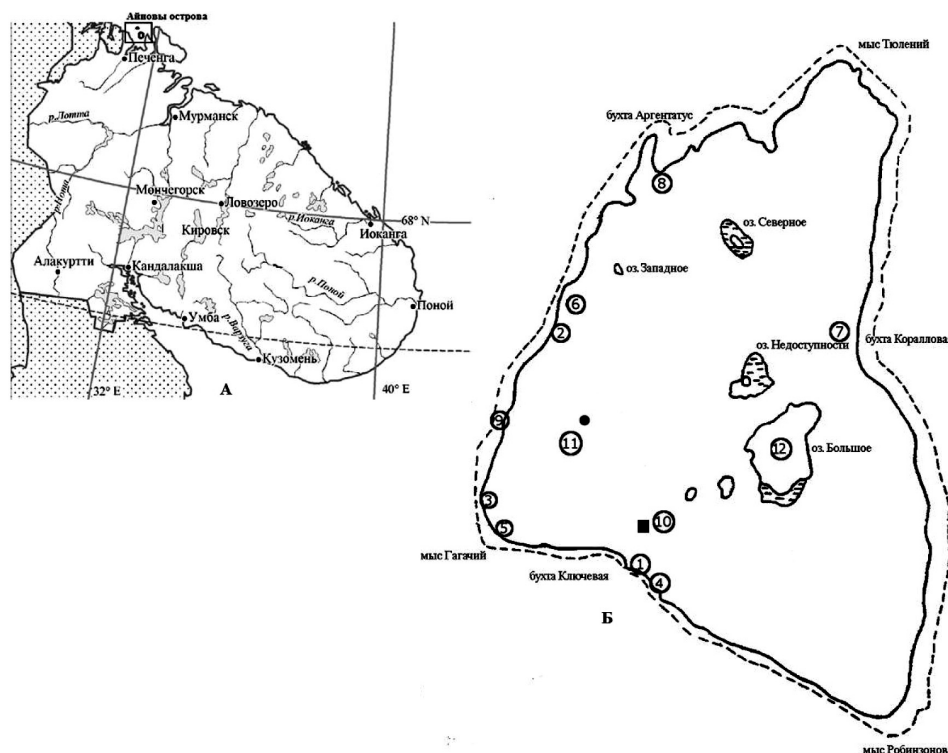
Айновы острова расположены в Баренцевом море в Варангер-фьорде в 5 км к северо-западу от полуострова Средний (см. рисунок) и включают два острова: Большой Айнов (Б. Айнов) – 220 га и Малый Айнов (М. Айнов) – 60 га. Острова являются частью Кандалакшского государственного природного заповедника. Несмотря на то что флора заповедника изучалась длительное время, основное внимание уделялось островам Кандалакшского залива Белого моря [4]. Данные о цианопрокариотах, микролишайниках и печеночниках баренцевоморской части заповедника либо отсутствуют, либо отличаются явной неполнотой. Настоящая статья, посвященная обзору разнообразия цианопрокариот, лишайников и печеночников Айновых островов, частично восполняет этот пробел.

Первые сведения о лишайниках Айновых островов приводятся в работе V. Räsänen [11], содержащей данные о 34 видах. Список видов вырос до 71 после исследований Т. А. Дудоревой [3]. Флора печеночников до наших работ включала 2 вида [5], флора цианопрокариот – один вид [6].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рельеф Айновых островов равнинный, максимальное поднятие – 21 м над уровнем моря. Берега пологие, слабо изрезанные, каменистые или скалистые. В некоторых частях побережья наблюдаются ступенчатые террасы. В центре М. Айнова имеется западина, занятая озером. Через центральную часть Б. Айнова проходит холмистая гряда, полого снижающаяся к северу; в юго-восточной части острова – обширное заболоченное понижение с рядом мелких озер. По геологическому строению Айновы острова близки к полуострову Рыбачий [7]. На островах преобладают торфянистые почвы.

Исследованная территория расположена в Кольской подпровинции южных субарктических тундр [1]. Растительность Айновых островов сформировалась под воздействием мягкого морского климата, орнитофауны [5] и существенного антропогенного влияния: на островах проводились покосы, постройка хозяйственных сооружений и жилья, военных объектов.



А – положение Айновых островов на карте Мурманской области; Б – карта-схема о. Большой Айнов (по [3] с изменениями).

М 1:10000, квадратом обозначен кордон, кружком – маяк. Точки сбора образцов: 1 – 69°50'2" с. ш., 031°33'52" в. д., 2 м над уровнем моря; 2 – 69°50'17" с. ш., 031°33'11" в. д., 1 м над уровнем моря; 3 – 69°50'9" с. ш., 031°33'4" в. д., 1 м над уровнем моря; 4 – 69°49'57" с. ш., 031°34'5" в. д., 2 м над уровнем моря; 5 – 69°50'3" с. ш., 031°33'17" в. д., 1 м над уровнем моря; 6 – 69°50'20" с. ш., 031°33'12" в. д., 2 м над уровнем моря; 7 – 69°50'23" с. ш., 031°33'19" в. д., 4 м над уровнем моря; 8 – 69°50'35" с. ш., 031°33'35" в. д., 2 м над уровнем моря; 9 – 69°50'12" с. ш., 031°33'5" в. д., 2 м над уровнем моря

В основу статьи положены сборы цианопрокариот, лишайников и печеночников, проведенные в период с 16 по 25 июня 2010 года маршрутным методом. Большая часть времени была посвящена работам на о. Б. Айнов, сборы на о. М. Айнов осуществлялись только 16 июня в течение нескольких часов. Сходство условий и экотопов двух островов, а также их близкое расположение позволяют обоснованно допустить, что видовой состав печеночников, лишайников и цианопрокариот на них мало отличается. Сборы проводились во всех представленных экотопах: на литорали, в растительных сообществах, на немногочисленных скальных обнажениях, в ручьях и водоемах. Было собрано 96 образцов цианопрокариот, 112 образцов лишайников, 35 образцов печеночников. В списках приняты следующие сокращения: о. Большой Айнов – Б; о. Малый Айнов – М; для единичных находок указаны номера точек сбора (см. рисунок). Сборы образцов печеночников проведены А. В. Мелехиным и О. А. Белкиной. Определение проводилось в лаборатории Полярно-альпийского ботанического сада-института (ПАБСИ) стандартными методами. Все образцы хранятся в гербарии ПАБСИ (КРАВГ).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Цианопрокариоты

Аннотированный список цианопрокариот построен в алфавитном порядке, названия таксонов даны по J. Komárek, K. Anagnostidis [8], [9]. Новые виды для Кандалакшского заповедника отмечены знаком *.

**Ammatoidea aegea* Anagn. et Pant. – Б: 1 – супралитораль в 10 м от уреза воды, лужа (1,5 м x 1,2 м) на скалистом берегу, на дне лужи под водой.

Calothrix parietina (Näg.) Thur. – Б: 1 – супралитораль в 10 м от уреза воды, лужа (1,5 м x 1,2 м) на скалистом берегу, на дне лужи под водой; 2 – супралитораль, пересохшая лужа на скале, на дне на камне; 3 – супралитораль, 10 м от уреза воды в литоральной ванне, в воде.

Gloeocapsopsis crepidinum (Thur.) Geitl. ex Komárek – Б: 3 – супралитораль, 10 м от уреза воды в литоральной ванне, в воде.

**Leptolyngbya cf. angustissima* (W. West et G. S. West) Anagn. et Komárek – Б: 2 – супралитораль, пересохшая лужа на скале, на дне на камне.

**L. foveolarum* (Mont. ex Gom.) Anagn. et Komárek – Б: 1 – супралитораль, на скалистом

берегу, небольшая лужа, на горизонтальной поверхности камня; **2** – супралитораль, скалистый берег в 30 м от уреза воды, лужа с опресненной водой, 1–3 см под водой; **3** – супралитораль, 10 м от уреза воды в литоральной ванне, в воде; **4** – граница супралитораля, лужа на каменистом субстрате, 2 м в диаметре, красно-оранжевые обрастания на дне, всплывающие на поверхность; **5** – супралитораль, в 10 м от уреза воды, литоральная ванна на скалах, в воде; **6** – лужа в 30 м от уреза воды, эндоциты на камнях.

***L. tenuis* (Gom.) Anagn. et Kom.** – Б: небольшое озеро. Указывается С. Cedercreutz по сборам Н. Jarnefelt [6].

***Nostoc microscopium* Carm. ex Born. et Flah.** – М: 69°49'12" с. ш., 031°38'2" в. д., 25 м над уровнем моря, скалы в 50 м от берега моря, южная экспозиция, скала 2 м высотой, силикатный камень, на хорошо освещенном участке вертикальной скалы; Б: **7** – 30 м от побережья, на горизонтальной поверхности плавника, зарастающего мхами и злаками.

***N. punctiforme* (Kütz.) Hariot** – Б: **9** – орнито-генная пропитанная водой злаково-звездчато-моховая лужайка, обрамленная скальными выходами 30 см высотой. На *Warnstorfia fluitans* (Hedw.) Loeske (Белкина, 74/4-10).

***Nostoc* sp.** – Б: **1** – супралитораль, зеленые обрастания в литоральной ванне.

***Phormidium autumnale* (C. Ag.) Gom.** – М: 69°49'12" с. ш., 031°38'2" в. д., 25 м над уровнем моря, скалы в 50 м от берега моря, южная экспозиция, скала 2 м высотой, в пещере с нависающими слоистыми скальными выходами – 3 м вглубь, на лежащих мокрых, покрытых мхами, зелеными водорослями и подгнивших досках, черные обрастания; там же на вертикальной поверхности скалы в углублении в 50 см от поверхности, среди зеленых водорослей; там же на хорошо освещенном участке вертикальной скалы; 69°49'25" с. ш., 031°37'32" в. д., 10 м над уровнем моря, каменистые голые пологие выходы на берегу моря в 20 м от уреза воды в луже на голом силикатном камне, коричневые обрастания; Б: **2** – супралитораль, скалистый берег в 30 м от уреза воды, лужа с опресненной водой, 1–3 см под водой; **3** – супралитораль, 10 м от уреза воды в литоральной ванне, в воде; **7** – скала в 30 м от берега моря высотой 1,5 м, на вертикальной поверхности у основания скалы западной экспозиции. В 10 см от земли, темно-коричневые пленки на камне; **8** – супралитораль в 10 м от уреза воды, на скалистом берегу в высохшей опресненной луже, на песчаном дне.

***Pseudanabaena* cf. *minima* (G.S. An) Anagn.** – Б: **1** – супралитораль в 10 м от уреза воды, лужа (1,5 м x 1,2 м) на скалистом берегу, на дне лужи под водой; **3** – супралитораль, 10 м от уреза воды в литоральной ванне, в воде; **9** – супралитораль, 20 м от уреза воды на скале в высохшей луже на горизонтальной поверхности, на камне.

***Scytonematopsis fuliginosa* (Tild.) Cop.** – Б: **1** – супралитораль, на скалистом берегу, небольшая лужа. Обрастания на горизонтальной поверхности камня.

Лишайники

В приведенном списке – 47 видов лишайников, расположенных в алфавитном порядке. Номенклатура дается по R. Santesson et al. [12]. Для новых в заповеднике и единичных находок принята схема: местонахождение, координаты, местообитание, субстрат, освещенность, гербарный номер (для единичных находок). Новые виды для Айновых островов отмечены знаком *, для Кандалакшского заповедника – **, новые для Мурманской области – ***.

******Absconditella lignicola* Vezda et Pisut** – Б: **10** – плакор около кордона. Антропогенный луг с господством купыря. Доска на земле. На древесине. В условиях средней освещенности. КРАБГ(Л)-9711.

***Acarospora molybdina* (Wahlenb.) A. Massal.** – повсеместно. На каменистом субстрате. В условиях хорошей освещенности. Предпочитает орнито-генные сообщества.

***Amardinea cacuminum* (Th. Fr.) H. Mayrhofer et Sheard** – повсеместно. На каменистом субстрате. В условиях хорошей освещенности. Предпочитает орнито-генные сообщества.

***A. coniops* (Wahlenb.) M. Choisy ex Scheid.** – повсеместно. На каменистом субстрате. В условиях хорошей освещенности. Предпочитает орнито-генные сообщества.

***A. punctata* (Hoffm.) Coppins et Scheid.** – повсеместно. На древесине и коре. В условиях хорошей освещенности.

***Bacidia friesiana* (Hepp) Korb.** – Б: **10** – ивняк травяной. На коре живой ивы диаметром 8 см. В условиях средней освещенности. КРАБГ(Л)-9681.

***Bellemerea cinereorufescens* (Ach.) Clauzade et Cl. Roux** – Б: **11** – вершина холма с маяком. Борт окопа времен Великой Отечественной войны, внутренняя часть. На гальке. В условиях низкой освещенности. КРАБГ(Л)-9698.

***Bryoria simplicior* (Vain.) Brodo et D. Hawksw.** – вне птичьих базаров. На древесине и коре. В условиях хорошей освещенности.

***Caloplaca chlorina* (Flot.) H. Olivier** – повсеместно. На каменистом субстрате. В условиях хорошей освещенности.

***C. holocarpa* (Hoffm. ex. Ach.) A. E. Wade** – Б, М – у маяков. На бетоне. В условиях хорошей освещенности.

***C. verruculifera* (Vain.) Zahlbr.** – повсеместно. На каменистом субстрате. В условиях хорошей освещенности. Предпочитает орнито-генные сообщества.

***Candelariella vitellina* (Hoffm.) Mull. Arg.** – Б, М – у маяков. На бетоне. В условиях хорошей освещенности.

Cetraria islandica (L.) Ach. – вне птичьих базаров. На почве, растительных остатках и мхах. В условиях хорошей освещенности.

Cladonia arbuscula (Wallr.) Flot. – вне птичьих базаров. На почве, растительных остатках и мхах. В условиях хорошей освещенности.

Hypogymnia physodes (L.) Nyl. – повсеместно. На древесине и коре. В условиях хорошей освещенности.

**Japewia tornoensis* (Nyl.) Tonsberg – вне птичьих базаров. На древесине и коре. В условиях хорошей освещенности.

Lecania aipospila (Wahlenb.) Th. Fr. – на литорали или супралиторали. На каменистом субстрате.

**L. contractula* Nyl. – повсеместно. На каменистом субстрате. В условиях хорошей освещенности. Предпочитает орнитогенные сообщества.

L. dispersa (Pers.) Sommerf. – у маяков. На бетоне. В условиях хорошей освещенности.

**L. intricata* (Ach.) Ach. – повсеместно. На каменистом субстрате. В условиях хорошей освещенности.

**L. polytropa* (Ehrh. ex Hoffm.) Rabenh. – повсеместно. На каменистом субстрате. В условиях хорошей освещенности.

L. straminea Ach. – повсеместно. На каменистом субстрате. В условиях хорошей освещенности. Предпочитает орнитогенные сообщества.

L. symmicta (Ach.) Ach. – повсеместно. На древесине и коре. В условиях хорошей освещенности.

***Lecidea lapicida* (Ach.) Ach. – Б: 11 – вершина холма с маяком. Вороничный луг. Глыба на краю земляной насыпи, на каменистом субстрате. В условиях хорошей освещенности. КРАБГ(Л)-9716.

***Lichenomphalia umbellifera* (L.: Fr.) Redhead et al. – Б: 11 – вершина холма. Борт окопа. Валунная насыпь среди луга, на мхах. В условиях хорошей освещенности. КРАБГ(Л)-9671.

**Ochrolechia androgyna* (Hoffm.) Arnold – вне птичьих базаров. На почве, растительных остатках и мхах. В условиях хорошей освещенности.

Parmeliopsis ambigua (Wulfen) Nyl. – вне птичьих базаров. На древесине и коре. В условиях хорошей освещенности.

P. hyperopta (Ach.) Arnold – вне птичьих базаров. На древесине и коре. В условиях хорошей освещенности.

**Phaeophyscia sciastra* (Ach.) Moberg – Б, М – у маяков. На бетоне. В условиях хорошей освещенности.

Physcia caesia (Hoffm.) Furnr. – Б, М – у маяков. На бетоне. В условиях хорошей освещенности.

P. dubia (Hoffm.) Lettau – Б, М – у маяков. На бетоне. В условиях хорошей освещенности.

**Placynthiella dasaea* (Stirt.) Tonsberg – вне птичьих базаров. На почве, растительных остатках и мхах. В условиях хорошей освещенности.

**P. icmalea* (Ach.) Coppins et P. James – вне птичьих базаров. На почве, растительных остатках и мхах. В условиях хорошей освещенности.

***Porpidia glaucophaea* (Korb.) Hertel et Knoch – Б: 10 – середина склона холма. Луг чернично-папоротниковый. Глыба на тропе. В условиях хорошей освещенности. КРАБГ(Л)-9705.

**Protoparmelia badia* (Hoffm.) Hafellner – вне птичьих базаров. На каменистом субстрате. В условиях хорошей освещенности.

**Rhizocarpon geographicum* (L.) D. C. – Б: 11 – вершина холма с маяком. Вороничник. Глыба на краю земляной осыпи. В условиях хорошей освещенности. КРАБГ(Л)-9716.

***R. leptolepis* Anzi – Б: 2 – супралитораль. Антропогенный луг с господством зонтичных. На каменистом субстрате. В условиях средней освещенности. КРАБГ(Л)-9683.

**R. polycarpum* (Hepp) Th. Fr. – Б: 11 – вершина холма с маяком. Вороничник. Глыба на краю землянки. В условиях хорошей освещенности. КРАБГ(Л)-9716; там же, внутренняя часть окопа времен Великой Отечественной войны. На каменистом субстрате. В условиях низкой освещенности. КРАБГ(Л)-9698.

**Trapeliopsis flexuosa* (Fr.) Coppins et P. James – вне птичьих базаров. На древесине. В условиях хорошей освещенности.

**T. granulosa* (Hoffm.) Lumbsch – вне птичьих базаров. На почве, растительных остатках и мхах. В условиях хорошей освещенности.

**Umbilicaria proboscidea* (L.) Schrad. – вне птичьих базаров. На каменистом субстрате. В условиях хорошей освещенности.

Verrucaria ceuthocarpa Wahlenb. – на литорали. На каменистом субстрате. Галофильный.

**V. maura* Wahlenb. – на литорали, редко на супралиторали. На каменистом субстрате. Галофильный.

**V. mucosa* Wahlenb. – на литорали. На каменистом субстрате. Галофильный.

***V. striatula* Wahlenb. – на литорали. На каменистом субстрате. Галофильный.

Vulpicida pinastri (Scop.) J. E. Mattsson et M. J. Lai – вне птичьих базаров. На древесных субстратах.

Xanthoria candelaria (L.) Th. Fr. – повсеместно. На каменистом субстрате. В условиях хорошей освещенности. Предпочитает орнитогенные сообщества.

**Xylographa parallela* (Ach.: Fr.) Fr. – вне птичьих базаров. На древесине. В условиях хорошей освещенности.

Печеночники

Виды расположены по алфавиту, названия даются в соответствии с последним списком печеночников России [10]. Для каждого вида указаны место сбора, местообитание, субстрат, а также наличие структур, связанных с размножением. Новые виды для заповедника обозначены знаком *. Для ряда критических образцов

приведены описания некоторых дифференциальных признаков.

***Aneura pinguis* (L.) Dumort.** – Б: 10 – вблизи кордона заповедника, ивовые заросли, на влажной почве, на и среди *Pellia neesiana* и *Chiloscyphus polyanthos* (Мелехин, 17.06.2010).

***Blasia pusilla* L.** – Б: 10 – вблизи кордона заповедника, ивовые заросли, на влажной почве, на мхах (Мелехин, 17.06.2010).

***Calypogeia neesiana* (C. Massal. et Carestia) Müll. Frib.** – Б: 12 – склон долины озера, выше болота, папоротниково-моховое сообщество, на боковой поверхности кочки, на торфянистой почве (Мелехин, 16.06.2010). *Растения сизовато-зеленые, клетки вдоль края листа в основном вытянутые, в 2 рядах; масляные тела присутствуют только в краевых клетках и в отдельных клетках ближе к основанию листа.*

***Cephalozia bicuspidata* (L.) Dumort.** – Б: 12 – небольшое понижение в центре острова, вблизи оз. Большое, осоково-моховое болото, на кочке среди осок (Мелехин, 18.06.2010). С периянтциями.

***Cephalozia leucantha* Spruce** – Б: 12 – склон долины оз. Большое, выше болота, папоротниково-моховое сообщество, на боковой поверхности кочки, на торфянистой почве (Мелехин, 16.06.2010).

***Cephalozia pleniceps* (Austin) Lindb.** – Б: 12 – осоково-моховое болото, на кочке среди осок (Мелехин, 18.06.2010). Вместе с *Cephalozia bicuspidata*, *Chiloscyphus polyanthos*, *Pseudolophozia sudetica*. С периянтциями.

***Cephaloziella divaricata* (Sm.) Schiffn.** – Б: 12 – склон долины озера, папоротниковое сообщество, тонкий коврик на моховой куртине (Мелехин, 18.06.2010); скала на приморском лугу, на камне на вершине скальной стенки, на отмирающих мхах (Мелехин, 16.06.2010); М: скала (вне птичьего базара), на глыбе скалы под козырьком (Мелехин, 16.06.2010), в тончайших ковриках, еле соскабливается с камня.

***Chiloscyphus polyanthos* (L.) Corda** – часто встречается на Б, на мхах, влажной почве, на отмерших вайях папоротников и опаде, чаще всего в тонких ковриках.

***Gymnocolea inflata* (Huds.) Dumort.** – М: папоротниково-вороничное сообщество, в основании скалы, в небольшом плотном коврике (Мелехин, 16.06.2010); Б: 12 – переувлажненные участки воронично-морошковой тундры. Единичные растения в плотных дерновинках *Lophozia savicziae* (Белкина, 77/10-10).

****Lophozia savicziae* Schljakov** – Б: 12 – переувлажненные участки воронично-морошковых тундр (Белкина, 77/10-10). Основа плотной дерновинки. *Растения типичного облика с чашевидно-вогнутыми листьями; масляные тела 3–4 мкм в диаметре по 22–36 в клетке, со средней каплей.*

***Marchantia polymorpha* L. subsp. *montivagans* Bischl. et Boissel.-Dub.** [= *M. alpestris* (Nees)

Burgeff]. – нередко встречается на Б, в ивовых зарослях, на почве, по антропогенно нарушенным местам. Указывался Н. С. Парфентьевой и И. П. Бреслиной [5] для ивняковых зарослей в понижениях с разнотравно-моховым покровом западнее Среднего и Малого озер Б.

***Obtusifolium obtusum* (Lindb.) S. W. Arnell** – Б: 12 – склон долины оз. Большое, выше болота, папоротниково-моховое сообщество, на отмерших вайях, единичными побегами в рыхлых ковриках *Chiloscyphus polyanthos* (Мелехин, 16.06.2010).

***Pellia neesiana* (Gottsche) Limpr.** – нередко встречается на Б, на влажной почве, опаде и отмерших вайях, обычно вместе с *Chiloscyphus polyanthos*. Указывался Н. С. Парфентьевой и И. П. Бреслиной [5] для ивняковых зарослей в понижениях с разнотравно-моховым покровом западнее Среднего и Малого озер Б.

***Pseudolophozia sudetica* (Nees ex Huebener) Konstant. et Vilnet** [= *Lophozia sudetica* (Nees ex Huebener) Grolle] – Б: 12 – переувлажненные участки воронично-морошковых тундр. Единичные растения в плотных дерновинках *Lophozia savicziae* (Белкина, 77/10-10); там же, осоково-моховое болото, на кочке среди осок (Мелехин, 18.06.2010). Вместе с *Cephalozia pleniceps*, *Cephalozia bicuspidata*, *Chiloscyphus polyanthos*. С выводковыми почками.

ОБСУЖДЕНИЕ

Выявленное видовое разнообразие цианопрокариот и печеночников чрезвычайно мало, что, с одной стороны, объясняется небольшими размерами территории, низким разнообразием экотопов, высокой конкуренцией с высшими сосудистыми растениями, а с другой – чрезвычайно неподходящими экологическими условиями. Обилие птиц приводит к переобогащению почвы и голых субстратов азотистыми соединениями, нитрификации водоемов и водотоков. Среди цианопрокариот к таким условиям может приспособиться только небольшое число видов нитрофилов, в частности *Phormidium autumnale*. В целом цианопрокариоты не выносят нитрификации. В условиях Айновых островов большинство цианопрокариот обнаружены на морской литорали. Помимо морских видов (*Amatoidea aegea*, *Gloeocapsopsis crepidinum*, *Scytonema topsis fuliginosa*) здесь встречены и обычные наземные виды. В свою очередь, печеночники произрастают в затененных условиях под пологом папоротников, на болотах среди других мохообразных. Лишь *Cephaloziella divaricata* поселяется прямо на голых камнях, образуя рыхлые коврики. Большая часть печеночников, обнаруженных на исследованной территории, широко распространенные в области виды. Интерес вызывает находка критического малоизученного вида – *Lophozia savicziae*. Это арктический

вид, дизъюнктивно распространенный в горах Северной Евразии [2], изредка встречающийся в Мурманской области. Для заповедника приводится впервые.

В отношении лишайников можно констатировать, что лишенофлора довольно богата. Найдено 6 новых видов для заповедника и 29 – для Айновых островов. С учетом данных предшествующих исследователей [3], [11] на островах насчитывается 100 видов лишайников. Среди находок *Absconditella lignicola* является новым

для Мурманской области. Этот вид распространен по всей лесной зоне Северного полушария, в России нередок, почти не заходит в подзону северной тайги.

Работа частично выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (09-04-00281, 12-04-01476), гранта Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых (МК-3328.2011.4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александрова В. Д. Геоботаническое районирование Арктики и Антарктики. Л.: Наука, 1977. 187 с.
2. Бакалин В. А. Монографическая обработка рода *Lophozia* (Dumort.) s. str. М.: Наука, 2005. 239 с.
3. Дудорева Т. А. Макролишайники острова Большой Айнов (Баренцево море) // Флористические и геоботанические исследования в Мурманской области. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1993. С. 73–81.
4. Константинова Н. А., Белкина О. А., Боровичев Е. А., Давыдов Д. А., Костина В. А., Лихачев А. Ю., Мелехин А. В., Шалыгин С. С. Обзор разнообразия растений, лишайников и цианопрокариот на ООПТ Мурманской области // Вестник Кольского научного центра РАН. 2011. № 2. С. 63–73.
5. Парфентьева Н. С., Бреслина И. П. Флора Айновых островов // Труды Кандалакшского государственного заповедника. 1969. Вып. VII. С. 390–411.
6. Cedercreutz C. Süsswasseralgen aus Petsamo II // Mem. Soc. Fauna Flora Fennica. 1931. Vol. 7. P. 236–248.
7. Kalliola R. Pflanzensoziologische Untersuchungen in der Alpenstufe Fennisch Lapland // Vanato. 1939. Bd. 13. S. 2.
8. Komárek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota. I. Chroococcales // Süßwasserflora von Mitteleuropa / Eds. H. Ettl, G. Gartner, H. Heynig, D. Mollenhauer. Bd. 19 (1). Jena, 1998. 548 p.
9. Komárek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota. II. Oscillatoriales // Süßwasserflora von Mitteleuropa. / Eds. H. Ettl, G. Gartner, H. Heynig, D. Mollenhauer. Bd. 19 (2). München, 2005. 759 p.
10. Konstantinova N. A., Bakalin V. A., Andreeva E. N., Bezgodov A. G., Borovichev E. A., Dulin M. V., Mamontov Yu. S. Checklist of liverworts (Marchantiophyta) of Russia // Arctoa. 2009. Vol. 18. P. 1–63.
11. Räsänen V. Petsamon jäkäläkasvisto [Die Flechtenflora von Petsamo] // Annal. Bot. Soc. Zool. Bot. Fenn. «Vanamo». 1943. Vol. 18. № 1. P. 1–110.
12. Santesson R., Moberg R., Nordin A., Tønsberg T., Vitikainen O. Lichen-forming and lichenicolous fungi of Fennoscandia. Museum of Evolution. Uppsala University, 2004.

АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ ПОЛТОРАК

профессор, заведующий Лабораторией молекулярной генетики врожденного иммунитета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация), профессор Департамента патологии Центра биомедицины, Тафтский университет (Бостон, Соединенные Штаты Америки)
alexander.poltorak@tufts.edu

МЕХАНИЗМЫ ВРОЖДЕННОГО ИММУНИТЕТА. ИЗУЧЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЫШИНОЙ МОДЕЛИ

Установление и изучение многочисленных функций генов человека является одной из главных задач современной иммуногенетики. Вследствие высокой степени гомологии между мышинным и человеческим геномами важная роль в решении этой задачи принадлежит мышинной модели, использование которой возросло в связи с выведением различных инбредных линий мышей. Различия в иммунном ответе в мышинных линиях были неоднократно использованы для нахождения иммунологически компетентных генов. В данном обзоре приведены некоторые из наиболее успешных и известных примеров использования мышей в изучении врожденного иммунитета.

Ключевые слова: врожденный иммунитет, мышинная модель, геном человека, инфекции, воспаление

ВВЕДЕНИЕ

Развитие экспериментальной биологии в конце XX – начале XXI века привело к прорыву в исследованиях клеточных и молекулярных механизмов иммунитета. Это относится в первую очередь к пересмотру ранее сложившихся представлений о роли врожденного иммунитета в общей системе иммунитета организма. Во многом этому способствовало развитие молекулярно-генетических методов исследования. В настоящее время причины развития многих патологий человека интенсивно изучаются. Тем не менее генетическое разнообразие человека осложняет диагностику и лечение различных заболеваний. Так, например, известно, что предрасположенность к сепсису в ходе иммунного ответа на инфекцию находится под строгим генетическим контролем [58]. Более того, хорошо изучена роль полиморфизма в генах, кодирующих белки острой фазы септического шока, таких как TNF (фактор некроза опухоли, ФНО), IL-1, IL-6 [44]. Тем не менее наличия мутантной аллели по одному из этих генов далеко не достаточно для возникновения предрасположенности к сепсису, которая существенно зависит от окружения, расовой и этнической принадлежности [57].

Осознавая проблему индивидуального разнообразия человека, основоположники мышинной генетики использовали инбридинг для выведения генетически однородных мышинных линий (*inbred mouse lines*, или *classical inbred mice*), что позволило изучать экспериментальную инфекцию на строго определенном генетическом фоне [19], [42]. В то же время наличие отличающихся друг от друга инбредных линий позволяет использовать их в генетическом анализе [47]. В результате почти вековой работы было выведено около 200 инбредных линий мышей,

различающихся между собой фенотипическими характеристиками [49]. На рис. 1 представлена фотография мышей двух линий – MSM и MOLF. Различия в фенотипе между двумя инбредными линиями могут быть использованы в классическом (*classical*, или *formal*) генетическом анализе. В дополнение к этому наличие полностью секвенированного и аннотированного мышинного генома, полиморфных маркеров и других информационных ресурсов способствует развитию классической генетики в мышинной модели. В последние десятилетия было установлено, что многие из инбредных линий различаются по предрасположенности к бактериальным, вирусным и паразитарным инфекциям и, следовательно, могут быть использованы в классическом генетическом анализе [26]. Классический генетический подход исторически определяется как прямая (*forward*) генетика [5]. Такой подход основан на знании фенотипа, нахождении двух инбредных линий (в случае мышинной модели), различающихся по этому фенотипу, и определении (с помощью картирования) геномного локуса, отвечающего за фенотип. На последней стадии проводят скрещивание родительских линий с целью определения ассоциации (корреляции) между фенотипом и генотипом в полученном потомстве. Альтернативными прямой генетике являются методы так называемой обратной генетики [2], в соответствии с которыми сначала производится делеция (нокаут – *knockout*) гена с последующим изучением фенотипов, которые могли измениться в животном с нокаутированным геном [15]. Таким образом, в прямой генетике по функциональному тесту (фенотип) находят ген, в то время как в обратной генетике посредством нокаута проверяют предположение о функции гена. Обратная генетика эффектив-

на, если очевидна функция гена; в противном случае предсказать функцию сложно, особенно в отсутствие ярко проявляемого фенотипа [7]. Практическая невозможность предсказания функции многих генов накладывает серьезные ограничения на обратную генетику [64]. Более того, учитывая, что функциональное разнообразие (число фенотипов) в природе значительно превышает число генов в млекопитающих (25 тысяч), можно заключить, что подавляющее большинство генов имеют не одну, а несколько функций, которые чрезвычайно трудно определить с помощью обратной генетики.

Таким образом, поскольку определить все функции с помощью обратной генетики невозможно, классическая генетика представляется единственным и наиболее перспективным подходом для нахождения функций генов [8]. Поэтому в данном обзоре мы ограничимся рассмотрением наиболее удачных примеров использования методов классической генетики для клонирования генов, ответственных за иммунный ответ.

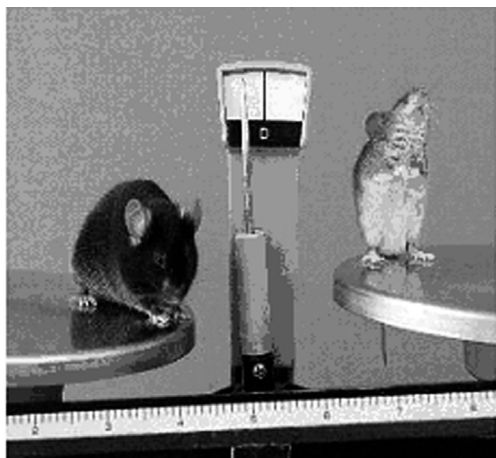


Рис. 1. Мыши линий MOLF/Ei и MSM/Ms

РОЛЬ ЛПС-ГЕНА В ФУНКЦИОНИРОВАНИИ ВРОЖДЕННОГО ИММУНИТЕТА

В течение долгого времени считалось, что ЛПС (липополисахарид) – это составная часть бактериального эндотоксина, который был впервые изолирован из грамотрицательных бактерий и идентифицирован К. Пфайфером в начале прошлого века [56]. Структура бактериального ЛПС представлена на рис. 2. В 1947 году Пфайфер доказал, что ЛПС и эндотоксин идентичны, после чего оба термина стали использоваться как синонимы. Чувствительность к ЛПС варьирует в широком диапазоне в различных видах [3]. Так, птицы, рептилии и амфибии почти нечувствительны к ЛПС. В то же время инъекция ЛПС способна вызывать лихорадку, шок и повреждение органов у многих млекопитающих [9]. Тем не менее некоторые из них, например мыши, крысы, павианы, относительно нечувствительны

к ЛПС, а другие виды (человек, кролик) обладают наибольшей чувствительностью к ЛПС. Например, смертельная доза ЛПС для мыши и кролика различается на четыре порядка (10^4) и позволяет предположить, что чувствительность к ЛПС генетически обусловлена [68]. Гипотеза о гене, определяющем чувствительность к ЛПС, получила подтверждение в 1968 году после обнаружения ЛПС-резистентной линии мышей (C3H/HeJ), происходившей из одной линии с ЛПС-чувствительными мышами линии C3H/HeN [63], которые были разделены на две независимые линии после спонтанной мутации в ЛПС-рецепторе, получившем название ЛПС-ген (LPS-gene, или *Lps*). Наличие двух конгенных инбредных линий, отличающихся между собой только чувствительностью к ЛПС, позволило постулировать наличие специфического рецептора к ЛПС. Мутантный фенотип в C3H/HeJ линии был описан в 1968 году, а в 1978-м была охарактеризована другая линия ЛПС-резистентных мышей C57BL10/ScCR [14] и был установлен аллельный характер мутации в C3H/HeJ- и C57BL/10ScCR-мышях (две разные мутантные аллели одного и того же гена ответственны за резистентность к ЛПС). Кроме того, было показано, что мутация в ЛПС-гене напрямую связана со способностью распознавания грамотрицательных бактерий, так как C3H/HeJ-мыши были нечувствительны к *Salmonella typhimurium* инфекции и умирали от инфекционной дозы, которую ЛПС-чувствительные C3H/HeN-мыши переносили легко [45]. Таким образом, наличие функционального ЛПС-гена было критично для распознавания ЛПС и борьбы хозяина с патогенными микроорганизмами, а следовательно, его выживания.

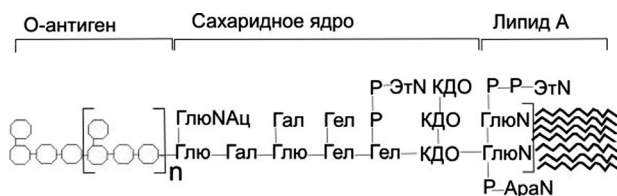


Рис. 2. Структура липополисахарида *Salmonella* spp. Показаны углеводы, входящие в состав липида А: глюкозамин (ГлюN) и 4-аминоарабиноза (АраN), а также углеводы ядра 2-кето-3-дезоксиктоонат (КДО), адаптировано из: <http://www.center-hc.ru/diseases/infection2.htm>

Первые данные по картированию ЛПС-гена на 4-й мышиной хромосоме были опубликованы в 1978 году [69], но потребовалось еще 15 лет для начала работ по позиционному клонированию. За это время были накоплены данные о полиморфных маркерах, необходимых для картирования генов, а также были разработаны методы клонирования больших фрагментов ДНК – YAC (*Yeast Artificial Chromosome*) и BAC (*Bacterial Artificial Chromosome*), необходимых для установления геномной последовательности. Работы по позиционному клонированию ЛПС-гена нача-

лись в 1993 году независимо в трех лабораториях (Beutler [53], Malo [54] и Shwartz) и успешно завершились в 1998 году публикацией статьи [51], в которой В. Beutler с коллегами охарактеризовали мутацию в мышином TLR4 (*Toll-Like Receptor*) гене, состоявшую в замене эволюционно консервативного пролина на гистидин (P712H) в цитоплазматическом домене рецептора (рис. 3). Важную роль в идентификации TLR4 как ЛПС-рецептора имели генетические исследования *Толл*-рецептора в дрозофиле, где *Толл* (*Toll*) важен не только в эмбриональном развитии [28], но и для защиты от грибковой инфекции [38]. Последнее обстоятельство поддерживало идею об иммунной функции мышиного гомолога *Толла*. Как и ожидалось, TLR4 оказался трансмембранным рецептором, содержащим цитоплазматический домен, способный передавать сигнал от ЛПС внутрь клетки, активируя таким образом транскрипционные факторы, отвечающие за продукцию воспалительных цитокинов и выработку защитных иммунных механизмов.



Рис. 3. Схема расположения мутации в мышином TLR4 (*Toll-Like Receptor*) гене. Мутация приводит к замене эволюционно консервативного пролина на гистидин (P712H) в цитоплазматическом домене рецептора [51]

Обнаруженная мутация P712H препятствовала правильной димеризации рецептора и его активации [71]. Последующие кристаллографические и биохимические исследования подтвердили, что пролин важен для сохранения конформации цитоплазматического домена, участвующего в димеризации рецептора. Рецептор присутствует на мембране в пресобранном состоянии, и добавление ЛПС индуцирует сближение и димеризацию двух соседних молекул рецептора [35]. Важная роль цитоплазматического домена, также называемого TIR-доменом (Толл Интерлейкин-1 Рецептор), состоит в передаче клеточного сигнала, который активирует транскрипционные факторы, участвующие, в свою очередь, в экспрессии и синтезе воспалительных цитокинов [31]. Замена пролина на гистидин препятствует димеризации TIR-домена и его взаимодействию с другими молекулами, такими как MyD88, TIRAP и TRIF [34]. И наконец, в подтверждение гипотезы об аллельном характере дефекта в C3H/HeJ- и C57BL10/ScCR-мышях, было показано, что C57BL10/ScCR-мыши не синтезируют Tlr4 из-за делеции в ЛПС-локусе размером примерно 75 кб [52]. Таким образом, завершилась тридцатилетняя история поиска гена, который стал одним из первых членов хорошо известного в настоящее время семейства *Толл*-подобных

рецепторов, каждый из которых отвечает за узнавание разных компонентов бактерий (грамположительных и грамотрицательных) и вирусов.

После идентификации TLR4 как рецептора к бактериальному эндотоксину стало понятно, что остальные *Толл*-подобные рецепторы тоже могут узнавать различные микробные компоненты. Действительно, функции остальных членов семейства были охарактеризованы с помощью обратной генетики (нокаут генов). Так, TLR2 в комбинации с TLR1 или TLR6 участвует в узнавании липопептидов, пептидогликана, липотейхоевой кислоты и других бактериальных компонентов [20]. TLR3 [4], TLR7 [16], TLR8 и TLR9 [29] локализованы преимущественно в эндосомах, где они распознают нуклеиновые кислоты микробного происхождения [13]. Нокаут каждого из указанных рецепторов приводил к потере защиты мышей от различных бактериальных и вирусных инфекций [30]. Генетические открытия в области мышиных *Толл*-подобных рецепторов способствовали исследованиям полиморфизма гомологичных генов у человека. Несмотря на то что данные об ассоциации между полиморфизмами в TLR4 человека и предрасположенностью к бактериальным инфекциям были опубликованы, в этой области много противоречий. Так, например, предрасположенность к бактериальным инфекциям в детском возрасте в некоторых случаях объясняется мутациями в IRAK4 [50] и MYD88 [11], а некоторые больные вирусным энцефалитом имеют нефункциональные UNC93B1 [12] и TLR3 [72] из-за мутаций в этих генах.

МЕХАНИЗМЫ ЗАЩИТЫ ОРГАНИЗМА ОТ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ИНФЕКЦИИ

Место проникновения бактерий в организм называется входными воротами инфекции. Здесь на борьбу с бактериями поднимаются фагоцитирующие клетки. Первый сигнал мобилизации эти клетки получают от самих бактерий-аггессоров в виде молекул их токсинов. Одновременно с фагоцитозом бактерий макрофаги начинают синтезировать и выделять воспалительные цитокины – интерлейкин-1, фактор некроза опухолей и др. Под влиянием цитокинов усиливается прилипание циркулирующих лейкоцитов к эндотелию сосудов и мобилизация в очаг инфекции. Те же цитокины усиливают антибактериальную активность фагоцитов. Если фагоцитирующие клетки не справляются с очищением очага инфекции от бактерий, интерлейкин-1 выполняет роль межклеточного сигнала. Он вовлекает в процесс активации Т-лимфоциты и включает механизмы специфического иммунного ответа.

Фагоцитоз является одним из наиболее эффективных методов устранения патогена хозийской клеткой, которая использует низкое рН фагосом и лизосом для разрушения и расщепления микроорганизмов с помощью протеаз и ак-

тивных радикалов. Поэтому среди разнообразных механизмов адаптации к хозяйской клетке некоторые микроорганизмы эволюционировали с целью избежать фагосом или даже изменить свойства самих фагосом. Так, например, упоминавшийся ранее NRAMP является одним из компонентов фагосомы, используемой клеткой для разрушения микроорганизмов. NRAMP локализован на мембране поздних эндосом / лизосом и быстро рекрутируется к мембране фагосом и содержащимся в них микробам. NRAMP способствует оттоку ионов кальция из фагосомы, что приводит к снижению уровня этого важного иона, обедняя микробное микроокружение и затрудняя микробную жизнедеятельность [21]. Таким образом, NRAMP конкурирует с бактериями за возможность модулировать функции фагосом.

Другим примером воздействия бактерий на клеточный аппарат является инфекция внутриклеточной бактерией *Legionella pneumophila*, к которой человеческие макрофаги обычно нечувствительны, а мышинные макрофаги чувствительны и быстро умирают. Исключение составляет линия мышей A/J, которая поддерживает рост бактерий. Этот дефект был картирован на 13-й хромосоме [17], а именно в локусе, содержащем несколько полноразмерных и неполных копий генов семейства *Naip* [6], [61]. Функциональная комплементация с использованием трансгенных мышей подтвердила, что геномом, отвечающим за фенотип, является *NAIP5* [18], [70]. То обстоятельство, что ген принадлежит к NLR (*Nod-Like Receptor*) семейству, отвечающему за узнавание бактериальных компонентов, позволило предположить, что ген может распознавать компоненты *Legionella* [24]. Оказалось, что *NAIP5* взаимодействует с бактериальным флагеллином, попадающим в клетку через секреторную систему 4-го типа [55]. После распознавания флагеллина *NAIP5* активирует *CASP1* каспазу, участвующую в синтезе IL-1 и клеточной смерти посредством пироптозиса. Недавние исследования с использованием *CASP1*^{-/-} и *IPAF*^{-/-} нокаутных мышей позволили предположить, что после распознавания компонентов *Legionella* *NAIP5* активирует *IPAF-dependent* инфламмасому, что приводит к антибактериальной активности и клеточной смерти [70]. Более того, бактериальные мутанты флагеллина, но не дикие штаммы *Legionella* растут нормально в макрофагах линии C57BL/6, подтверждая таким образом критическую роль флагеллина в иммунном ответе к *Legionella* [55]. Исследования *NAIP5*^{-/-} макрофагов пролили свет на механизм действия *NAIP5*. Наличие функционального *NAIP5* ассоциируется с даун-регуляцией маркеров шероховатого эндоплазматического ретикулула и ап-регуляцией лизосомных маркеров, таких как *LAMP-1* и *cathepsin*, что свидетельствует о созревании фагосомы [40]. Эти

изменения протекают очень быстро, в течение нескольких часов после инфекции, что позволяет предположить активацию дополнительных внутриклеточных компонентов, способных бороться с бактерией. Идентификация этих компонентов представляет значительный интерес.

Идентификация так называемого BCG-гена является одним из первых примеров использования прямой генетики для позиционного клонирования генов [62]. Результаты этой работы были опубликованы в 1993 году, задолго до получения сиквенса мышинного генома и широкого распространения Интернета, что затрудняло биоинформатический анализ результатов генетического картирования. До появления этой публикации было показано, что *Bcg* отвечает за защиту от таких микроорганизмов, как *S. typhimurium*, *Mycobacterium bovis* (BCG) [10]. Было также известно, что различные инбредные линии мышей сильно отличаются по своей чувствительности к инфекции *in vivo* и *in vitro* [25], [65]. В ходе предварительного генетического анализа было показано, что защита от внутриклеточной инфекции находится под контролем одного гена, который получил название *Bcg*. Поскольку клонировать *Bcg*-ген приходилось в отсутствие достаточной информации о мышинном геноме и детальной карты генома, группе под руководством Е. Скамене потребовалось самостоятельно клонировать генетические маркеры, строить геномный контиг из искусственных хромосом, заниматься обогащением локус-специфических кДНК и использовать другие молекулярно-биологические методы. Содержащийся в критической геномной области ген получил название *Nramp1* (*Natural Resistance-Associated Macrophage Protein 1*) и кодировал мембранный гликопротеин, содержащий 12 трансмембранных доменов [66]. Один из нескольких идентифицированных при сравнении различных мышинных линий полиморфизмов Gly169Asp (G169D) полностью коррелировал с устойчивостью к вышеуказанным инфекциям *in vivo* и *in vitro* [67]. Результаты позиционного клонирования *Bcg* подтвердились с помощью его геномного нокаута, который привел к резкому повышению чувствительности мышей 129SV линии к инфекциям *S. typhimurium*, *L. donovani*, *M. bovis* (BCG). Кроме того, перенос резистентной *Nramp1G169* аллели на чувствительную линию мышей C57BL/6J (*NrampD169*) приводил к увеличению устойчивости этих мышей к инфекции [27]. Было также показано, что замена G169D нарушает конформацию белка и его посттрансляционный процессинг, что приводит к отсутствию зрелого пептида на клеточной мембране [23]. Мутации в человеческом гене NRAMP1 ассоциируются с повышенной чувствительностью к туберкулезу в популяции из Африки и Азии, но не из Европы.

Предыдущий пример с *NAIP5* демонстрирует, что апоптоз как результат отношений между хозяином и патогеном является предпочтительным,

выигрышным для хозяина, и потому ассоциируется с устойчивостью к инфекции. Несмотря на то, что клетка умирает, на уровне организма происходит освобождение от патогена. Похожая стратегия используется в туберкулезной инфекции [61]. Важность проблемы туберкулеза трудно переоценить, учитывая глобальный характер заболевания. Согласно современным данным, около 32 % населения инфицировано *Mycobacterium tuberculosis* [39]. Инбредные мышиные линии используются для изучения туберкулеза в течение последних 60 лет. Экспериментальное инфицирование резистентных мышей, таких как C57BL/6, C57BL/10 и BALB, приводит к низким титрам инфекции, в то время как чувствительность к туберкулезу в линиях CBA, DBA, C3H ассоциируется со значительными инфекционными титрами в легких, воспалительной реакцией, приводящей к разрушению легочной ткани и в конечном счете смерти [1]. Действительно, макрофаги резистентных мышей в ходе инфекции более предрасположены к апоптозу, чем макрофаги чувствительных животных [33]. Эти исследования показали, что инфекция находится под контролем нескольких генов, из которых удалось идентифицировать только один локус на 1-й хромосоме. Генетический контроль ответа на *Mycobacterium tuberculosis* подтверждается данными на человеке, а именно: 1) семейной предрасположенностью к болезни; 2) фенотипическим анализом в моно- и дизиготных двойниках; 3) половыми и расовыми различиями в чувствительности к болезни [22]. Несмотря на то что генетические исследования велись исключительно на людях, первый ген был идентифицирован в мышах И. Крамником и сотрудниками. Он вместе с коллегами прокартировал *Sst1* (*Susceptibility to tuberculosis* – чувствительность к туберкулезу) на центральном участке хромосомы 1 [37]. Исследования конгенных C3HeB/FeJ животных с резистентной *B6sst1R* аллелью выявили, что *Sst1* оказывает разнообразный эффект по отношению к различным инфекциям, включая *Listeria monocytogenes*. Более того, экспрессия нормальной аллели этого гена в дефектных C3HeB/FeJ-мышях восстанавливала резистентность к туберкулезной инфекции и к устойчивости макрофагов *in vitro*. В результате многолетней работы был позиционно клонирован ген под названием *Ipr1*, функциональная копия которого присутствовала в резистентной к инфекции линии, но не в чувствительной линии мышей [46]. IPR1 мРНК активируется в ответ на интерферон, а продукт трансляции содержит сигнал ядерной локализации и транскрипционной активности. Человеческий гомолог IPR1 способен взаимодействовать с белками вируса гепатита С и вируса Эпштейна – Барр. Все это позволяет предположить, что IPR1 участвует в транскрипционной активации макрофагов в ответ на инфекцию [36].

МЕХАНИЗМЫ ЗАЩИТЫ ОРГАНИЗМА ОТ ВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ

Особенность вирусов как паразитов состоит в том, что они предпочитают внутриклеточный паразитизм, то есть жизнь и размножение исключительно внутри клеток хозяина и за их счет. Как в таких условиях бороться против вируса-паразита? Остается два пути: или атаковать и убивать зараженные вирусами клетки вместе с вирусами, или каким-то образом воспрепятствовать внутриклеточному размножению вирусов, если не удалось помешать их внедрению. По первому пути идут разные типы цитотоксических клеток-киллеров, защищающих организм от вирусов. Распознав на поверхности зараженной клетки чужеродные антигены, клетки-киллеры впрыскивают в такую клетку-мишень содержимое своих цитоплазматических гранул (куда входит фактор некроза опухолей и другие молекулы, повреждающие клетку-мишень). Результатом атаки киллера, как правило, является гибель клетки-мишени вместе с внутриклеточными паразитами. Правда, гибель и разрушение собственных клеток организма не безразличны для его жизнедеятельности. При некоторых вирусных инфекциях такого рода защитные реакции приносят больше вреда, чем пользы.

Другой механизм защиты против вирусов – молекулярный. За противовирусную защиту ответственны молекулы интерферонов. Они способны «интерферировать», то есть противодействовать процессам биосинтеза вирусных частиц в клетке хозяина. Интерферон синтезируется клеткой-продуцентом в ответ на заражение вирусом и соединяется с соответствующими рецепторами на поверхности зараженных клеток. Взаимодействие цитокина (в данном случае интерферона) со своим специфическим рецептором влечет за собой передачу внутриклеточного сигнала к ядру клетки. В клетке включаются гены, ответственные за синтез белков и ферментов, препятствующих самовоспроизведению вируса.

Использование мышиной модели в изучении генетики иммунного ответа на вирусные инфекции привело к открытию гена, участвующего в защите от различных флавивирусов, – 2',5'-олигоаденилат-синтазы 1b (*Oas1b*) [48]. Кроме того, эти исследования выявили важный интерферон-зависимый механизм защиты хозяйского организма от вирусной инфекции. Устойчивые к этому вирусу мышиные линии содержат полноразмерную копию *Oas1b*. В отличие от них, чувствительные к вирусу мышиные линии содержат мутацию, приводящую к трансляции неполноразмерного OAS1 полипептида [43]. OAS1 активируется интерфероном и отвечает за синтез олигоаденилатов, активирующих РНКазу, которая деградирует вирусную и клеточную РНК. Анализ человеческой ДНК выявил ряд полиморфизмов, которые коррелируют с активнос-

тью этого фермента, а также с уровнем ответа на вакцинацию против вируса желтой лихорадки. Таким образом, позиционное клонирование *Oas1b* стимулировало изучение полиморфизма у человека и в конечном счете улучшило диагностику этого вирусного заболевания.

В Западном полушарии вирус, вызывающий лихорадку Западного Нила, последний раз был обнаружен в 1999 году, когда он произвел эпидемию вирусного энцефалита в Нью-Йорке [41]. Однако этот и другие флавивirusы, включая вирус желтой лихорадки, Денги и японского энцефалита, представляют значительно большую проблему на всей территории Африки и Ближнем Востоке, где эти вирусы являются постоянными возбудителями заболеваний. Большинство флавивirusов имеют РНК-вый геном размером примерно 10 кб, содержат РНК и реплицируются в клетке через двуцепочечные РНК-интермедиаты преимущественно в антиген-презентирующих клетках. Большинство инфекционных случаев протекают без осложнений, но около 20 % заболевших имеют риск переноса инфекции в нервную систему, что может привести к менингиту, энцефалиту и параличу. Нейроны являются главной мишенью вируса, от репликации и распространения которого защищает интерферон. Было обнаружено, что инбредные линии мышей значительно различаются по своей чувствительности к экспериментальной вирусной инфекции. Большинство лабораторных линий мышей, таких как C57BL/6, C3H/HeJ, BALB/C, CBA, PERA, принадлежащих в основном к подвиду *Mus musculus domesticus*, очень чувствительны к экспериментальной флавивиральной инфекции, в то время как так называемые дикие мыши подвиды *Mus musculus musculus* чрезвычайно устойчивы к инфекции [59]. Было также показано, что иммунный ответ на вирусную инфекцию находится под контролем одного локуса, получившего название *Flv* (*Flavivirus*).

Когда устойчивую к инфекции аллель *Flv* перенесли на чувствительную к вирусу линию C3H.PR1, мыши полученной конгенной линии C3H.PR1-*flvR* приобрели резистентность к инфекции и были использованы для точного картирования *Flv* локуса на 5-й мышинной хромосоме с разрешением до 0,5 сМ [60]. Последующий скрининг генов-кандидатов идентифицировал семейство генов, кодирующих 2',5'-олигоаденилат-синтазу (*Oas*), из которых только *Oas1b* был важен в иммунном ответе на вирус лихорадки Западного Нила (WNV – *West Nile Virus*). Все чувствительные к WNV линии мышей содержали замену Т на С, что приводило к замене аргинина на стоп-кодон и потере ферментативной активности. Было также показано, что активированная OAS участвует в синтезе олигоаденилатов, которые активируют РНК-азу L, разрушающую вирусную и клеточную РНК. Важная роль этого фермента в деградации вирусной РНК подтверждается тем, что мыши, дефектные

по протеинкиназе R и РНК-азе L, демонстрируют повышенную летальность при инфицировании WNV и имеют более высокий титр вируса в периферийных тканях в первые часы инфекции. Недавние генетические исследования на пациентах, больных вирусом лихорадки Западного Нила, показали ассоциацию между T210C-полиморфизмом и предрасположенностью к болезни. Эти исследования также показали, что T210C-замена приводит к альтернативному сплайсингу транскрипта OAS и образованию доминант-негативной изоформы фермента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные примеры картирования генов позволяют сделать следующие выводы.

Во-первых, научное познание с точки зрения классической (формальной) генетики начинается с фенотипа и заканчивается «генетическим» объяснением фенотипа. В этом обзоре была рассмотрена лишь небольшая часть примеров таких фенотипов, основанных на взаимодействиях между хозяином и патогеном. Почти все они в течение десятилетий представляли загадку не только для генетиков, но и для инфекционистов, эпидемиологов и, что не менее важно, врачей. В этой связи инбредные линии мышей способствовали значительному прогрессу в понимании механизмов врожденного иммунитета. Поэтому трудно переоценить значение мышинной модели, которая нуждается в дальнейшей популяризации в биологических науках.

Во-вторых, несмотря на то что большинство представленных фенотипов привели к раскрытию функции одного гена, в действительности взаимодействие хозяина с микроорганизмом – многоэтапный процесс, в котором участвует большое количество клеточных и вирусных компонентов. Поэтому выявленные гены были специфичны именно для выбранного фенотипического скрининга, например бактериального титра в макрофагах. Можно предположить, что для другого скрининга разница в фенотипе позволила бы идентифицировать другие гены. Все это расширяет возможности мышинной генетики.

И наконец, фенотипическая разница между инбредными линиями часто может объясняться не одним геном (монокенная характеристика), а несколькими (полигенная характеристика). В таком случае картирование привело бы к идентификации нескольких генов, хотя в реальности картирование комплексных фенотипов бывает затруднено. Можно надеяться, что совершенствование методов картирования, прогресс биоинформатического обеспечения и появление новых мышинных моделей, особенно на основе уже упоминавшихся диких линий мышей, поможет решить эту и другие проблемы генетического изучения различных патологий, в первую очередь опухолевых и аутоиммунных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abel B., Thieblemont N., Quesniaux V. J., Brown N., Mpagi J., Miyake K., Bihl F., Ryffel B. Toll-like receptor 4 expression is required to control chronic *Mycobacterium tuberculosis* infection in mice // *J. Immunol.* 2002. Vol. 169. P. 3155–3162.
2. Akira S., Takeda K. Functions of toll-like receptors: lessons from KO mice // *C. R. Biol.* 2004. Vol. 327. P. 581–589.
3. Alexander C., Rietschel E. T. Bacterial lipopolysaccharides and innate immunity // *J. Endotoxin. Res.* 2001. Vol. 7. P. 167–202.
4. Alexopoulou L., Holt A. C., Medzhitov R., Flavell R. A. Recognition of double-stranded RNA and activation of NF-kappaB by Toll-like receptor 3 // *Nature.* 2001. Vol. 413. P. 732–738.
5. Appleby M. W., Ramsdell F. A forward genetic approach for analysis of the immune system // *Nat. Rev. Immunol.* 2003. Vol. 3. P. 463–471.
6. Beckers M. C., Yoshida S., Morgan K., Skamene E., Gros P. Natural resistance to infection with *Legionella pneumophila*: chromosomal localization of the *Lgn1* susceptibility gene // *Mamm. Genome.* 1995. Vol. 6. P. 540–545.
7. Benfey P. N., Mitchell-Olds T. From genotype to phenotype: systems biology meets natural variation // *Science.* 2008. Vol. 320. P. 495–497.
8. Beutler B., Hoebe K., Shamel L. Forward genetic dissection of afferent immunity: the role of TIR adapter proteins in innate and adaptive immune responses // *C. R. Biol.* 2004. Vol. 327. P. 571–580.
9. Beutler B., Poltorak A. Sepsis and evolution of the innate immune response // *Crit. Care. Med.* 2001. Vol. 29. P. S2–S6.
10. Blackwell J. M., Barton C. H., White J. K., Roach T. I., Shaw M. A., Whitehead S. H., Mock B. A., Searle S., Williams H., Baker A. M. Genetic regulation of leishmanial and mycobacterial infections: the *Lsh/Ity/Bcg* gene story continues // *Immunol. Lett.* 1994. Vol. 43. P. 99–107.
11. Casanova J. L., Abel L. The human model: a genetic dissection of immunity to infection in natural conditions // *Nat. Rev. Immunol.* 2004. Vol. 4. P. 55–66.
12. Casrouge A., Zhang S. Y., Eidenschenk C. et al. Herpes simplex virus encephalitis in human UNC-93B deficiency // *Science.* 2006. Vol. 314. P. 308–312.
13. Chuang T. H., Ulevitch R. J. Cloning and characterization of a sub-family of human toll-like receptors: hTLR7, hTLR8 and hTLR9 // *Eur. Cytokine Netw.* 2000. Vol. 11. P. 372–378.
14. Coutinho A., Meo T. Genetic Basis for Unresponsiveness to Lipopolysaccharide in C57BL/10Cr mice // *Immunogenetics.* 1978. Vol. 7. P. 17–24.
15. Curtis D. J. Modifier screens in the mouse: time to move forward with reverse genetics // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2004. Vol. 101. P. 7209–7210.
16. Diebold S. S., Kaisho T., Hemmi H., Akira S., Sousa R. Innate antiviral responses by means of TLR7-mediated recognition of single-stranded RNA // *Science.* 2004. Vol. 303. P. 1529–1531.
17. Dietrich W. F., Damron D. M., Isberg R. R., Lander E. S., Swanson M. S. *Lgn1*, a gene that determines susceptibility to *Legionella pneumophila*, maps to mouse chromosome 13 // *Genomics.* 1995. Vol. 26. P. 443–450.
18. Diez E., Lee S. H., Gauthier S., Yaraghi Z., Tremblay M., Vidal S., Gros P. Bircle is the gene within the *Lgn1* locus associated with resistance to *Legionella pneumophila* // *Nat. Genet.* 2003. Vol. 33. P. 55–60.
19. Dyson A., Singer M. Animal models of sepsis: why does preclinical efficacy fail to translate to the clinical setting? // *Crit. Care. Med.* 2009. Vol. 37. P. S30–37.
20. Farhat K., Riekenberg S., Heine H., Debarry J., Lang R., Mages J., Buwitt-Beckmann U., Roschmann K., Jung G., Wiesmuller K. H., Ulmer A. J. Heterodimerization of TLR2 with TLR1 or TLR6 expands the ligand spectrum but does not lead to differential signaling // *J. Leukoc. Biol.* 2008. Vol. 83. P. 692–701.
21. Forbes J. R., Gros P. Iron, manganese, and cobalt transport by Nramp1 (Slc11a1) and Nramp2 (Slc11a2) expressed at the plasma membrane // *Blood.* 2003. Vol. 102. P. 1884–1892.
22. Fortin A., Abel L., Casanova J. L., Gros P. Host genetics of mycobacterial diseases in mice and men: forward genetic studies of BCG-osis and tuberculosis // *Annu. Rev. Genomics Hum. Genet.* 2007. Vol. 8. P. 163–192.
23. Frehel C., Canonne-Hergaux F., Gros P., De Chastellier C. Effect of Nramp1 on bacterial replication and on maturation of *Mycobacterium avium*-containing phagosomes in bone marrow-derived mouse macrophages // *Cell Microbiol.* 2002. Vol. 4. P. 541–556.
24. Girardin S. E., Sansonetti P. J., Philpott D. J. Intracellular vs extracellular recognition of pathogens-common concepts in mammals and flies // *Trends Microbiol.* 2002. Vol. 10. P. 193–199.
25. Govoni G., Canonne-Hergaux F., Pfeifer C. G., Marcus S. L., Mills S. D., Hackam D. J., Grinstein S., Malo D., Finlay B. B., Gros P. Functional expression of Nramp1 in vitro in the murine macrophage line RAW264.7 // *Infect Immun.* 1999. Vol. 67. P. 2225–2232.
26. Gruenheid S., Gros P. Forward genetic dissection of innate response to infection in inbred mouse strains: selected success stories // *Clin. Exp. Immunol.* 2007. Vol. 162. P. 393–401.
27. Gruenheid S., Pinner E., Desjardins M., Gros P. Natural resistance to infection with intracellular pathogens: the Nramp1 protein is recruited to the membrane of the phagosome // *J. Exp. Med.* 1997. Vol. 185. P. 717–730.
28. Hashimoto C., Hudson K. L., Anderson K. V. The Toll gene of *Drosophila*, required for dorsal-ventral embryonic polarity, appears to encode a transmembrane protein // *Cell.* 1988. Vol. 52. P. 269–279.
29. Hemmi H., Takeuchi O., Kawai T., Kaisho T., Sato S., Sanjo H., Matsumoto M., Hoshino K., Wagner H., Takeda K., Akira S. A Toll-like receptor recognizes bacterial DNA // *Nature.* 2000. Vol. 408. P. 740–745.
30. Iversen A. C., Steinkjer B., Nilsen N., Bohnhorst J., Moen S. H., Vik R., Stephens P., Thomas D. W., Benedict C. A., Espevik T. A proviral role for CpG in cytomegalovirus infection // *J. Immunol.* 2009. Vol. 182. P. 5672–5681.
31. Kawai T., Akira S. The role of pattern-recognition receptors in innate immunity: update on Toll-like receptors // *Nat. Immunol.* 2005. Vol. 11. P. 373–384.
32. Kaufmann S. H. How can immunology contribute to the control of tuberculosis? // *Nat. Rev. Immunol.* 2001. Vol. 1. P. 20–30.
33. Kaufmann S. H. Immune response to tuberculosis: experimental animal models // *Tuberculosis.* 2003. Vol. 83. P. 107–111.
34. Kenny E. F., O'Neill L. A. Signalling adaptors used by Toll-like receptors: an update // *Cytokine.* 2008. Vol. 43. P. 342–349.
35. Kim H. M., Park B. S., Kim J. I., Kim S. E., Lee J., Oh S. C., Enkhbayar P., Matsushima N., Lee H., Yoo O. J., Lee J. O. Crystal structure of the TLR4-MD-2 complex with bound endotoxin antagonist Eritoran // *Cell.* 2007. Vol. 130. P. 906–917.
36. Kramnik I. Genetic dissection of host resistance to *Mycobacterium tuberculosis*: the *sst1* locus and the *Ipr1* gene // *Curr. Top. Microbiol. Immunol.* 2008. Vol. 321. P. 123–148.

37. Kramnik I., Dietrich W. F., Demant P., Bloom B. R. Genetic control of resistance to experimental infection with virulent *Mycobacterium tuberculosis* // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2000. Vol. 97. P. 8560–8565.
38. Lemaitre B., Nicolas E., Michaut L., Reichhart J. M., Hoffmann J. A. The dorsoventral regulatory gene cassette *spatzle/Toll/cactus* controls the potent antifungal response in *Drosophila* adults // *Cell*. 1996. Vol. 86. P. 973–983.
39. Ling D. I., Zwerling A. A., Steingart K. R., Pai M. Immune-based diagnostics for TB in children: what is the evidence? // *Paediatr. Respir. Rev.* 2011. Vol. 12. P. 9–15.
40. Losick V. P., Stephan K., Smirnova I., Isberg R. R., Poltorak A. A hemidominant *Naip5* allele in mouse strain MOLF/Ei-derived macrophages restricts *Legionella pneumophila* intracellular growth // *Infect Immun.* 2009. Vol. 77. P. 196–204.
41. Mackenzie J. S., Gubler D. J., Petersen L. R. Emerging flaviviruses: the spread and resurgence of Japanese encephalitis, West Nile and dengue viruses // *Nat. Med.* 2004. Vol. 10. P. 98–109.
42. Mannel D. N. Advances in sepsis research derived from animal models // *Int. J. Med. Microbiol.* 2007. Vol. 297. P. 393–400.
43. Mashimo T., Lucas M., Simon-Chazottes D., Frenkiel M. P., Montagutelli X., Ceccaldi P. E., Deubel V., Guenet J. L., Despres P. A nonsense mutation in the gene encoding 2'-5'-oligoadenylate synthetase/L1 isoform is associated with West Nile virus susceptibility in laboratory mice // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2002. Vol. 99. P. 11311–11316.
44. Netea M. G., Van Der Meer J. W., Kullberg B. J. Sepsis theory and therapies // *N. Engl. J. Med.* 2003. Vol. 348. P. 1600–1602.
45. O'Brien A. D., Rosenstreich D. L., Scher I., Campbell G. H., MacDermott R. P., Formal S. B. Genetic control of susceptibility to *Salmonella typhimurium* in mice: role of the LPS gene // *J. Immunol.* 1980. Vol. 124. P. 20–24.
46. Pan H., Yan B. S., Rojas M., Shebzukhov Y. V., Zhou H., Kobzik L., Higgins D. E., Daly M. J., Bloom B. R., Kramnik I. *Ipr1* gene mediates innate immunity to tuberculosis // *Nature*. 2005. Vol. 434. P. 767–772.
47. Payseur B. A., Place M. Prospects for association mapping in classical inbred mouse strains // *Genetics*. 2007. Vol. 175. P. 1999–2008.
48. Perelygin A. A., Scherbik S. V., Zhulin I. B., Stockman B. M., Li Y., Brinton M. A. Positional cloning of the murine flavivirus resistance gene // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2002. Vol. 99. P. 9322–9327.
49. Peters L. L., Robledo R. F., Bult C. J., Churchill G. A., Paigen B. J., Svenson K. L. The mouse as a model for human biology: a resource guide for complex trait analysis // *Nat. Rev. Genet.* 2007. Vol. 8. P. 58–69.
50. Picard C., Puel A., Bonnet M. et al. Pyogenic bacterial infections in humans with IRAK-4 deficiency // *Science*. 2003. Vol. 299. P. 2076–2079.
51. Poltorak A., He X., Smirnova I., Liu M. Y., Huffel C. V., Du X., Birdwell D., Alejos E., Silva M., Galanos C., Freudenberg M., Ricciardi-Castagnoli P., Layton B., Beutler B. Defective LPS signaling in C3H/HeJ and C57BL/10ScCr mice: mutations in *Tlr4* gene // *Science*. 1998. Vol. 282. P. 2085–2088.
52. Poltorak A., Smirnova I., Clisch R., Beutler B. Limits of a deletion spanning *Tlr4* in C57BL/10ScCr mice // *J. Endotoxin Res.* 2000. Vol. 6. P. 51–56.
53. Poltorak A., Smirnova I., He X., Liu M. Y., Van Huffel C., McNally O., Birdwell D., Alejos E., Silva M., Du X., Thompson P., Chan E. K., Ledesma J., Roe B., Clifton S., Vogel S. N., Beutler B. Genetic and physical mapping of the *Lps* locus: identification of the toll-4 receptor as a candidate gene in the critical region // *Blood Cells Mol. Dis.* 1998. Vol. 24. P. 340–355.
54. Qureshi S. T., Lariviere L., Sebastiani G., Clermont S., Skamene E., Gros P., Malo D. A High-resolution map in the chromosomal region surrounding the *Lps* locus // *Genomics*. 1996. Vol. 31. P. 283–294.
55. Ren T., Zamboni D. S., Roy C. R., Dietrich W. F., Vance R. E. Flagellin-deficient *Legionella* mutants evade caspase-1 and *Naip5*-mediated macrophage immunity // *PLoS Pathog.* 2006. Vol. 2. P. 18.
56. Rietschel E. T., Cavallion J. M. Richard Pfeiffer and Alexandre Besredka: creators of the concept of endotoxin and anti-endotoxin // *Microbes. Infect.* 2003. Vol. 5. P. 1407–1414.
57. Rittirsch D., Flierl M. A., Ward P. A. Harmful molecular mechanisms in sepsis // *Nat. Rev. Immunol.* 2008. Vol. 8. P. 776–787.
58. Russell J. A. Management of sepsis // *N. Engl. J. Med.* 2006. Vol. 355. P. 1699–1713.
59. Sangster M. Y., Helians D. B., MacKenzie J. S., Shellam G. R. Genetic studies of flavivirus resistance in inbred strains derived from wild mice: evidence for a new resistance allele at the flavivirus resistance locus (*Flv*) // *J. Virol.* 1993. Vol. 67. P. 340–347.
60. Sangster M. Y., Urosevic N., Mansfield J. P., Mackenzie J. S., Shellam G. R. Mapping the *Flv* locus controlling resistance to flaviviruses on mouse chromosome 5 // *J. Virol.* 1994. Vol. 68. P. 448–452.
61. Scharf J. M., Damron D., Frisella A., Bruno S., Beggs A. H., Kunkel L. M., Dietrich W. F. The mouse region syntenic for human spinal muscular atrophy lies within the *Lgn1* critical interval and contains multiple copies of *Naip* exon 5 // *Genomics*. 1996. Vol. 38. P. 405–417.
62. Skamene E. The *Bcg* gene story // *Immunobiology*. 1994. Vol. 191. P. 451–460.
63. Sultzter B. M. Genetic control of leucocyte responses to endotoxin // *Nature*. 1968. Vol. 219. P. 1253–1254.
64. Suzuki Y., Roth F. P. Systematic genetics swims forward elegantly // *Mol. Syst. Biol.* 2006. Vol. 2. P. 48.
65. Turcotte K., Loredi-Osti J. C., Fortin P., Schurr E., Morgan K., Gros P. Complex genetic control of susceptibility to *Mycobacterium bovis* (Bacille Calmette-Guerin) infection in wild-derived *Mus spretus* mice // *Genes. Immun.* 2006. Vol. 7. P. 684–687.
66. Vidal S. M., Malo D., Vogan K., Skamene E., Gros P. Natural resistance to infection with intracellular parasites: isolation of a candidate for *Bcg* // *Cell*. 1993. Vol. 73. P. 469–485.
67. Vidal S. M., Pinner E., Lepage P., Gauthier S., Gros P. Natural resistance to intracellular infections: *Nramp1* encodes a membrane phosphoglycoprotein absent in macrophages from susceptible (*Nramp1* D169) mouse strains // *J. Immunol.* 1996. Vol. 157. P. 3559–3568.
68. Warren H. S. Editorial: Mouse models to study sepsis syndrome in humans // *J. Leukoc. Biol.* 2009. Vol. 86. P. 199–201.
69. Watson J., Kelly K., Largen M., Taylor B. A. The genetic mapping of a defective LPS response gene in C3H/HeJ mice // *J. Immunol.* 1978. Vol. 120. P. 422–424.
70. Wright E. K., Goodart S. A., Gowney J. D., Hadinoto V., Endrizzi M. G., Long E. M., Sadigh K., Abney A. L., Bernstein-Hanley I., Dietrich W. F. *Naip5* affects host susceptibility to the intracellular pathogen *Legionella pneumophila* // *Current. Biology*. 2003. Vol. 13. P. 27–36.
71. Xu Y., Tao X., Shen B., Horng T., Medzhitov R., Manley J. L., Tong L. Structural basis for signal transduction by the Toll/interleukin-1 receptor domains // *Nature*. 2000. Vol. 408. P. 111–115.
72. Zhang S. Y., Jouanguy E., Ugolini S. et al. TLR3 deficiency in patients with herpes simplex encephalitis // *Science*. 2007. Vol. 317. P. 1522–1527.

УДК 547.333.4+579.23+579.25+579.66

ВЛАДИМИР ПЕТРОВИЧ АНДРЕЕВ

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

andreev@psu.karelia.ru

АННА ВЛАДИМИРОВНА ЗАЧИНЯЕВА

доктор биологических наук, старший преподаватель кафедры микробиологии, Военно-медицинская академия им. С. М. Кирова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

anvz@rambler.ru

ЛЮДМИЛА АЛЕКСАНДРОВНА РЕМИЗОВА

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

rv57@mail.ru

БАКТЕРИЦИДНЫЕ И ФУНГИЦИДНЫЕ СВОЙСТВА АЦЕТИЛЕНОВЫХ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ АММОНИЕВЫХ СОЛЕЙ

Диско-диффузионным методом показано, что моноацетиленовые четвертичные аммониевые соли обладают более слабым, но более избирательным бактерицидным и фунгицидным действием по отношению к микроорганизмам *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *Escherichia coli* ATCC 25922, *Proteus vulgaris*, *Proteus mirabilis*, *Penicillium spp.* и *Bacillus cereus*, чем не содержащий тройной связи триоктилметиламмоний иодид и диацетиленовый диоктилди(гепт-2-инил)аммоний бромид. Только триоктил(гепт-2-инил)аммоний иодид активен по отношению к *Saccharomyces cerevisiae*.

Ключевые слова: ацетиленовые четвертичные аммониевые соли, противомикробные, бактерицидные, фунгицидные свойства, дезинфекция

Среди четвертичных аммониевых соединений (ЧАС, $[R^1R^2R^3R^4N]^+X^-$) наибольшее практическое значение имеют алкилбензилдиметиламмонийхлорид, смесь равных частей алкилбензилдиметиламмонийхлорида с алкилдиметилбензиламмоний хлоридом, диоктилдиметиламмонийхлорид, дидецилдиметиламмоний хлорид, смесь октилдецилдиметиламмонийхлорида (50 %) с диоктилдиметил-аммоний-хлоридом (25 %) и дидецилдиметиламмоний хлоридом (25 %), которые входят в состав большинства современных дезинфекционных и антисептических средств [7]. Действующим веществом в средстве «ДЕЗЭФЕКТ-САНИТ» является смесь 6 четвертичных аммониевых солей, суммарное содержание которых составляет 3,8 %. В состав смеси этих ЧАС входят октилдецилдиметиламмоний хлорид (30,0 %), тетрадецилдиметил бензиламмоний хлорид (20,0 %), додецилдиметил бензиламмоний хлорид (16,0 %), диоктилдиметиламмоний хлорид (15,0 %), дидецилдиметиламмоний хлорид (15,0 %) и гексадецилдиметил бензиламмоний хлорид (4,0 %) [11].

Согласно [12], среднегодовые темпы роста спроса на дезинфекционные и антисептические средства из группы ЧАС в промышленно развитых странах составляют 6–7 %, причем в настоящее время наблюдается отчетливая тенденция возрастания объемов потребления препаратов, в состав которых они входят в смеси с другими активно действующими веществами (АДВ) аль-

дегидами, производными гуанидина, алкиламинами, пероксисоединениями, спиртами и др.

Первым комплексным препаратом широкого спектра действия стало дезинфицирующее средство «Лизафин», зарегистрированное в РФ в 1999 году. Оно обладает антимикробной активностью в отношении Gr^+ и Gr^- бактерий (в том числе возбудителей внутрибольничных инфекций, микобактерий туберкулеза, чумы и холеры), грибов рода *Candida* и *Trichophyton*, вирусов – возбудителей гепатита, полиомиелита и других энтеровирусных, аденовирусных инфекций, вирусов группы *Herpesviridae*, ВИЧ-ассоциированных инфекций. В качестве действующих веществ в состав препарата были введены алкилдиметилбензиламмоний хлорид, глутаровый альдегид и глиоксаль. Основными достоинствами альдегидов являются шадящее действие на объекты и наличие антимикробной активности в отношении всех видов микроорганизмов за счет алкилирования amino-, карбоксильных и сульфгидрильных групп протеинов и других органических соединений и подавления синтеза последних.

ЧАС проявляют сравнительно узкий спектр противомикробной активности: они эффективны в отношении возбудителей кишечных и воздушно-капельных инфекций бактериальной этиологии, грибов, некоторых вирусов, однако недостаточно активны в отношении культур *Proteus vulgaris*, *Proteus morganii*, *Proteus*

mirabilis, что существенно ограничивает возможности их применения для профилактики нозокомиальных инфекций. По данным [30], около 89,5 % госпитальных штаммов микроорганизмов рода *Proteus* резистентны к ЧАС. Имеют место случаи нозокомиальных инфекций (сепсис с высоким процентом летальности), которые связаны с использованием в клинике растворов ЧАС, контаминированных культурами *Proteus mirabilis* [29]. Большинство препаратов этой группы не активны в отношении вирусов, споровых форм бактерий и микобактерий туберкулеза [7], [25], [32]. В экспериментальных и клинических условиях установлена гетерогенность чувствительности популяций бактерий к ЧАС. В частности, бактериальные клетки одного штамма *Escherichia coli*, находящиеся на разных стадиях онтогенетического развития, проявляют неодинаковую чувствительность к препаратам этой группы. Переход культуры из экспоненциальной к стационарной фазе роста сопровождается уменьшением гидрофобности и повышением содержания липополисахаридов во внешней мембране клеток, которые защищают цитоплазматическую мембрану от дезорганизации под влиянием ЧАС [10]. Экспоненциальные клетки Gr^+ микроорганизмов (*B. cereus*), наоборот, уступают в чувствительности к ЧАС клеткам, которые находятся в стационарной фазе роста [7].

Учитывая сравнительно узкий спектр противомикробной активности, дезинфекционные средства из группы ЧАС применяют для дезинфекции ограниченного круга объектов в учреждениях здравоохранения – поверхностей помещения (стены, пол, окна, двери, оконные стекла), предметов обстановки, медицинских приборов, оборудования и аппаратов с лакокрасочным, гальваническим и полимерным покрытием, предметов ухода за больными, нательного и постельного белья, однако их не используют для дезинфекции хирургического и стоматологического инструментария вследствие ограниченного спектра противомикробной активности ЧАС [27]. Многочисленные экспериментальные исследования и клинические наблюдения свидетельствуют о быстром формировании и распространении резистентных к ЧАС бактерий в учреждениях здравоохранения и окружающей среде. Например, чувствительность клинических изолятов *Staphylococcus aureus* к препаратам из группы бис-четвертичных аммониевых соединений (декаметоксин, этоний) на протяжении 10-летнего периода снизилась в 2–10 раз [7]. Это обусловлено недостаточно обоснованным применением одних и тех же препаратов из группы ЧАС в учреждениях здравоохранения, ветеринарии, пищевой и перерабатывающей промышленности, в быту. Дезинфекцию объектов (емкости, коммуникации, трубопроводы и др.) в таких отраслях пищевой промышленности, как

пиво-безалкогольная, молочная, кондитерская, выполняют объемным способом – заполняют их рабочим раствором дезинфекционного средства с последующим сбросом в канализационную систему. Такой способ дезинфекции обуславливает поступление значительных количеств ЧАС в объекты внешней среды (вода водоемов, почва) и селекцию устойчивых к ним вариантов микроорганизмов.

Таким образом, существующий ассортимент средств дезинфекции из группы ЧАС не полностью отвечает современным требованиям к свойствам препаратов этой группы по таким критериям, как универсальность (применяют для дезинфекции сравнительно узкого круга объектов), узкий спектр противомикробной активности, сравнительно быстрое формирование и распространение резистентных к ЧАС видов микроорганизмов.

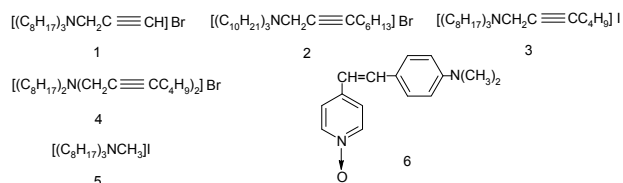
Целью данной работы явился поиск новых типов ЧАС, у которых отсутствуют отмеченные недостатки.

Хорошо известно, что к основным элементам структуры, обуславливающим противомикробные свойства ЧАС, относятся гидрофильные полярные четвертичные аммониевые группы и гидрофобные углеводородные радикалы [7]. Соединения, содержащие короткоцепочечные углеводородные радикалы у атома четвертичного азота, проявляют умеренные противомикробные свойства или лишены их. Увеличение количества атомов углерода в радикале до восьми приводит к появлению поверхностной активности и вместе с ней противомикробных свойств. Активность повышается при введении в структуру ЧАС ненасыщенных углеводородных радикалов [28], асимметричного атома азота [15], простых эфирных связей [7]. Среди моночетвертичных аммониевых солей максимальную активность, как правило, проявляют соединения, которые содержат 12–16 атомов углерода в радикале [14], [17]. Дальнейшее удлинение углеводородной цепи приводит к снижению активности [22]. Согласно [8], противомикробные свойства ЧАС коррелируют с поверхностной активностью. Эти соединения концентрируются на поверхности раздела фаз «раствор : поверхность клетки бактерий», встраиваются в цитоплазматическую мембрану с последующими изменениями конформации мембранных липидов, что приводит к повышению проницаемости цитоплазматической мембраны.

Токсичность ЧАС, наоборот, находится в обратном пропорциональной зависимости от длины углеводородной цепи – уменьшается по мере того, как увеличивается количество атомов углерода в радикале. Кроме того, алифатические ЧАС менее токсичны, чем циклические [21], а ацетиленовые соединения менее токсичны, чем олефиновые, и особенно алифатические [1].

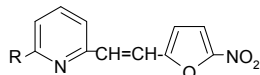
В литературе отмечаются особые свойства четвертичных аммониевых солей, содержащих длинноцепной ацетиленовый радикал, в частности их повышенная бактерицидная активность [16]. Поэтому мы поставили задачу выяснить влияние длины и числа алкильных и алкинильных групп в ЧАС на бактерицидные и фунгицидные свойства этих веществ.

В качестве объектов исследования были выбраны следующие соединения:



Следует отметить, что ЧАС (1–4) могут быть легко синтезированы по разработанной нами методике кватернизацией триоктиламина, тридециламина и диоктил(ди-2-гептинил)амина соответствующими галогенидами пропаргильного типа в очень мягких условиях [1], [3]. Реакция между этими реагентами при комнатной температуре заканчивается в ацетонитриле за 1–2 часа, а в пентане за 1–2 суток с выходами ЧАС, близкими к количественным. Указанные моно- и диацетиленовые ЧАС содержат от 27 до 39 атомов углерода, в качестве стандарта использован алифатический аналог (5) с 25 атомами углерода.

N-оксид транс-4-(4-диметиламиностирил)пиридина (4-DPyO) был получен согласно методике [2]. Последнее соединение было выбрано нами для исследований, поскольку стирильные производные вида



$R = CH_2OCONHAc, CH_2Cl, CH_2I, CH_2OP(O)(OH)_2, CH_2NRR'$ и др.

обладают противомикробной, противодерматозной и противопротозойной активностью [13], а 4-DPyO – апоптогенной активностью [5].

Экспериментальные данные относительно чувствительности микроорганизмов к химиотерапевтическим препаратам, полученные нами диско-диффузионным методом, даны в таблице, в которой представлены все классы микроорганизмов (бактерии и грибы), имеющие эпидемиологическое значение.

К сожалению, стирильное производное N-оксида пиридина (6) оказалось неактивным по отношению ко всем видам микроорганизмов, в то время как ЧАС в зависимости от строения проявляют избирательное биологическое действие.

Следует отметить (см. таблицу), что *Proteus vulgaris* (тест-культура № 3) резистентна ко всем образцам ЧАС, а рост *Saccharomyces cerevisiae* (№ 7) подавляется только триоктилгепт-2-инил-аммониййодидом (3).

Диаметр зоны подавления роста микроорганизмов химиотерапевтическим препаратом (4-DPyO, предельные, моно- и диацетиленовые ЧАС)

Четвертичные аммониевые соли и DPyO (формула и номер согласно схеме)	Тест-культура* Диаметр зоны подавления роста микроорганизмов, мм						
	1	2	3	4	5	6	7
$[(C_8H_{17})_3NCH_2C \equiv CH]Br$ (1)	0	0	0	0	20	25	0
$[(C_{10}H_{21})_3NCH_2C \equiv CC_6H_{13}]Br$ (2)	15	15	0	0	0	0	0
$[(C_8H_{17})_3NCH_2C \equiv CC_4H_9]I$ (3)	0	0	0	15	10	12	10
$[(C_8H_{17})_2N(CH_2C \equiv CC_4H_9)_2]Br$ (4)	20	20	0	20	30	17	0
$[(C_8H_{17})_3NCH_3]I$ (5)	30	20	0	20	30	17	0
транс- $(CH_3)_2NC_6H_4CH=CHC_5H_4N \rightarrow O$ (6)	0	0	0	0	0	0	0

* *Staphylococcus aureus* – № 1, *Escherichia coli* – № 2, *Proteus vulgaris* – № 3, *Proteus mirabilis* – № 4, *Penicillium spp.* – № 5, *Bacillus cereus* – № 6, *Saccharomyces cerevisiae* – № 7.

По отношению к культурам 1–5 (триоктилпропаргил-аммоний бромид (1) на *Bacillus cereus* (№ 6) оказывает более сильное химиотерапевтическое воздействие) триоктилметиламмониййодид с алкильными группами (5) и диацетиленовый диоктилдил-2-гептиламмониййодид (4) проявляют одинаковое (за исключением культуры № 1), более сильное подавление роста культур, чем моноацетиленовые ЧАС (1–3). В то же время избирательность биологического действия последних соединений (1 – № 5, 6; 2 – № 1, 2; 3 – № 4–7) теоретически может позволить избирательно уничтожать некоторые виды микроорганизмов, не влияя на жизнеспособность других.

Особенно важным может оказаться тот факт, что ЧАС (3) подавляют рост культуры № 7, на которую не воздействуют другие исследованные в данной статье химиотерапевтические препараты. Это соединение можно было бы использовать как добавку к применяемым в настоящее время мягким дезинфицирующим средствам.

Кроме того, ввиду сравнительно быстрого формирования и распространения резистентных к ЧАС видов микроорганизмов применение ацетиленовых ЧАС, с которыми они пока не сталкивались, может привести к разработке новых эффективных бактерицидных и фунгицидных средств.

Целью нашей дальнейшей работы является синтез и исследование противомикробной активности более доступных ацетиленовых ЧАС меньшей молекулярной массы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Ацетиленовые четвертичные аммониевые соли
Синтез 1-бром-2-пропина (бромистого пропаргила)

В трехгорлую колбу, снабженную мешалкой, капельной воронкой, обратным холодильником и охлажденную до $-5^\circ C$ льдом с солью, вноси-

ли 36,5 г (0,65 моль) перегнанного пропаргилового спирта и 6 мл пиридина. К этой смеси при перемешивании по каплям прибавляли 61,6 г (0,23 моля) PBr_3 в 2 мл пиридина. Температуру реакционной смеси постепенно в течение одного часа доводили до комнатной и смесь кипятили один час на водяной бане. Затем обратный холодильник заменяли на нисходящий и отгоняли бромистый пропаргил в приемник на сухой поташ. Через некоторый промежуток времени бромистый пропаргил перегоняли еще раз. Выход – 43,3 г (56 %). $T_{\text{кип}}$ 84 °C / 760 мм рт. ст., n_D^{20} 1,4920 [1].

Синтез метилпропаргилового эфира

В трехгорлую колбу на 1 л, снабженную мешалкой, обратным холодильником и капельной воронкой, охлажденную смесью льда с солью, вносили 84 г (1,5 моля) пропаргилового спирта, 201 г (1,65 моля) диметилсульфата, 60 мл воды и прибавляли по каплям раствор едкого натра (82 г NaOH в 82 мл воды) с такой скоростью, чтобы температура реакционной смеси не превышала -15 °C. Затем продолжали перемешивание в течение 2 часов. Органический слой отделяли от водного и сушили безводным CaCl_2 . После перегонки получали 84 г (80 %) метилпропаргилового эфира. $T_{\text{кип}}$ 61–62 °C / 760 мм рт. ст., n_D^{20} 1,3965. Литературные данные: $T_{\text{кип}}$ 61–62 °C / 760 мм рт. ст., n_D^{20} 1,3975 [31].

Синтез 1-метокси-2-гептина [19]

В трехгорлую колбу на 1 л, снабженную мешалкой, обратным холодильником и капельной воронкой, охлажденную до -50 °C твердой углекислотой в эфире, наливали около 500 мл жидкого аммиака и при перемешивании вносили 500 мг $\text{Fe}(\text{NO})_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (катализатор) и 1 г металлического натрия. После перехода окраски из синей в серую в колбу вносили 23 г (1 г-атом) мелконарезанного натрия и продолжали перемешивание в течение 2 часов. Образование густой темно-серой взвеси указывает на конец превращения. Охладив колбу до -60 °C, по каплям прибавляли 70 г (1 моль) метилпропаргилового эфира, растворенного в 100 мл абсолютного эфира, и продолжали перемешивание еще в течение 1,5–2 часов. Далее охлаждали колбу до -70–75 °C и добавляли раствор 137 г (1 моль) бромистого бутила в 110 мл абсолютного эфира. Реакционную смесь оставляли на ночь для испарения аммиака и на следующий день в колбу последовательно добавляли 200 мл сухого эфира, 5 г NH_4Cl и 100 мл воды. Эфирный слой отделяли от водного, водный слой несколько раз экстрагировали эфиром, эфирные вытяжки объединяли и пропускали через них CO_2 из аппарата Кипа до нейтральной реакции. Эфирный раствор сушили безводным MgSO_4 . После удаления растворителя остаток перегоняли в вакууме. Из одного синтеза получали в среднем 81 г (65 %) 1-метокси-2-гептина. $T_{\text{кип}}$ 50–51 °C / 10 мм рт. ст., n_D^{20} 1,4320. Литературные данные: $T_{\text{кип}}$ 53–54 °C /

11 мм рт. ст., n_D^{20} 1,4300 [26], $T_{\text{кип}}$ 56–57 °C / 12 мм рт. ст., n_D^{20} 1,4320 [19].

Синтез 1-бром-2-гептина

В трехгорлую колбу на 100 мл, снабженную мешалкой, обратным холодильником и капельной воронкой, помещали 16 г (0,13 моля) бромистого ацетила и 0,25 г безводного ZnCl_2 (катализатор), по каплям при интенсивном перемешивании прибавляли 16,5 г (0,13 моля) 1-метокси-2-гептина. Реакционную смесь нагревали на водяной бане при температуре 50 °C. После прибавления эфира температуру бани поднимали до 70 °C и продолжали перемешивание в течение 1,5 часа. Далее реакционную смесь выливали в ледяную воду, органический слой отделяли, водный слой экстрагировали несколько раз эфиром. Эфирный раствор сушили безводным MgSO_4 и после отгонки растворителя остаток перегоняли в вакууме. Из одного синтеза получали 18 г (79 %) 1-бром-2-гептина.

$T_{\text{кип}}$ 69 °C / 10 мм рт. ст., n_D^{25} 1,4895. Литературные данные: $T_{\text{кип}}$ 71–73 °C / 12 мм рт. ст., n_D^{25} 1,4890 [26], $T_{\text{кип}}$ 88,7 °C / 27 мм рт. ст., n_D^{20} 1,4898 [24].

Синтез бромистого ди-н-октил-ди-(2-гептинил) аммония

Реакционную смесь, содержащую 0,034 моля 1-ди-н-октиламино-2-гептина, 0,03 моля 1-бром-2-гептина и 10 мл ацетонитрила, перемешивали при комнатной температуре в течение 3–4 часов. Ацетонитрил отмывали водой. Выделившееся масло промывали пентаном, растворяли в эфире и сушили безводным MgSO_4 . Эфир удаляли в вакууме. Выход продукта – 50 %.

Остальные ЧАС получали аналогично. В ацетофеноне реакционную смесь оставляли на ночь, в пентане реакцию проводили в течение 3–4 дней (в последнем случае нерастворимые ЧАС промывали пентаном и растворитель удаляли в вакууме).

Определение чувствительности микроорганизмов к химиотерапевтическим препаратам проводили диско-диффузионным методом [18], [20].

Для исследования использовали стандартные питательные среды: АГВ – для определения чувствительности бактерий к химиотерапевтическим препаратам, Мюллер–Хинтон с добавлением метиленового синего и глюкозы – для определения чувствительности грибов к химиотерапевтическим препаратам.

На поверхность подсушенной питательной среды в чашке Петри нанесли 1 мл исследуемой культуры (18–20-часовой бульонной культуры или стомиллионной агаровой суспензии из агаровой культуры). Диски, пропитанные насыщенными растворами исследуемых ЧАС и N-оксида в ДМСО, накладывали пинцетом на равном расстоянии друг от друга и на 2 см от края чашки. Чашки с посевами бактерий инкубировали при 35–37 °C в течение 18–20 часов. Чашки

с посевами грибов инкубировали при 22–25 °C в течение 7–10 суток.

Для учета результатов с помощью линейки измеряли диаметр зон подавления роста вокруг дисков с точностью до 1 мм.

Тест-культуры: *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *Escherichia coli* ATCC 25922, *Proteus vulgaris*, *Proteus mirabilis*, *Penicillium spp.*, *Bacillus cereus*, *Saccharomyces cerevisiae*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В. П. Молекулярные комплексы гетероароматических N-оксидов и ацетиленовых аминов с v-акцепторами как модель исследования нуклеофильности и основности соединений с пространственно доступными реакционными центрами: Дисс. ... д-ра хим. наук. Петрозаводск, 2007. 427 с.
2. Андреев В. П., Батоцыренова Е. Г., Рыжаков А. В., Родина Л. Л. Процессы внутримолекулярного переноса заряда в ряду стирильных производных N-оксидов пиридина и хинолина // ХГС. 1998. № 8. С. 1093–1102.
3. Андреев В. П., Вукс Е. М., Кочеткова Е. В., Ремизова Л. А., Фаворская И. А. Кватернизация ацетиленовых аминов 2-пропинил- и алкилгалогенидами // ЖОрХ. 1979. Т. 5. Вып. 3. С. 464–467.
4. Волкова С. В., Клементенок Е. В., Ефремова М. И. Оптимизация состава современного дезинфицирующего средства на примере препарата «Лизафин» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.petrospt.ru/articles/1/index.html>
5. Волкова Т. О., Немова Н. Н. Молекулярные механизмы апоптоза лейкозной клетки. М.: Наука, 2006. 205 с.
6. Гудзь О. В. Влияние этония на процесс дегидрирования метаболитов цикла трикарбоновых кислот культурами клетки *Escherichia coli* и *Pseudomonas aeruginosa* // Микробиологический журнал. 1985. Т. 47. № 2. С. 60–63 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.provisor.com.ua/archive/1998/N12/clin_dez.htm
7. Гудзь О. В. Итоги и перспективы клинического применения дезинфекционных средств из группы четвертичных аммониевых соединений. Совет по регламентации применения и внедрения дезинфекционных средств Минздрава Украины (г. Киев) // Провизор. 1998. Вып. 12.
8. Гудзь О. В., Писько Г. Т. Молекулярные аспекты действия поверхностно-активных веществ на микроорганизмы // Фармакология и токсикология: Республ. междувед. сборник. Киев: Здоров'я, 1983. С. 106–111.
9. Гудзь О. В., Писько Г. Т. Влияние четвертичных аммониевых соединений на функциональное состояние цитоплазматической мембраны *Escherichia coli* // Микробиологический журнал. 1988. Т. 50. № 3. С. 75–78.
10. Иванов А. Ю., Фомченков В. М. Зависимость повреждающего действия поверхностно-активных веществ на клетки *Escherichia coli* от фазы роста культуры // Микробиология. 1989. Т. 58. Вып. 6. С. 969–975.
11. Инструкция по применению средства дезинфицирующего «ДЕЗЭФЕКТ-САНИТ» на предприятиях мясной промышленности [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.dezeft.ru/san_meat_instruction.doc
12. Йоффе Б. С., Бабаян Е. П., Злотник Р. Е. Синтез и применение катионных ПАВ // Хлорная промышленность. М.: НИИТЕХИМ, 1988. 42 с.
13. Коляшнин О. А., Кормачев В. В., Митрасов Ю. Р., Братилов Б. И. N-окиси пиридина. Чебоксары: Чувашский ГУ, 1987. 95 с.
14. Крученок Т. Б. Научные основы направленного поиска новых дезинфицирующих средств и изучение механизма их действия // Проблемы дезинфекции и стерилизации. М., 1985. С. 6–13.
15. Лиманов М. О., Иванов С. Б., Крученок Т. Б. Синтез и бактерицидная активность катионных поверхностно-активных веществ, содержащих асимметричный атом азота // Хим.-фарм. журн. 1984. № 6. С. 703–706.
16. Лиманов В. Е., Эпштейн А. Е., Скворцова Е. К., Арефьева Л. И. 5-я всесоюзная конференция по химии ацетилена. Тбилиси, 1975.
17. Ляпунов Н. А., Бобылева Л. Г., Иванов Л. В., Грецкий В. М., Чуева И. Н., Рудько А. П. Исследование катионных поверхностно-активных веществ – солей алкиламидопропилдиметилбензиламмония // Фармация. 1984. Т. XXXIII. № 3. С. 26–30.
18. Медицинская микробиология / Под. ред. А. М. Королюка, В. Б. Сбойчакова. СПб., 1999. 272 с.
19. Мкрян Г. М., Гаспарян С. М., Волнина Э. А., Капелян Э. Е. Исследование в области соединений ацетиленового ряда. V. Присоединение алкилхлорметилловых эфиров к однозамещенным ацетиленовым углеводородам. Синтез алкин-2-илалкиловых эфиров // Арм. хим. журнал. 1970. Т. 23. № 5. С. 419–424.
20. МУК 4.12.1890-04. Определение чувствительности микроорганизмов к антибактериальным препаратам. М.: Минздрав России, 2004.
21. Писько Г. Т., Гудзь О. В. Зависимость между строением катиона и биологической активностью катионных поверхностно-активных веществ // Фармакология и токсикология. 1980. № 5. С. 210–215.
22. Писько Г. Т., Овчинников В. Г., Гудзь О. В., Смирнова Н. А., Тарасенко В. С. Противомикробные свойства производных гексаметилендиамина, содержащих остатки высокомолекулярных спиртов // Физиологически активные вещества. 1984. Вып. 16. С. 54–57.
23. Чернявская М. А., Павлова И. Б. Структурно-функциональные изменения клеток сферопластов эшерихий при воздействии катионного поверхностно-активного вещества // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунологии. 1983. № 2. С. 62–66.
24. Bartlett P. D., Rosen L. J. An acetylenic analog of neopentyl bromide; evidence that the hindrance to displacement reactions in neopentyl halides is steric in nature // J. Am. Chem. Soc. 1962. Vol. 64. № 3. P. 542–546.
25. Best M., Sattar S. A., Springthorpe V. S., Kennedy M. E. Efficacies of selected disinfectants against *Mycobacterium tuberculosis* // J. Clin. Microbiol. 1990. № 10. P. 2234–2239.
26. Couffignal R., Gaudemar M., Perriot P. Sur la preparation des bromures propargyliques du type R-C≡C-CH₂-Br (note de laboratoire) // Bull. Soc. Chim. Fr. 1967. № 10. P. 3909–3910.
27. Desinfektionsmittel-Liste der DGHM. Wiesbaden, 1997.
28. Kabara J. J., McKillip W. J., Sedor E. A. Ammimides. I. Antimicrobial effect of some long chain fatty acid derivatives // J. Amer. Oilchem. Soc. 1975. № 8. P. 316–317.
29. Frank M. J., Schaffner W. Contaminated Aqueous Benzalkonium Chloride an Unnecessary Hospital Infection Hazard // J. Amer. Med. Assoc. 1976. Vol. 236. № 21. P. 2418–2419.
30. Girardo P., Reverdy M. E., Martra A., Fleurette J. Determination de la concentration minimale bactericide de trois antiseptiques et un desinfectant sur S 80 souches de bacilles gram negatif d'origine hospitaliere // Pathol. Biol. 1989. № 5 bis. P. 605–611.
31. Perriot P., Gaudemar M. Sur la preparation des esters d'alcools α-acetyleniques γ-halogenes // Bull. Soc. Chim. Fr. 1968. F. 8. P. 3239–3244.
32. Russell A. D. Bacterial spores and chemical sporicidal agents // Clin. Microbiol. Rev. 1990. № 2. P. 99–119.

ЛЮБОВЬ АЛЬБЕРТОВНА НОВИКОВА

кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры медицинской биологии и генетики, Северный государственный медицинский университет (Архангельск, Российская Федерация)
lubovnovikova@mail.ru

НИКОЛАЙ СЕРГЕЕВИЧ ИШЕКОВ

доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой возрастной физиологии и валеологии (медицинских дисциплин) Института естественных наук и биомедицины, Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова (Архангельск, Российская Федерация)
doctor1@atknet.ru

АНДРЕЙ ГОРГОНЬЕВИЧ СОЛОВЬЕВ

доктор медицинских наук, профессор, заместитель директора Института ментальной медицины, Северный государственный медицинский университет (Архангельск, Российская Федерация)
asoloviev1@yandex.ru

ВЗАИМОСВЯЗЬ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА С ЦЕНТРАЛЬНОЙ И МОЗГОВОЙ ГЕМОДИНАМИКОЙ ПРИ УПОТРЕБЛЕНИИ ПИВА УЧАЩИМИСЯ 12–17 ЛЕТ

Выявлена взаимосвязь вариабельности сердечного ритма с параметрами центральной и мозговой гемодинамики у учащихся 12–17 лет, употребляющих пиво. Отмечено увеличение взаимосвязей показателей центральной и мозговой гемодинамики с симпатической активностью и ослабление с парасимпатическими влияниями вариабельности сердечного ритма.

Ключевые слова: пиво, учащиеся, вариабельность сердечного ритма, центральная и мозговая гемодинамика, реография, психоактивные вещества

Практически во всех регионах Российской Федерации с каждым годом все большее распространение получает злоупотребление психоактивными веществами (ПАВ). Наиболее распространенными среди ПАВ являются алкоголь и алкогольсодержащие напитки. В последние десятилетия отмечается тенденция к снижению возрастного порога потребителя и как следствие – растущая алкоголизация среди детей, подростков и молодежи [5], [7], [12].

Согласно исследованиям как российских, так и зарубежных авторов, алкоголь и алкогольсодержащие напитки оказывают патологическое влияние практически на все жизненно важные функции организма и являются одним из важнейших факторов риска возникновения и развития в будущем заболеваний сердечно-сосудистой системы [11], [15], [17].

Эпидемиологические исследования показывают, что большинство несовершеннолетних отдадут предпочтение относительно легким алкогольным напиткам, таким как пиво. Около 10 % учащихся ежедневно употребляют пиво, 89 % пробовали этот напиток до 16 лет, возраст первого опыта употребления пива в последние годы неуклонно снижается [3], [10].

Целью работы явилось выявление взаимосвязи вариабельности сердечного ритма с центральной и мозговой гемодинамикой у учащихся 12–17 лет, употребляющих пиво.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обследованы 280 учащихся общеобразовательных школ и колледжей г. Архангельска в возрасте от 12 до 17 лет, относящихся к первой и второй группам здоровья; все родились и постоянно проживали на территории Европейского Севера. Из обследования были исключены дети, имеющие в анамнезе заболевания сердечно-сосудистой, дыхательной, центральной и периферической нервной систем.

Обследованные были разделены на две группы: основную – 160 человек (78 мальчиков (48 %), 82 девочки (52 %)), употребляющих пиво, и контрольную – 120 человек (56 мальчиков (46 %) и 64 девочки (54%)), не употребляющих пиво. К основной группе были отнесены дети 12–17 лет, принимающие пиво с частотой два и более раз в месяц, без признаков зависимости и явного роста толерантности в соответствии с Международной классификацией болезней МКБ-10 (2000).

Согласно возрастной периодизации обследованный контингент был подразделен на две группы: 12–14 и 15–17 лет. Основная группа состояла из 30 мальчиков и 28 девочек 12–14 лет, 48 мальчиков и 54 девочек 15–17 лет. Контрольная группа – из 26 мальчиков и 28 девочек 12–14 лет, 30 мальчиков и 36 девочек 15–17 лет. Средний возраст детей 12–14 и 15–17 лет контрольной и основной групп между собой достоверно не различался.

Обследование осуществлялось через 1,5–2 часа после еды в первой половине дня в специально оборудованном кабинете с комфортным температурным режимом. Перед обследованием выдерживался период адаптации к условиям обследования в течение 5–10 минут.

Анализ вариабельности сердечного ритма (ВСР) осуществлялся при помощи системы комплексного компьютерного исследования функционального состояния организма человека «Омега-М» («Динамика», Санкт-Петербург). Расчет показателей ВСР основывался на пятиминутных массивах RR-интервалов, не содержащих экстрасистол и артефактов с их последующей математической обработкой. Показатели ВСР приведены в соответствии с рекомендуемыми стандартами Европейского кардиологического общества, Североамериканского общества электрокардиографии и разработками отечественных авторов [1], [2], [16]. Запись параметров проводилась в положении лежа на спине при спокойном дыхании.

Анализировались следующие показатели ВСР: частота сердечных сокращений (ЧСС), систолическое (САД) и диастолическое артериальное давление (ДАД, мм рт. ст.). Измерение артериального давления производили по методу Короткова. Для оценки функционального состояния вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы использовались следующие параметры: SDNN – среднеквадратическое отклонение (СКО, мс), RMSSD – среднеквадратичное различие между продолжительностью соседних кардиоинтервалов (мс), число пар кардиоинтервалов с разностью более 50 мс в процентах к общему числу кардиоинтервалов в массиве – PNN50 (%), мода значений кардиоинтервалов (Мо, мс), амплитуда моды (АМо, %), коэффициент вариации (CV, у. е.), вариационный размах (ВР, у. е.), индекс напряжения регуляторных систем (Stress index) (ИН, у. е.), мощность частотных составляющих в диапазоне высоких частот (0,15–0,4 Гц) (HF, мс²), мощность частотных составляющих в диапазоне низких частот (0,04–0,15 Гц) (LF, мс²), мощность частотных составляющих в диапазоне очень низких частот (0,003–0,04 Гц) (VLF, мс²), отношение мощности в диапазоне низких частот к мощности в диапазоне высоких частот (LF/HF) как мера баланса симпатического и парасимпатического отделов вегетативной нервной системы (ВНС), соотношение высокочастотного спектра и низкочастотного спектра (%), суммарная мощность частотных составляющих спектра (TP, мс²) [4], [13].

Реография как неинвазивная методика исследования функционального состояния сердечно-сосудистой системы осуществлялась при минимальном воздействии на организм человека высокочастотным электрическим током малой амплитуды; ее отличает физиологичность, относительная простота и стабильность регистрации [8], [9].

Для изучения центральной и мозговой гемодинамики использовался метод интегральной реографии тела (ИРГТ) по Тищенко и реоэнцефалография (РЭГ) при помощи аппаратно-программного комплекса для проведения функциональных исследований медицинской диагностической системой (МДС) «Валента+» (НПП «Нео», Санкт-Петербург, Россия) [6].

Количественную оценку ИРГТ проводили по 7 основным показателям, рассчитываемым автоматически аппаратно-программным комплексом. Для оценки функционального состояния центральной гемодинамики использованы следующие показатели: минутный объем сердца (МОК, л/мин), ударный объем крови (УОК, мл), ударный индекс (УИ, мл/с), сердечный индекс (СИ, мл/с), удельное периферическое сопротивление (УПС, мм рт. ст. · м² · мин/л), мощность наполнения левого желудочка (N, Вт), коэффициент интегральной точности (КИТ, у. е.), среднее гемодинамическое давление (СГД, мм рт. ст.).

Оценку состояния мозгового кровотока (МК) проводили в бассейне внутренних сонных (правое и левое фронтально-мастоидальные отведения – FMd и FMs) и позвоночных (правое и левое окципито-мастоидальные отведения – OMd и OMs) артерий [21]. Одновременно с РЭГ, которую проводили в фазе неглубокого выдоха, регистрировали ЭКГ во II стандартном отведении. Количественную оценку РЭГ проводили по 11 основным показателям, рассчитываемым автоматически: реографический индекс (РИ, Ом), объемный относительный пульс (Рг, %), время распространения пульсовой волны (Qa, с), время максимального систолического наполнения сосудов (α, с), время катакроды (β, с), средняя скорость наполнения (V_{ср}, Ом/с), средняя скорость быстрого наполнения (V_б, Ом/с), средняя скорость медленного наполнения (V_м, Ом/с), венозный отток (ВО, %), дикротический индекс (ДКИ, %), диастолический индекс (ДСИ, %).

Полученные данные подвергали комплексной статистической обработке с использованием электронных таблиц Excel XP для среды Windows с помощью стандартных программ математического обеспечения и STATISTICA 6.0 for Windows. При оценке достоверности различий между средними значениями двух выборочных совокупностей использовался параметрический критерий t-Стьюдента. Для исследования структуры взаимосвязей изучаемых переменных использовался корреляционный анализ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения особенностей взаимоотношений ВСР с центральной и мозговой гемодинамикой был проведен корреляционный анализ. Результаты анализа представлены в виде корреляционных моделей, показывающих зависимость центральной и мозговой гемодинамики

от ВСР, коэффициент корреляции при этом имел слабые ($r = 0,3-0,49$) и достоверные ($p < 0,001$) связи.

Корреляционная модель взаимосвязей ВСР с центральной и мозговой гемодинамикой мальчиков 12–14 лет контрольной группы существенно отличалась от модели сверстников основной группы и мальчиков 15–17 лет контрольной группы.

В основной группе мальчиков 12–14 лет показатели ВСР, такие как SDNN, BP, VLF, TP, отрицательно коррелировали с УОК и положительно – с показателем симпатической активности ИН (рис. 1а). Показатель VLF обладал отрицательной корреляцией с МОК, CV положительно коррелировал с РИ, Vcp, Vб и Vм и отрицательно – с β . Показатель Мо имел отрицательную корреляцию с ДКИ, а HF – обратную связь с ДСИ. Показатели VLF и LF/HF положительно коррелировали с РИ и Pr, а ИН – отрицательно с ДСИ.

Следовательно, в основной группе мальчиков 12–14 лет наблюдалось уменьшение числа обладавших корреляционными взаимоотношениями показателей ВСР, характеризовавшихся увеличением связей с показателями центральной гемодинамики и ослаблением связей с показателями мозговой гемодинамики, причем отмечалось усиление симпатических и ослабление парасимпатических влияний ВСР на показатели обеих гемодинамик.

Мальчики 12–14 лет контрольной группы имели связь с показателями как центральной, так и мозговой гемодинамики (рис. 1б). Показатель парасимпатической активности CV положительно коррелировал с КИТ, Vб и отрицательно – с Pr. Показатель Мо имел отрицательную корреляцию с КИТ, ДКИ, ДСИ, α и положительно – с РИ, Pr, Vcp, Vб, Vм. Остальные показатели ВСР имели средние связи только с мозговой гемодинамикой. Показатель SDNN обладал прямой связью с Vб и обратной – с ВО, ДКИ, ДСИ; CV – прямой связью с Vб и обратной –

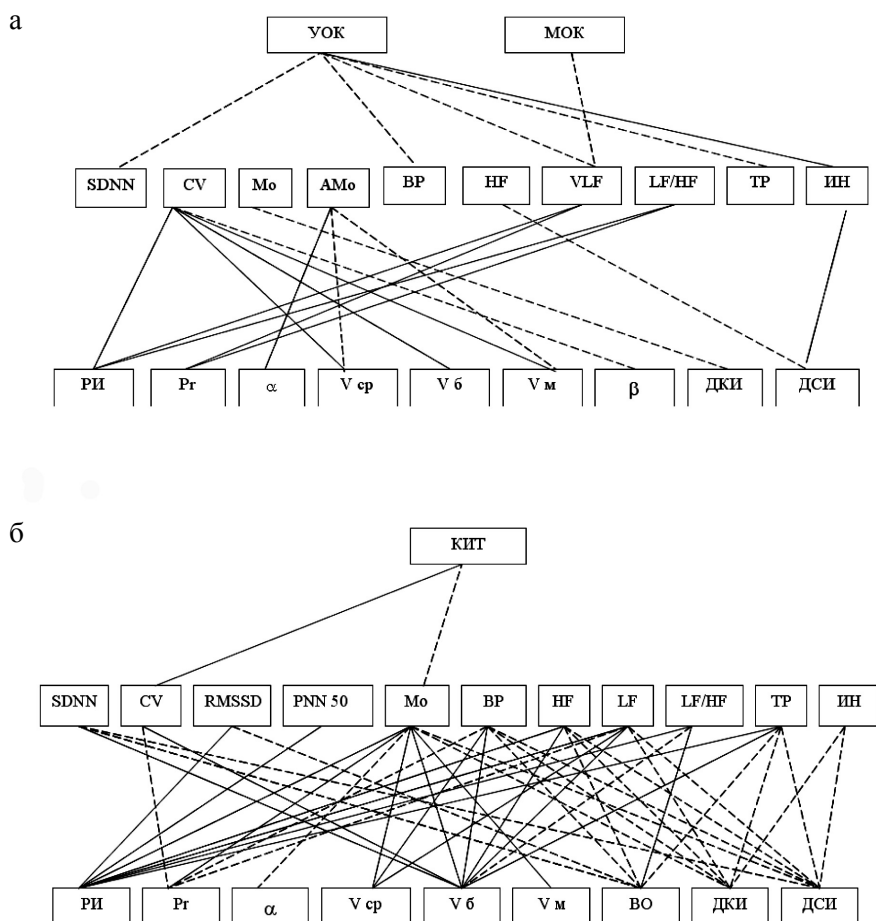


Рис. 1. Корреляционная модель взаимосвязей variability ритма сердца, центральной и мозговой гемодинамики у мальчиков 12–14 лет: а – основной группы; б – контрольной группы: здесь и далее на рис. 2–4 анализировались достоверные коэффициенты корреляции ($r \geq 0,3$; $p < 0,001$), где «—» – прямая связь, «---» – обратная связь

с Pr; RMSSD имел положительную связь с РИ и отрицательную – с ВО; PNN50 – прямую с РИ, BP – прямую с Vcp, Vб и обратную – с РИ, ВО, ДКИ, ДСИ.

Частотные характеристики ВСР HF и TP положительно коррелировали с РИ, Vб и отрицательно – с ВО, ДКИ, ДСИ, а LF – отрицательно с Pr, ДКИ, ДСИ и положительно – с Vcp, Vб. LF/HF положительно коррелировал с РИ и ВО, отрицательно – с Vб. Показатель симпатической активности ИН имел отрицательную корреляцию с ДКИ и ДСИ. Итак, у мальчиков в контрольной группе наблюдалось уменьшение числа связей показателей ВСР с центральной гемодинамикой и увеличение отношений с показателями мозговой гемодинамики.

В основной группе у мальчиков 15–17 лет корреляционных взаимосвязей по вышеперечисленным методикам не обнаружено.

В контрольной группе мальчиков 15–17 лет показатель Мо обладал отрицательными корреляциями с МОК, КИТ и положительными – с N, РИ, Pr, α , Vcp, Vб, Vм. Обратная корреляция наблюдалась у VLF и МОК, а также у LF/HF и СИ, прямая – у LF/HF и N. Показатели симпатической активности АМо и ИН прямо коррелировали с МОК, при этом АМо имел отрицательную корреляцию с РИ, Vcp и положительную – с Qa (рис. 2). Показатель парасимпатической активности SDNN обладал прямой связью с РИ и Vcp. RMSSD, PNN50, HF имели положительную корреляцию с РИ, Vcp, Vб, Vм. Следовательно, у мальчиков 15–17 лет контрольной группы наблюдалось как увеличение связей с показателями центральной гемодинамики, так и уменьшение – с показателями мозговой гемодинамики в сравнении с мальчиками 12–14 лет.

Корреляционный анализ показателей ВСР с центральной и мозговой гемодинамикой у девочек 12–14 и 15–17 лет сравниваемых групп выявил взаимосвязь параметров, свидетельствующих о существовании средних корреляционных связей между сравниваемыми данными. В основной группе девочек значительно возросло количество взаимосвязей ВСР с показателями центральной гемодинамики и уменьшилось – с показателями мозговой.

У девочек 12–14 лет основной группы корреляционный анализ выявил значительно большее количество связей с центральной гемодинамикой (рис. 3а). Наблюдалось снижение доли связей с мозговой гемодинамикой и числом взаимодействий ВСР, характеризующих парасимпатическую активность. Для SDNN, PNN50, LF были характерны прямые связи с УОК. Показатели АМо, VLF, ИН находились в обратном взаимодействии с УОК, МОК, УИ. Положительная корреляция наблюдалась у HF с МОК и BP с УИ, а отрицательная была характерна для VLF и СИ, ИН и N. Показатели SDNN, BP, ИН также имели прямую связь с ДКИ, CV – прямую связь с ДКИ и обратную – с Vб и ВО. Для LF были характерны положительные взаимосвязи с ДКИ, ДСИ и отрицательные – с Pr и Vб.

Для девочек контрольной группы 12–14 лет были характерны следующие особенности: у параметров SDNN, BP, HF, LF, VLF, TP нами была отмечена отрицательная корреляция с МОК; у таких показателей, как SDNN, PNN50, Мо, BP, HF, TP, наблюдалась обратная корреляция с N, у АМо и ИН – прямая связь с N (рис. 3б). Показатели CV и LF имели прямые взаимосвязи с Qa. Показатели парасимпатической активности RMSSD и PNN50 были положительно связаны

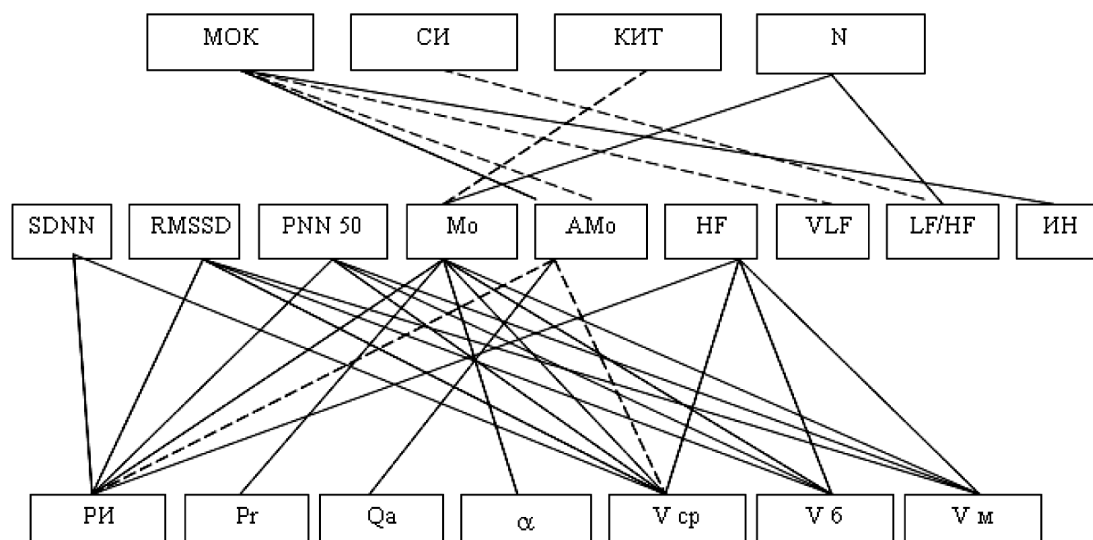


Рис. 2. Корреляционная модель взаимосвязей вариабельности ритма сердца, центральной и мозговой гемодинамики у мальчиков 15–17 лет контрольной группы

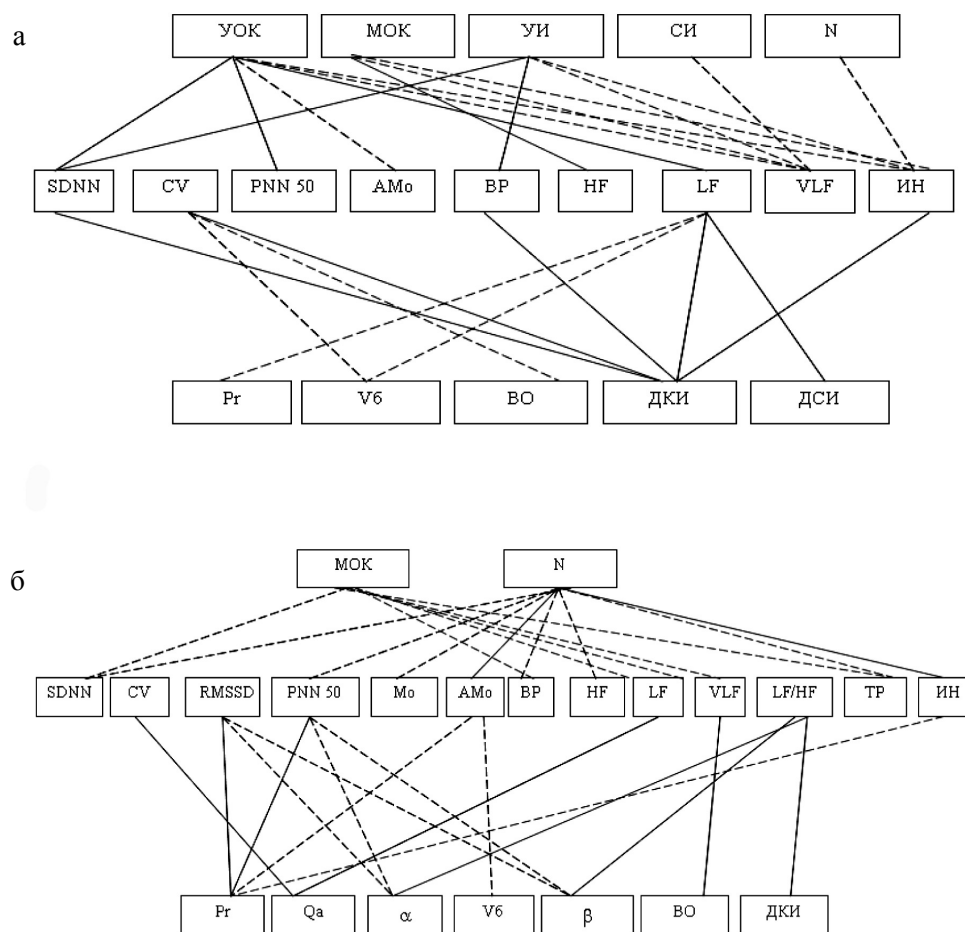


Рис. 3. Корреляционная модель взаимосвязей variability ритма сердца, центральной и мозговой гемодинамики у девочек 12–14 лет: а – основной группы; б – контрольной группы

с Pr и отрицательно – с α и β . Для AMo были характерны обратные взаимосвязи с Pr и V6, а ИИ обратно коррелировал с Pr. Также нами были отмечены положительные корреляции VLF и BO, LF/HF и Pr, ДКИ.

У девочек 15–17 лет основной группы были отмечены следующие взаимосвязи: SDNN, CV, VLF, TP имели прямую связь с показателем центральной гемодинамики СИ, в то же время для VLF была характерна прямая корреляция с УОК, МОК, УИ и обратная – с УПС (рис. 4а). Показатели вагусной активности SDNN, CV, RMSSD BP, HF и TP положительно коррелировали с ДКИ, ДСИ и отрицательно – с BO. Показатель PNN50 имел положительную корреляцию с ДКИ и отрицательную – с BO; Mo положительно коррелировал с BO. Прямыми взаимосвязями обладали LF с ДКИ и ДСИ, VLF – с ДКИ. Показатель AMo, отражающий симпатическую активность, имел прямую корреляцию с BO и обратную – с ДКИ и ДСИ. Показатель ИИ положительно коррелировал с BO и ДКИ.

Девочкам 15–17 лет контрольной группы были свойственны следующие корреляционные взаимодействия (рис 4б). Показатель VLF имел прямую связь с УПС, а AMo – прямую корреляцию с BO. Мода прямо коррелировала с β , ДСИ и обратно – с Pr, Vcp, V6, Vm. Для LF/HF были характерны прямые взаимосвязи с Pr, Vcp, V6, Vm.

Таким образом, у мальчиков и девочек, употребляющих пиво, наблюдается уменьшение диапазона параметров variability сердечного ритма, обладающих стойкими корреляционными взаимоотношениями. Отмечается значительно большее количество положительных и отрицательных связей с параметрами центральной гемодинамики и снижение доли взаимосвязей с параметрами мозговой гемодинамики, а также увеличение взаимосвязей с симпатической активностью и ослабление парасимпатических влияний variability сердечного ритма на показатели центральной и мозговой гемодинамики.

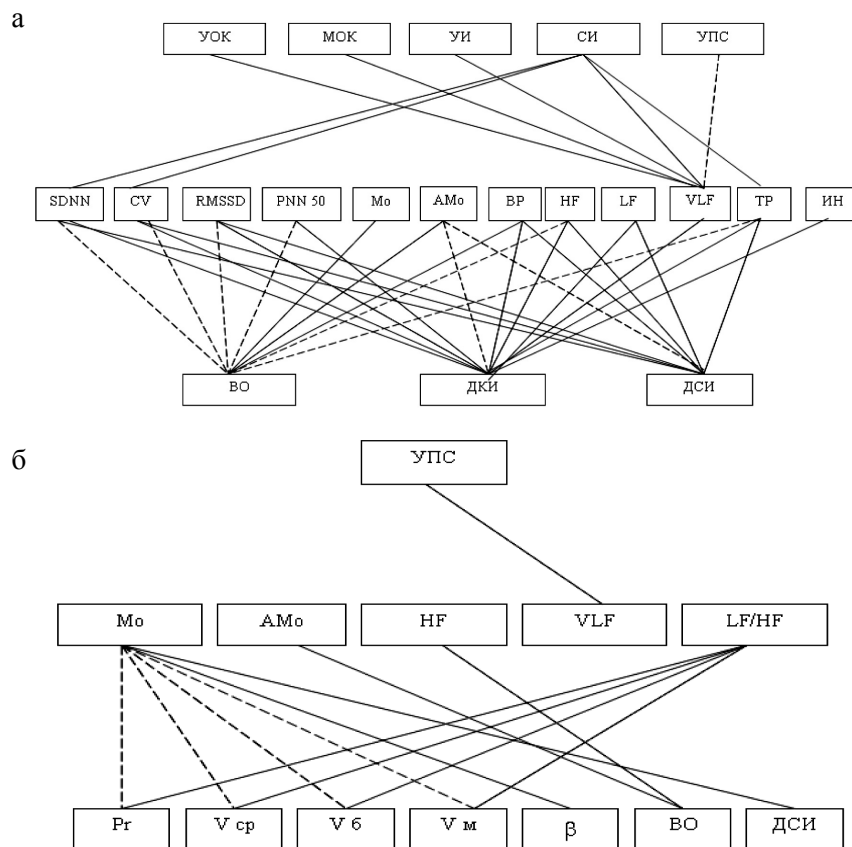


Рис. 4. Корреляционная модель взаимосвязей variability ритма сердца, центральной и мозговой гемодинамики у девочек 15–17 лет: а – основной группы; б – контрольной группы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баевский Р. М., Кириллов О. И., Клецкин С. З. Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе. М.: Наука, 1984. 225 с.
2. Баевский Р. М., Иванов Г. Г. Variability сердечного ритма: теоретические аспекты и возможности клинического применения // Ультразвуковая и функциональная диагностика. 2001. № 3. С. 106–127.
3. Буркин М. М. Транскультуральные исследования аддитивного поведения подростков Карелии и Финляндии // Наркология. 2002. № 7. С. 17–19.
4. Ибатов А. Д. Variability ритма сердца при ортопробе и показатели центральной гемодинамики у больных ишемической болезнью сердца с сопутствующей артериальной гипертензией // Российский кардиологический журнал. 2004. № 1 (45). С. 13–18.
5. Иванов А. Г. Некоторые аспекты употребления алкогольных напитков подростками и молодежью // Российский медицинский журнал. 2004. № 2. С. 12–14.
6. Комплекс аппаратно-программный для проведения функциональных исследований ЭКГ, РЕО, ФДР «Валента+». Инструкция по медицинскому применению. СПб., 2007. 173 с.
7. Кошкина Е. А., Крижанова В. В. Особенности распространенности наркологических расстройств в Российской Федерации в 2005 г. // Вопросы наркологии. 2006. № 2. С. 50–59.
8. Кузьмин В. В., Мазуров В. Д., Кузьмин В. Ф. Математический метод оценки точности неинвазивного определения ударного объема сердца // Клиническая анестезиология и реаниматология. 2008. Т. 5. № 4. С. 37–41.
9. Лебедев В. П. Физиология кровообращения. Регуляция кровообращения. Л.: Наука, 1986. 25 с.
10. Леонтьева М. В. Распространенность алкоголя и табака в образовательной среде Архангельской области // Бюллетень СГМУ. 2008. № 2. С. 86–88.
11. Нечаев А. К. Потребление алкоголя и смертность от сердечно-сосудистых заболеваний // Вопросы наркологии. 1992. № 3–4. С. 86–91.
12. Новикова Г. А., Соловьев А. Г. Психосоциальные характеристики подростков с высокой степенью риска развития пивной зависимости // Вопросы современной педиатрии. 2009. № 1. С. 25–29.
13. Новикова Л. А., Ишеков Н. С. Оценка variability сердечного ритма у несовершеннолетних при пивной алкоголизации // Экология человека. 2009. № 11. С. 20–24.
14. Симоненко В. Б., Чокотов А. В., Фисун А. Я. Функциональная диагностика. М.: Медицина, 2005. 304 с.
15. Groot L. C., Zock P. L. Moderate alcohol intake and mortality // Nutrition Reviews. 1998. № 56 (1). P. 25–30.
16. Heart Rate Variability. Standards of measurements physiological interpretation and clinical use / Task force of the European society of Cardiology and the North American society of Pacing and Electrophysiology circulation // Heart Rate Variability. 1996. Vol. 93. P. 1043–1065.
17. Keil U., Liese A., Filipiak B., Swales J. D., Grobbee D. E. Alcohol, blood pressure and hypertension // Novartis Found Symp. 1998. Vol. 216. P. 125–144.

НАДЕЖДА ЛЕОНИДОВНА РЯБКОВА

кандидат медицинских наук, ассистент кафедры госпитальной терапии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

nadl-ryabkova@yandex.ru

НАТАЛЬЯ НИКОЛАЕВНА ВЕЗИКОВА

доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой госпитальной терапии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

vezikov23@mail.ru

ВАДИМ АЛЕКСАНДРОВИЧ РЯБКОВ

кандидат медицинских наук, ассистент кафедры госпитальной терапии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

ryabkov@onego.ru

АКТИВНОСТЬ ВОСПАЛИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПРИ РЕВМАТОИДНОМ АРТРИТЕ В УСЛОВИЯХ КОМОРБИДНЫХ ИНФЕКЦИЙ

Изучена динамика острофазовых показателей, ряда цитокинов и неоптерина при коморбидных инфекциях на фоне ревматоидного артрита. Санация инфекционного очага сопровождалась достоверным снижением концентрации ряда острофазовых параметров и неоптерина в сыворотке крови. Коморбидные инфекции индуцируют избыточную продукцию цитокинов, острофазовых белков у больных ревматоидным артритом, влияя таким образом на активность воспаления и ускоряя развитие осложнений заболевания.

Ключевые слова: ревматоидный артрит, коморбидные инфекции, цитокины, неоптерин

ВВЕДЕНИЕ

Ревматоидный артрит (РА) – центральная проблема современной ревматологии, что объясняется его распространенностью, поражением людей любого возраста, в том числе наиболее трудоспособного, тяжестью болезни, тенденцией к неуклонному прогрессированию и частым инвалидизированием [12].

Инфекционная патология при РА имеет особую важность как коморбидное состояние, развивающееся у больных РА в 1,5 раза чаще, чем в популяции [12], что нередко объясняют снижением иммунной защиты, обусловленным самим основным заболеванием и применением препаратов с иммуносупрессивным действием [7], [17], [20], [21]. Коморбидные инфекции (КИ) оказывают значимое влияние на продолжительность жизни у данной категории пациентов, являясь второй по частоте причиной смерти после кардиоваскулярной патологии [4], [6]. Кроме того, РА и КИ имеют ряд сходных клинико-лабораторных проявлений, что объясняется развитием неспецифических реакций организма, отражающих процесс воспаления. Так, участие фактора некроза опухоли-альфа (ФНО- α), индуцирующего синтез интерлейкина (ИЛ)-1 β , ИЛ-6, неоптерина и ряда других биологически активных субстанций, доказано в развитии как РА [5], [22], так и инфекционных процессов [14], [19], [21].

Целью исследования было изучить особенности клинических проявлений, а также динамику острофазовых показателей и ряда имму-

нологических маркеров воспаления при КИ на фоне РА для уточнения возможного влияния бактериальной инфекции на скорость прогрессирования эрозивного процесса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследование включено 46 пациентов ревматологического отделения ГУЗ «Республиканская больница им. В. А. Баранова» (Республика Карелия, г. Петрозаводск) с достоверным РА, установленным на основании критериев Американской коллегии ревматологов [16]. Среди них 35 (76,0 %) женщин и 11 (24,0 %) мужчин в возрасте от 23 до 86 лет (в среднем $56,96 \pm 15,40$ года) с длительностью болезни от 5 месяцев до 28 лет (в среднем $8,55 \pm 6,93$ года). Серопозитивный вариант диагностирован у 34 (74,0 %) больных. Рентгенологическая стадия I по Штейнброкеру констатирована у 3 (6,5 %) пациентов, II – у 12 (26,1 %), III – у 18 (39,1 %), IV – у 13 (28,3 %). Минимальную степень активности РА имели 7 (15,2 %) больных, умеренную – 16 (34,8 %), высокую – 23 (50,0 %). Внесуставные проявления отмечены у 20 (43,5 %) пациентов, из них ревматоидные узелки – у 5 (10,1 %), полинейропатия – у 3 (6,5 %), васкулит – у 4 (8,7 %), амилоидоз почек – у 3 (6,5 %), снижение веса – у 1 (2,0 %), сухой кератоконъюнктивит – у 2 (4,3 %), тромбоцитоз (тромбоциты более 400 г/л) – у 10 (21,7 %), анемия – у 14 (30,4 %). Установлено 3 случая особых клинических форм РА: синдром Фелти – 2 случая, болезнь Стилла взрослых – 1 случай.

На момент включения в исследование терапию нестероидными противовоспалительными препаратами (НПВП) получали 39 больных, базисными противовоспалительными средствами (БПВС) регулярно на протяжении 2 и более месяцев – 21 (45,6 %) пациент (средняя продолжительность непрерывного приема – $27,26 \pm 22,10$ месяца). В качестве БПВС чаще всего использовался метотрексат: у 13 больных в дозе 7,5–20 мг/нед. (в среднем $14,04 \pm 4,02$ мг/нед.). Сульфасалазин получали 3 пациента в дозе 2000–2500 мг/сут., лефлуномид – 2 пациента в дозе 10 мг/сут., далагил – 2 пациента в дозе 250 мг/сут. В исследуемой группе одной больной проводилась терапия инфликсимабом по стандартной схеме в комбинации с метотрексатом в дозе 7,5 мг/нед. на протяжении 6 месяцев. Коррекция базисной противовоспалительной терапии во время исследования не проводилась. Исключением явились 4 пациента, которым потребовалась отмена БПВС до санации очага инфекции. Кроме того, на момент диагностики бактериальной инфекции 6 (13,0 %) человек получали глюкокортикостероиды (ГКС) в дозе 5–15 мг/сут. в пересчете на преднизолон (в среднем $9,17 \pm 3,80$ мг/сут.). Внутрисуставное введение ГКС в течение 12 месяцев до выявления очага инфекции выполнялось 8 (17,4 %) больным.

Диагностика бактериальных инфекций и эмпирическая антибактериальная терапия осуществлялись на основании принципов, изложенных в руководствах по рациональной антимикробной терапии [13], [15]. Критериями исключения явились сопутствующая вирусная инфекция, туберкулез и онкопатология. Всем пациентам выполнялось бактериологическое исследование с определением чувствительности флоры к антибиотикам диско-диффузионным методом при диагностике очага инфекции и после курса антимикробной терапии с целью оценки ее эффективности.

У 25 (54,3 %) пациентов выявлялись инфекции мочевыводящих путей, у 13 (28,3 %) больных – инфекции респираторного тракта. У 40 (87,0 %) пациентов инфекция возникла вне стационара.

Всем больным на фоне бактериальной инфекции и после ее санации выполнялась гемограмма, определялся уровень в сыворотке крови фибриногена, ревматоидного фактора (РФ), циркулирующих иммунных комплексов (ЦИК), С-реактивного белка высокочувствительным методом (hsCRP). У 15 пациентов в сыворотке крови определен ИЛ-1 β , у 21 – ИЛ-6, у 18 – неоптерин.

Уровень РФ в сыворотке крови определялся с использованием метода латекс-агглютинации, ЦИК – метода фотометрии. Количественное измерение hsCRP в сыворотке крови осуществлялось с помощью высокочувствительного иммунометрического теста на анализаторе IMMULITE. Количество ИЛ-1 β , ИЛ-6 и неоптерина

оценивалось с помощью иммуноферментного анализа на сенсорном иммуноферментном анализаторе Sunrise (TECAN Austria GmbH) с использованием тест-систем фирмы «Biosource Europe S. A.» (Бельгия) при определении ИЛ-1 β и ИЛ-6 и тест-системы фирмы «IBL-Hamburg» (Германия) при определении неоптерина. Минимально определяемыми концентрациями, согласно методикам измерений, были 1,0 пг/мл (ИЛ-1 β), 2,0 пг/мл (ИЛ-6), 0,7 нмоль/л (неоптерин).

Результаты исследования обрабатывались с помощью IBM-совместимого компьютера с процессором Pentium с использованием пакета статистических программ Statistica 6.0. Перед проведением статистического анализа количественные признаки проверялись на нормальность распределения с помощью критерия Шапиро – Уилка. Для нормально распределенных признаков определялись средние величины и стандартное отклонение ($M \pm s$, где M – среднее арифметическое, s – стандартное отклонение), для признаков, распределенных отлично от нормального, приведены медиана и интерквартильный размах ($A (L-H)$, где A – медиана, L – нижний квартиль, H – верхний квартиль). Статистический анализ проводился непараметрическими методами: сравнение методами Манна – Уитни (для 2 независимых групп), Вилкоксона (для 2 зависимых групп), Краскела – Уоллиса (для 3 независимых групп) и анализ корреляции методом Спирмена.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Типичные клинические проявления инфекции из 46 пациентов присутствовали лишь у 28 (60,9 %), лихорадка была отмечена у 13 (28,3 %) человек, лейкоцитоз и омоложение лейкоцитарной формулы наблюдались у 12 (26,0 %) и 15 (32,6 %) больных соответственно. Характерной особенностью группы пациентов без типичных клинических проявлений явилось преобладание в ее структуре инфекций мочевыводящих путей.

При санации инфекционного очага выявлено достоверное снижение ряда лабораторных показателей, среди которых можно выделить количество тромбоцитов (на фоне инфекции – 291,0 (221,0–388,0) г/л, после лечения – 256,5 (184,0–309,1) г/л), уровень фибриногена (5,7 (4,0–7,1) г/л и 4,6 (4,0–5,9) г/л), ЦИК ($0,162 \pm 0,103$ и $0,138 \pm 0,073$) и неоптерина (21,92 (13,62–48,85) и 19,15 (12,56–24,20) нмоль/л) (см. таблицу). Выявлено также снижение hsCRP по мере санации очага инфекции, однако достоверной динамики не отмечено, что может объясняться небольшим размером выборки, а также повышением активности РА ввиду отмены БПВС у ряда пациентов.

Полученные данные свидетельствуют об активации тромбоцитарного и коагуляционного звеньев гемостаза на фоне КИ, риске формирования эндотелиальной дисфункции [10], что может способствовать нарушению микроциркуляции у больных РА, индукции атеротромбоза

и повышению вероятности развития кардиоваскулярных и цереброваскулярных расстройств [8], [18]. Особое значение данные нарушения приобретают при стертом течении инфекций в связи с затруднением своевременной диагностики и как следствие – затяжным течением.

Динамика лабораторных показателей

Показатель	На фоне инфекции	После санации очага инфекции
ИЛ-1 β , пг/мл	1,3 (1,22–1,44)	1,32 (1,13–1,49)
ИЛ-6, пг/мл	41,3 (6,43–87,3)	12,64 (2,67–62,95)
Неоптерин, нмоль/л	21,92 (13,62–48,85)	19,15 (12,56–24,20)*
Лейкоциты, г/л	7,3 (5,2–9,8)	7,22 (5,1–9,2)
Тромбоциты, г/л	291,0 (221,0–388,0)	256,5 (184–309,1)*
СОЭ, мм/час	43 (30–58)	39,5 (25–50)
Гемоглобин, г/л	121 (106–131)	120 (107–133)
РФ, МЕ/мл	128 (0–512)	64 (0–256)
Фибриноген, г/л	5,7 (4,0–7,1)	4,6 (4,0–5,9)*
ЦИК	0,162 $\pm$ 0,103	0,138 $\pm$ 0,073*
hs-СРБ, мг/л	18,2 (5,67–33,6)	10,2 (1,96–43,7)

Примечание. Достоверность различий по сравнению с исходными показателями отмечена * при $p < 0,05$.

Неоптерин – это низкомолекулярная субстанция, которая образуется в моноцитах / макрофагах. Основным индуктором синтеза неоптерина является Th1-цитокин интерферон-гамма, а ФНО- α резко усиливает этот синтез [9]. Неоптерин считается превосходным маркером активации клеточного иммунитета [24], повышенные концентрации которого наблюдаются при вирусных, бактериальных, протозойных инфекциях, новообразованиях, а при ревматических болезнях коррелируют со степенью их активности [23], [24]. Продукция неоптерина снижается под влиянием иммуносупрессантов, в том числе ГКС [11]. Полученные нами результаты, касающиеся взаимосвязи данного показателя с активностью РА и наличием внесуставных проявлений, полностью подтверждают вышеуказанные данные. Так, при сравнении пациентов со II и III степенями активности РА выявлена достоверная разница при наличии инфекции (при II степени активности – 15,31 (10,19–16,95) нмоль/л, при III – 40,75 (20,04–90,37) нмоль/л; $p = 0,017$). После санации очага инфекции концентрация неоптерина была также значимо выше при III степени активности, однако достоверных различий не получено (при II степени активности – 12,94 (11,50–17,85) нмоль/л, при III – 22,18 (16,03–59,56) нмоль/л; $p = 0,063$).

При сопоставлении больных РА с системными проявлениями и без них получена достоверная разница в концентрации неоптерина до антимикробной терапии (с системными проявлениями – 38,92 (20,04–90,37) нмоль/л, без них – 16,51 (11,81–17,34) нмоль/л; $p = 0,028$) (рис. 1).

Пациенты, получавшие ГКС-терапию, имели значимо меньшую концентрацию неоптерина после лечения инфекции, что обусловлено

иммунодепрессивными свойствами глюкокортикоидов (у больных на ГКС-терапии – 11,50 (6,52–13,32) нмоль/л, без ГКС-терапии – 22,18 (16,03–29,03) нмоль/л; $p = 0,037$).

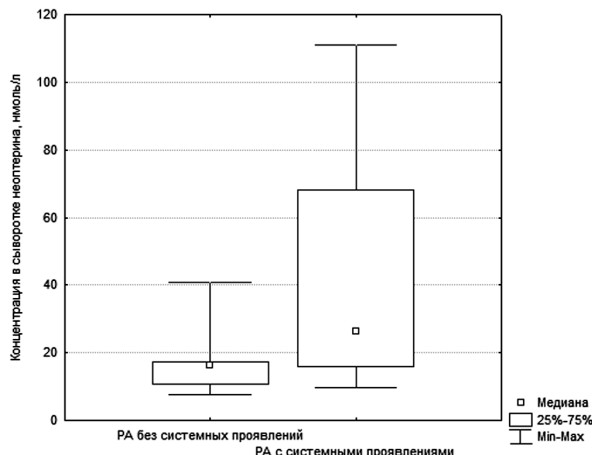


Рис. 1. Концентрация неоптерина (нмоль/л) у больных в зависимости от наличия системных проявлений РА до санации очага бактериальной инфекции

Показатели неоптерина были достоверно выше ($p < 0,05$) у серопозитивных по РФ пациентов как до, так и после эффективной антимикробной терапии (рис. 2–3).

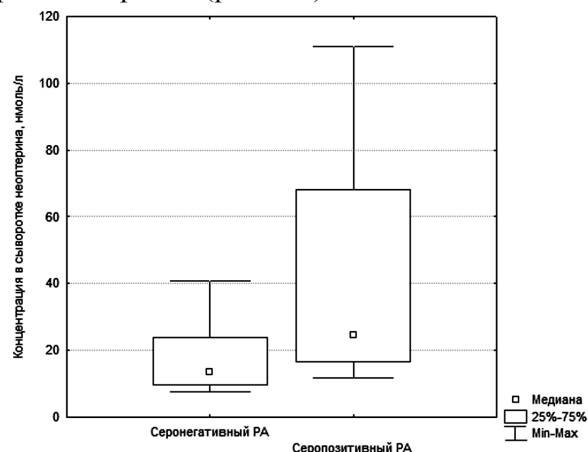


Рис. 2. Концентрация неоптерина в зависимости от наличия ревматоидного фактора при первичном обследовании пациентов

При изучении корреляции между концентрацией ИЛ-6 с лабораторными показателями активности выявлена достоверная положительная корреляция с концентрацией hsСРБ, которая регистрировалась как на фоне очага инфекции ($r = 0,52$; $p = 0,014$), так и после адекватной антимикробной терапии ($r = 0,59$; $p = 0,006$). Выявленные нами корреляции концентрации ИЛ-6 и hsСРБ отражают закономерные взаимодействия: так, СРБ считается наиболее точным параметром активности РА [2], а ИЛ-6 – один из основных цитокинов, индуцирующих его синтез в печени [3], [4]. При исследовании ИЛ-1 β в сочетании

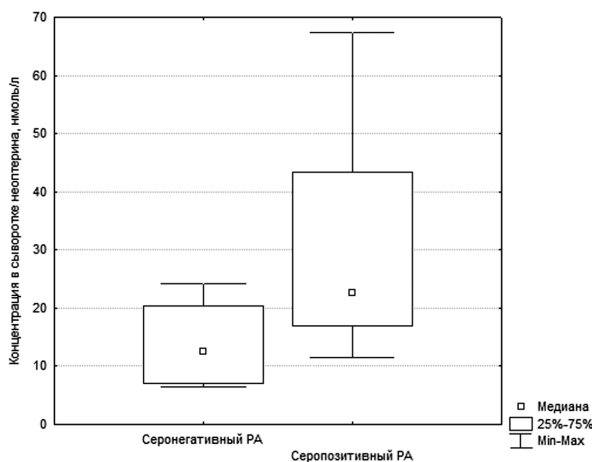


Рис. 3. Концентрация неоптерина в зависимости от наличия ревматоидного фактора после антибактериальной терапии

с теми же показателями достоверной корреляции не выявлено ни на фоне инфекции, ни после ее санации, что может объясняться небольшими размерами выборки.

ВЫВОДЫ

КИ, нередко протекая со стертой клинической картиной, способны индуцировать избыточную продукцию провоспалительных цитокинов и синтез острофазовых белков у больных РА, влияя на активность воспалительного процесса, что может играть роль в ускоренном прогрессировании эрозивного процесса в суставах и провоцировать развитие нежелательных кардиоваскулярных и цереброваскулярных событий. Полученные данные указывают на необходимость активного выявления и своевременной санации очагов инфекции у данной категории больных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов Б. С., Балабанова Р. М., Манукян С. Г. и др. Коморбидные инфекции при ревматических заболеваниях: современное состояние проблемы // Научно-практическая ревматология. 2006. № 3. С. 62–66.
- Гукасян Д. А., Балабанова Р. М., Смирнов А. В. и др. Изучение взаимосвязи между минеральной плотностью костной ткани и клинико-лабораторными показателями активности ревматоидного артрита // Научно-практическая ревматология. 2005. № 1. С. 18–21.
- Гусев Д. Е., Пономарь Е. Г. Роль С-реактивного белка и других маркеров острой фазы воспаления при атеросклерозе // Клиническая медицина. 2006. № 5. С. 25–30.
- Дмитриев В. А., Ощепкова Е. В., Титов В. Н. С-реактивный белок и артериальная гипертензия: существует ли связь? // Терапевтический архив. 2006. № 5. С. 86–89.
- Зорина В. Н., Трофименко Н. А., Архипова С. В. и др. Альфа-2-макроглобулин, его комплексы с IgG и некоторые факторы гуморального иммунитета при ревматоидном артрите // Научно-практическая ревматология. 2006. № 1. С. 22–27.
- Лукина Г. В., Сигидин Я. А., Чичасова Н. В. и др. Применение моноклональных антител к фактору некроза опухоли (ремикейд) при ревматоидном артрите: предварительные результаты // Терапевтический архив. 2003. № 5. С. 9–12.
- Мазуров В. И., Богданов А. Н. Диагностика и лечение поражений легких у больных ревматоидным артритом // Научно-практическая ревматология. 2003. № 1. С. 52–56.
- Мазуров В. И., Столов С. В., Якушева В. А. и др. Кардиоваскулярные проблемы в ревматологии // Научно-практическая ревматология. 2006. № 4. С. 28–34.
- Насонов Е. Л. Иммунологические маркеры атеросклероза // Терапевтический архив. 2002. № 5. С. 80–85.
- Ребров А. П., Инамова О. В. Предпосылки развития эндотелиальной дисфункции при ревматоидном артрите // Терапевтический архив. 2004. № 5. С. 79–85.
- Свиридов Е. А., Телегина Т. А. Неоптерин и его восстановленные формы: биологическая роль и участие в клеточном иммунитете // Успехи биологической химии. 2005. № 45. С. 355–390.
- Сигидин Я. А., Гусева Г. Г., Иванова М. М. Диффузные болезни соединительной ткани (Системные ревматические заболевания): Руководство для врачей. М.: Медицина, 2004. 640 с.
- Страчунский Л. С., Белоусов Ю. Б., Козлов С. Н. Практическое руководство по антиинфекционной химиотерапии. Смоленск: МАКМАХ, 2007. 464 с.
- Шилкина Н. П., Чураков О. Ю. Системные проявления ревматоидного артрита, экзоструктурные изменения в брахиоцефальных артериях // Терапевтический архив. 2005. № 12. С. 49–53.
- Яковлев В. П., Яковлев С. В. Рациональная антимикробная фармакотерапия (руководство для практических врачей). М.: Литтерра, 2003. 1008 с.
- Arnett F. C., Edworthy S. M., Bloch D. A. et al. The American Rheumatism Association 1987 revised criteria for the classification of rheumatoid arthritis // Arthr. Rheum. 1988. № 31. P. 315–324.
- Bongartz T., Sutton A. J., Sweeting M. J. Anti-TNF antibody therapy in rheumatoid arthritis and the risk of serious infections and malignancies // JAMA. 2006. № 295. P. 2275–2285.
- Gerli R., Goodson N. J. Cardiovascular involvement in rheumatoid arthritis // Lupus. 2005. Vol. 14. P. 679–682.
- Hallegra D. S., Weisman M. H. Potential therapeutic uses of interleukin-1 receptor antagonists in human diseases // Ann. Rheum. Dis. 2002. Vol. 61. P. 960–967.
- Imaizumi K., Sugishita M., Usui M. et al. Pulmonary infectious complications associated with anti-TNF α therapy (Infliximab) for rheumatoid arthritis // Intern. Med. 2006. Vol. 45. № 10. P. 685–688.
- Kroesen S., Widmer A. F., Tyndall A. et al. Serious bacterial infections in patients with rheumatoid arthritis under anti-TNF- α therapy // Rheumatology. 2003. № 42. P. 617–621.
- Popa C., Netea M. G., van Riel P. L. et al. The role of TNF- α in chronic inflammatory conditions, intermediary metabolism, and cardiovascular risk // J. Lipid. Res. 2007. Vol. 48. P. 751–762.
- Rider L. G., Schifflbauer A. S., Zito M. et al. Neopterin and quinolinic acid are surrogate measures of disease activity in the juvenile idiopathic inflammatory myopathies // Clin. Chem. 2002. № 10. P. 1681–1688.
- Sghiri R., Feinberg J., Thabet F. et al. Gamma interferon is dispensable for neopterin production in vivo // Clin. Diagn. Lab. Immunol. 2005. № 12. P. 1437–1441.

УДК 553.493(470.22)

ЛЮДМИЛА ВЛАДИМИРОВНА КУЛЕШЕВИЧкандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии, Карельский научный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
kuleshev@krc.karelia.ru**АНТОНИНА ВАСИЛЬЕВНА ДМИТРИЕВА**аспирант Института геологии, Карельский научный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
dmitrieva-a-v@yandex.ru

МИНЕРАЛЫ И ИСТОЧНИКИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КАРЕЛИИ

Редкоземельные элементы (Y и лантаноиды La, Ce, Nd...) в последние годы нашли широкое применение в разных современных отраслях промышленности. В земной коре они входят в минералы (бастнезит, паризит, монацит, ксенотим и др.) в щелочных комплексах пород, карбонатитах, гранитах повышенной щелочности, пегматитах, характерны для золоторудных проявлений. В работе рассматриваются некоторые нетрадиционные источники редкоземельных элементов, их аномальные концентрации и минералы в породах и рудах Карелии.

Ключевые слова: редкоземельные элементы и минералы, бастнезит, паризит, монацит, ксенотим, Карелия

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ: МИНЕРАЛЫ-КОНЦЕНТРАТОРЫ, ТИПЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, СОВРЕМЕННЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

К редкоземельным элементам (РЗЭ или REE) относят лантаноиды (TR – № 57 La – № 71 Lu), совместно с ними обычно рассматривается и иттрий (№ 39 Y). Минералами-концентраторами РЗЭ и Y являются бастнезит $(\text{Ce,La,Pr})[\text{CO}_3]\text{F}$, паризит $\text{Ca}(\text{Ce,La}_2)_3[\text{CO}_3]_2\text{F}_2$, синхизит $\text{Ca}(\text{Ce,La})[\text{CO}_3]_2\text{F}$, монацит $\text{Ce}[\text{PO}_4]$, ксенотим $\text{Y}[\text{PO}_4]$, ортит (или алланит) $(\text{Ca,Ce})_2(\text{Al,Fe})_3[\text{Si}_3\text{O}_{12}](\text{O,OH})$, лопарит $\text{NaCeTi}_2\text{O}_6$, эвдиалит и некоторые TR-содержащие минералы (апатит, эпидот). Известны около 100 собственных минералов (до 250 с TR-содержащими). Они представляют изоморфные смеси соединений всех 15 лантаноидов или иттрия.

Основными типами промышленных месторождений РЗЭ являются магматические (лопаритовые нефелиновые сиениты и апатит-нефелиновые руды); редкометалльные щелочные граниты (альбитовые) и пегматиты; скарны, образующиеся на контакте карбонатных пород с щелочными гранитами и сиенитами, и карбонатитовые месторождения (например, месторождения Кольского полуострова, месторождение Бастнез в Швеции, Маунтин-Пасс в США, Баюнь-Обо в КНР); россыпные и осадочные [1]. Максимально высокие концентрации РЗЭ имеют карбонатиты и скарны на контакте с сиенитами, среди них наиболее крупные объекты располагаются на докембрийских щитах. К ним относятся месторождения разной глубинности, такие как Маунтин-Пасс в США, Нам-Се во Вьетнаме, Баюнь-Обо в КНР, дающие основную продукцию РЗЭ в мире, Карасуг в России [1]. Среди осадочных метаморфизованных месторождений на первое место выходят также докембрийские кварцевые конгломераты: они образуют пластовые объемные залежи и при не столь высоких

концентрациях минералов (браннерит, монацит, давидит) Ce или Y подгруппы, составляющих десятые или сотые доли процента, представляют промышленный интерес и разрабатываются совместно с ураном (что составляет 1/5 часть от всех Y месторождений).

Применение редкоземельных элементов возросло с конца XX века и сейчас составляет около 130 тыс. т в год в пересчете на оксиды [5]. Их свойства, в частности высокая проводимость и слабая реакция на другие элементы, делают РЗЭ незаменимыми компонентами в высокоточных приборах и устройствах. Прогнозируемый спрос на такие металлы к 2015 году вырастет до 225 тыс. т. РЗЭ используются в металлургии в виде мишметалла – смеси, близкой к природному концентрату.

Мишметалл легко сплавляется со сталью и улучшает свойства легатуры (жаропрочность, устойчивость к коррозии, вязкость), используется для легирования титана и алюминия, добавляется в хромоникелевые стали. Оксид церия применяется в обработке и подготовке специальных стекол, изготовлении люминофоров. Практически весь спектр РЗЭ задействован при производстве лазеров, в электронике и атомной промышленности. Эти элементы являются частью наиболее важных узлов (кристаллов), отвечающих за активацию и концентрацию лазерного пучка. Zr, Hf и редкие земли, особенно Gd, хорошо поглощают нейтроны, поэтому их добавляют в состав регулирующих стержней для замедления реакции, а также специальных покрытий для защиты от излучения. Разделение урана и плутония решается за счет фторида лантана, в котором хорошо «растворяется» радиоактивный элемент. Большой объем редких земель уже несколько десятилетий используется при изготовлении катализаторов для нефтяной промышленности. Значительные количества

в первую очередь самария и неодима идут на производство постоянных магнитов, энергия которых на порядок выше старых аналогов на основе железа. Магнитоотрицательные свойства (способность менять форму в магнитном поле) этих элементов широко применяются в производстве аудиосистем и устройств, генерирующих звуковые волны. Редкие земли адаптировали к обработке ЖК-дисплеев и кремниевых кристаллов для электроники. В прошлом десятилетии существенно возросло использование РЗЭ для производства оптоволокна и устройств памяти, а также изготовления аккумуляторов и топливных элементов. Важнейшая область применения оксидов РЗЭ – изготовление высокотемпературных сверхпроводников (типа $YBa_2Cu_3O_{7-x}$). Одно из самых перспективных направлений – использование РЗЭ в производстве электро- и гибридных автомобилей.

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ДОКЕМБРИЙСКИХ КОМПЛЕКСАХ КАРЕЛИИ

Наиболее высокие концентрации РЗЭ на территории Карелии известны в следующих формациях [7]: 1 – в ультраосновных щелочных пегматоидных породах Тикшезерского и Ельтьозерского массивов (Σ РЗЭ 0,1–0,36 %); 2 – в субщелочных гранитах, пегматитах и метасоматитах архейского возраста (0,13–0,41 %); 3 – в грейзенах и скарнах в ореоле рифейских гранитов-рапакиви в Северном Приладожье (0,12–0,63 %); 4 – в метаморфизованных кварцевых конгломератах и кварцито-песчаниках (0,1–0,22 %). Данные Северной ГЭ позволяют говорить о том, что в карбонатитах щелочных комплексов Σ РЗЭ составляет 970–1250 ppm (ppm = г/т, табл. 1). Нами были изучены и иные возможные нетрадиционные аномальные источники РЗЭ, а также акцессорные минералы: 1 – в грейзенах с рудной минерализацией в Северном Приладожье в ореоле гранитов-рапакиви; 2 – в монцонитах (породах повышенной щелочности и в их ореолах); 3 – в альбититах и связанных с ними Au-содержащих Cu-Se-U-V или Cu-Se-U месторождениях и рудопроявлениях; 4 – в золотосульфидных [6].

Методика. Содержание РЗЭ определялось методом ICP MS для некоторых типов пород и руд (табл. 1), минералы изучались с помощью микрозондового анализатора (сканирующего электронного микроскопа VEGA II LSH с микроанализатором INCA Energy 350, табл. 2–3).

МИНЕРАЛЫ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИХ АССОЦИАЦИИ

1. *Питкярантское рудное поле (РП), Северное Приладожье.* Группа грейзенизированных скарновых месторождений Питкярантского РП в ореоле рифейских гранитов-рапакиви Сал-

минского массива отличается высокими концентрациями РЗЭ и радиоактивных элементов. Изучались образцы проявления Люпикко (из коллекций Р. А. Хазова, Институт геологии КарНЦ РАН), содержащие леллингит, халькопирит, борнит, шеелит, галенит, клаусталит $Pb(Se,S)$, самородные висмут и серебро, хедлейит, пильзенит, теллуrowисмутит, Ве-минералы (ряд данолит-гельвин-гентгельвин), Cl-биотит. С рудными минералами ассоциируют и находятся в тесном сростании монацит, бастнезит и уранинит (табл. 2–3). Монацит ($Ce,La...$) PO_4 обычно встречается в хорошо ограненных кристаллах. Бастнезит (F-карбонат РЗЭ) выделяется в зернах неправильной формы, обрастает монацит, образуя кайму вокруг него. Уранинит выделяется в кубических кристаллах, содержит радиогенный Pb (13,5–14,54 %) и примесь Th (3,04–12,16 %), в связи с чем часто бывает окружен каймой более позднего Y-содержащего торита ($ThSiO_4$) и более сложными фазами с РЗЭ.

Следует отметить, что в рудах уранового месторождения Карку («тип несогласия» [2]), сформировавшегося в зоне контакта разновозрастных протерозойских толщ в южном ореоле Салминского массива, а также в коре выветривания гранитного массива, установлены повышенные концентрации РЗЭ (возраст гранитов ~1,5 млрд лет, оруденения ~1,4–1,3 млрд лет).

2. *Умереннощелочные комплексы пород архейского и протерозойского возраста.* На Сегозерской площади для архейского умереннощелочного магматизма – интрузий, дифференцированных от габбро-пироксенитов до монзонитов и сиенитов (массивы Панозерский, Сяргозерский, Торосозерский, Шаравалампи), характерно повышенное содержание РЗЭ (253–488,4 ppm). В них, и особенно в зонах метасоматического преобразования этих пород, установлены биотит, Ва-содержащий микроклин, апатит, эпидот, ортит, карбонат, турмалин, барит. В Панозерском массиве (пос. Паданы) минералы, содержащие РЗЭ, представлены торитом, ортитом, монацитом, среди них преобладают F-карбонаты La-Ce, реже Ce-La состава (табл. 3(3–5), рис. а–в; семейство бастнезит-паризит-синхизит). Наиболее распространенным среди них является бастнезит, который образует неправильные ветвящиеся выделения. При распаде торита, отличающегося высокой концентрацией РЗЭ (в сумме до 7 %), вокруг него образуется ореол бастнезита (рис. а). На участке Шаравалампи (восточнее пос. Шалговаара) встречаются зональные эпидоты-ортиты (рис. г). Апатит из рудных апатит-магнетитовых зон этих интрузий часто содержит микровключения ортита.

В Кумсинской структуре Центральной Карелии на участках Светлое-2 и Медные горы интрузии монзонитов протерозойского возраста отличается высокая Na-щелочность (плагноклаз представлен альбитом) и особенно повышенные концентрации РЗЭ, Zr, Ва, Р. Рудные и акцессор-

ные минералы представлены магнетитом, сфеном, апатитом, монацитом, бастнезитом. В зонах более позднего метасоматического изменения в монцонитах появляются биотит, в прожилках – микроклин, альбит, эпидот, более крупный сфен, апатит, циркон, турмалин, реже алланит, кальцит, барит.

3. *Щелочные метасоматиты, содержащие благороднометальное Cu-S, Cu-Se-U и U-V оруденение (Светлое, Медные горы, Средняя Падма).* Золотосодержащее Cu-Se-U проявление Светлое расположено в среднем течении р. Кумса вблизи описанной выше интрузии (Светлое-2) и приурочено к зоне щелочных метасоматитов,

Таблица 1

Содержание Ba, Y, Zr, U и лантаноидов (ppm) в некоторых типах пород и руд Карелии

№	№ обр.	Ba	Y	Zr	U	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu
1	СВ-9/4	125,38	392,19	8,64	550,0	35,70	125,38	20,88	117,31	57,48	20,08
2	СВ-7	14,61	210,79	5,52	773,2	46,14	110,58	15,78	82,03	32,12	10,97
3	МГ-13/1	45,22	7,42	69,23	9,27	24,75	74,79	7,09	25,61	4,34	0,71
4	МГ-18/9	472,16	48,15	215,41	0,60	17,42	41,02	5,61	26,04	6,94	2,20
5	Ги-5	204,64	58,67	180,61	0,76	21,20	50,98	6,80	31,40	8,24	2,44
6	Ги-6	66,00	122,59	681,89	1,79	40,26	99,90	13,78	64,59	18,21	4,75
7	Мак-13	283,21	10,53	45,12	7,01	18,05	32,12	3,30	13,55	1,99	0,43
8	Мак-19	353,41	39,02	231,80	1,28	13,47	33,33	4,54	22,72	5,85	1,90
9	Шу-2	145,69	26,13	107,52	35,13	13,99	24,32	3,16	14,2	2,9	0,77
10	С41/110,7	584,90	18,41	268,55	1,13	69,15	169,83	17,38	78,20	14,34	1,84
11	ГП-1/9-1	149,98	11,56	80,19	1,38	23,80	44,67	4,84	20,11	3,51	0,89
12	706-1	–	–	–	25,9	237,0	513,0	–	177,0	24,3	2,87
13	146/96-107	–	< 15	105,0	255,0	258,0	597,0	–	344,0	38,3	9,6
14	527-1	1675	39	451	–	99	252	–	115	15,6	3,66
15	551	1668	30	215	–	63	126	–	53	9,30	2,42
16	613	2490	32	328	–	68	147	–	72	11,7	2,89
№	№ обр.	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣP3Э (14)	
1	СВ-9/4	89,04	14,26	80,92	14,40	33,45	3,26	14,41	1,56	628,13	
2	СВ-7	48,47	8,46	58,11	9,18	21,84	2,27	10,29	1,04	457,28	
3	МГ-13/1	3,68	0,40	2,04	0,30	0,80	0,09	0,61	0,07	145,28	
4	МГ-18/9	8,62	1,45	9,27	1,88	5,54	0,78	5,22	0,72	132,71	
5	Ги-5	10,37	1,70	11,11	2,26	6,70	0,91	5,88	0,78	160,77	
6	Ги-6	22,57	3,63	23,27	4,70	13,71	1,92	12,50	1,78	325,57	
7	Мак-13	1,94	0,25	1,52	0,32	1,00	0,14	0,90	0,13	75,64	
8	Мак-19	7,04	1,17	7,64	1,52	4,70	0,65	4,41	0,63	109,57	
9	Шу-2	3,37	0,53	3,7	0,84	2,81	0,42	2,8	0,42	74,23	
10	С41/110,7	11,99	1,25	5,73	0,82	2,22	0,33	2,43	0,33	375,84	
11	ГП-1/9-1	3,42	0,38	2,01	0,39	1,19	0,16	1,15	0,16	106,68	
12	706-1	–	3,5	–	–	–	–	12,6	1,7	970,3	
13	146/96-107	–	3,14	–	–	–	–	1,21	< 0,05	1251,3	
14	527-1	–	1,79	–	–	–	–	1,14	0,17	488,4	
15	551	–	0,78	–	–	–	–	1,35	0,18	253,03	
16	613	–	0,95	–	–	–	–	1,54	0,21	304,3	

Примечание. (1 ppm = 1 г/т). 1–2 – проявление Светлое, Cu-Se-U-руды. 3–4 – Медные горы, альбититы в габбро с медной минерализацией. 5–6 – Гирвас, альбитизированные взрывные брекчии в базальтах. 7–8 – Максово, сульфидная минерализация в шунгитах. 9 – Шуньга. 10 – п-е Северо-Вожминское, колчеданно-полиметаллические руды. 11 – Au-S-As п-е Южно-Костомукшское (южный карьер железорудного месторождения). 12–13 – Тикшезерско-Ельтьозерский массив, данные СГЭ. 14 – Сяргозеро, 15–16 – Панозеро (пос. Паданы, по материалам С. Б. Лобач-Жученко).

Таблица 2

Состав монацитов и ксенотимов (мас. %)

Эл.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P	14,05	13,77	14,05	13,75	14,77	15,61	14,79	15,47	17,33	18,22	17,58	18,05
Y									38,34	36,73	37,84	34,21
Ca			2,9	0,29	0,84							
La	15,33	15,05	10,92	17,12	11,84	21,18	14,5	13,73				
Ce	29,85	29,86	27,24	29,87	24,27	33,64	31,19	30,41				
Pr	1,93	2,36		2,43	1,74							
Nd	7,84	8,68	12,90	8,74	11,26		10,79	11,01				
Sm			1,79		0,45							
Gd			1,65						1,30	1,95	1,41	4,45
Dy									4,48	4,72	3,54	8,77
Yb									4,35	3,46	3,23	
Th	2,23	2,60			6,12							
O	27,84	27,69	28,54	27,8	28,7	29,58	28,74	29,38	34,20	34,92	34,38	34,52
Σ	99,07	100,01	99,99	100	99,99	100,01	100	100	100	100	97,98	100

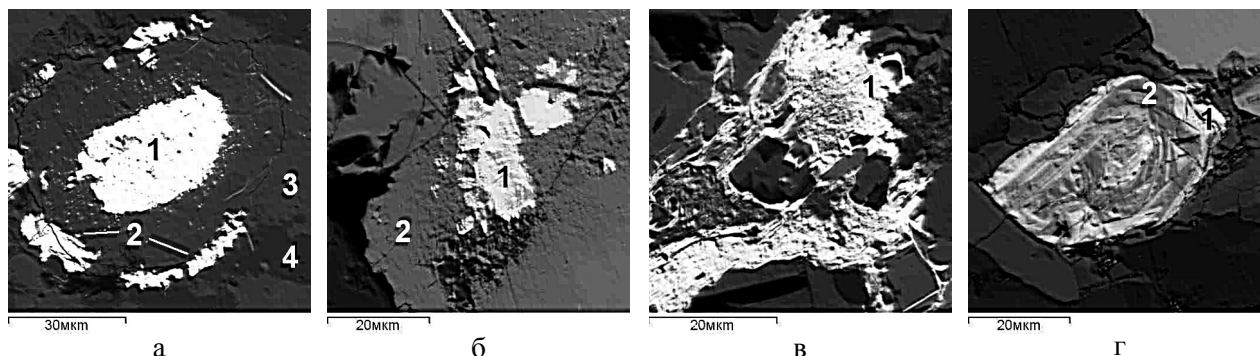
Примечание. 1–8 – монациты, 9–12 – ксенотимы. 1–2 – Люпикко (образец ХЗ-1). 3–6 – Рыбозеро (3, 9, 10 – С-38/64,5; 4, 11 – С-37/61; 5 – С-42/149,2; 6 – С-5/51,3; 7, 12 – С-41/191,8). 8 – Северо-Вожминский. Микрозондовые анализы выполнены в Институте геологии КарНЦ РАН, приведены к 100 %.

Таблица 3

Состав карбонатов РЗЭ (мас. %)

Эл.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
F	10,33	11,91	2,38	5,77	6,73	2,43	4,05	5,24	3,22	2,22	9,10	12,55
Ca	2,46	3,23		0,53	1,3	2,34	1,60				1,51	2,97
La	25,71	26,26	43	39,31	27,1	18,57	16,82	18,66	13,99	18,06	20,63	19,85
Ce	37,28	45,05	36,35	35,09	39,47	46,4	41,77	43,40	44,97	41,95	41,34	36,80
Pr	2,34				3,11							
Nd	8,3		3,96	5,39	8,4	15,58	17,95	18,89	23,75	22,78	13,87	14,49
Sm							3,56					
O	13,59	13,54	14,31	13,91	13,89	14,68	14,25	13,80	14,07	14,98	13,56	13,33
Σ	100,01	99,99	100	100	100	100	100	99,99	100	99,99	100	99,99

Примечание. 1–2 – Люпикко (образец ХЗ-1). 3–5 – Паданы (29-1, коллекция С. Б. Лобач-Жученко). 6–9 – Рыбозеро (С-2/63). 10 – Северо-Вожминский (С-41/191,8). 11–12 – Южно-Костомукшский (11-ГП-1/11а, 12 – ГП-1/34). Микрозондовые анализы выполнены в Институте геологии КарНЦ РАН, приведены к 100 % (даны без учета CO₂, так как образцы с углеродным напылением).



Минералы РЗЭ: Паданский массив (а–в), Шаравалампи (г): а (обр. 29-2, коллекция С. Б. Лобач-Жученко): 1 – торит, 2 – F-карбонат La-Ce-Nd, 3 – К-шпат (BaO 2,97 %), 4 – альбит; б (обр. 29-1): 1 – бастнезит, 2 – сфен. в (обр. 29-2-6): 1 – бастнезит; г (обр. 9742/8): зональный эпидот (2) – ортит (1)

наложенных на карбонатные породы. Оруденение представлено клаусталитом (PbSe), медными сульфидами, настураном, содержит благородные металлы (Au, Pd-Se и Pd-Sb-As-фазы). В рудной зоне содержание Σ РЗЭ составляет 457–628 ppm (табл. 1). Для руд проявления Светлое характерно присутствие мелкозернистых селенидов и сульфидов либо почковидных сростаний минералов клаусталита и настурана, образовавшихся в близповерхностных условиях. Тонкодисперсные массы и почки представлены сложнокомпонентным составом, содержащим Y (до 2,5–3 %) и другие РЗЭ (рис. в).

В щелочных метасоматитах и комплексном (Au-Ag-Pd-Mo-Cu-Se)-U-V-оруденении месторождения Средняя Падма высокая концентрация РЗЭ обеспечивается присутствием в околорудных метасоматитах и рудных телах монацита. В околорудном ореоле монацит встречается в сростании с пиритом, более редкими сульфидами и селенидами, особенно много его в участках с апатитом и баритом.

4. *Золоторудные и золотосодержащие рудные объекты.* На золоторудном месторождении Рыбозеро в Восточной Карелии в рудном теле № 1 в оталькованных коматиитах установлены монациты неправильных форм с широким спектром изоморфных замещений (Ce, La, Nd, Sm, Gd) и более широко распространенные хорошо ограненные ксенотимы, в которых Y изоморфен с Dy, Gd, Yb (табл. 2). Рудное тело № 2 приурочено к лежащему контакту колчеданной залежи. В этих рудах кроме ведущего пирита установлены халькопирит, Ni-Sb-S-As фазы, галенит, монацит (табл. 2(6)), уранинит, рутил. В золоторудном теле № 3 совместно с пиритом, халькопиритом, золотом, герсдорфитом обнаружен высокотермический монацит (Th – 6,12 %, табл. 2(5)). Западная ветвь участка Рыбозеро включает

горизонт апатит-магнетитовых руд, которые содержат V-ильменит, магнетит, Cl-apatит и наложенную прожилковую S-Cu-Ni-минерализацию: здесь в сростании с сульфидами широко распространены бастнезит, паризит, встречается Y-содержащий торит (Y 5,36–9,98 %).

РЕЗЮМЕ

Как показало изучение некоторых рудных объектов Карелии, источниками РЗЭ являются карбонатиты и руды известного Тикшезерского щелочного массива. Кроме того, в качестве источников РЗЭ могут выступать зоны грейзенизации и альбитизации в ореолах массивов гранитов-рапакиви либо пород повышенной щелочности – монзонитов, а также палеопротерозойские альбититы в зонах региональных СЗ разломов, и особенно рудные тела в них. Приуроченность содержащих РЗЭ минералов (фосфатов или карбонатов) к определенным типам пород и руд определяется их составом и щелочностью-известковистостью среды. Рост содержания РЗЭ связан с постмагматическими рудными процессами. Эти элементы концентрируются преимущественно в рудных телах и сопровождают золоторудные залежи.

Редкоземельные элементы, представляя объект большого, все возрастающего практического интереса, являются одновременно одним из основных «помощников», позволяющих судить о происхождении и источниках расплавов и растворов. При изучении магматических пород данные по геохимии и минералогии РЗЭ позволяют расшифровать условия и обстановки их образования. При установлении генезиса золоторудных месторождений РЗЭ позволяют судить об источниках растворов при метасоматозе, а для россыпных месторождений – об их генетической связи [3], [4], [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдонин В. В., Бойцов В. Е. и др. Месторождения металлических полезных ископаемых. М.: ЗАО «Геоинформ-марк», 2005. 718 с.
2. Величкин В. И., Кушнеренко В. К., Тарасов Н. Н. и др. Геология и условия формирования месторождения типа «несогласия» в Северном Приладожье (Россия) // Геология рудных месторождений. 2005. Т. 47. № 2. С. 99–126.
3. Винокуров С. Ф., Коваленкер В. А., Сафонов Ю. Г. и др. Лантаноиды в кварцах эпitherмальных золоторудных месторождений: распределение и геохимическое значение // Геохимия. 1999. № 2. С. 171–180.
4. Волошин А. В. Y-REE минералы и минералы группы циркона из рудных зон Панареченской вулcano-тектонической структуры // Труды VII Всероссийской Ферсман. науч. сессии, посвящ. 80-летию Кольского НЦ РАН. Апатиты, 2010. С. 11–13.
5. Информационный центр поддержки предпринимательства на рынке редкоземельных металлов и технологий [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.74rif.ru/redkozem.html
6. Кулешевич Л. В., Панфилова И. В. Последовательность формирования, рудные и акцессорные минералы золоторудных проявлений Костомукшской структуры // Материалы 14-й Междунар. конф. «Связь поверхностных структур земной коры с глубинными». Ч. 2. Петрозаводск, 2008. С. 300–303.
7. Михайлов В. П. Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Петрозаводск: Карелия, 2005. 278 с.
8. Юдовская М. А., Дистлер В. В. и др. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черномосланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов // Геология рудных мест. 2011. Т. 53. № 1. С. 32–65.

УДК 502.51+502.52:504.054(470.22)

ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ РЫБАКОВкандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии, Карельский научный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
*rybakovd@krc.karelia.ru***ЗАХАР ИВАНОВИЧ СЛУКОВСКИЙ**аспирант кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
slukovsky87@gmail.com

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ДОННЫХ ОСАДКОВ ЗАРЕГУЛИРОВАННОЙ ГОРОДСКОЙ РЕКИ

Изучены особенности накопления химических элементов в приповерхностном слое донных осадков небольшого водохранилища в приустьевой части реки Лососинки (г. Петрозаводск) и зоны перехода от руслового гидрологического режима к режиму относительно замедленного водообмена в условиях массированного поступления городских сточных вод. На этой основе дана оценка химического загрязнения указанной водной системы.

Ключевые слова: химические элементы, загрязнение, донные осадки, корреляционный анализ

ВВЕДЕНИЕ

Важность исследований химических характеристик водных объектов для дальнейшего экологического использования не вызывает сомнений. Очевидно, что потоки загрязняющих веществ на пути в конечные водоемы стока (моря и океаны) с разной степенью интенсивности перехватываются континентальными водными экосистемами, накапливаясь, зачастую в значительных концентрациях, в литосферной составляющей водных объектов – донных осадках. Это происходит и в небольших реках и водохранилищах. В настоящее время донные осадки принято считать интегральным индикатором техногенной нагрузки на водные объекты [15]. Отмечается экологическая опасность возможного вторичного загрязнения вод в результате поступления токсикантов из загрязненных донных осадков при изменении условий водного объекта [8]. Возможен перенос тяжелых металлов с глинистым и органическим материалом на пойменные почвы в результате наводнений [17].

Преимущество донных осадков как объекта исследования загрязнения окружающей среды подтверждено многими работами на Северо-Западе России [1], [6], [7], [13] и др.

Настоящее исследование вносит вклад в решение важнейших экологически ориентированных геохимических задач, к которым относится изучение распределения ассоциаций химических элементов, сформированных в донных осадках водных объектов под воздействием природных и техногенных факторов.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

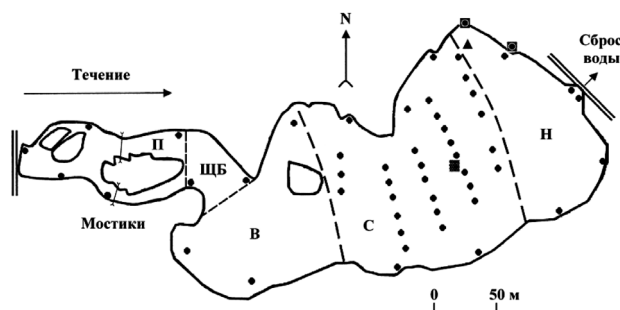
Исследуется геохимическое состояние приповерхностного слоя донных осадков локальной водной системы, расположенной в нижней

части реки Лососинки в пределах г. Петрозаводска, включающей небольшое водохранилище и соединяющую его с рекой зону перехода от руслового гидрологического режима к режиму с относительно замедленным водообменом (далее – переходная зона). Водоохранилище и переходная зона расположены между двумя автодорожными мостами, один из которых совмещен с плотиной бывшей малой ГЭС (рис. 1). Длина водной системы от верхней точки переходной зоны до плотины составляет 460 м, ширина – от 20–45 м в переходной зоне до 170 м в средней и нижней частях водохранилища. Переходная зона имеет длину около 170 м, однако при регулировании стока на гидротехнических сооружениях происходит смещение ее нижней границы в связи с изменениями скорости течения воды в верховой части водохранилища.

Вода через быстроток в нижней части водохранилища сбрасывается в Петрозаводскую губу Онежского озера. В весенний период принимаются меры по контролю прохождения паводковых вод и поддержанию нормального гидрологического режима. Небольшой сброс с целью сохранения уровня водохранилища осуществляется летом. Значительный выпуск воды производится в конце летнего – начале осеннего периода. При этом регулирование стока приводит к существованию открытых участков илисто-глинистого дна в течение всего осеннего периода.

Рассматриваемая водная система подвергается значительному загрязнению городскими сточными водами. Загрязняющие вещества перед тем как попасть в нее поступают с водосбора в реку на протяжении 5 км (3 км – по интенсивно застроенной территории), в том числе из 15 контролируемых выпусков необорудованной очистными сооружениями ливневой канализации.

Существуют и неконтролируемые выпуски. Два выпуска, в том числе один контролируемый, имеются в нижней части водохранилища. На этом же участке расположен водозабор для фонтана, установленного на фундаменте в средней части водохранилища (рис. 1), способный при сезонном функционировании в определенной степени перераспределять поступающие загрязнители (локальный и временный фактор взмучивания осадка).



Условные обозначения:

== – автодорожные мосты; ■ – выпуски ливневой канализации; ▲ – место забора воды для фонтана; ■ – фундамент фонтана; ● – точки отбора проб.

Рис. 1. Схема отбора проб донных осадков, условные границы частей водохранилища (В – верховая, С – средняя, Н – нижняя части), П – переходная зона от речного гидрологического режима к режиму водохранилища, ЩБ – примерное местоположение щелочного гидроксидного барьера

Ежегодно в воде реки фиксируются концентрации тяжелых металлов (Fe, Cu), превышающие предельно допустимые, принятые санитарными нормами и правилами [4]. А. В. Горохов и Л. П. Марченко [5] в ходе многолетних наблюдений отмечали концентрации Mn до 20 ПДК_{р.х.} и Zn до 15 ПДК_{р.х.}, а также некоторый рост содержания Cu и Pb в воде в устьевой части реки Лососинки. Полученные данные они связывали с антропогенным воздействием в результате локального переноса загрязняющих компонентов внутри техногенного купола урбанизированной территории. В таких условиях целесообразность изучения донных осадков на тех же самых участках очевидна.

Пробы взяты из приповерхностного (0–3 см) слоя донных осадков при открытых затворах плотины в сентябре 2007 года. Часть проб отобрана по всей протяженности мелководной зоны водной системы на расстоянии от 0,5 до 15 м от границы зоны затопления. Шаг отбора проб параллельно береговой линии – 40–80 м (рис. 1). Другая часть проб отобрана в точках профилей, пересекающих зону аккумуляции иловых наносов в средней части водохранилища (рис. 1). Глубина водохранилища в зоне аккумуляции достигает $2 \pm 0,5$ м в расчете на условия поддержания нормального подпорного уровня. Материал образцов – глинисто-алевритовый иловый, в некоторых случаях с примесью более крупных

частиц песчаного аллювия, развитого по правому берегу водохранилища (зона пляжа).

Предварительная обработка проб осуществлялась согласно существующим рекомендациям [9]. Всего для анализа взято 49 проб, в каждой из которых с помощью стандартного сита выделена глинисто-алевритовая фракция (частицы размером $< 0,1$ мм), взаимодействующая со всей толщей воды реки и водохранилища при переносе во взвешенном состоянии. С другой стороны, сорбирующие свойства глинисто-иловых материалов фракции способствуют накоплению химических элементов, включая потенциально опасные, в донных осадках при их взаимодействии с придонными водами и содержащимися в них химическими компонентами. Таким образом, гранулометрическая фракция $< 0,1$ мм способна адекватно характеризовать загрязнение донных осадков потенциально опасными элементами, являясь наименьшим из возможных компромиссов между самым полным определением всех загрязнений и экспрессностью подготовки проб к анализу.

Всего использовались валовые концентрации 20 элементов (Bi, Ti, V, Li, Be, P, Cd, Zn, As, Sb, Hf, Zr, Pb, Rb, Cs, Sr, Cr, Ni, Mn и Cu), определенные в глинисто-алевритовой фракции донных осадков (далее – донные осадки) методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS). Анализ выполнен в лаборатории химического анализа Института геологии Карельского научного центра РАН.

Для получения корректных значений средних и дисперсий с помощью рассчитанных показателей асимметрии (K_A) и эксцесса (K_E) осуществлялась проверка гипотез о нормальности распределения концентраций химических элементов (трехсигмовых) значений в выборках. Получаемые выборки проверялись на однородность с помощью F- и t-критериев. Между значениями концентраций элементов или логарифмов концентраций рассчитывались значения парных коэффициентов корреляции, статистическая значимость которых устанавливалась на уровне надежности 95 % при соответствующем числе степеней свободы. В расчетах использовался пакет «Анализ данных» программы Microsoft Excel.

Для определения значений pH воды реки вблизи границы переходной зоны с водохранилищем использовался pH-тестер PCE-pH20S (точность $\pm 0,07$ pH в диапазоне 5...9 pH). Замеры сделаны в послепаводковый период в конце второй декады мая 2012 года при максимальном подпорном уровне воды в водохранилище у левого и правого берегов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследованы три выборки концентраций химических элементов в донных осадках: для

проб, отобранных на мелководье прибрежной зоны (n_1 – ближе к правому берегу, n_2 – ближе к левому берегу), n_3 – отобранных в зоне аккумуляции иловых наносов в средней части водохранилища и характеризующих глубины около $2 \pm 0,5$ м (далее – зона аккумуляции). Данные по выборочным средним значениям концентраций и выборочным дисперсиям приведены в табл. 1.

Полученные данные свидетельствуют, что средние концентрации ряда элементов превышают кларк по А. П. Виноградову [14]: Bi и Cd – примерно в 20 раз, Sb и As – в 6–8 раз, Hf – в 4,6–5,2 раза, Mn – в 3,7–4,5 раза, Pb – в 2,5–3,1 раза, Zn – в 2,5–2,7 раза, P – в 2,1–2,5 раза, Cu – в 1,7–1,8 раза, V и Ti – до 1,3–1,4 раза, средние концентрации Zr в выборках находятся на уровне кларка, Cr, Ni, Sr, Li, Be, Rb, Cs – ниже кларковых значений.

Из элементов, для которых установлены предельно или ориентировочно допустимые концентрации в почвах (ПДК и ОДК соответственно, в донных осадках не установлены), превышают санитарные нормы для почв суглинистых и глинистых от близких к нейтральным и в нейтральных до кислых [10] средние значения концентраций в донных осадках: Cd – в 1,2–2,5 раза, в As – 1,1–2,4 раза, Cu – до 1,3 раза, Ni – в 1,1 раза, превышают ПДК для почв [13]; сред-

ние значения концентраций: As – в 5,5–6 раз, Mn – в 2,5–3 раза, Pb – в 1,3–1,6 раза.

Изученные донные осадки повсеместно загрязнены Cd, концентрации которого достигают в них статистически аномальное значение 3,6 г/т, превышающее ОДК для разных условий в 1,8–3,6 раза, и As – 4,3–18,7 г/т (до 1,9–3,7 ОДК, или 9,3 ПДК). Выше норматива (ОДК и ПДК) донные осадки загрязнены следующими элементами: Zn – в 100 % случаев, Mn – 98 %, Mn + V – 96 %, Pb – 90 %, Sb – 14 %.

Проверка однородности выборок, характеризующих мелководные условия правого и левого берегов рассматриваемой водной системы, показала значимость различий выборочных дисперсий для Ti, Ni, Sb, Hf, lgV и Bi ($p < 0,05$). Для других изученных элементов различия дисперсий и средних значений незначимы ($p > 0,05$). Указанные соотношения для Ti, Sb, Hf, lgV и Bi связаны лишь с одной пробой, отобранной в нижней части водохранилища. Особенности этого «аномального» участка являются: искусственная нестабильность скорости движения воды в связи с близостью к регулирующим механизмам плотины, нахождение вблизи выпусков ливневых стоков, наличие забора воды для фонтана, примыкание к откосу автодороги (рис. 1). Дон-

Таблица 1

Средние значения и выборочные дисперсии концентраций элементов в донных осадках

Элемент	Мелководье, правый берег ($n_1 = 10$)		Мелководье, левый берег ($n_2 = 10$)		Мелководье, оба берега ($n_{1,2} = 19$)		Зона аккумуляции ($n_3 = 26$)	
	$x_{cp.}$	$S^2 (S^2_{lg})$	$x_{cp.}$	$S^2 (S^2_{lg})$	$x_{cp.}$	$S^2 (S^2_{lg})$	$x_{cp.}$	$S^2 (S^2_{lg})$
Bi	0,172	0,0010	0,179	0,0038	0,180	0,0019	0,202	0,0015
Cd	2,50	0,039	2,50	0,039	2,46	(0,0021)	2,52	(0,0006)
Sb	3,94	4,968	3,82	1,055	3,55	(0,0298)	3,09	(0,0040)
As	11,0	10,82	11,5	10,09	11,5	9,08	12,4	5,93
Hf	5,20	0,262	5,18	1,151	5,06	(0,0036)	4,64	(0,0006)
Mn	4390	(0,072)	4120	(0,066)	4510	(0,0554)	3680	(0,0172)
Pb	40,4	76,44	43,6	180,4	43,1	107,5	50,3	13,94
Zn	208	1725	208	2358	211	1880	227	413,1
P	2080	267984	1940	388906	2070	263477	2310	51809
Cu	78,5	(0,0047)	83,5	(0,0040)	81,4	(0,0045)	86,3	(0,0018)
V	120	(0,0024)	130	(0,0098)	121	(0,0031)	117	(0,0004)
Ti	5570	1074708	5950	6192599	5380	(0,0117)	4610	(0,0025)
Zr	182	680,3	189	2080	180	(0,0058)	172	(0,0011)
Cr	64,6	47,99	70,4	155,2	67,1	(0,0043)	75,3	(0,0046)
Ni	39,6	16,48	44,0	91,81	–	$p < 0,01$	43,1	50,37
Sr	262	667,5	235	1041	248	1065	240	220,3
Li	17,3	13,35	16,6	20,33	17,3	14,48	20,3	2,09
Be	1,13	0,008	1,10	0,012	1,12	0,009	1,21	0,002
Rb	51,2	22,38	49,6	49,17	50,7	(0,0022)	55,1	(0,0003)
Cs	1,22	0,070	1,24	0,140	1,26	0,087	1,39	0,018

Примечание. 1. $x_{cp.}$ – среднее значение концентраций (г/т): арифметическое для нормального и геометрическое для логнормального распределений, S^2 – дисперсия, S^2_{lg} – дисперсия значений логарифмов. 2. Для Sb $n_3 = 25$ ввиду наличия статистически аномального значения 6,77 г/т (участок загрязнения в зоне пляжа).

ные осадки в этом месте характеризуются (г/т): высоким содержанием V (218), Ti (9650), Cd (2,94) и Hf (6,68), минимальным содержанием Li (10,4), P (911), Pb (21,8), Rb (39,2), Cs (0,68), Bi (0,088) и Mn (1375).

Исключение выявленной «аномальной» пробы из расчетов позволило получить для объединения однородные выборки, в которых дисперсии и значения средних концентраций (логарифмов концентраций) по 19 элементам отличаются незначимо ($p > 0,05$). Выборочные дисперсии имеют значимые различия только по Ni ($p < 0,01$), кларк концентрации (КК) которого мал и варьирует по всей прибрежной зоне мелководья от 0,5 до 1,1.

Анализ полученных концентраций элементов для донных осадков зоны аккумуляции выявил пробы со статистически аномально высокими и аномально низкими концентрациями Cd (3,6 и 1,84 г/т соответственно), Hf (5,96–7,09 и 3,22 г/т) и Zr (295 и 109 г/т). После исключения трех «аномальных» проб объем выборки составил $n_3 = 26$ (табл. 1).

Оценка сопоставимости данных по прибрежной зоне мелководья и зоне аккумуляции на основе табл. 1 показывает значимость различий выборочных дисперсий почти для всех изученных элементов. Степень различий снижается по мере убывания значений F-критерия (7,71–2,54 при $F = 2,14 \div 2,04$) в ряду: Pb > Sb > V > Li > Rb > Hf > Be > Zr > P > Sr > Cs > Ti > Zn > Cd > Mn > Cu. Эти различия связаны с более суще-

ственными колебаниями концентраций в донных осадках прибрежной зоны водной системы по сравнению с опробованной на меньшем протяжении зоной аккумуляции.

Для As, Bi и Cr различия дисперсий незначимы ($F = 1,53–1,06$), однако имеются значимые различия средних значений концентраций Cr ($p < 0,05$).

В табл. 2 и 3 представлены результаты корреляционного анализа для концентраций (логарифмов концентраций) химических элементов в выборках, характеризующих донные осадки мелководной зоны (табл. 2) и зоны аккумуляции (табл. 3). Для ряда элементов наблюдается статистически значимая зависимость значений их концентраций от удаленности от верхней точки переходной зоны обследованной водной системы по направлению к нижней точке водохранилища. Так, для V и Ti эта зависимость является обратной и обеспечивается прежде всего резким и закономерным снижением их концентраций в донных осадках переходной зоны (рис. 2). В средней части водохранилища содержание V и Ti стабилизируется, что отражается также на корреляционных связях в выборке, характеризующей зону аккумуляции (табл. 3); в нижней части водохранилища замечен относительно небольшой разброс концентраций.

Для Li зависимость является прямой (табл. 2). Представленные на рис. 3 в качестве примеров тренды концентраций Li, Rb и Cs показывают

Таблица 2

Парные коэффициенты корреляции между значениями концентраций (логарифмов концентраций) химических элементов в донных осадках мелководной прибрежной зоны

lgTi	V	Li	P	lgCd	Zn	As	lgHf	lgZr	Pb	Sr	lgMn	Cu	Bi	lgSb	Cr	
-0,55	-0,58	0,59	0,28	0,33	0,27	0,11	0,14	0,10	0,35	-0,33	-0,14	0,09	0,33	-0,02	0,41	L
	0,82	-0,65	-0,38	-0,25	-0,46	-0,35	0,00	0,07	-0,66	0,49	0,07	-0,17	-0,64	-0,16	-0,64	lgTi
		-0,45	-0,28	-0,46	-0,24	-0,18	-0,26	-0,12	-0,45	0,22	0,15	0,20	-0,45	-0,16	-0,63	V
			0,77	-0,19	0,85	0,63	-0,55	-0,58	0,86	-0,67	0,22	0,66	0,55	-0,17	0,23	Li
				-0,11	0,82	0,79	-0,51	-0,56	0,70	-0,46	0,57	0,56	0,35	0,00	0,03	P
					-0,22	-0,12	0,86	0,80	-0,24	0,16	-0,15	-0,46	-0,03	0,22	0,56	lgCd
							0,78	-0,63	-0,61	0,85	-0,73	0,58	0,77	0,38	-0,15	Zn
								-0,45	-0,47	0,68	-0,58	0,68	0,70	0,16	0,16	As
									0,95	-0,62	0,47	-0,42	-0,70	-0,29	0,27	lgHf
									-0,64	0,41	-0,37	-0,64	-0,32	0,19	0,34	lgZr
									-0,71	0,38	0,62	0,67	-0,08	0,33		Pb
										-0,36	-0,72	-0,31	0,12	-0,30		Sr
											0,43	-0,15	0,14	-0,10		lgMn
												0,23	-0,29	-0,01		Cu
													-0,07	0,26		Bi
														0,11		lgSb

Примечание. L – расстояние точек отбора проб от верхней точки опробования по направлению вдоль береговой линии (м); критический $r_{0,95; 17} = 0,46$. Полужирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты корреляции.

Таблица 3

Парные коэффициенты корреляции между значениями концентраций (логарифмов концентраций) химических элементов в донных осадках зоны аккумуляции

V	Li	P	lgCd	Zn	As	Hf	Zr	Pb	Sr	Mn	Cu	Bi	Sb	lgCr	Ni	
0,38	-0,14	-0,02	0,45	-0,20	0,01	0,42	0,31	-0,08	0,18	0,02	0,28	-0,14	0,46	0,28	0,22	Ti
	0,62	0,72	0,35	0,57	0,24	0,09	-0,15	0,61	0,04	0,06	0,70	0,46	0,05	0,15	0,05	V
		0,90	0,08	0,92	0,59	-0,31	-0,28	0,88	-0,41	0,44	0,73	0,70	-0,30	-0,09	0,07	Li
			0,17	0,88	0,42	-0,16	-0,30	0,79	-0,21	0,26	0,70	0,51	-0,38	-0,18	-0,09	P
				0,15	-0,17	0,76	0,42	0,03	0,25	0,14	0,17	-0,08	-0,07	-0,11	-0,04	lgCd
					0,50	-0,22	-0,25	0,87	-0,36	0,41	0,68	0,54	-0,35	-0,16	0,05	Zn
						-0,58	-0,21	0,57	-0,67	0,69	0,59	0,56	0,22	0,44	0,52	As
							0,51	-0,29	0,62	-0,35	-0,14	-0,46	-0,04	-0,30	-0,25	Hf
								-0,26	0,15	0,09	0,00	-0,25	0,03	0,01	0,09	Zr
									-0,45	0,42	0,73	0,66	-0,19	-0,04	0,09	Pb
										-0,79	-0,33	-0,47	-0,01	-0,50	-0,67	Sr
											0,48	0,41	0,00	0,33	0,54	Mn
												0,50	0,06	0,21	0,32	Cu
													0,06	0,30	0,29	Bi
														0,57	0,48	Sb
															0,84	lgCr

Примечание. Критический $r_{0,95;24} = 0,39$.

закономерный рост содержания редких литофилов в донных осадках вплоть до средней части водохранилища, в которой колебания концентраций оказываются минимальными и далее резко снижаются. В нижней части водохранилища вновь наблюдается рост концентраций.

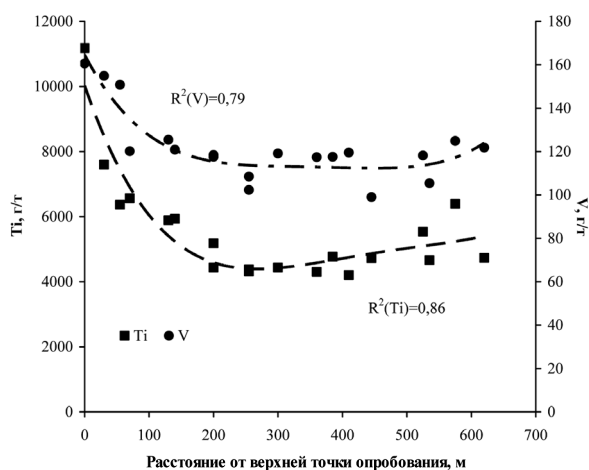


Рис. 2. Распределение Ti и V в донных осадках мелководной прибрежной зоны водной системы «переходная зона – водохранилище» в нижней части р. Лососинки

Все закономерные изменения концентраций элементов в переходной зоне объясняются механической дифференциацией осаждающихся и накапливающихся в донных осадках частиц при замедлении скорости речного потока. Вариации концентраций в нижней части водохра-

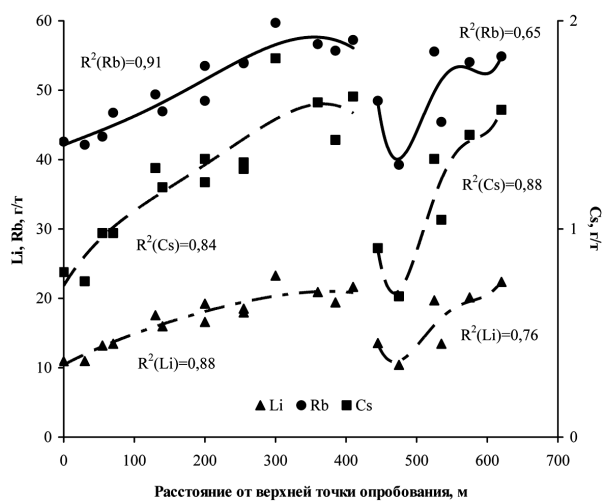


Рис. 3. Распределение Li, Rb и Cs в донных осадках мелководной прибрежной зоны

нилища могут быть связаны с искусственными непостоянными причинами (например, сезонным регулированием стока). Причиной резкого снижения концентраций Li и сопутствующих ему элементов (рис. 3) в некоторых пробах донных осадков средней и нижней частей водохранилища может быть присутствие более крупных частиц (алевритовых во фракции $< 0,1$ мм) из ранее сформировавшегося по правому берегу водохранилища речного аллювия. На некоторых локальных участках различия в степени осаждения взвешенных частиц, а следовательно, в на-

коплении разного количества соответствующих химических компонентов могут определяться наличием островов, частично экранирующих течение воды.

Из представленных корреляционных матриц (табл. 2 и 3) следует, что Li в донных осадках сопутствуют (по убыванию значений коэффициентов корреляции): в мелководной прибрежной зоне – Pb, Zn, P, Cu, As, Bi; в зоне аккумуляции – Zn, P, Pb, Cu, Bi, V, As, Mn.

Приведенные взаимоотношения указывают на то, что перечисленные элементы, в том числе экологически опасные в связи с их повышенными концентрациями P, Zn, Pb, Cu, As, частично Mn и V, вслед за Li, а также ассоциирующимися с ним Rb и Cs (рис. 3) накапливаются в донных осадках, главным образом с легкими фракциями. В большей степени это происходит в зоне аккумуляции согласно «правилу пелитовой фракции».

В целом, несмотря на отмечаемую повсеместную связь Li с глинами [3], [11] и кларк 32 г/т [14], его количество в изучаемых донных осадках невелико: средние значения составляют от 16,6 до 23,3 г/т (табл. 1). Последнее обстоятельство обусловлено как малым привносом Li с водосбора, так и выносом части глинистой фракции во взвешенном состоянии в Онежское озеро.

Корреляционные связи между значениями концентраций Ti и V в выборках, характеризующих донные осадки прибрежной зоны мелководья (табл. 2) и зоны аккумуляции (табл. 3), кардинально различаются. В частности, во втором случае отмечается резкое снижение величины коэффициента корреляции до уровня ниже статистической значимости, а также появление значимой прямой корреляционной связи между значениями концентраций V, с одной стороны, и P, Cu, Li, Pb, Zn, Bi – с другой.

Особенности корреляционных взаимоотношений значений концентраций Sr с Li и Mn в обеих выборках могут свидетельствовать о двойственном характере его поведения в изучаемой водной системе, то есть не только о важной роли механической дифференциации твердого вещества водной системы, но и об определенном взаимодействии вод с различными кислотно-щелочными свойствами.

В переходной зоне концентрации Sr снижаются закономерно, а в пределах водохранилища наблюдается значительный их разброс (рис. 4) за счет разницы значений концентраций Sr в донных осадках прибрежной зоны средней части водохранилища левого и правого берегов: средние значения 197 и 283 г/т соответственно ($p < 0,01$). Заметный антагонизм Mn и Sr в донных осадках зоны аккумуляции (табл. 3) может свидетельствовать о пространственно-временных колебаниях значений pH вод водохранилища, влияющих на растворимость соединений химических элементов, согласно представлениям А. И. Перельмана [11].

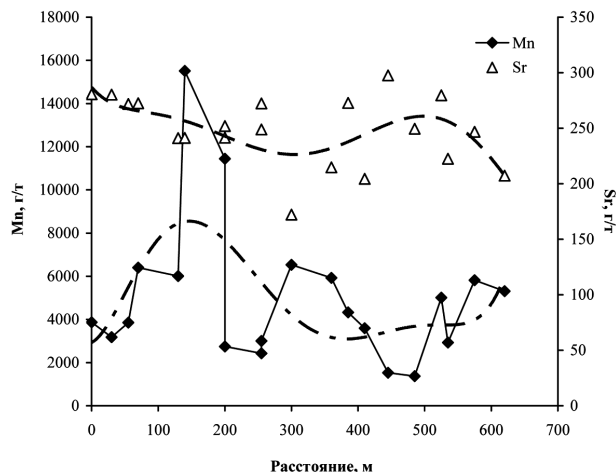


Рис. 4. Распределение Mn и Sr в донных осадках мелководной прибрежной зоны

Данные табл. 2 и 3 также не позволяют относить полностью или частично такие элементы, как Mn, Cd, Hf, Zr, Cr, Sb, к ассоциациям элементов – индикаторам механической дифференциации твердого вещества донных осадков.

Наиболее значительные концентрации Mn в донных осадках (15 515 и 11 440 г/т) фиксируются на границе переходной зоны с водохранилищем – на расстоянии от верхней точки опробования 140 м по правому берегу и 200 м – по левому (рис. 1, 4). Донные осадки в этом месте приобретают характерную желто-коричневую и темно-красновато-коричневую окраску. На данном участке по левому берегу зафиксировано локальное повышение значений pH воды до 7,15–7,22 по сравнению с расположенным выше по течению участком переходной зоны – 7,01, что может указывать на существование здесь щелочного гидрохимического барьера (рис. 1). По более мелководному правому берегу изменения кислотности также имеют место, но они менее заметны – pH 6,95 (переходная зона) – 7,03–7,06 (граница с водохранилищем).

В зоне аккумуляции Mn ассоциируется с As, а также частично с Ni, Cu, Cs, Li, Pb, Zn, Bi (табл. 3).

По данным табл. 2 и 3, выделяется «сквозная» ассоциация Cd-Hf-Zr, в которой наиболее потенциально опасным токсикантом, судя по очень высокому содержанию в донных осадках (табл. 1), является Cd. В. В. Гавриленко и В. В. Сахоненко [3], обобщая данные многих исследователей, отмечали приуроченность Hf и Zr в природных условиях к алевроитовой фракции терригенных осадков. По А. И. Перельману [11], Hf и Zr могут лишь частично мигрировать в щелочной среде, в то время как Cd хорошо мигрирует в кислых водах окислительной и глеевой обстановок и обычно осаждается на щелочном барьере вместе с Zn, Cu, Ni и Pb.

Необычные взаимоотношения Cd с другими элементами объясняются его привносом в исследуемую водную систему в качестве загряз-

нителя. Действительно, хорошо известно повсеместное техногенное распространение Cd, в том числе на урбанизированных территориях [2], [16] и др. В качестве источников загрязнения Cd могут выступать процессы использования кадмиевых красителей, покрытий, сплавов, порошков, сбросы гальванических отходов, горение поливинилхлорида, разложение выброшенных химических источников тока (свалки), движение автотранспорта.

Обращают на себя внимание концентрации Sb в донных осадках зоны пляжа, достигающие 5,6–8,9 г/т (выше ПДК в 1,2–1,9 раза), что может свидетельствовать о прошлом специфическом загрязнении некоторых участков. В зоне аккумуляции Sb ассоциируется с Cr, Ti и Ni.

Для Cr, значения концентраций которого связаны со значениями концентраций небольшого числа элементов (табл. 2 и 3), также характерны свои особенности для каждой обследованной зоны водохранилища. В частности, несмотря на незначительные средние концентрации Cr в донных осадках (табл. 1), имеется определенная его связь не только с Sb (табл. 3), но также с такими загрязнителями, как Cd (табл. 2) и As (табл. 3).

Сильная корреляционная связь установлена между значениями концентраций Cr и Ni (табл. 3). Для выборок n_1 и n_2 , характеризующих мелководные условия прибрежных участков водохранилища, соответствующие парные коэффициенты корреляции имеют значения: $r_{1, \lg Cr-Ni} = 0,89$ и $r_{2, Cr-Ni} = 0,98$ при $r_{крит.} = 0,63$. Эти отношения указывают на совместное поведение Cr и Ni в донных осадках.

ВЫВОДЫ

1. В пределах нижней части р. Лососинки основным фактором осаждения и накопления химических элементов является механическая дифференциация. Вынос наиболее легких гранулометрических фракций происходит в зону аккумуляции наносов, расположенную в пределах входящего в изученную водную систему водохранилища, и сопровождается увеличением в донных осадках концентраций Li, Rb и Cs, а также снижением концентраций Ti и V.

2. Элементы-загрязнители поступают в реку прежде всего с неочищенными стоками городской ливневой канализации. Pb, Zn, P, Cu, As и Mn осаждаются в зоне аккумуляции совместно с Li, Rb и Cs по «правилу пелитовой фракции». На границе переходной зоны и верховой части водохранилища в максимальных количествах осаждаются Mn (более 1,1–1,5 масс. % в донных осадках), что связано с изменением реакции вод на данном участке от слабокислой и нейтральной до слабощелочной.

3. На участке локального загрязнения ливневыми стоками в нижней части водохранилища накапливаются V и Cd.

4. К наименее «встроенным» в основные установившиеся в водной системе динамические процессы природно-технического распределения химических элементов следует отнести Cd и Sb. При этом Cd является опасным сквозным элементом-загрязнителем в связи с его повышенными концентрациями во всех без исключения проанализированных пробах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белкина Н. А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Труды КарНЦ РАН. Водные проблемы Севера и пути их решения. 2011. № 4. С. 35–41.
- Волков С. Н. Геохимия кадмия в урбанизированной среде и проблемы изменения состояния металлов при урбанизации: Автореф. дисс. ... д-ра геол.-минерал. наук. М., 2001. 50 с.
- Гавриленко В. В., Сахоненко В. В. Основы геохимии редких литофильных металлов. Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. 172 с.
- Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2008 г. / Мин-во сельского, рыбного хозяйства и экологии РК; Ред. коллегия: А. Н. Громцев (гл. ред.), Ш. Ш. Байбусинов, В. И. Колесова, О. Л. Кузнецов, Т. Б. Ильмаст. Петрозаводск, 2009. 288 с.
- Горохов А. В., Марченко Л. П. Распределение тяжелых металлов в водах реки Лососинки // Экосистемы малых рек: биоразнообразие, биология, охрана: Тез. докл. Всероссийской конференции 16–19 ноября 2004 года. Борок, 2004. С. 17.
- Даувальтер В. А. Оценка экологического состояния водоемов по химическому составу донных отложений // Геология, геохимия и экология Северо-Запада России: Материалы I Междунар. науч. конф. СПб., 2005. С. 94–96.
- Иванская Т. Б. Эколого-геохимическая характеристика почв и донных осадков юго-запада Ленинградской области: Дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб., 2006. 194 с.
- Кондратьева Л. М. Вторичное загрязнение водных экосистем // Водные ресурсы. 2000. Т. 27. № 2. С. 221–231.
- Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения поверхностных водотоков химическими элементами. М.: ИМГРЭ, 1982. 74 с.
- Оrientировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2511-09 (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 18 мая 2009 г. № 32).
- Перельман А. И. Геохимия. М.: Высш. шк., 1989. 528 с.
- Петрова Е. А. Закономерности распределения и формы нахождения тяжелых металлов в донных осадках Ладожского озера: Автореф. дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб., 2005. 18 с.
- Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041-06 (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 19 февраля 2006 г. № 1).
- Справочник по геохимии / Г. В. Войткевич, А. В. Кокин, А. Е. Мирошников, В. Г. Прохоров. М.: Недра, 1990. 480 с.
- Экологические функции литосферы / В. Т. Трофимов, Д. Г. Зилинг, Т. А. Барабошкина и др.; Под. ред. В. Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2000. 432 с.
- Boehme S. E., Panero M. A. Pollution prevention and management strategies for cadmium in the New York / New Jersey Harbor: A Report from the Harbor Consortium of the New York Academy of Sciences. N. Y., 2003. 65 p.
- Middelkoop H. Heavy-metal pollution of the river Rhine and Meuse floodplains in the Netherlands // Geologie en Mijnbouw / Netherlands Journal of Geosciences. 2000. Vol. 79 (4). P. 411–428.

АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ СОБИСЕВИЧ
научный сотрудник, Институт истории естествознания
и техники им. С. И. Вавилова РАН (Москва, Российская
Федерация)
sobisevich@mail.ru

КАРТА ОЛОНЕЦКОГО УЕЗДА КАК ИСТОЧНИК СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО ТЕРРИТОРИИ КАРЕЛИИ ПЕРВОЙ ЧЕТВЕРТИ XVIII ВЕКА

В статье рассматривается информативность первой отечественной крупномасштабной карты территории Карелии. «Ландкарта Олонецкого уезда», составленная картографом Акимом Клешнинным в 1728 году, сообщает ценную информацию о расположении объектов социально-экономической инфраструктуры. Для проверки достоверности карты проводится сопоставление сообщаемой ею информации с данными других письменных источников.

Ключевые слова: Карелия, Олонецкий уезд, история, география, социально-экономическая история

«Ландкарта Олонецкого уезда» (см. рисунок), созданная в 1728 году геодезистом Акимом Клешнинным, является ценным картографическим источником, показывающим территорию Карелии [1]. Созданная в результате первых всеобщих съемок территории Российской империи, карта сообщает уникальную информацию о пространственном расположении таких важных объектов социально-экономической инфраструктуры, как монастыри и пустыни, погосты и волостные центры, водные мельницы и заводы. К карте был приложен каталог, содержащий полный перечень населенных пунктов в Олонецком уезде, а также перечень рек, по берегам которых находились водяные мельницы [2]. В исследовательской литературе встречаются различные оценки достоверности ранних карт и методов их использования. Считается, что информативность создаваемых в начале XVIII века картографических материалов с избытком перекрывала их неточности, более того, содержащаяся в этих картах информация является уникальной [9; 12–14]. Использование карт первой половины XVIII века возможно только после проведения подробного источниковедческого анализа с выяснением обстоятельств возникновения конкретного картографического источника и сверкой его информационного содержания с другими типами источников [10; 186].

Таким образом, передаваемая картой Олонецкого уезда информация должна восприниматься критически, так как использовавшиеся при составлении карт петровскими геодезистами еще не совершенные методики топографических работ могли способствовать возникновению серьезных погрешностей. Источниковедческий анализ картографического произведения следует проводить путем выделения из него информационных слоев, а затем последовательной сверки их содержания с наиболее близкими к дате составления карты историческими источниками.

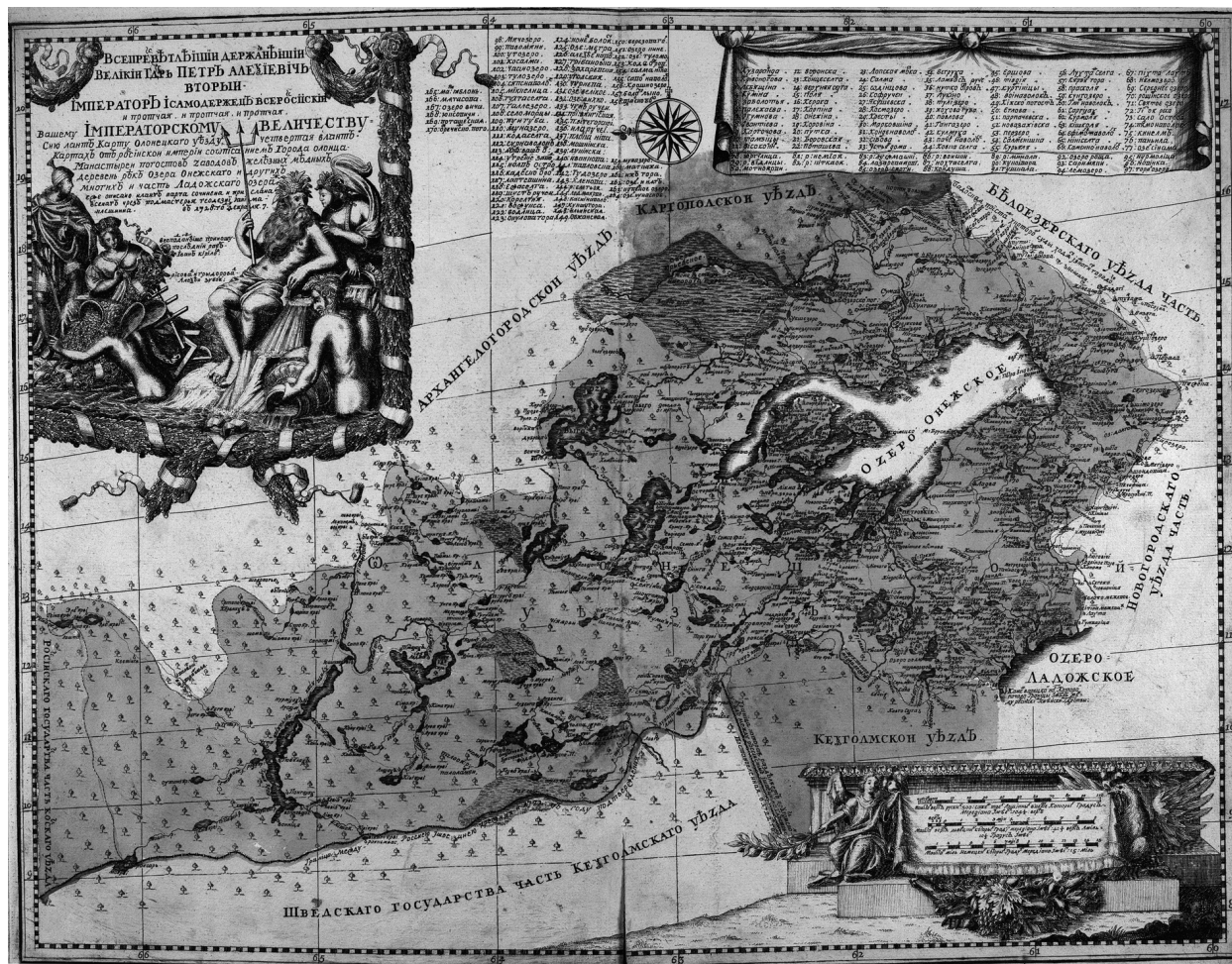
Материалы ревизских описаний, проводимых в Олонецком уезде в 1721–1722 годах, в полной мере помогают проверить информативный потенциал карты и достоверность сообщаемой ею информации. В отдельных случаях для анализа

поселенческой инфраструктуры могут привлекаться более ранние источники. В данном случае была использована «Переписная книга Лопских погостов Олонецкого уезда» (1678 год) [6].

Материалы второй ревизии дают возможность определить, действительно ли в поселениях, обозначенных на карте как погосты и волости, находились церкви. Карта упоминает значительное количество поселений, имеющих статус волостей, поэтому необходимо ограничиться приведением ряда примеров, позволяющих в полной мере отразить информативный потенциал и достоверность источника. На территории Селецкого погоста Аким Клешнин упоминает поселение Гимолу как волость, хотя в списке церквей за 1722 год нет упоминаний о наличии в нем церковного строения. Использование «Переписной книги...» позволяет установить, что в этом селе к 1678 году церковь сгорела при пожаре [6]. В Семсозерском погосте в двух волостях Юштарви и Семсоярви, согласно списку церквей за 1722 год, также не имелось церковных строений [4]. Таким образом, наблюдается сохранение за поселениями волостного статуса даже после утраты церковных строений. Вместе с тем имеются свидетельства утраты поселением своего волостного статуса после разрушения церковного строения. В Паданском погосте, согласно данным «Переписной книги...» 1678 года, в выставке Масельга находилось церковное строение, но в списке церквей за 1722 год это поселение уже не упоминается, а карта и каталог Олонецкого уезда указывают его как деревню.

Территория Олонецкого уезда традиционно делилась на северные Лопские погосты и более густонаселенные Заонежские. Большое количество упомянутых картой погостов и находящихся в их составе поселений ограничивает нас необходимостью привести результаты сопоставления карты и материалов ревизии только по нескольким территориально-административным единицам.

В Селецком погосте ревизские материалы подтверждают достоверность содержащейся на карте Олонецкого уезда информации относи-



Ландкарта Олонецкого уезда (1728)

тельно расположения 12 поселений [10]. Вместе с тем соотнесение ряда поселений вызывает определенные затруднения, обусловленные отличным написанием их названий в других источниках. С учетом схожести гидронимов поселение Вонгесарь может быть соотнесено с деревней под названием Остров на озере Вонго, а поселение Илюсина гора – с деревней Васильева Гора на Вонгозере. Ревизские описания сообщают о значительном количестве поселений, которые не были упомянуты ни картой, ни каталогом Олонецкого уезда.

В Линдозерском погосте отмечается совпадение информации, сообщаемой картой Олонецкого уезда и каталогом, относительно расположения 14 деревень. Каталог Олонецкого уезда дополнительно сообщает о существовании на территории Линдозерского погоста деревень Сювяярви, Говиконду, Каски Наволок, Педризеро, Шолта [2], которые не упоминаются в материалах второй ревизии. Ревизские материалы по этой территории содержат дополнительную информацию о существовании в Линдозерском погосте поселений: Верхняя Гора, Глубокое Озеро, Святозеро, Троперозеро, Кондыламба [6]. Общее количество совпавших по карте и по данным ревизских материалов поселений состав-

ляет 14 единиц, причем отдельно оба источника дополнительно упоминают по 5 населенных пунктов, которые в силу различий названий не представляется возможным сопоставить.

Аким Клешнин указывал в каталоге на существование 63 населенных пунктов в Пудожском погосте. Сама же карта показывает в данной волости только 30 поселений, поэтому генерализация населенных пунктов составляет около 50 %. Вместе с тем ревизские материалы сообщают о наличии 102 поселений в данном погосте, что на 40 % превышает заявленное Клешниним количество, а в ходе сопоставления 43 населенных пункта были отождествлены с указанными картой и каталогом Олонецкого уезда.

Согласно данным каталога, в Олонецком погосте находилось 337 населенных пунктов, только 137 поселений были показаны на карте, а 200 поселений не были отражены из-за высокой генерализации картографического полотна. В свою очередь, материалы ревизского описания сообщают информацию о 381 поселении на территории погоста, что свидетельствует о большей подробности материалов ревизии при описании поселенческой инфраструктуры. Сопоставление карты и каталога Акима Клешнина с данными

ревизского описания позволило получить следующие результаты: 166 из 337 поселений, указанных на карте и в каталоге Олонецкого уезда, были соотнесены с данными ревизских материалов по погосту.

Промышленное производство Олонецкого края в допетровское время существовало в основном в виде крестьянских железоделательных промыслов. Крестьянские кузницы не могли обеспечить потребности армии в металле, поэтому усилия правительства были направлены на создание на территории Карелии развитой металлургической индустрии. В последние годы Северной войны началось угасание активности Олонецких заводов [7; 59–60]. Поэтому ко времени проведения А. Клешниным съемок в 1728 году на территории Олонецкого уезда функционировали три завода: Петровский и Повенецкий железоделательные заводы, Кончезерский медеплавильный завод. Вместе с тем геодезист показал на карте законсервированный Устьрецкий завод, а также завод на реке Лижме. Сведения о существовании последнего отсутствуют в литературе.

Карта Олонецкого уезда и каталог сообщают нам сведения о расположении 144 водяных мельниц. Согласно этим данным, мельницы часто образовывали по рекам каскады, причем эта информация подтверждается источниками середины XVIII века. По свидетельству крестьянина Святозерской волости Олонецкого погоста Деметрия Трофимова, выше его мельницы по реке Урас находилась плотина священника Феодора Мокеева, а ниже – крестьянина Григория Назарева [5; 7]. Единственная в Олонецком крае лесопильная мельница, по мнению М. А. Цейтлина, была построена на реке Пидьма крестьянином Григорием Тишиным, так как водный режим этой реки был стабилен и позволял производить распиловку бревен 10 месяцев в году [11; 86].

С целью установления расположения водяных мельниц было осуществлено отождествление объектов, показанных на старинной карте, в рамках современной системы координат. В результате проведенной работы были идентифицированы и перенесены на современную карту 73 мельницы. В ходе анализа их расположения стало ясно,

что большинство мукомольных мельниц располагались по берегам небольших рек и ручьев.

Карта показывала два типа дорог – главные и проселочные. Использование главных дорог для почтового сообщения подтверждается наличием на тракте от Олонца до Петровской слободы пункта для смены лошадей – Половинной подставы. Создание почтовой дороги, соединившей верфь в Лодейном Поле с г. Олонцом, Петровским заводом и Повенцом, относится к 1704 году [11; 32]. Представляется наиболее вероятным, что показанная на карте Олонецкого уезда и описанная в данной книге почтовая дорога существовала ранее как обычная проселочная, а затем была перестроена под нужды почтовой службы. Карта содержит информацию о развитой сети проселочных дорог, причем наибольшей густоты дорожная сеть достигала на юго-западе уезда. В средней и северной части уезда дорог было мало, зачастую они прерывались озерами и реками.

Вместе с тем озера и реки являлись крайне важными транспортными путями. В каталоге Олонецкого уезда был приведен список судоходных рек и тех, где судоходство было невозможно. Судоходными были Олонка, Тулокса, Видлица, Ошта, Шуя и Мегра до располагающихся выше по течению погостов и волостей. В ряде случаев судоходство заканчивалось у малых поселений: река Вытегра была судоходна до деревни Шестовой, Водла – до деревни Подпорожье, Выг – до пустыни Райпорог [2; 269].

Карта Олонецкого уезда была одним из первых картографических изображений этой территории, которая в значительной мере соответствует современной. Большое количество локализуемых с ее помощью населенных пунктов и объектов экономической инфраструктуры позволяет говорить об уникальности данного источника при передаче социально-экономической информации. Проведенный анализ и сопоставление карты с данными современных ей источников дает возможность утверждать, что имеющиеся расхождения и неточности обусловлены преимущественно использованием геодезистами в качестве источника информации опросов местного населения.

ИСТОЧНИКИ

1. Ландкарта Олонецкого уезда с показанием города Олонца, погостов, монастырей, заводов железных и медных, деревень, рек, озера Онежского и других многих и часть Ладожского озера // Атлас Всероссийской империи. СПб., 1934.
2. РГАДА. Ф. 248. Кн. 1201. Л. 233–272.
3. РГАДА. Ф. 350. Оп. 2. Д. 2369.
4. РГАДА. Ф. 350. Оп. 2. Д. 2374.
5. РГАДА. Ф. 547. Оп. 1. Д. 1194. Л. 7.
6. РГАДА. Ф. 1209. Д. 8537.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

7. Василевский А. П. Очерк по истории металлургии Олонецкого края в XVI–XVII вв. Петрозаводск: Госиздат КФССР, 1949. 65 с.
8. Дороги Карелии: С древнейших времен до наших дней. СПб.: Лики России, 1999. 199 с.
9. Постников А. В. Развитие картографии и вопросы использования старых карт. М.: Наука, 1985. 214 с.
10. Сотникова С. И. Источниковедение русских карт XVIII – начала XIX вв.: Дисс. ... д-ра ист. наук. М., 1990. 383 с.
11. Цейтлин М. А. Очерки развития лесозаготовок и лесопиления в России. М.: Лесн. пром-сть, 1968. 136 с.

ЮРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ КАРПЕЧКОдоктор географических наук, ведущий научный сотрудник
Института водных проблем Севера, Карельский науч-
ный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
*karp@nwpi.krc.karelia.ru***НАДЕЖДА АЛЕКСАНДРОВНА МЯСНИКОВА**аспирант Института водных проблем Севера, Карельский
научный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
gold_dream@mail.ru

РАСЧЕТ ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЯ

Получена количественная оценка влияния продуктивности древостоя на массу листвы и показана взаимосвязь массы листвы и корневой системы древостоя. Выполнен анализ существующих методов расчета количества листвы. Предложены формулы для расчета массы листвы, общей фитомассы и прироста общей фитомассы древостоя для сосняков, ельников и березняков.

Ключевые слова: фитомасса, масса листвы, класс бонитета, прирост фитомассы

При решении задач, связанных с круговоротом вещества и энергии возникает вопрос о количестве различных частей и общей величины фитомассы леса. Зависимости соотношения частей фитомассы древостоя от метеорологических условий вызывают интерес при исследовании механизма транспирации [15]. Масса листового аппарата представляет собой важный при определении этого физиологического процесса показатель, поэтому уточнение методов расчета количества хвои и листьев должно способствовать совершенствованию моделей транспирации древостоя и суммарного испарения с леса.

Кроме того, при отсутствии простых экспериментальных методов определения транспирации древостоя изучение динамики частей его фитомассы и их соотношений формирует некоторое представление об изменении расхода воды с возрастом леса и в различных условиях его роста. Наличие этих оценок позволяет хотя бы косвенно судить об адекватности используемых методов расчета.

Для определения среднесуточной величины транспирации древостоя с помощью предложенного автором [5] метода могут применяться такие характеристики, как общая величина фитомассы древостоя и ее текущий прирост, что также является одним из побудительных мотивов для уточнения методов расчета этих показателей.

В лесном хозяйстве практический интерес к величине фитомассы древостоя ограничивается информацией о количестве стволовой древесины, выраженном в объемных единицах. Данную характеристику определяют при проведении таксации лесов, она имеется в базах данных о состоянии лесного фонда каждого региона. Сведения о различных частях фитомассы и о ее общей величине получают при проведении исследовательских работ, поэтому они имеются в очень ограниченном количестве.

В последние годы выполнен большой объем работ по сбору и обобщению этой информации, в частности, В. А. Усольцевым [11], [12]. Переход от объема (запаса) стволовой древесины к общей фитомассе древостоя затруднен тем, что соотношение между этими показателями зависит, как это показано в [1], [2], [3], от возраста древостоя и условий произрастания. В данной работе на основании опубликованных данных [1], [2], [3], [11], [12] приведен анализ формирования соотношений некоторых частей фитомассы древостоя, получены и предложены эмпирические зависимости для определения массы листового аппарата, общей фитомассы древостоя и ее текущего прироста.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Запас фитомассы древостоя для каждого конкретного участка леса определяется продолжительностью периода роста (возрастом) растения, его биологическими особенностями и условиями произрастания. Это можно представить в следующем виде:

$$P = f(T, Bel, Bon), \quad (1)$$

где P – фитомасса на единице площади, т/га; T – возраст, лет; Bel – биологические особенности растения; Bon – класс бонитета.

Для конкретного древостоя, произрастающего в конкретных условиях, фитомасса является функцией его возраста ($P = f(T)$). Также ее можно представить как функцию средней высоты древостоя ($P = f(h)$). Последняя функция в меньшей степени связана с классом бонитета, чем предыдущая, так как высота древостоя конкретного возраста характеризует и условия произрастания (это лежит в основе бонитерочной таблицы). Такие зависимости, полученные по данным наблюдений, могут быть надежными только в том случае, если древостои, где проводились наблюдения, имели одинаковую полноту.

Эмпирические данные, как правило, получены при различной полноте, а переход к какой-либо конкретной полноте, несомненно, будет сопровождаться потерей в точности. Данное обстоятельство создает сложности для использования уравнения вида (1) при анализе эмпирических данных.

Кроме того, применение функции $P = f(h)$ осложняется еще и тем, что в зависимости от лесорастительных условий меняется абсолютная и удельная величина фитомассы. В частности, на рис. 1 показана тенденция роста отношения фитомассы к средней высоте древостоя (P/h) с увеличением его продуктивности для сосняков, ельников и березняков (светлые кружочки – ельник, заштрихованные – сосняк, крестики – березняк). Увеличение продуктивности древостоя на один класс бонитета сопровождается возрастанием средней массы каждой единицы высоты древостоя (1 м) на 1,2–0,7 т/га.

При построении представленных на рис. 1 зависимостей и в дальнейшем классы бонитета заменялись на показатели классов бонитета. Последние представлены арабскими цифрами (обозначения Ia, I, ..., V, Va заменены на 7, 6, ..., 2, 1) [6]. Эта замена принятых произведена для удобства анализа и формализации зависимостей.

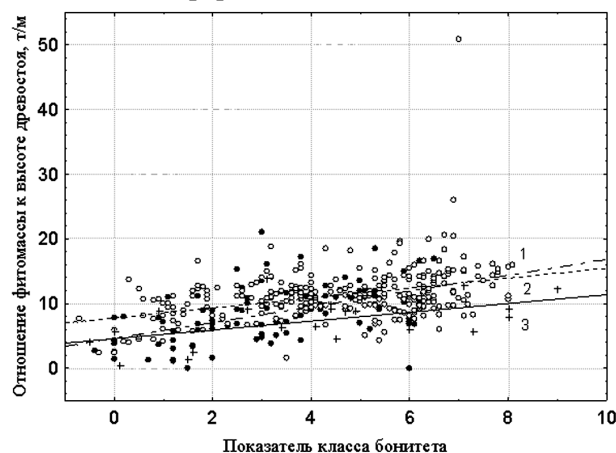


Рис. 1. Зависимость отношения общей фитомассы древостоя к средней высоте древостоя от показателя класса бонитета (1 – сосняк, 2 – ельник, 3 – березняк)

При определении частей деревьев важным обстоятельством является то, что в зависимости от лесорастительных условий могут меняться соотношения между ними. В частности, С. Н. Сеннов указывает на увеличение удельной массы корней при ухудшении почвенных условий [8]. Подобные изменения происходят и с листовым аппаратом. Влияние условий роста на листовую аппарат можно показать следующим образом. Лист является органом, осуществляющим тесное взаимодействие растения с атмосферой. Влияние солнечной энергии на растение осуществляется в большей степени через листовую аппарат. Посредством него происходит ас-

симилиация углекислого газа и выделение влаги в атмосферу. Масса листового аппарата связана с объемом необходимых для растения в данное время и в данном месте веществ, в том числе и минеральных, поглощаемых из почвы в виде их водного раствора. Связь удельной транспирации с массой листы можно представить в следующем виде:

$$E_{tr,i} = P_{li}/C_i = k_{tr} m_1, \quad (2)$$

где $E_{tr,i}$ – расход воды для осуществления жизнедеятельности и прироста единицы фитомассы; P_{li} – количество i -го минерального вещества, необходимого для жизнедеятельности и построения единицы фитомассы и лимитирующего в данных условиях рост растения; C_i – концентрация лимитирующего рост растения i -го минерального вещества в водном растворе, потребляемом растением из почвы; k_{tr} – коэффициент транспирационной активности; m_1 – количество листы, необходимое для осуществления всех процессов при поддержании жизнедеятельности и построении единицы фитомассы.

Во многих работах ранее было показано, что коэффициент транспирационной активности конкретной породы древостоя, показывающий расход воды единицей массы листового аппарата, не зависит от условий произрастания и является величиной практически постоянной. Можно также предположить, что для построения единицы фитомассы требуется определенное количество минерального вещества, не зависящее от условий произрастания. Конечно, в связи с изменением с возрастом соотношения частей древостоя, в которых для построения используется разное количество тех или иных веществ, меняется и количество минерального вещества, затрачиваемого всем растением на построение единицы фитомассы. Однако для растений, находящихся на одной стадии развития, величину P_{li} можно, по-видимому, принимать практически постоянной для различных условий произрастания. В качестве показателя стадии развития может служить возраст, тогда следует считать, что для одновозрастного древостоя конкретной породы величина P_{li} остается постоянной независимо от лесорастительных условий. При постоянстве P_{li} и k_{tr} из (2) следует, что уменьшение концентрации лимитирующего рост и развитие растения минерального вещества (C_i) должно сопровождаться увеличением удельного расхода растением воды, а следовательно, m_1 . Это подтверждается приведенными на рис. 2 зависимостями, показывающими тенденцию снижения удельной массы хвои практически одновозрастных сосняков (51–66 лет) и ельников (37–40 лет) с улучшением лесорастительных условий.

В данном случае использовались опубликованные данные [1], [2], а полученные зависимости можно представить в следующем виде:

для сосняков $m/P = 105,3 \exp(-0,26 KI)$, (3)

для ельников $m/P = 170,2 \exp(-0,112 KI)$, (4)

где m – масса хвои в абсолютно сухом виде, кг;
 P – фитомасса в абсолютно сухом виде, т;
 KI – показатель класса бонитета.

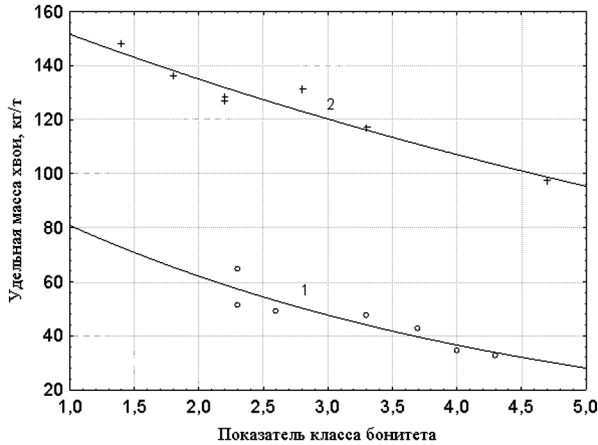


Рис. 2. Зависимость удельной массы хвои сосны (1) и ели (2) от показателя бонитета

На основании приведенных зависимостей можно установить, что в среднем при улучшении условий роста древостоя на один класс бонитета удельная масса хвои уменьшается на 10–15 кг/т. Анализ показывает, что эта величина мало меняется с изменением возраста. Соответствующая полученной абсолютной оценке относительная величина изменения массы хвои с изменением продуктивности древостоя на один класс бонитета составляет 10–30 %.

Тесную связь с окружающей средой растение осуществляет как с помощью листового аппарата, так и через корневую систему. Поскольку водный раствор поглощается из почвы корневой системой, увеличение массы листов с ухудшением лесорастительных условий предполагает увеличение массы корней. Основываясь на водном балансе растения, можно написать равенство, устанавливающее соотношение между массой корневой системы и массой листов:

$$E_{ir} = k_{ir} m_1 + R(P) = k_p p_l, \quad (5)$$

где k_p – коэффициент, характеризующий поглощение единицей массы корневой системы водного раствора из почвы; p_l – масса корней, необходимых для поглощения водного раствора из почвы при поддержании жизнедеятельности и построении единицы фитомассы; $R(P)$ – количество влаги, задерживаемой непосредственно в тканях растения.

Нужно отметить, что в тканях растения остается небольшая доля расходуемой растением воды из почвы, поэтому слагаемое $R(P)$ в правой части (5) можно приравнять к нулю. С учетом этого равенство приобретает следующий вид:

$$k_{ir} / k_p = p_l / m_1. \quad (6)$$

Среднее за сезон значение коэффициента k_p , по-видимому, также, как и k_{ir} , можно принять постоянным. Следовательно, при увеличении массы хвои с ухудшением лесорастительных условий должна синхронно увеличиваться масса корней, как это вытекает из уравнения (6). Данный вывод относится, конечно, к той корневой массе, которая участвует в поглощении почвенного раствора.

На основании равенства (6) можно, по-видимому, сделать вывод о том, что соотношение массы поглощающих водный раствор корней и массы листов не зависит от плодородия почв и для всех бонитетов должно оставаться практически постоянной величиной.

Учитывая, что сумма масс листов и корней, в частности, по данным, приведенным в [1], колеблется в пределах 15–30 % от общей фитомассы, можно предполагать, что пренебрежение в расчетных схемах влиянием условий роста не приведет к большим ошибкам при определении всей фитомассы.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЛИСТЫ И ОБЩЕЙ ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЯ

К настоящему времени созданы региональные методы расчета массы древесной зелени (листья и недревесневшие веточки), в том числе листов. Один из методов был разработан в Ленинградской лесотехнической академии [14] на основании анализа данных, собранных в Ленинградской области. В [9] приведены формулы для расчета массы хвои, полученные для древостоя, произрастающего в Нижегородской и Костромской областях.

Достаточно удобный для практического использования метод определения количества древесной зелени и листов (хвои) был разработан в Институте леса КарНЦ под руководством Н. И. Казиминова [7], [10]. Его параметры получены для древостоя, произрастающего в Карелии. По оценкам авторов метода, ошибка определения массы древесной зелени составляет 3–6 %. Выраженная авторами в табличном виде зависимость между удельной массой листов конкретной породы (масса листов по отношению к запасу стволовой древесины) и средней высотой древостоя была нами формализована и представлена следующей удобной для практического использования формулой [6]:

$$m = M K c \exp(-d h), \quad (7)$$

где m – масса листового аппарата в свежем виде, т/га; M – запас стволовой древесины, м³/га; h – средняя высота древостоя, м; K – коэффициент, показывающий долю листового аппарата в общем запасе древесной зелени и равный для сосны 0,78, для ели – 0,60, для березы – 0,56; c , d – коэффициенты регрессии, равные соответственно для сосны 0,29, 0,10, для ели – 0,81, 0,099, для березы – 0,30, 0,083.

Была выполнена проверка данного метода с применением биометрических характеристик древостоя, собранных в различных природных зонах [11], [12]. Всего использовались 152 значения для сосняков и 318 для ельников. Относительная ошибка расчета определялась по формуле:

$$\Delta m_{\%} = 100(m_o - m_c) / m_o, \quad (8)$$

где m_o – экспериментальные величины массы хвои, т/га; m_c – рассчитанные по (7) величины массы листвы, т/га.

Приведенные в таблице результаты оценки свидетельствуют о значительном завышении расчетных значений массы хвои в низкопродуктивных древостоях и занижении – в высокопродуктивных. Полученные результаты можно объяснить увеличением удельной величины общей фитомассы, а следовательно, и удельного запаса стволовой древесины с улучшением лесорастительных условий (рис. 1).

Относительные ошибки расчета массы хвои ($\Delta m_{\%}$) для древостоя различной продуктивности по методу Института леса КарНЦ РАН (1) и по методу авторов (2)

Класс бонитета	Показатель класса бонитета	Относительная ошибка, %			
		Сосна		Ель	
		1	2	1	2
Vб	0	-43	7	-95	-30
Va	1	-41	-24	-47	-6
V	2	-22	-18	-13	8
IV	3	2	-4	9	7
III	4	12	-1	14	2
II	5	17	-11	25	-2
I	6	27	10	35	-6
Ia	7			40	-9

Поскольку величина ошибки связана с продуктивностью древостоя, ее снижения можно добиться введением в расчетную формулу показателя класса бонитета. С учетом этого вывода по опубликованным в [11], [12] данным были получены эмпирические уравнения. Общий вид этих уравнений следующий:

$$m = aM \exp(-(b - c \ln(KI + 1)) h), \quad (9)$$

где m – масса листвы (хвои) в абсолютно сухом виде, т/га; a , b и c – коэффициенты регрессии, равные соответственно для сосняков 0,15, 0,213, 0,063, для ельников 0,165, 0,128, 0,033, для березняков 0,067, 0,14, 0,026.

Результаты проверки уравнений для хвойных пород приведены в таблице. Ошибки расчета вычислялись по формуле (8). Расхождения между рассчитанными по (9) и измеренными данными, приведенными в [11], [12], существенно снизились. Наиболее заметно уточнение расчетов массы листового аппарата для низкопродуктивного древостоя. Все это позволяет рекомендовать уравнение (9) для определения массы листвы (хвои) сосняков, ельников и березняков, произрастающих в различных лесорастительных условиях.

Масса стволовой древесины составляет в большинстве случаев наибольшую часть общей фитомассы (60–70 %), и только в возрасте менее 20 лет ее доля в сосновом и еловом древостое опускается ниже 40 %. При таких условиях общую фитомассу древостоя можно рассматривать как функцию запаса стволовой древесины ($P = f(M)$). Некоторые изменения соотношений частей древостоя из-за смены условий произрастания не могут оказывать заметного влияния на надежность данной функции, как это указано выше и показано на рис. 3 (кружочками обозначен ельник, заштрихованными кружочками – сосняк, крестиками – березняк). Аналитическое выражение представленных на рис. 3 связей для соснового, елового и березового древостоя приведено ниже:

$$P = a + b M, \quad (10)$$

где P – общая фитомасса древостоя в сухом виде, т/га; a и b – коэффициенты регрессии, равные соответственно для сосняков 13,0 и 0,58, для ельников – 30,4 и 0,55, для березняков – 11,2 и 0,68.

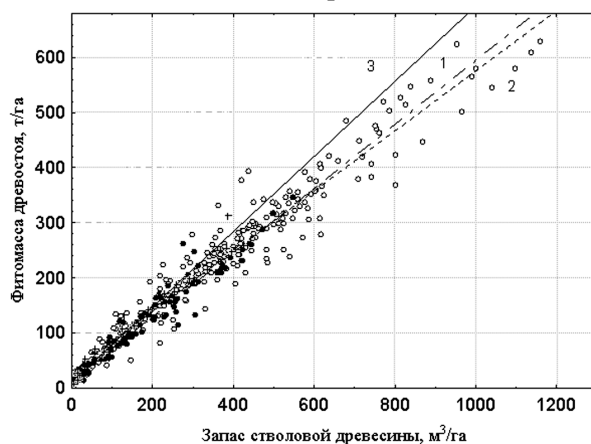


Рис. 3. Зависимость общей фитомассы древостоя от запаса стволовой древесины (1 – сосняк, 2 – ельник, 3 – березняк)

Среднеквадратичное отклонение между рассчитанными по (10) и измеренными в [11], [12] значениями фитомассы для сосняков составляет 18 т/га, для ельников – 32 т/га, для березняков – 14 т/га. По отношению к средним значениям фитомассы каждого ряда конкретной породы эти величины составляют 16, 14 и 14 %.

Для расчета очень важной характеристики биогеоценоза – прироста фитомассы – можно воспользоваться идеями Г. Ф. Хильми об энергетическом обмене между внешней средой и лесом [13]. Основываясь на его представлении об энергопотреблении растительным покровом, можно сделать вывод о том, что отношение прироста фитомассы к ее объему для каждой породы одновозрастного древостоя во всех классах бонитета остается постоянным. Эти отношения зависят только от возраста. Справедливость данного вывода в отношении запаса стволовой древесины и ее прироста показана нами в [4], [5]. Применительно для решения приведенных в данных

работах задач рассматриваемая зависимость хорошо описывалась экспоненциальной функцией. В отношении общей фитомассы справедливость такой зависимости на примере ельника показана на рис. 4. Достаточно высокий разброс точек на рис. 4 объясняется, по-видимому, в большей степени не столь высокой точностью полевых определений общей фитомассы и ее прироста. Как показывает анализ, продуктивность древостоя не влияет на точность связей. В принятых в статье обозначениях зависимость для общей фитомассы будет выглядеть следующим образом:

$$dP/P = c \exp(-d \tau), \quad (11)$$

где dP – прирост общей фитомассы в сухом виде, т/(год · га); τ – возраст древостоя, лет; c и d – коэффициенты, зависящие от породы.

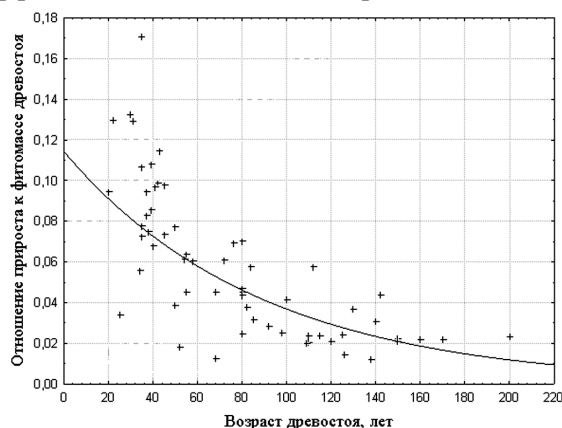


Рис. 4. Зависимость отношения прироста фитомассы древостоя ельника к его общей фитомассе от возраста древостоя

По опубликованным данным были получены значения коэффициентов c и d , которые для сосняков, ельников и березняков соответственно составили: 0,096, 0,011; 0,114, 0,011; 0,264, 0,021.

Среднеквадратичное отклонение между рассчитанными по (11) и измеренными значениями

прироста фитомассы для сосняков составляет 2,5 т/(га · год), для ельников – 5,2 т/(га · год), для березняков – 3,0 т/(га · год). При этом измеренные величины прироста фитомассы сосняков изменялись от 1 до 15 т/(га · год), ельников – от 1 до 35 т/(га · год), березняков – от 1 до 15 т/(га · год). Из-за достаточно высоких отклонений полученные с использованием данных параметров результаты расчетов следует принимать в качестве ориентировочных. Наименее обоснованы измеренными данными параметры формулы (11) для березняков.

ВЫВОДЫ

Изменение продуктивности древостоя сопровождается преобразованием соотношений частей его фитомассы. Удельная масса листового аппарата хвойных пород возрастает на 10–15 кг на каждую тонну общей фитомассы древостоя при ухудшении бонитета на один класс. Синхронно этим преобразованиям изменяется масса корневой системы. При увеличении продуктивности древостоя соответственно возрастает его общая фитомасса. В среднем ее относительная величина (по отношению к средней высоте древостоя) увеличивается на 1,2–0,7 т/га. Учет влияния продуктивности древостоя в методах расчета массы листового аппарата способствует повышению их точности при использовании в различных лесорастительных условиях. Использование простых линейных связей между запасом стволовой древесины и общей фитомассой древостоя дает возможность определять последнюю с точностью, приемлемой для практического применения. Для определения прироста фитомассы древостоя можно использовать экспоненциальные зависимости между отношением прироста фитомассы к ее общей величине от возраста древостоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казимиров Н. И., Волков А. Д., Зябченко С. С., Иванчиков А. А., Морозова Р. М. Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера. Л.: Наука, 1977. 304 с.
2. Казимиров Н. И., Морозова Р. М. Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии. Л.: Наука, 1973. 176 с.
3. Казимиров Н. И., Морозова Р. М., Куликова В. К. Органическая масса и потоки веществ в березняках средней тайги. Л.: Наука, 1978. 216 с.
4. Карпечко Ю. В. Влияние характеристик леса на водность рек Карелии // Вопросы экологии и гидрологические расчеты: Сб. науч. тр. (межведомственный). Вып. 116. СПб.: РГГМИ, 1994. С. 38–42.
5. Карпечко Ю. В. Расчетный метод определения транспирации древостоев // Лесоведение. 2010. № 5. С. 65–71.
6. Карпечко Ю. В., Бондарик Н. Л. Гидрологическая роль лесохозяйственных и лесопромышленных работ в таежной зоне Европейского Севера России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 225 с.
7. Лесотаксационный справочник. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 288 с.
8. Сеннов С. Н. Уход за лесом. Экологические основы. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 128 с.
9. Старцев А. И. Фитомасса чистых и смешанных древостоев сосны обыкновенной в Нижегородской и Костромской областях // Лесоведение. 2007. № 2. С. 51–56.
10. Таблицы для оценки древесного сырья в лесах Карелии. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1978. 26 с.
11. Усольцев В. А. Формирование банков данных о фитомассе лесов. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 541 с.
12. Усольцев В. А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложение. Екатеринбург, 2007. 637 с.
13. Хильми Г. Ф. Основы физики биосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 299 с.
14. Яновский Л. Н., Моисеев В. С., Ларионова Г. Г. Лесная таксация. Методические указания по учету древесной зелени для студентов специальности 1512. Л.: ЛТА, 1985. 38 с.
15. Monteith J. L. Accommodation between transpiring vegetation and the convective boundary layer // Journal of Hydrology. 1995. № 166. P. 251–263.

НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА ЛАУР

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесного хозяйства лесотехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
laur@psu.karelia.ru

АНАТОЛИЙ ПЕТРОВИЧ ЦАРЁВ

доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесного хозяйства лесотехнического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
tsarev@psu.karelia.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ *LARIX SUKACZEWII* НА ЗАПАДНОМ ПРЕДЕЛЕ ЕЕ ЕСТЕСТВЕННОГО АРЕАЛА

Представлены общая характеристика, проблемы систематики и ареал лиственницы Сукачева в пределах Карелии. Приведены данные по выделению ее ценных участков на территории республики и показатели роста природных популяций в Пудожском районе. Показаны результаты селекционной инвентаризации лиственницы, проведенной разными организациями в ее искусственных насаждениях. Сохранение и использование выделенных генетических ресурсов данной породы позволяют создавать высокоценные плантационные насаждения.

Ключевые слова: лиственница Сукачева, селекция, плюсовые деревья, плюсовые насаждения, генетические резерваты

Род Лиственница является самым распространенным в России и в мире. Его представители могут переносить чрезвычайно низкие температуры и поэтому являются перспективными для культивирования в северных холодных областях. Высококачественная древесина лиственницы отличается прочностью и устойчивостью к гниению и находит самое разнообразное применение.

Род *Larix*, как и другие роды семейства *Pinaceae*, является гомоплоидом. Число хромосом в его диплоидном наборе $2n = 24$. У некоторых видов обнаружены единичные миксоплоидные, триплоидные и тетраплоидные сеянцы, а в редких случаях и взрослые растения. У трех видов лиственницы (сибирская, Сукачева и Гмелина) дополнительно к основному набору найдены В-хромосомы – $2n = 24 + 1B$ [10].

Внутриродовая систематика лиственницы постоянно корректируется [1], [6], [14]. В отношении выделения лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Dylis) в видовой таксон среди ботаников до настоящего времени идет дискуссия. В. П. Путенихин и О. Мартинссон [18] приводят историю названия лиственницы Сукачева. Первоначально лиственница Сукачева именовалась *Larix archangelica* Laws (1836), позже *Larix rossica* Sabine, а в 1845 году Ф. И. Рупрехт назвал лиственницу, произрастающую в северной части Олонецкой губернии (Архангельской губернии), *Ledebourii* в честь К. Ф. Ледебера. Затем Э. Л. Регель классифицировал эту лиственницу как *Larix europae* var. *Rossica* (1871 год). В. Сзафер также считал правильным отделение лиственницы, произрастающей на Европейском Севере России, от *Larix sibirica* (1913 год). Затем

появились исследования В. Н. Сукачева (1924, 1938 годов) и Н. В. Дылиса [5].

Часть ботаников, отмечая, что сам В. Н. Сукачев рассматривал эту лиственницу как русский экотип лиственницы сибирской (*L. sibirica* Ledeb. оес. *rossica*), считают, что именно такое название необходимо оставить за этим таксоном [2]. Некоторые же авторы именуют ее лиственницей архангельской (*L. archangelica*) [3], [11].

По данным А. В. Кравченко [7], в Карелии к востоку от оз. Водлозеро, на о. Кондостров в Белом море и даже на западном берегу Онежского озера встречается именно лиственница сибирская. Другие исследователи лиственницы в Карелии нередко именуют одни и те же объекты то лиственницей сибирской, то лиственницей Сукачева, а иногда и архангельской, что говорит о неустоявшейся терминологии данного вида.

Тем не менее название, предложенное Н. В. Дылисом, поддерживается и широко используется в публикациях ряда крупных отечественных специалистов по лиственнице (Р. И. Дерюжкина, А. И. Ирошникова, В. П. Путенихина и др.). У названных исследователей также имеются определенные доказательства выделения этого вида в отдельный таксон. Наименование лиственницы Сукачева использовано также в ряде зарубежных изданий [16], [17], [18]. Не вмешиваясь в дебаты специалистов, мы примем определение этого вида Н. В. Дылиса.

Лиственница Сукачева является наиболее продуктивным среди перечисленных видов. Она распространена в европейской части России, на Урале и на юго-западе Западной Сибири. В Карелии, по данным Федерального агентства лесного хозяйства России на 1 января 2011 года, площади, покрытые лиственницей, составляют

0,8 тыс. га. Лесов же с той или иной долей участия лиственницы Сукачева значительно больше. По разным данным, их площадь колеблется от 17 до 23 тыс. га [18].

Исследованию лиственницы посвящено множество работ отечественных и зарубежных ученых, имеются примеры весьма удачных опытов по ее разведению, в частности на Северо-Западе России [1], [5], [6], [8], [11], [14], [19]. Однако в Карелии, несмотря на высокую ценность этой породы, ее разведение сталкивается с рядом проблем. В частности, при наибольшем среди других древесных растений ареале этой породы в России совершенно недостаточное внимание уделяется систематическому изучению, мероприятиям по выделению и сохранению ценных генетических ресурсов и широкомасштабному разведению этой породы.

Цель настоящей работы – обобщение имеющегося материала по выделению ценных участков и деревьев лиственницы на территории Карелии, анализ показателей роста ее природных популяций и рассмотрение возможности сохранения и использования выделенных генетических ресурсов данной породы для создания высокоценных плантационных насаждений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использованы как результаты собственных исследований и наблюдений авторов, так и литературный материал по освещаемой проблеме. Анализ роста природных популяций проведен в Пудожском районе Карелии, где были осуществлены экспедиционные наблюдения и заложены 5 пробных площадей (размером от 0,2 до 0,5 га) в разных кварталах бывшего Колодозерского лесничества. На данных пробных площадях был осуществлен сплошной пересчет деревьев с выделением экземпляров с деловыми стволами (ровная часть составляла более 6 м). При вычислении объемов стволов и запасов использовалась Лесная вспомогательная книжка [13].

Отбор плюсовых насаждений и деревьев в Карелии в разные годы проводился рядом организаций. В этих работах принимала участие соавтор настоящей публикации Н. В. Лаур. В настоящее время, по данным Министерства по природопользованию и экологии РК, существуют 4 плюсовых насаждения и 27 плюсовых деревьев лиственницы. Данные о размерах последних приведены ниже.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Западная граница естественного ареала в виде отдельных небольших насаждений с участием лиственницы Сукачева доходит до Онежского озера [18]. В основном это Пудожский район, где ранее были проведены исследования [20].

В «Список ООПТ (особо охраняемых природных территорий) регионального значения Рес-

публики Карелия (по состоянию на 01.01.2011 г.)» [4] в качестве ботанических памятников природы включены 6 участков лиственницы общей площадью 97,7 га. Из них 2 участка лиственницы сибирской искусственного происхождения (№ 72 площадью 49 га и № 73 площадью 3,7 га) находятся в Лахденпохском районе. Четыре участка лиственницы Сукачева естественного происхождения (№ 76 площадью 6 га, № 77 площадью 4 га, № 78 площадью 5 га, № 79 площадью 30 га) выделены в Пудожском районе.

В Лесохозяйственном регламенте для Пудожского центрального лесничества, разработанном Российским проектно-изыскательским институтом по проектированию лесохозяйственных предприятий и природоохранных объектов ОАО «РОСГИПРОЛЕС» в 2008 году [9], отмечены те же 4 участка лиственницы (№ 76, 77, 78 и 79) на общей площади 46 га (на 1 га больше). Кроме того, здесь указаны и 2 генетических резервата с ее участием на площади 1232 га, которые подлежат охране. Более детальные сведения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Перечень особо охраняемых природных территорий Пудожского центрального лесничества

Наименование ООПТ	Участковое лесничество, номера кварталов	Площадь, га	Цель создания
Участок лиственницы Сукачева естественного происхождения № 76*	Кривецкое (Колодозерское) лесничество, кв. 61	6	Охрана особо ценных лесных участков
Участок лиственницы Сукачева № 77*	Кривецкое (Колодозерское) лесничество, кв. 62	4	Охрана особо ценных лесных участков
Участок лиственницы Сукачева № 79*	Кривецкое (Колодозерское) лесничество, кв. 106	30	Охрана особо ценных лесных участков
Участок лиственницы Сукачева естественного происхождения № 78*	Кривецкое (Колодозерское) лесничество, кв. 72	6	Охрана особо ценных лесных участков
Лесной генетический резерват № 22**	Кривецкое (Колодозерское) лесничество, кв. 42	200	Сохранение сосны обыкновенной, лиственницы Сукачева
Лесной генетический резерват № 21**	Кривецкое (Колодозерское) лесничество, кв. 106, 121, 122	1032	Сохранение сосны обыкновенной, лиственницы Сукачева

* Ботанический памятник природы регионального значения (Постановление СМ КАСР № 276 от 20.07.1984 и Постановление Правительства РК от 19.03.04 № 27 (для № 79)).

** Особо ценный лесной участок, предложение 2002 года.

К сожалению, пока неизвестно, проведено ли это выделение в натуре, каким образом оформ-

лено, осуществляются ли регулярный или периодический мониторинг и охрана выделенных объектов. Возможно, вследствие резкого сокращения штата лесной охраны в соответствии с новым Лесным кодексом 2007 года эти участки окажутся вне всякого присмотра и охраны.

Для получения данных о росте и состоянии насаждений с участием лиственницы на территории бывшего Пудожского лесхоза дипломником кафедры лесного хозяйства Петрозаводского государственного университета Н. А. Тюриным было заложено 5 пробных площадей (табл. 2).

Как видно из данных табл. 2, доля лиственницы в исследованных насаждениях колебалась, по данным лесоустройства, от 10 до 30 %. По фактическому соотношению площадей сечений стволов живых деревьев на высоте 1,3 м участие лиственницы в насаждениях на пробных площадях колебалось от 17 до 42 %. Доля деловых стволов лиственницы на пробных площадях составляла 95–100 %.

В табл. 3 приведены средние показатели высот и диаметров на высоте 1,3 м. Таблицы объемов для лиственницы в Карелии отсутствуют, поэтому объемы стволов определены расчетным способом. При этом использовались видовые числа М. Е. Ткаченко для среднего коэффициента формы (0,67). В среднем для данных высот и среднего коэффициента формы видовые числа равны около 0,46 [13]. Запас рассчитывался с учетом фактического числа деревьев на пробной площади.

Возраст насаждений лиственницы колебался от 120 до 200 лет. Средняя высота варьировала от 25 до 28 м, средний диаметр – от 32 см для

самого молодого насаждения (120–140 лет) до 44 см у самого старого (200 лет).

В этом возрасте и при такой невысокой доле деревьев лиственницы в насаждении их размеры оказались мало связанными с типом леса. Однако интересно, что при небольшом количестве деревьев лиственницы, как показали данные на пробных площадях, они вносят наиболее существенный вклад (от 47 до 208 м³/га) в запас насаждений. По данным лесоустройства, запасы насаждений, где были заложены пробные площади, колебались от 230 до 290 м³/га, то есть небольшое число деревьев лиственницы представляло 20–70 % общего запаса насаждения. И даже если запас насаждений был занижен в результате глазомерной таксации при лесоустройстве, запас деревьев лиственницы составлял значительную часть общего запаса насаждений.

На анализируемых пробных площадях представлены не самые крупные деревья Пудожского центрального лесничества. В других насаждениях лесничества встречаются деревья, диаметр которых составляет 70 см и более (рис 1, 2).

В исследуемом регионе встречается естественное возобновление лиственницы Сукачева. Авторы наблюдали это в Колодозерском лесничестве на освещенных участках вдоль дорог. Высоты молодых растений достигали 3 м.

Сам факт нахождения в той или иной степени сомкнутости насаждений на границе ареала этой породы, ее хорошее состояние, значительный рост и наличие естественного возобновления говорит о перспективности ее культивирования в Карелии. Это отмечали В. И. Шубин [15], А. С. Лантратава [8] и другие исследователи.

Таблица 2

Характеристика пробных площадей, заложенных в насаждениях Колодозерского лесничества бывшего Пудожского лесхоза (с участием лиственницы)

№ пробной площади	Тип леса*	Площадь, га / квартал-выдел	Состав		Число деревьев лиственницы, экз.	Из них доля с деловыми стволами, %
			По данным лесоустройства	По соотношению площадей сечений деревьев на пробной площади		
1	Кисл.	0,2 / 88–25	3Л2С2Е1Б	42Л24Е19С15Б	22	95
2	Черн.	0,5 / 106–8	5Е1С2Б1Л	37Е24Л21С18Б	26	96
3	Кисл.	0,2 / 107–4	7Б2Л1С + Е	64Б17Л10С9Е	10	100
4	Черн.	0,25 / 107–12	4С3Е1Л2Б	38С32Л19Е11Б	26	100
5	Брусн.	0,5 / 72–25	4С2Л4Б	50С23Б22Л5Е	27	96

* Кисл. – кисличник; черн. – черничник; брусн. – брусничник.

Таблица 3

Показатели роста лиственницы на пробных площадях Пудожского центрального лесничества

№ пробной площади	Возраст, лет	Ср. высота, м	Ср. диаметр, см	Ср. объем ствола, м ³	Запас лиственницы на пробной площади, м ³	Запас лиственницы, м ³ /га
1	180	27	44	1,89	41,58	208
2	180	27	44	1,89	49,14	98
3	120–140	25	32	0,93	9,3	47
4	180	27	44	1,89	49,14	197
5	200	28	44	1,96	52,92	106



Рис. 1. Одно из крупных деревьев лиственницы бывшего Колодозерского лесничества Пудожского лесхоза Карелии (диаметр – до 70 см, высота – 29,5 м, объем ствола – 5,22 м³). Фото Н. В. Лаур



Рис. 2. Форма ствола и характер коры кандидата в плюсовые деревья Пудожского центрального лесничества. Фото Н. В. Лаур

Для широкомасштабного разведения лесных пород необходимо использовать семена от лучших отобранных и испытанных плюсовых деревьев.

В настоящее время в Карелии числятся 4 плюсовых насаждения лиственницы, отобранные в искусственных насаждениях сотрудниками отдела селекции Карельского проектного селекционно-семеноводческого центра на площади 2,95 га (табл. 4). Как видно из данных табл. 4, запасы плюсовых насаждения лиственницы в лесных культурах в черничном типе леса к 90-летнему возрасту могут достигать 400–470 м³/га. Санитарное состояние всех плюсовых насаждений на год отбора (2001, 2007) было хорошим, протяженность живой кроны деревьев составляла в среднем 10–12 м, протяженность бессучковой зоны – 10 м. Кроме того, в Карелии в разные годы сотрудниками разных организаций отобраны десятки плюсовых деревьев (табл. 5).

Согласно данным табл. 5, среди отобранных деревьев попадались гиганты, объем стволов которых превышал 4 м³ и достигал даже 5,77 м³. Однако возраст этих деревьев составлял 130–165 лет. В основном же при отборах обращалось

внимание на то, чтобы возраст плюсовых деревьев позволял производить их полноценную репродукцию и не превышал пятый класс. К настоящему времени часть отобранных ранее деревьев по разным причинам списана. В реестре же плюсовых деревьев Карелии, который вел отдел селекции Карельского проектного селекционно-семеноводческого центра, сохранились 27 плюсовых деревьев лиственницы в разных районах республики. Этого, конечно, недостаточно для такой лесной республики, как Карелия. Отборы как плюсовых насаждений, так и плюсовых деревьев необходимо продолжить. Кроме того, необходимо переходить к следующим этапам селекции: закладке клоновых архивов, прививочных плантаций, испытательных культур и др.

Учитывая, что лиственница Сукачева в Карелии находится на пределе своего естественного ареала, являющегося чрезвычайно «продырявленным», необходимо создать здесь генетический резерват в насаждениях с участием этого вида, а также обеспечить его мониторинг и сохранность, равно как и для выделенных плюсовых насаждений и плюсовых деревьев.

Таблица 4

Характеристика плюсовых насаждений лиственницы, отобранных в Карелии

Лесхоз и год отбора	Площадь, га / состав	Тип леса	Полнота / возраст лиственниц	Средняя высота, м / средний диаметр, см	Запас лиственниц, м³/га
Суоярвский, 2001	1,8 / 7Лц1С2Е	Травяно-злаковый	0,7 / 85	25 / 28	240
Лакхденпохский, 2007	0,7 / 10 Лц	Черничный	0,9 / 90	25 / 38	420
Лакхденпохский, 2007	0,2 / 10 Лц	Черничный	1,0 / 90	19 / 36	400
Лакхденпохский, 2007	0,15 / 10 Лц	Черничный	1,0 / 90	21 / 44	470

Таблица 5

Показатели размеров некоторых плюсовых деревьев лиственницы, отобранных в Карелии

Лесхозы, в которых произведен отбор	Годы отбора	Число деревьев	Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см	Объемы стволов, м³
Кондопожский	1973*	8	80	24–26	28–32	0,42–0,96
Кондопожский	1974**	2	150	34,5	58–59	4,02–4,29
Кондопожский	1998***	10	133–165	31–40	45–64	2,27–5,77
Валаамский	1973**	2	80	28–33	56–63	3,66–4,54
Сортавальский	1976*	2	90	30–32	34–36	1,00
Сортавальский	1980****	6	60	25,5–29	24–32,5	0,54–1,03
Суоярвский	2001***	2	85	34,5	47–52	2,66–3,19
Пудожский	2002***	5	90–120	25–30	26–40	0,62–1,58

Примечание. Организации, сотрудники которых проводили отбор плюсовых деревьев:

* Петрозаводская производственная лесосеменная станция;

** Институт «Союзгипролесхоз»;

*** Отдел селекции Карельского проектного селекционно-семеноводческого центра;

**** Олонецкая производственная лесосеменная станция.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абаимов А. П., Гуков Г. В., Милютин Л. И. Систематика лиственниц Азиатской России // Биоразнообразие лиственниц Азиатской России. Новосибирск: Гео, 2010. С. 7–20.
- Бобров Е. Г. Лесообразующие хвойные СССР. Л.: Наука, 1978. 188 с.
- Булыгин Н. Е., Ярмишко В. Т. Дендрология. СПб.: Наука, 2000. 528 с.
- Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2010 году. Петрозаводск: Министерство по природопользованию и экологии Республики Карелия, 2011. 292 с.
- Дылис Н. В. Сибирская лиственница. Материалы к систематике, географии и истории. М.: МОИП, 1947. 137 с.
- Ирошников А. И. Лиственницы России. Биоразнообразие и селекция. Ч. I. Состояние и перспективы. М.: ВНИИЛМ, 2004. 182 с.
- Кравченко А. В. Лиственница сибирская // Красная книга Карелии. Петрозаводск: Карелия, 1995. С. 22–23.
- Лантратова А. С. Лиственницы Карелии и отбор форм, ценных для их селекции // Лесная генетика, селекция и семеноводство. Петрозаводск: Карелия, 1970. С. 210–217.
- Лесохозяйственный регламент Пудожского центрального лесничества на 2008–2017 гг. М.: Российский проектно-исследовательский институт по проектированию лесохозяйственных предприятий и природоохранных объектов ОАО «РОСГИПРОЛЕС», 2008. 143 с.
- Муратова Е. Н., Седелникова Т. С., Пименов А. В., Карпук Т. В., Квитко О. В., Сизых О. А. Карпиологический полиморфизм лиственниц // Биоразнообразие лиственниц Азиатской России. Новосибирск: Гео, 2010. С. 34–49.
- Наквасина Е. Н., Барабин А. И., Тихонов П. Р., Елисеев А. А. Лиственница на Архангельском Севере: биология, изменчивость, сохранение. Архангельск: Арханг. гос. техн. ун-т, 2008. 216 с.
- Сукачев В. Н., Богданов П. Л., Соколов С. Я., Шенников А. П. Дендрология с основами лесной геоботаники. Л.: Гослестехиздат, 1938. 576 с.
- Тюрин А. В., Воропанов П. В., Науменко И. М. Лесная вспомогательная книжка (по таксации леса). 2-е изд. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1956. 532 с.
- Усольцев В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 708 с.
- Шубин В. И., Гавриленко Г. Рекомендации по разведению лиственницы в Карельской АССР. Петрозаводск: Карельский ЦНТИ, 1969. 15 с.
- Abaimov A. P., Lesinski J. A., Martinsson O., Milyutin L. I. Variability and ecology of Siberian larch species: Reports. № 43. Umea: Swedish University of Agricultural Sciences / Department of Silviculture, 1998. 123 p.
- Larch genetics and breeding. Research findings and ecological-silvicultural demands. IUFRO working party S2.02–07. July 31 – August 4, 1995. Remington and Siljansfors: Reports. № 39. Umea: Swedish University of Agricultural Sciences / Department of Silviculture, 1995. 211 p.
- Putenikhin V., Martinsson O. Present distribution of Larix sukaczewii Dyl. in Russia: Reports. № 38. Umea: Swedish University of Agricultural Sciences / Department of Silviculture, 1995. 78 p.
- Redko G., Mälikönen E. The Lintula Larch Forest // Scandinavian Journal of Forest Research. 2005. Vol. 20. № 3. P. 252–282.
- Tsarev A. P., Laur N. V. Natural valuable gene pool of basic forest species in Republics of Karelia // Transformation to Continuous Cover Forestry in Changing Environment. Bangor (UK): University of Wales, 2004. P. 76.

VALERIY MIKHAYLOVICH LEVIN

Doctor of Physics and Mathematics, Researcher, Mexican Oil Institute (Mexico City, Mexico)

vlevine@imp.mx

SERGUEY KONSTANTINOVICH KANAUN

Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Technological Institute of Higher Education of Monterrey (Mexico City, Mexico)

kanaoun@itesm.mx

GENERALIZED MAXWELL METHOD FOR CALCULATION OF EFFECTIVE CONDUCTIVITY OF MATRIX COMPOSITE MATERIALS

An anisotropic medium with an array of anisotropic ellipsoidal inclusions is considered. The generalized Maxwell method is used for calculation of the effective conductive properties of such medium. The predictions of the method are compared with the results of other self-consistent schemes known in literature.

Key words: Matrix composites, homogenization problem, self-consistent schemes, Maxwell's method, effective properties

INTRODUCTION

Heterogeneous random media have been the objects of extensive studies of engineers, physicists, and mathematicians for about two centuries. This interest is connected with an important role of random media in the material science and technology. Composites and nanomaterials, geological structures, metals and polymers in a certain scale are examples of heterogeneous media with random microstructures. An important class of heterogeneous materials is the so-called matrix composites. Such materials consist of the homogeneous host medium (matrix) and multiple isolated inhomogeneities of random shapes and properties (pores, cracks, inclusions). The homogenization problem is the calculation of effective physical properties of the composites. If the effective (overall) properties are known, the heterogeneous medium may be replaced by a homogeneous medium with the same response to the external loading.

The main difficulty in the solution of the homogenization problem is in taking into account interactions between many randomly placed inclusions (the many-particle problem). For the materials with random microstructures, it is impossible to obtain an exact solution of this problem, but only approximations are available.

In theoretical physics, there is a group of efficient methods (the so-called self-consistent methods) for constructing approximate solutions of many particle problems. Using physically reasonable hypotheses these methods reduce the many particle problem to the problem of one particle. If the latter may be solved explicitly, the solution of the many-particle problem and as a result, the solution of the homogenization problem may be also constructed in an explicit analytical form. One of those methods was proposed by James Clerk Maxwell in 1873. In his famous book "A Treatise on Electricity and Magnetism" [5], Maxwell calculated effective conductivity of a homogeneous medium containing a set of spherical particles with other conductive properties. In this method, N

particles are placed into a spherical region of the radius R in an infinite matrix material. It is assumed that every particle inside the sphere is subjected to the external electric field applied to the composite medium. Thus, at the first look, this hypothesis neglects interactions between the particles. Then, a homogeneous sphere of the same radius R with the effective properties of the composite is embedded into the infinite matrix phase and subjected to the original external field. The conductive properties of this sphere (the effective properties of the composite) are to be chosen in such a way that the far fields from the spherical region with many spheres and from the homogeneous sphere will be the same. As a result, Maxwell derived the equation for the effective conductivity c_* of the composite that is known in literature as the Maxwell – Garnett formula

$$c_* = c_0 + \frac{3pc_0(c - c_0)}{3c_0 + (1 - p)(c - c_0)}.$$

In this equation, c_0 is the conductivity of the matrix phase, c is the same for the inclusions, p is the volume fraction of the inclusions. Maxwell himself understood restrictions of this equation and declared that it serves only for small volume fractions of the inclusions. Nevertheless, later on, in the works of Clausius, Lorenz, Lorentz, and other authors, the same equation was obtained by self-consistent methods that apparently took into account the inclusion interactions. Moreover, the experimental measurements have shown good agreement of this equation with experimental data by rather high volume fractions of spherical particles $p \approx 0,3-0,35$, when interactions cannot be neglected. Many authors were surprised for these results, and till present time, the fact that the equation obtained from the hypothesis of non-interacting inclusions takes into account such interactions does not have any satisfactory explanation.

In the present work, the Maxwell method is extended to the case of homogeneous anisotropic medium containing a random set of ellipsoidal homo-

geneous anisotropic inclusions. It is shown that the Maxwell method allows deriving the equations for the effective conductivity constants that coincide with the equations obtained by other self-consistent methods. The advantage of the Maxwell scheme is that it is the most simple and straightforward way of the solution of the homogenization problems for matrix composites.

THE MAXWELL METHOD

We start with the homogenization problem solved by J. C. Maxwell in [5]: prediction of the effective conductivity of the homogeneous isotropic material with a set of spherical inclusions. The detailed description of the original Maxwell method may also be found in [4], [5]. Below, the method is presented in a modified form that simplifies derivations and allows extension of the method to the case of ellipsoidal anisotropic inclusions.

One-particle problem

The basic point of the Maxwell method is the problem for a single spherical inhomogeneity embedded into a homogeneous matrix material and subjected to a constant external field (the one-particle problem). The field $E_i(x)$ and the field flux $J_i(x)$ in the medium with the inclusion satisfy the following system of partial differential equations

$$\nabla_i J_i(x) = -q(x), \quad J_i(x) = C_{ij}(x) E_j(x), \quad E_i(x) = \nabla_i \varphi(x). \quad (2.1)$$

Here $\nabla_j = \partial / \partial x_j$ is the Nabla-operator, $x(x_1, x_2, x_3)$ is a point in 3D-space, $\varphi(x)$ is the scalar potential of the field, $C_{ij}(x)$ is the tensor of the medium properties, and q is the density of the field sources. For the electrostatic problem, $E_i(x)$ is the electric field, $J_i(x)$ is the electric displacement, $C_{ij}(x)$ is the tensor of dielectric permittivity, $\varphi(x)$ is the potential of the electric field. For the electro conductivity problem, $E_i(x)$ is the electric field, $J_i(x)$ is the electric current, $C_{ij}(x)$ is the tensor of the electric conductivity. For the thermo conductivity problem, $E_i(x)$ is the gradient of the temperature field, $J_i(x)$ is the heat flux, $C_{ij}(x)$ is the tensor of thermo conductivity.

Let $V(x)$ be the characteristic function of the region V occupied by the inclusion

$$V(x) = \begin{cases} 1 & \text{when } x \in V \\ 0 & \text{when } x \notin V \end{cases}. \quad (2.2)$$

If C_{ij}^0 is the property tensor of the homogeneous host medium, the tensor $C_{ij}(x)$ in equation (2.1) is presented in the form

$$C_{ij}(x) = C_{ij}^0 + C_{ij}^1 V(x), \quad C_{ij}^1 = C_{ij} - C_{ij}^0, \quad (2.3)$$

where $C_{ij}(x)$ is the tensor of the inclusion conductivity. Using (2.3) we can rewrite the first equation (2.1) as:

$$\nabla_i C_{ij}^0 \nabla_j \varphi(x) = -q(x) - \nabla_i C_{ij}^1 V(x) E_j(x). \quad (2.4)$$

Applying the inverse operator $(\nabla_i C_{ij}^0 \nabla_j)^{-1}$ to both parts of this equation we transform the latter into the equivalent integral equation:

$$\varphi(x) = \varphi^0(x) + \int_V \nabla_i G(x-x') C_{ik}^1 E_k(x') dx'. \quad (2.5)$$

Here $\varphi^0(x)$ is the “external” field that would have existed in the medium without the inclusion. This field satisfies the equation

$$\nabla_i C_{ij}^0 \nabla_j \varphi^0(x) = -q(x) \quad (2.6)$$

and imposed conditions at infinity. $G(x)$ is the Green function of the operator $\nabla_i C_{ij}^0 \nabla_j$. For the infinite medium and in the case of its arbitrary anisotropy this function has the form [3]:

$$G(x) = \frac{1}{4\pi\bar{r}(x)}, \quad \bar{r}(x) = \sqrt{(\det C^0) x_i B_{ij}^0 x_j}, \quad B_{ij}^0 = (C_{ij}^0)^{-1}. \quad (2.7)$$

Application of the gradient operator to both sides of equation (2.5) yields:

$$E_i(x) = E_i^0(x) - \int_V K_{ij}(x-x') C_{jk}^1 E_k(x') dx', \quad (2.8)$$

$$K_{ij}(x) = -\nabla_i \nabla_j G(x), \quad E_i^0(x) = \nabla_i \varphi^0(x).$$

If the materials of the matrix and inclusion are isotropic

$$C_{ij}^0 = c_0 \delta_{ij}, \quad C_{ij} = c \delta_{ij}, \quad G(x) = \frac{1}{4\pi c_0 r}, \quad r = |x|, \quad (2.9)$$

equation (2.8) takes the form

$$E_i(x) = E_i^0(x) + (c - c_0) \int_V K_{ij}(x-x') E_j(x') dx'. \quad (2.10)$$

Suppose that the external field $E_i^0(x)$ is constant. When $x \in V$ and the region V is a sphere, the solution of this equation is also constant and has the form [4]

$$E_i = \frac{3c_0}{2c_0 + c} E_i^0, \quad (x \in V). \quad (2.11)$$

If the field inside the region V is known, the field in the medium ($x \notin V$) can be reconstructed from the same equation (2.10).

The Maxwell scheme

Let N identical spherical inclusions of the radii a and conductivity c be embedded inside a large sphere V^A of the radius A in an infinite medium with conductivity c_0 . (“Large” means that $A \gg a$, see Fig. 1).

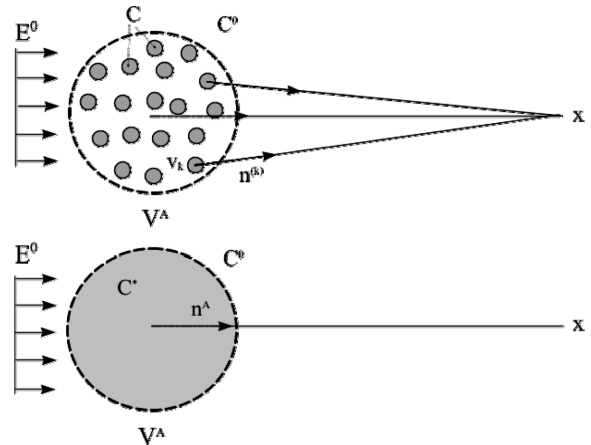


Fig. 1. The scheme of the Maxwell approach to the homogenization problem

Assume that the field E_i^0 applied to the medium is constant. The presence of the inhomogeneous sphere V^A disturbs the applied field E_i^0 that can be evaluated by two different ways. First, the far field induced by the small spheres is presented as

$$E_i(x) = E_i^0 + \frac{c - c_0}{4\pi c_0} \sum_{k=1}^N \int_{V_k} \nabla_i \nabla_j \frac{1}{|x - x'|} E_j(x') dx', \quad (2.12)$$

where V_k is the region occupied by the k -th sphere. The sum in the right-hand side can be calculated if the fields inside the inclusions are known. To find these fields let us consider each small sphere as a single one subjected to the external field E_i^0 . In this case, the fields inside the spheres are constant and determined by Eq. (2.11). Hence, far from the center of the large sphere V^A , the sum in Eq. (2.12) is as follows

$$E_i' = \frac{v}{4\pi} \sum_{k=1}^N \frac{1}{R_k^3} (\delta_{ij} - 3n_i^{(k)} n_j^{(k)}) \frac{3(c - c_0)}{2c_0 + c} E_j^0, \quad (2.13)$$

$$n_i^{(k)} = \frac{R_i^{(k)}}{R_k}, \quad v = \frac{4}{3} \pi a^3.$$

Here R_k is the distance from the observation point x and the center of the sphere V_k . Because all the small spheres are practically at the same distance from the far-distant observation point x , $R_k \approx R_A$, where R_A is the distance between x to the center of the large sphere V^A , we have

$$E_i' \approx \frac{Nv}{4\pi R_A^3} (\delta_{ij} - 3n_i^A n_j^A) \frac{3(c - c_0)}{2c_0 + c} E_j^0, \quad n_i^A = \frac{R_i^A}{R_A}. \quad (2.14)$$

Second, the disturbance of the far field by the large sphere V^A may be treated as the field disturbance of a homogeneous sphere V^A with an effective conductivity c^* . The disturbance caused by such a sphere at the same point x is

$$E_i^* = \frac{V}{4\pi R_A^3} (\delta_{ij} - 3n_i^A n_j^A) \frac{3(c^* - c_0)}{2c_0 + c^*} E_j^0. \quad (2.15)$$

Equating the disturbances E_i' and E_i^* in Eqs (2.14) and (2.15) we derive the equation for the effective conductivity c^*

$$\frac{p(c - c_0)}{c + 2c_0} = \frac{c^* - c_0}{c^* + 2c_0}, \quad p = \frac{Nv}{V}. \quad (2.16)$$

The solution of this equation with respect to c^* yields

$$\frac{c^*}{c_0} = \frac{1 + 2p\beta}{1 - p\beta}, \quad \beta = \frac{c - c_0}{c + 2c_0}. \quad (2.17)$$

The latter coincides with well-known Clausius-Mossotti equation (in dielectric context) or Maxwell-Garnet equation (in conductivity context), and also Lorenz-Lorentz's equation (in refractivity context).

An obvious drawback of Maxwell scheme is that each sphere is considered as a single one subjected to the external field E_i^0 applied to the medium. Strictly speaking, Eq. (2.11) is correct only in the di-

lute limit $p \ll 1$. In spite of this, equation (2.17) coincides with the expression for the effective conductivity of the composite with random set of spherical inclusions derived by the effective field method that takes into account interactions between the inclusions (see, e. g., [2]).

Note, that using the integral equation (2.8) instead of the differential equations (2.1) allows extending the Maxwell scheme to the case of the composites with anisotropic matrices and ellipsoidal anisotropic inclusions. Let the region V in Eq. (2.11) be ellipsoid with semi-axes a_1, a_2, a_3 . If $x \in V$ and E_i^0 is constant, the field E_i inside V is also constant and is determined by the expression:

$$E_i = (\delta_{ij} + A_{ij}(a) C_{kj}^1)^{-1} E_j^0. \quad (2.18)$$

Here $A_{ij}(a)$ is the tensor with constant components that is presented as an integral over the unit sphere Ω in 3D-space:

$$A_{ij}(a) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} K_{ij}^*(a^{-1}k) d\Omega, \quad K_{ij}^*(k) = \frac{k_i k_j}{k_m C_{mn}^0 k_n}, \quad (2.19)$$

where $K_{ij}^*(k)$ is the Fourier transform of the kernel $K_{ij}(x)$ in Eq. (2.11); k is the Fourier transform parameter; $a = (a_{ij})$ is a linear transformation that converts the ellipsoid V into a unit sphere. For an isotropic host medium, tensor $A_{ij}(a)$ has the symmetry of ellipsoid and its three principal components have the form:

$$A_k = \frac{a_1 a_2 a_3}{2C_0} \int_0^\infty \frac{d\zeta}{(a_k^2 + \zeta) \sqrt{(a_1^2 + \zeta)(a_2^2 + \zeta)(a_3^2 + \zeta)}}, \quad (2.20)$$

($k = 1, 2, 3$) and are expressed via the standard elliptical integrals.

Application of the Maxwell method to the case of ellipsoidal inclusions yields the following expression for the tensor of the effective conductivity C_{ij}^* :

$$C_{ij}^* = C_{ij}^0 + c P_{ik} (\delta_{kj} - c A_{kl} P_{lj})^{-1}, \quad (2.21)$$

where

$$P_{ik} = \frac{1}{\langle v(a) \rangle} \left\langle v(a) C_{im}^1 (\delta_{mk} + A_{ml}(a) C_{lk}^1)^{-1} \right\rangle, \quad (2.22)$$

$$v(a) = \frac{4}{3} \pi a_1 a_2 a_3,$$

and the averaging is performed over the ensemble distribution of the ellipsoid semi-axes, their orientations and orientation of their principal anisotropic axes; tensor A_{ij} is determined by the same formula (2.19) where the transformation a_{ij} is the identical one ($a_{ij} = \delta_{ij}$).

In considered examples, a spherical form of the region V^A was accepted. It was mentioned in [1] that taking V^A in the form of an ellipsoid it makes it possible to describe the properties of a broader class of the composite materials. But the choice of the ellipsoid aspects is not unique. In other words, possibility to vary the form of the region V^A demonstrates

ambiguity of the Maxwell scheme. But for some cases, this choice of aspects of the ellipsoidal region V^A may be justified.

Let us consider a composite with isotropic ellipsoidal inclusions of the same orientation (Fig. 2).

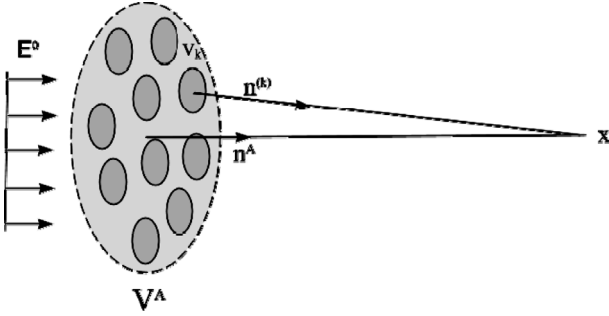


Fig. 2. The Maxwell scheme for the medium with ellipsoidal inclusions of the same orientations

In spite of isotropy of the matrix phase the macro properties of the composite will be anisotropic. It seems reasonable to take for the region V^A not a sphere but an ellipsoid which aspect ratio and orientation coincide with those of the inclusions. In this case the Maxwell scheme leads to the following expression for the effective conductive tensor

$$C_{ij}^* = C_{ij}^0 + p C_{ik}^1 \left[\delta_{kj} + (1-p) A_{kl}(a) C_{lj}^1 \right]^{-1}. \quad (2.23)$$

Again, this equation coincides with ones obtained by other homogenization methods in which the interactions between inclusions were taken into account.

Let us consider, for example, transversely isotropic medium with the property tensor in the form

$$C_{ij}^0 = C_{11}^0 \theta_{ij} + C_{33}^0 m_i m_j, \quad \theta_{ij} = \delta_{ij} - m_i m_j, \quad (2.24)$$

where m_i is the unit vector along the isotropy axis. The medium contains a set of identical spheroidal inhomogeneities ($a_1 = a_2 = a$, $a / a_3 = \gamma$) and all spheroid semi-axes a_3 are directed along the vector m_i (the x_3 -axis). We assume additionally that material of the inclusion is also transversely isotropic with symmetry axis coincides with semi-axis a_3 . In this

case, the integral A_{ij} in (2.19) is calculated in the explicit form

$$A_{ij} = A_1 \theta_{ij} + A_2 m_i m_j \quad (2.25)$$

$$A_1 = \frac{\lambda^2}{2C_{11}^0} \left[1 - \frac{\gamma^2 C_{33}^0}{2C_{11}^0} \lambda \ln \left(\frac{\lambda+1}{\lambda-1} \right) \right], \quad (2.26)$$

$$\lambda = \left(1 - \lambda^2 \frac{C_{33}^0}{C_{11}^0} \right)^{-\frac{1}{2}},$$

$$A_2 = \frac{(\gamma\lambda)^2}{C_{11}^0} \left[\frac{1}{2} \lambda \ln \left(\frac{\lambda+1}{\lambda-1} \right) - 1 \right]. \quad (2.27)$$

And general formula (2.23) gives the following expression for the components of the tensor C_{ij}^*

$$\begin{aligned} C_{ij}^* &= C_{11}^* \theta_{ij} + C_{33}^* m_i m_j, \\ C_{11}^* &= C_{11}^1 + p C_{11}^1 [1 + (1-p) A_1 C_{11}^1]^{-1}, \\ C_{11}^1 &= C_{11}^0 - C_{11}^0, \\ C_{33}^* &= C_{33}^1 + p C_{33}^1 [1 + (1-p) A_2 C_{33}^1]^{-1}, \\ C_{33}^1 &= C_{33}^0 - C_{33}^0. \end{aligned} \quad (2.28)$$

Note, that these expressions are also valid for complex λ .

CONCLUSIONS

It is shown that the Maxwell method allows deriving the well-known equations for the effective conductive properties of the composite materials in the most simple and straightforward way. Nevertheless, the method contains an ambiguity connected with the choice of the shape of the region V^A . This ambiguity cannot be avoided in the frame of the method itself. This defect is overcome in the self-consistent effective field method developed in [2]. In this method, the tensor $A(a)$ in Eq. (2.23) is defined uniquely by the correlation function of the random set of inclusions. This correlation function is additional and important information about the random field of inclusions in the composite.

REFERENCES

1. Berriman J., Berge P. Critique of two explicit schemes for estimating elastic properties of multiphase composites // *Mechanics of Materials*. 1996. Vol. 22. P. 149–164.
2. Kanaun S., Levin V. *Self-Consistent Methods for Composites*. V. I. Static Problem. Springer: Dordrecht, 2008. 386 p.
3. Kunin I. *Methods of Tensor Analysis in the Theory of Dislocation* // US Department of Commerce, Clearing House for Fed. Sci. Tech. Inform. 1965. Springfield, VA 22151.
4. Markov K. *Elementary Micromechanics of Heterogeneous Media* // *Heterogeneous Media. Micromechanics Modeling and Simulations* / Eds. K. Markov, L. Preziosi. Boston: Birkhauser, 2001. P. 1–162.
5. Maxwell J. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. N. Y.: Dover, 1954.

ГЕННАДИЙ НИКОЛАЕВИЧ КОЛЕСНИКОВ

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
kolosnikovgn@yandex.ru

ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ КУВШИНОВ

аспирант кафедры механики, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
dak@ptz.ru

АЛГОРИТМ ДЕКОМПОЗИЦИИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ОДНОСТОРОННИМИ КОНТАКТАМИ

Исследуется математическая модель механической системы с полуконтактными (односторонними) контактами. Модель получена как физически обоснованное описание контактного взаимодействия подсистем механической системы. Исследуется эффективность алгоритма компьютерной реализации модели.

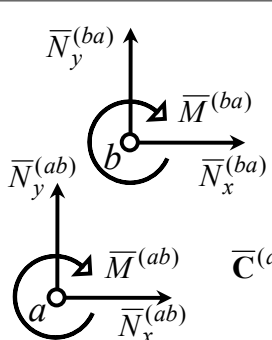
Ключевые слова: метод декомпозиции, метод конечных элементов, контактное взаимодействие

Развитие методов декомпозиции обусловлено необходимостью решения поставляемых практикой все более сложных задач, требующих компьютерного моделирования инженерных объектов и технологических процессов. Цель разработки метода декомпозиции – корректно заменить решение одной большой задачи решением серии меньших задач и тем самым уменьшить затраты времени как в последовательных, так и в параллельных алгоритмах численного моделирования. Применение методов декомпозиции позволяет расширить класс объектов, моделирование которых может быть выполнено с применением существующей компьютерной техники. Появление многопроцессорных вычислительных систем и мультиядерных процессоров стимулировало эволюцию методов декомпозиции. Развитие методов декомпозиции привело к формированию одного из фундаментальных направлений вычислительной математики. К актуальным проблемам данного направления относятся совершенствование алгоритмов численного моделирования с применением метода конечных элементов [6], [7]. В данной статье в развитие работы [3] рассматривается алгоритм декомпозиции конечно-элементной модели механической системы с полуконтактными (односторонними) контактами*. Примером такой модели может быть система «контактная сеть – токоприемники электроподвижного состава» [1], [4]. Объектом исследования является математическая модель механической системы с полуконтактными (односторонними) контактами. Модель получена как физически обоснованное описание контактного взаимодействия подсистем механической системы. Предмет изучения – вычислительная эффективность алгоритма компьютерной реализации модели.

Пусть конечно-элементная модель разбита на n подструктур. Запишем в векторно-матричной форме уравнения движения каждой подструктуры k , $k = 1, \dots, n$.

$$\mathbf{M}^{(k)} \ddot{\mathbf{U}}^{(k)} + \mathbf{K}^{(k)} \dot{\mathbf{U}}^{(k)} + \mathbf{R}^{(k)} \mathbf{U}^{(k)} = \mathbf{P}^{(k)} + \bar{\mathbf{C}}^{(k)} \bar{\mathbf{N}}. \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{U}^{(k)}$, $\dot{\mathbf{U}}^{(k)}$ и $\ddot{\mathbf{U}}^{(k)}$ – векторы (одномерные массивы) соответственно перемещений, скоростей и ускорений узлов; $\mathbf{R}^{(k)}$, $\mathbf{K}^{(k)}$ и $\mathbf{M}^{(k)}$ – матрицы соответственно жесткости, демпфирования и масс. $\mathbf{P}^{(k)}$ – вектор внешних воздействий (внешних сил). Соотношение (1), которое можно интерпретировать как систему уравнений равновесия, отличается от общепринятой формулировки слагаемым $\bar{\mathbf{C}}^{(k)} \bar{\mathbf{N}}$, где $\bar{\mathbf{C}}^{(k)}$ – матрица коэффициентов в уравнениях равновесия. Элементами вектора $\bar{\mathbf{N}}$ являются силы и моменты (пары сил), появляющиеся при контактном взаимодействии подсистем (см. рисунок). $\bar{\mathbf{N}}$ и $\mathbf{U}^{(k)}$ заранее не известны, их определение – цель решения задачи.



$$\bar{\mathbf{C}}^{(b)} \bar{\mathbf{N}} = -\bar{\mathbf{C}}^{(a)} \begin{pmatrix} \bar{N}_x^{(ab)} \\ \bar{N}_y^{(ab)} \\ \bar{M}^{(ab)} \end{pmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{C}}^{(a)} \bar{\mathbf{N}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{N}_x^{(ab)} \\ \bar{N}_y^{(ab)} \\ \bar{M}^{(ab)} \end{pmatrix}$$

Узлы a и b двух подсистем

Если, например, $\bar{N}_x^{(ab)} = 0$ и $\bar{M}^{(ab)} = 0$, то $\bar{\mathbf{C}}^{(a)} \bar{\mathbf{N}} = 1 \cdot \bar{N}_y^{(ab)}$, $\bar{\mathbf{C}}^{(b)} \bar{\mathbf{N}} = -1 \cdot \bar{N}_y^{(ab)}$. Это модель скользящего вдоль оси x шарнирно-подвижного контакта.

Зазоры укажем в векторе $\bar{\mathbf{D}}$, определив их линейными и угловыми компонентами. Например, для двух контактирующих узлов a и b получим:

$$\bar{\mathbf{D}}^{(ab)} = \bar{\mathbf{C}}^{(a)T} \mathbf{U}^{(a)} + \bar{\mathbf{C}}^{(b)T} \mathbf{U}^{(b)} + \bar{\mathbf{D}}_0^{(ab)}. \quad (2)$$

Не указывая верхние индексы, запишем дискретный аналог уравнения (1), используя явную схему с односторонними конечными разностями. С учетом (2) при $\bar{\mathbf{D}}_0 = \mathbf{0}$ получим [2]:

$$\mathbf{A} \mathbf{U}_i = \hat{\mathbf{P}}_i + \bar{\mathbf{C}} \bar{\mathbf{N}}; \quad \bar{\mathbf{D}}_i = \bar{\mathbf{C}}^T \mathbf{U}_i, \quad (3)$$

где: $\mathbf{A} = \mathbf{M} \tau^{-2} + \mathbf{K} \tau^{-1} + \mathbf{R}$,

$$\hat{\mathbf{P}}_i = \mathbf{P}_i + \tau^{-2} \mathbf{M} \mathbf{U}_{i-2} + (2\mathbf{M} \tau^{-2} + \mathbf{K} \tau^{-1}) \mathbf{U}_{i-1},$$

τ – шаг по времени, i – номер шага.

Для подструктуры k на шаге i получим (индекс i не указан):

$$\mathbf{A}^{(k)} \mathbf{U}^{(k)} - \bar{\mathbf{C}}^{(k)} \bar{\mathbf{N}} = \hat{\mathbf{P}}^{(k)}; \quad \bar{\mathbf{D}}^{(k)} = \bar{\mathbf{C}}^{(k)T} \mathbf{U}^{(k)}.$$

Систему этих соотношений для всех $k = 1, \dots, n$ запишем в виде блочного векторно-матричного равенства:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}^{(1)} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & -\bar{\mathbf{C}}^{(1)} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}^{(2)} & \dots & \mathbf{0} & -\bar{\mathbf{C}}^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{A}^{(n)} & -\bar{\mathbf{C}}^{(n)} \\ -\bar{\mathbf{C}}^{(1)T} & -\bar{\mathbf{C}}^{(2)T} & \dots & -\bar{\mathbf{C}}^{(n)T} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{U}^{(1)} \\ \mathbf{U}^{(2)} \\ \dots \\ \mathbf{U}^{(n)} \\ \bar{\mathbf{N}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{P}}^{(1)} \\ \hat{\mathbf{P}}^{(2)} \\ \dots \\ \hat{\mathbf{P}}^{(n)} \\ -\bar{\mathbf{D}} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Из (4) следует:

$$\mathbf{U}^{(k)} = \mathbf{A}^{-1(k)} (\hat{\mathbf{P}}^{(k)} + \bar{\mathbf{C}}^{(k)} \bar{\mathbf{N}}). \quad (5)$$

Используя (5) и учитывая, что, согласно (4),

$$\bar{\mathbf{C}}^T \mathbf{U} = \sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{C}}^{(k)T} \mathbf{U}^{(k)} = \bar{\mathbf{D}},$$

получим:

$$\sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{C}}^{T(k)} \mathbf{A}^{-1(k)} (\hat{\mathbf{P}}^{(k)} + \bar{\mathbf{C}}^{(k)} \bar{\mathbf{N}}) = \bar{\mathbf{D}}.$$

Если односторонних связей нет, то $\bar{\mathbf{D}} = \mathbf{0}$. Тогда [3]

$$\bar{\mathbf{N}} = - \left(\sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{C}}^{T(k)} \mathbf{A}^{-1(k)} \bar{\mathbf{C}}^{(k)} \right)^{-1} \sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{C}}^{T(k)} \mathbf{A}^{-1(k)} \hat{\mathbf{P}}^{(k)}. \quad (6)$$

Подставив (6) в (5), определим $\mathbf{U}^{(k)}$, $k = 1, \dots, n$. Таким образом, задача определения векторов $\bar{\mathbf{N}}$ и $\mathbf{U}$ при $\bar{\mathbf{D}} = \mathbf{0}$ решена. Если связи односторонние, то $\bar{\mathbf{D}} \neq \mathbf{0}$ и определение векторов $\bar{\mathbf{N}}$ и $\mathbf{U}$ сводится к линейной задаче дополненности:

$$\bar{\mathbf{D}} = \sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{C}}^{T(k)} \mathbf{A}^{-1(k)} \bar{\mathbf{C}}^{(k)} \bar{\mathbf{N}} + \sum_{k=1}^n \bar{\mathbf{C}}^{T(k)} \mathbf{A}^{-1(k)} \hat{\mathbf{P}}^{(k)},$$

$$\bar{\mathbf{N}} \geq \mathbf{0}, \quad \bar{\mathbf{D}} \geq \mathbf{0}, \quad \bar{\mathbf{N}}^T \bar{\mathbf{D}} = 0.$$

Решив эту задачу, например, с применением энергетического критерия перехода односторонних связей в действительное состояние [5], найдем $\bar{\mathbf{N}}$ и $\bar{\mathbf{D}}$. Затем определим $\mathbf{U}^{(k)}$ (5), $k = 1, \dots, n$.

Тестирование алгоритма при $\bar{\mathbf{D}} = \mathbf{0}$ выполняло на компьютере с процессором Intel® Core™2 Duo CPU E8400@3.00 GHz, кэш L1 32 Kb, L2 6144 Kb, память DDR3 667 MHz 2 Gb, Intel P43, ОС Windows XP 32 bit. Модель механической системы [4] разбивалась на n подсистем с примерно одинаковым числом неизвестных. Затраты времени (в секундах) при решении задачи с общим числом уравнений N_0 и числом подструктур n приведены в таблице.

N_0	n						
	1	2	3	4	5	6	7
1000	0,36	0,26	0,15	0,11	0,10	0,09	0,09
2000	2,21	1,98	0,81	0,57	0,41	0,34	0,29
3000	6,52	9,08	3,14	1,51	1,11	0,91	0,72

При $N_0 > 1$ выполнялась только декомпозиция, алгоритм вычислений – последовательный. Алгоритм параллельных вычислений обеспечит дальнейшее уменьшение времени счета.

Таким образом, применение представленного метода декомпозиции в задачах определенного класса [2], [4] позволяет уменьшить затраты времени при численном моделировании.

ПРИМЕЧАНИЕ

* В данной статье исправлены опечатки, допущенные в [3] по технической причине.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вологин В. А., Герасимов А. С. Динамические параметры системы контактная сеть – токоприемник // Вестник ВНИИЖТ. 2008. № 2. С. 19–23.
2. Колесников Г. Н., Кувшинов Д. А. Численное моделирование полуконтактного механического взаимодействия токоприемника и контактной сети при высокой скорости электровоза // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2008. № 3 (94). С. 83–88.
3. Колесников Г. Н., Кувшинов Д. А. Декомпозиция конечно-элементной модели // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2012. № 2 (123). С. 78–79.
4. Колесников Г. Н., Кувшинов Д. А. Численное моделирование динамического взаимодействия токоприемников и контактной сети // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 1. С. 9–12.
5. Колесников Г. Н., Раковская М. И. Энергетический критерий очередности перехода односторонних связей в действительное состояние // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2006. Т. 13. С. 652.
6. Копысов С. П., Новиков А. К. Метод декомпозиции для параллельного адаптивного конечно-элементного алгоритма // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2010. № 3. С. 141–154.
7. Фиялко С. Ю. Прямые методы решения систем линейных уравнений в современных МКЭ-комплексах. М.: Изд-во СКАДСОФТ: Изд-во Ассоциации строительных вузов (АСВ), 2000. 160 с.

ВЕНИАМИН НИКОЛАЕВИЧ ШИЛОВСКИЙ

доктор технических наук, профессор кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

tmir@psu.karelia.ru

ГРИГОРИЙ ЮРЬЕВИЧ ГОЛЬШТЕЙН

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

grigory@psu.karelia.ru

ВЕЙККО АРМАСОВИЧ КЯЛЬВИЙНЕН

аспирант кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

vek-1987@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОРГАНИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН

В статье предложены методические подходы оценки плановой и фактической периодичности и эффективности технических обслуживаний и фактически выполняемых ремонтов лесозаготовительных машин.

Ключевые слова: параметрический отказ, средняя наработка до параметрического отказа, доверительный интервал, границы доверительного интервала, периодичность технического обслуживания, виды и способы ремонта, корректировка периодичности технического обслуживания

Техническое обслуживание (ТО) лесозаготовительных машин (ЛЗМ), проводимое через определенную наработку и требующее особых условий, во многом определяет эксплуатационную технологичность техники. Операции ТО могут проводиться по фактическому техническому состоянию агрегатов и систем ЛЗМ или согласно инструкциям завода-изготовителя через установленные периоды наработки с выполнением определенной номенклатуры работ.

Периодичность и трудоемкость выполняемых работ, во-первых, зависят от сложности (номера) ТО, во-вторых, могут быть оценены и откорректированы по результатам наблюдений за машинами в условиях их рядовой эксплуатации. Наиболее ответственным и трудоемким для отечественных ЛЗМ является техническое обслуживание № 3 (ТО-3), выполняемое через 900 моточасов, что равноценно среднестатистической годовой наработке трелевочных тракторов ОТЗ и машин на их базе.

Сложные виды ТО зарубежных ЛЗМ, например John Deere, предусмотрены через 2000 моточасов и являются не третьим, а четвертым номером обслуживания. Выполнение сложных видов ТО зарубежных ЛЗМ возможно с использованием стационарных или специальных передвижных ремонтно-профилактических мастерских. Выполнение ТО-3 отечественных ЛЗМ предусмотрено в ремонтно-механических мастерских (РММ) с доставкой машин на трейлере.

При проведении ТО-3 с ЛЗМ снимаются элементы топливной и гидравлической систем, в первую очередь гидронасосы и топливные на-

сосы высокого давления (ТНВД). На ремонтно-диагностических стендах проверяется наличие параметрических отказов, осуществляются необходимые регулировочные работы, сопутствующий текущий ремонт.

Согласно требованиям ГОСТ и нормативно-технических документов (НТД) к эксплуатационной надежности машин, падение мощности, производительности или развиваемого давления более чем на 15 % считается наступлением параметрического отказа проверяемого узла или агрегата [1]. В условиях рыночных отношений процент падения уровня номинальной величины установленных заводом параметров определяется величиной доходной ставки в конкретных условиях производства [5].

При внедрении системы технического обслуживания и ремонта «по потребности», то есть исходя из фактического технического состояния того или иного агрегата, периодичность проверок контролируемых сопряжений может быть определена на основе минимаксного метода, изложенного в работе [5], обеспечивающего полное использование ресурса детали без получения аварийных отказов [2]. При планово-предупредительной системе, когда все виды ТО проводятся строго по плану в соответствии с инструкциями заводов-изготовителей, обоснование данных инструкций и их корректировка возможны, а порой необходимы на основе материалов эксплуатационных наблюдений (испытаний) машин в конкретных условиях рядовой эксплуатации. Проанализируем нормативные и фактические данные по ТО и ремонту отде-

льных марок отечественных и зарубежных ЛЗМ в условиях рядовой эксплуатации на лесозаготовительных предприятиях Карелии.

При проведении ТО-3 проверяются величина фактической производительности гидронасосов, значения усилий, развиваемых гидроцилиндрами. Восстановление до номинальных величин, сниженных в результате эксплуатации, показателей работоспособности гидроагрегатов может осуществляться в условиях эксплуатирующего ЛЗМ предприятия путем замены отдельных изношенных элементов агрегатов.

Однако замена отдельных деталей изношенных сопряжений не всегда способствует достижению первоначальных заводских параметров, что ограничивает последующий межремонтный период эксплуатации агрегатов. Например, заменой уплотнений и шестерен гидронасоса можно снизить падение его производительности с 35–40 до 15 %, что может являться допустимым для эксплуатации, но недостаточным для восстановления первоначального ресурса гидронасоса, которое возможно при одновременном восстановлении корпуса насоса. Аналогичная ситуация имеет место с восстановлением развиваемого гидроцилиндром усилия путем замены поршневых манжет и уплотнительных колец штоков. Для полного восстановления первоначального ресурса сопряжений с течением времени эксплуатации требуются ремонтные воздействия на все элементы сопряжений, влияющих на параметрический отказ узла. В частности, необходимо восстановление первоначальных размеров не только шестерен и уплотнений, но и корпуса шестеренного насоса и внутренних поверхностей гильз гидроцилиндров. Восстановление первоначальных размеров (например, путем обжата корпуса гидронасоса или гальванического наращивания внутренней поверхности гильзы) возможно только в условиях специализированного ремонтного предприятия.

Таким образом, восстановление ресурса сопряжений в пределах допустимых, экономически обоснованных величин может быть осуществлено в рамках текущего ремонта; восстановление же первоначальных размеров сопряжения при износе обеих сопрягаемых деталей может быть осуществлено путем капитального ремонта с полной разборкой узла, дефектовкой всех деталей и последующего восстановления их номинальных размеров в условиях специализированного предприятия. То есть периодичность проверок технического состояния агрегатов зависит от способа и вида предыдущего ремонта.

Рассмотрим данные о наработке до возникновения первого параметрического отказа шестеренных насосов и гидроцилиндров гидропривода трелевочных тракторов ОТЗ и ЛЗМ на их базе. Гидронасосы типа НШ используются и на современных отечественных машинах.

Наблюдения проводились за тракторами ОТЗ (ТДТ-55А, ТБ-1, ТБ-1М) и машинами на их базе

(ЛП-30Г, ПЛ-1В, ЛП-17А) в условиях леспромпхозов Карелии. Наблюдались 23 ЛЗМ по плану испытаний [NUN]. Техническое обслуживание согласно инструкции завода-изготовителя проводилось со следующей периодичностью в моточасах наработки: ТО-1 – 100 моточасов, ТО-2 – 300 моточасов, ТО-3 – 900 моточасов; сезонное обслуживание (СО) – два раза в год. Проверка производительности, развиваемого давления и усилий с использованием, например, манометров и дроссель-расходомера предусмотрена при сезонном обслуживании, то есть два раза в год.

Насосы по факту снимались с машины для последующего ремонта при снижении их производительности до 50 %. Первым шагом к восстановлению необходимой производительности насосов была замена их уплотнений на новые. Если производительность не восстанавливалась хотя бы до 70 % от номинальной, то у насоса заменялись шестерни. Если и замена шестерен не давала желаемого результата, агрегат отправлялся на капитальный ремонт на специализированное предприятие.

Результаты экспериментальной оценки фактического наступления параметрических отказов в условиях рядовой эксплуатации на лесозаготовительных предприятиях Карелии приведены в таблице. С использованием источников [3], [4] были проанализированы результаты наблюдений за работой нескольких десятков машин в условиях следующих лесозаготовительных предприятий: Суккозерского, Муезерского, Пяозерского, Ледмозерского, Шуялес.

Верхняя и нижняя границы интервала разброса наработок до первого параметрического отказа для насосов RE518088 составили соответственно 4096 и 1847 моточасов. При оценке вариационного ряда отказов насоса RE518088 установлено, что при доверительной вероятности (надежности) $P_D = 90$ % точность оценки математического ожидания $\Delta\sigma_m = 82,8$ %. Сбор экспериментальных материалов осуществлялся в ОАО «Ледмозерское ЛЗХ» и ЗАО «Шуялес».

Верхняя и нижняя границы доверительного интервала для насосов НШ-50 составили соответственно 1919 и 1679 моточасов при доверительной вероятности (надежности) $P_D = 80$ %. Эмпирическое распределение наработок до первого параметрического отказа насосов НШ-50 соответствует нормальному теоретическому распределению при значении критерия $\chi^2 = 5,06$, которое меньше стандартного значения $\chi^2 = 7,8$ для уровня значимости 0,05.

При оценке вариационного ряда наработок ЛЗМ John Deere серии 1010 между техническими обслуживаниями, состоящего из 46 вариантов, установлено, что при доверительной вероятности (надежности) $P_D = 95$ % точность оценки математического ожидания $\Delta\sigma_m = 96,7$ %. Средняя фактическая наработка между ТО – 249 моточасов, закон распределения между очередными техническими обслуживаниями логнормальный

Оценка наработки до первого параметрического отказа отдельных элементов гидросистем ЛЗМ

Наименование узла, детали	Оценка средней наработки до отказа (T_p), моточас	Оценка гамма-восьмидесятипроцентной наработки до отказа (T_{py}), моточас	Оценка среднего квадратического отклонения (σ), моточас	Оценка коэффициента вариации (V)	Закон распределения
Насос НШ-50	1784	1373	489	0,27	нормальный
Насос НШ-10	2326	1667	782	0,33	нормальный
Манжета 55 × 80 × 120	1668	1153	612	0,37	нормальный
Манжета 1-125 × 105	1356	1018	402	0,29	нормальный
Топливный насос высокого давления форвардера John Deere серии 1410 RE518088	2972	2466	1248	0,420	Вейбулла

с параметром масштаба $\mu = 5,514$ и формы $\sigma = 0,066$. При устранении отказов узлов гидросистемы ЛЗМ применялся агрегатный метод ремонта.

Анализируя способы устранения параметрических отказов гидронасосов НШ-50, необходимо отметить, что при наработке до 2000 моточасов отказы устранялись заменой уплотнения объекта на новые. До устранения отказа падение производительности насоса достигало 50 %, после устранения восстанавливалось на величину не менее 70 % от номинального значения.

При дальнейшей наработке наряду с заменой уплотнений требовалась замена шестерен. После 4000–4500 моточасов наработки было необходимо устранение износа самого корпуса, то есть капитальный ремонт гидронасоса с полной разборкой и дефектовкой всех деталей. В связи с отсутствием такой возможности на лесозаготовительных предприятиях гидронасосы браковались или эксплуатировались с потерей производительности до 50 % и более. Отсутствие на лесозаготовительных предприятиях специализированных участков по ремонту гидрооборудования, оснащенных ремонтно-диагностическими стендами, оборудованием для восстановления корпусов гидронасосов, изношенных гильз гидроцилиндров, связано с повышенным расходом гидроагрегатов в качестве запасных частей.

Создание региональных дилерских пунктов по обслуживанию и ремонту ЛЗМ с передвижными оснащенными необходимым диагностическим оборудованием средствами техничес-

кого сервиса позволяет своевременно выявлять параметрические отказы без доставки техники в центральные стационарные пункты технического сервиса. Примером подобной достаточно эффективной системы может служить дилерская деятельность фирмы «John Deere».

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальная оценка реальной технической эксплуатации ЛЗМ в конкретных производственных условиях позволяет определить фактическое изменение технического состояния сопряжений ЛЗМ во времени, определить и скорректировать периодичность необходимых технических воздействий в виде ТО и ремонта различных уровней.
2. Соответствующая организация технического обслуживания, диагностики, методов и способов эффективного восстановления работоспособности узлов в рамках как текущего, так и капитального ремонта может быть достигнута независимыми дилерскими организациями, примером которых могут быть дилеры фирмы «John Deere».
3. Согласно данным таблицы, наработка до наступления параметрического отказа на примере гидронасоса НШ-50 и топливного насоса RE518088 отечественных и зарубежных ЛЗМ примерно одного порядка. Поэтому и для отечественных ЛЗМ может быть принята унифицированная с зарубежными система ТО, обеспеченная специальными передвижными пунктами технического сервиса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Питухин А. В. Качество и надежность деталей лесных тракторов // Лесная промышленность. 1987. № 1. С. 24.
2. Питухин А. В. Методы теории катастроф при проектировании элементов конструкций машин и оборудования лесного комплекса // Лесной журнал. 2007. № 2. С. 58–65.
3. Саливоник А. В. К вопросу повышения эффективности эксплуатации зарубежных лесозаготовительных машин // Труды лесинженерного факультета ПетрГУ. Вып. 6 (спец.). Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2005. С. 56–58.
4. Шиловский В. Н. Теоретические основы и стратегии организации маркетинга и менеджмента технического сервиса территориально распределенных машин и оборудования. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2001. 324 с.
5. Шиловский В. Н., Гольштейн Г. Ю. Об исследовании параметрического отказа гидросистемы манипулятора бесчелюстного трактора // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2009. № 4. С. 89–94.

ВАСИЛИЙ МИХАЙЛОВИЧ ДЕРБИН

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии лесопромышленных производств Лесотехнического института, Северный (Арктический) федеральный университет (Архангельск, Российская Федерация)
v.derbin@mail.ru

ИЛЬЯ ВИКТОРОВИЧ МОРОЗОВ

аспирант кафедры технологии лесопромышленных производств Лесотехнического института, Северный (Арктический) федеральный университет (Архангельск, Российская Федерация)
altk-morozov@ya.ru

ВЛИЯНИЕ ЛЕСНОЙ СЕРТИФИКАЦИИ НА ТЕХНОЛОГИЮ РАЗРАБОТКИ ДЕЛЯНОК НА ПРИМЕРЕ СОХРАНЕНИЯ НЕЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПЛОЩАДЕЙ

В статье приведены причины, оказывающие влияние на развитие добровольной лесной сертификации. Указаны возможные элементы биоразнообразия, которые необходимо сохранять в соответствии со стандартом лесной сертификации. Определено влияние сохранения элементов биоразнообразия на технологию разработки делянки на примере сохранения неэксплуатационных площадей.

Ключевые слова: добровольная лесная сертификация, неэксплуатационная площадь, лесопогрузочный пункт, делянка, трелевка

Выполнение требований стандарта лесопромышленного управления по системе FSC оказывает влияние на технологический процесс лесосечных работ, в частности на схемы расположения трелевочных волоков.

При проектировании трелевочных волоков следует учитывать необходимость сохранения элементов биоразнообразия (малопродуктивные участки леса, участки леса вдоль водотоков, «окна» распада древостоя с естественным возобновлением и валежом различной стадии разложения, крупные устойчивые сухостойные и перестойные деревья, обломанные на различной высоте естественные пни и др.) [1], [2]. Например, при выделении на делянке неэксплуатационной площади технология по заготовке и трелевке меняется. Рассмотрим на примере конкретной делянки № 7, расположенной в квартале 109 Холмогорского лесничества (рис. 1), влияние сохранения элементов биоразнообразия на технологические параметры делянки, например среднее расстояние трелевки. Часть делянки, тяготеющей к одному лесопогрузочному пункту, на которой расположена неэксплуатационная площадь (элемент биоразнообразия), разбиваем на элементарные участки правильной формы. В качестве элементарных участков приняты ленты леса, разрабатываемые валочно-пакетирующей машиной (ВПМ).

При расчетах среднего расстояния трелевки используем формулы площадей и среднего расстояния:

$$L_{\text{тр}}^{\text{ср}} = \frac{S_{\text{общ.}}}{\left(\frac{S_1}{L_1} + \frac{S_2}{L_2} + \dots + \frac{S_n}{L_n} \right)}, \quad (1)$$

где $L_{\text{тр}}^{\text{ср}}$ – среднее расстояние трелевки, м; $S_{\text{общ.}}$ – общая площадь делянки, м²; S_i – площади участков делянки, м²; L_i – среднее расстояние трелевки на соответствующем участке, м.

Результаты расчетов средних расстояний трелевки сводим в таблицу.

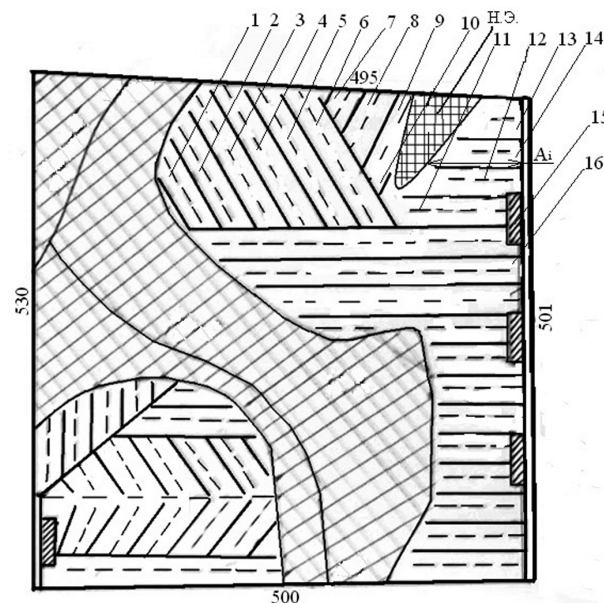


Рис. 1. Схема делянки № 7 в 109-м квартале (вариант 1):
1–14 – элементарные участки; 15 – лесопогрузочный пункт;
16 – лента, разрабатываемая ВПМ;
н. э. – неэксплуатационная площадь

Для анализа влияния места расположения неэксплуатационной площади по отношению к лесопогрузочному пункту искусственно смещаем неэксплуатационную площадь на определенное расстояние A_i (рис. 2).

Сводная таблица расчета среднего расстояния трелевки

№ п/п	Площадь участка, м ² (S)	Среднее расстояние трелевки на участке, м (L)
S1	2912	395
S2	4368	395
S3	5460	382
S4	5824	361
S5	5824	324
S6	5824	287
S7	37,44	270
S8	1820	262
S9	2912	253
S10	1164	170
S11	3931	104
S12	3276	108
S13	2402	116
S14	995	133
Сн.э.	41 79,3	—
S _{общ.}	50 930	244

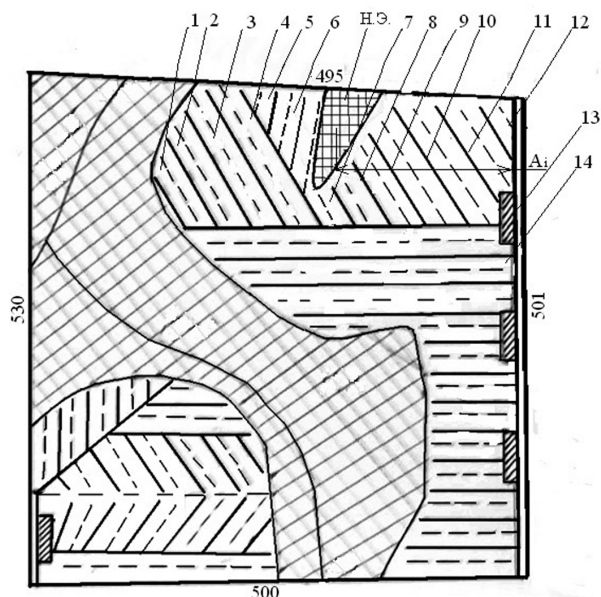


Рис. 2. Схема делянки № 7 в 109-м квартале:
1–12 – элементарные участки; 13 – лесопогрузочный пункт;
14 – лента, разрабатываемая ВПМ;
н. э. – неэксплуатационная площадь

Подобные расчеты среднего расстояния трелевки выполнены для нескольких вариантов расположения неэксплуатационной площади; построен график зависимости среднего расстояния трелевки от расстояния A_i (A_i – расстояние от неэксплуатационной площади до лесопогрузочного пункта).

Из приведенных исследований следует, что сохранение элементов биоразнообразия на разрабатываемых делянках оказывает влияние на

среднее расстояние трелевки. Удаление неэксплуатационной площади от лесопогрузочного пункта на расстояние от 100 до 300 м приводит к уменьшению среднего расстояния трелевки примерно на 5 %.

Анализ расчетных данных показывает, что для снижения среднего расстояния трелевки лесопогрузочные пункты следует располагать в зоне, тяготеющей к эксплуатационным площадям.

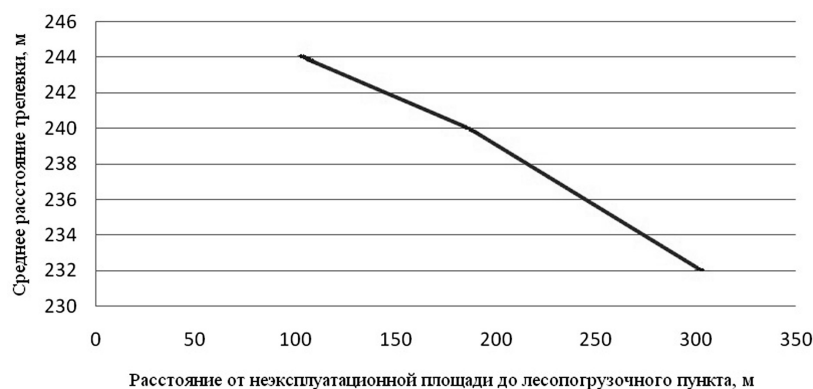


Рис. 3. График зависимости среднего расстояния трелевки от расстояния A_i

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паутов Ю. А., Засухин Д. П., Ключихин А. Н., Паутов С. Ю., Порошин Е. А. FSC сертификация в России: практические решения: Пособие для работников лесной отрасли. Сыктывкар: Коми региональный некоммерческий фонд «Серебряная тайга», 2007. 151 с.
2. Российский национальный стандарт добровольной лесной сертификации по схеме Лесного попечительского совета (FSC-STD-RUS-01 2008-11). Версия 7.0.

ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ СКРЫПНИК

заведующий лабораторией технологии лесосечных работ и транспорта леса Карельского научно-исследовательского института лесопромышленного комплекса, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

balasvet@psu.karelia.ru

АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ КУЗНЕЦОВ

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

kuzalex@psu.karelia.ru

ЮЛИЯ АЛЕКСЕЕВНА РАТМАНОВА

студентка 5-го курса лесинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

trinad13@list.ru

СПОСОБЫ МИНИМИЗАЦИИ ЗАТРАТ НА ПЕРВИЧНЫЙ ТРАНСПОРТ ЛЕСА

Работа посвящена исследованию минимизации затрат при транспортном освоении лесного фонда лесозаготовительным предприятием. На основе полученных результатов представлены выводы и рекомендации, позволяющие оценить экономическую целесообразность строительства временных лесовозных дорог (усов), продолжения усов в пределы лесосеки или трелевки на это расстояние тракторами.

Ключевые слова: лесосека, волок, трелевка, ус, критический объем вывозки, технологическая схема освоения лесосеки

В настоящее время перед лесозаготовителями остро стоит проблема минимизации затрат при транспортном освоении лесного фонда, ведь издержки на выполнение операций, связанных с первичным транспортом леса, могут достигать 50 % в общем объеме лесотранспортных работ. Несмотря на то что этой проблеме уделялось достаточно много внимания в исследованиях ученых СПбЛТА, ВГЛТА, МарГТУ, МГУЛ, ЦНИИМЭ, ГНЦ ЛПК [1], [2], [3], ряд вопросов в области повышения эффективности транспортно-заготовительных операций окончательно не решен. Одним из направлений этих исследований [8], [9], [10] является повышение эффективности функционирования первичной лесотранспортной сети лесозаготовительного предприятия в реальных природно-производственных условиях. В рамках этого направления должны быть решены две основные задачи.

1. Определение критического объема ($Q_{кр}$) вывозки леса из лесосеки, при превышении которого экономически целесообразно устройство временных лесовозных дорог (усов); в случае если запас леса меньше $Q_{кр}$, лес целесообразно трелевать тракторами по магистральным волокнам за пределы лесосеки.

2. Если до лесосеки прокладывается ус, то необходимо обосновать целесообразность продолжения усов в ее пределы и определить оптимальную технологическую схему освоения лесосеки.

В работе профессора В. И. Алябьева [1], а также в трудах исследователей Карельского науч-

но-исследовательского института лесопромышленного комплекса ПетрГУ [6] рассматривались вопросы определения целесообразности строительства усов при освоении небольших лесосек. В настоящее время эти вопросы стали более актуальными, так как при сортиментной заготовке сбор, трелевка, сортировка и штабелевка леса производится форвардерами (тракторами-сортиментовозами). Форвардеры на колесной базе имеют большую скорость, чем гусеничные трелевочные тракторы, и, что особенно важно, трелевочные тракторы, и, что особенно важно, трелевочные тракторы в полностью погруженном положении, что исключает повреждения древесины, которые имеют место при трелевке деревьев или хлыстов в полупогруженном положении. Поэтому форвардеры можно использовать в определенных условиях для транспортировки сортиментов на значительные расстояния.

В работе [7] приведены зависимости для определения $Q_{кр}$, выведенные нами для решения тех же задач. Анализ показал, что зависимости, представленные в работах [1], [6], не учитывают несколько существенных факторов: 1. Расстояние трелевки. 2. Время на набор и разгрузку вoза. 3. Эксплуатационные затраты в смену (стоимость машино-смены) при работе форвардера на лесосеке и за ее пределами. 4. Принимается одинаковая скорость движения по лесосеке и за ее пределами, хотя на практике эти значения отличаются. В конечном итоге игнорирование этих факторов приводит к значительным ошибкам при определении критического значения объема перевозки леса ($Q_{кр}$).

Расчеты показали, что при определении критической величины $Q_{кр}$ по рекомендациям [1] его значение завышено от 2 до 4 раз. Невозможно транспортировать тракторами или форвардерами объемы леса более 10–15 тыс. м³. Производительность тракторов при расстоянии транспортировки более 3–4 км резко падает, подстилающие грунты на магистральном волоке не выдерживают большого количества проходов машин и требуют больших затрат на содержание. Кроме того, нужно резко увеличить парк трелевочных тракторов (форвардеров).

С использованием полученных нами зависимостей составлена программа для определения критического значения величины $Q_{кр}$ с учетом всех влияющих факторов, а также построены номограммы для упрощения расчетов в условиях лесозаготовительных предприятий [7].

Проведенное с использованием разработанных методов и выведенных расчетных зависимостей обоснование критических объемов дало возможность определить лучший вариант транспортного освоения лесосеки для конкретных производственных условий: 1) строительство усов с вывозкой по ним леса от лесосеки автотранспортом к ближайшему погрузочному пункту; 2) трелевка леса тракторами на это расстояние.

Если доказана необходимость строительства уса до разрабатываемой лесосеки, следует определить целесообразность продолжения уса в пределы лесосеки с целью снижения суммарных затрат на прокладку волоков, трелевку, строительство уса и транспортировку леса по усу до границ лесосеки.

В настоящее время при разработке делянок применяются в основном три технологические схемы [1], [2] (рис. 1).

• Метод широкого фронта применяется в тех случаях, когда погрузочные пункты просты и затраты на их подготовку очень незначительны. Эта схема получила большое распространение после широкого внедрения в производство челюстных погрузчиков. В последние годы на погрузке хлыстов, и особенно сортиментов, в автопоездах в значительных масштабах используются манипуляторы, устанавливаемые

на автопоездах. В этом случае затраты на устройство площадок под штабеля еще больше минимизируются.

- Параллельная схема применяется в тех случаях, когда требуется концентрация стрелеванного леса в одном месте или при невозможности обустройства погрузочных пунктов по природно-производственным условиям (рельеф, несущая способность грунтов, укладки леса вдоль уса), когда несколько пасечных параллельных волоков выходят на один магистральный волок.
- Радиальная схема позволяет при одинаковой площади делянки значительно сократить расстояние трелевки по сравнению с параллельной схемой, за счет того что магистральные волока соединяют отдельные участки делянок с погрузочным пунктом по кратчайшим направлениям.

В современных условиях ввиду многообразия техники, возможности эксплуатации в различных условиях указанные классические схемы не должны быть догмой. Они могут дополняться, изменяться и совершенствоваться с учетом возможности машин, оборудования и конкретных природно-производственных условий.

Рассмотрим возможность снижения затрат, когда до лесосеки построен ус, путем уменьшения среднего расстояния трелевки за счет продолжения лесовозного уса в пределах лесосеки. Делянку осваивают по параллельной схеме с использованием харвестера и форвардера (рис. 2). Технологическая схема работы: харвестер, двигаясь от дороги вглубь лесосеки, производит валку деревьев, обрезку сучьев и раскряжевку на сортименты и частичную их штабелевку, затем в дальнем конце лесосеки сдвигается на ширину полупасеки, разворачивается и, двигаясь в обратном направлении, производит те же операции. Форвардер, двигаясь от дороги, собирает сортименты, укладывает их в кузов, причем, удаляясь от дороги, он укладывает сортименты одного размера, возвращаясь, добывает сортименты других размеров, затем движется по магистральному волоку к погрузочной площадке, где производит сортировку и штабелевку сортиментов.

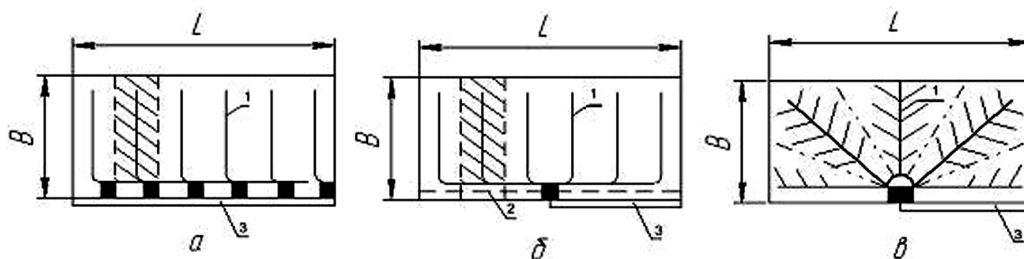


Рис. 1. Схемы расположения трелевочных волоков: а – с широким фронтом отгрузки; б – параллельная; в – радиальная. 1 – пасечный волок; 2 – магистральный волок; 3 – ус

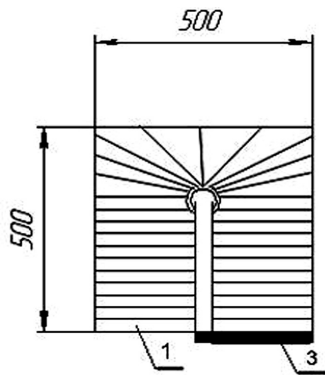


Рис. 2. Параллельная схема разработки делянки

Зададимся исходными данными: разработка делянки ведется с использованием комплекса машин в составе харвестера МЛХ-434 и форвардера МЛ-131. Длина делянки $L = 500$ м, ширина $B = 500$ м, запас на 1 га – 150 м^3 . По данным хронометражных наблюдений, средний объем воза при среднем объеме хлыста $0,25 \text{ м}^3$ составляет $9,7 \text{ м}^3$. Скорость движения по волоку в грузовом направлении – 56 м/мин. , в порожнем – 71 м/мин. , время погрузки $t_n = 25$ мин. Расчеты показали, что стоимость прокладки уса в пределах лесосеки – 60 тыс. руб./км , стоимость транспортировки по усу 1 м^3 леса – 5 руб./км , время разгрузки $t_p = 10,24 \text{ мин.}$, стоимость строительства уса внутри лесосек – 60 тыс. руб. Объем леса – $150 \cdot 0,25 = 3750 \text{ м}^3$. В базовом варианте среднее расстояние трелевки $l_{cp} = 0,5 \cdot 500 + 0,25 \cdot 500 = 375 \text{ м}$. Предполагается в середине лесосек проложить ус на расстояние 320 м . В этом случае среднее расстояние трелевки до уса составляет 125 м . Затраты на трелевку (соответственно в базовом C_{1Ty} и проектном варианте C_{2Ty}) определялись по известным формулам в расчете на 1 м^3 :

$$C_{1Ty} = \frac{C_m}{P_1}, \quad C_{2Ty} = \frac{C_m}{P_2}; \quad (1)$$

$$P_1 = \frac{T_{cm} \cdot K_g \cdot Q}{t_{nn} + t_p + \frac{l_{cp1}}{v_{nop}} + \frac{l_{cp1}}{v_{cp}}}, \quad P_2 = \frac{T_{cm} \cdot K_g \cdot Q}{t_{nn} + t_p + \frac{l_{cp2}}{v_{nop}} + \frac{l_{cp2}}{v_{cp}}}, \quad (2)$$

где C_m – стоимость машино-смены форвардера с зарплатой оператора, руб.; P_1, P_2 – производительность форвардера в базовом и проектном варианте соответственно, $\text{м}^3/\text{см}$; T_{cm} – время смены, мин.; K_g – коэффициент использования времени смены ($0,812$); Q – объем пачки сортиментов, м^3 ; l_{cp1}, l_{cp2} – среднее расстояние трелевки в базовом и проектном варианте соответственно, м; v_{nop} и v_{cp} – скорость движения трактора (форвардера) в порожнем и грузовом направлении соответственно, м/мин. ; t_{nn} и t_p – время набора пачки и разгрузки, мин.

В результате расчетов по формулам (1) и (2) в базовом варианте получим $P_1 = 80,05 \text{ м}^3/\text{см}$; $C_{1Ty} = 62,46 \text{ руб.м}^3$. Затраты на трелевку всего

объема C_{1T} равны затратам на освоение лесосеки $C_{01} = 62,46 \cdot 375,0 = 234225 \text{ руб.}$

В проектном варианте $P_2 = 95,14 \text{ м}^3/\text{см}$; $C_{2Ty} = 52,55 \text{ руб./м}^3$. Затраты на трелевку всего объема $C_{2T} = 52,5 \cdot 3750 = 196875 \text{ руб.}$ Затраты на строительство уса $C_y = 60\,000 \cdot 0,32 = 19\,200 \text{ руб.}$ Затраты на перевозку по усу определяем следующим образом: на расстояние $0,32 \text{ км}$ перевозится $0,36$ всего объема; на расстояние $0,32/2 \text{ км} = 0,64$ всего объема, следовательно, среднее расстояние транспортировки по усу составит $0,22 \text{ км}$, отсюда $C_{ny} = 5 \cdot 3750 \cdot 0,22 = 4125,5 \text{ руб.}$ Экономия затрат от упразднения устройства магистрального волока: $C_{mv} = 15\,000 \times 0,25 = 3750 \text{ руб.}$ Суммарные затраты на трелевку, строительство уса, перевозку по усу и экономия от упразднения устройства магистрального волока $C_{02} = 196\,875 + 19\,200 + 4687,5 - 3750 = 212\,887,5 \text{ руб.}$ Соотношение затрат $C_{01} / C_{02} = 1,10$, то есть при устройстве и сокращении расстояния трелевки затраты уменьшаются на 10% .

Соотношение затрат C_{01} / C_{02} во многом зависит от конфигурации лесосеки и варьируется от $1,1$ до $1,24$. Например, при длине и ширине лесосеки $1000 \times 1000 \text{ м}$, запасе леса в лесосеке $15\,000 \text{ м}^3$ и остальных тех же условиях, что и в предыдущем примере, $C_{01} / C_{02} = 1,24$.

В определенных условиях эффект от устройства усов внутри лесосеки может быть еще выше. В частности, это возможно, если в покрытие уса будут уложены древесные отходы, появившиеся в процессе обрезки сучьев с деревьев при заготовке леса в хлыстах или обрезке сучьев и раскряжке при сортиментной заготовке. В обоих случаях эффект достигается за счет снижения стоимости усов. При заготовке леса с использованием валочно-трелевочно-процессорной машины (ВТПМ) [4], [5] технология работы заключается в следующем: вначале ВТПМ работает на трассе уса и примыкающей полосе, на расстоянии $15\text{--}20 \text{ м}$ производит валку деревьев, обрезку сучьев и раскряжку, укладывая древесные отходы на трассу уса. После этого бензопилами спиливаются пни заподлицо. Затем на лесосеке производится валка и трелевка деревьев к трассе уса, у трассы уса – обрезка сучьев, раскряжка деревьев. Древесные отходы остаются на трассе уса. В процессе сортировки и штабелевки сортиментов форвардером они уплотняются и служат покрытием уса. При необходимости древесные отходы засыпаются слоем грунта, взятого с канав по обе стороны уса.

Таким образом, укладка древесных отходов в покрытие уса производится в процессе выполнения ВТПМ основной работы – заготовки сортиментов. При этом исключаются затраты на доставку древесных отходов, что позволяет минимизировать стоимость строительства уса. В сравнении с прокладкой магистрального волока добавляются лишь затраты на укладку в покрытие из древесных отходов грунта, что

производится лишь на 20–30 % протяженности дороги. Проведенные расчеты показывают, что стоимость строительства уса по этой технологии составляет не более 45 тыс. руб.

Определим эффективность заготовки леса по предлагаемой технологической схеме со строительством уса. $L = 1000$ м, $B = 1000$ м, $Q = 15000$ м³, работа в базовом варианте производится по параллельной схеме. Производительность ВПТМ (в базовом и проектном вариантах) на валке-трелевке [4]:

$$\Pi_1 = \frac{T_{см} \cdot K_v \cdot Q}{t_{vy} \cdot Q + t_p + \frac{l_{cp1}}{v_{пор}} + \frac{l_{cp1}}{v_{cp}}}, \Pi_2 = \frac{T_{см} \cdot K_v \cdot Q}{t_{vy} \cdot Q + t_p + \frac{l_{cp2}}{v_{пор}} + \frac{l_{cp2}}{v_{cp}}}, \quad (3)$$

где Q – объем трелюемой пачки, м³ (9,7 м³); $v_{пор}$ и v_{cp} – скорость движения ВПТМ в порожнем и грузовом направлении соответственно, м/мин.; t_{vy} и t_p – время валки, укладки в коник 1 м³ (2,53 мин.) и разгрузки соответственно, мин.

В базовом варианте $l_{cp} = 500 + 250 = 750$ м. В рассматриваемом варианте $l_{cp} = 250$ м. По формуле (6): $\Pi_1 = 63,88$ м³/см; $\Pi_2 = 103,11$ м³/см. Затраты на строительство уса $C_y = 45\,000 \cdot 0,6 = 27\,500$ руб. Затраты на транспортировку по усу $C_{ny} = 5 \cdot 0,42 \cdot 15\,000 = 31\,500$ руб. Снижение затрат за счет упразднения магистрального волока на расстояние 0,5 км: $15\,000 \cdot 0,5 = 7500$ руб. $C_{20} = 727\,379 + 27\,500 + 31\,500 - 7500 = 778\,879$ руб. В результате расчетов получим, что суммарные затраты по базовому варианту $C_{10} = 1\,103\,636$ руб., по проектному варианту – 778 879 руб. Отсюда $C_{10} / C_{20} = 1\,103\,636 / 778\,879 = 1,42$, то есть транспортные затраты на освоение лесосек в проектном варианте меньше на 42 %.

Строительство волоков по технологии с укладкой древесных отходов в покрытие уса в процессе обрезки сучьев и раскряжевки может быть организовано и с использованием других комплектов машин. Например, валка-трелевка валочно-трелевочными машинами; валка бензо-

пилами; трелевка тракторами с тросочокерным оборудованием или тракторами с манипулятором; валка валочно-пакетирующими машинами; трелевка тракторами с манипулятором или с пачковым захватом (скиддерами). На обрезке сучьев и раскряжевке во всех приведенных случаях используются сучкорезно-раскряжевные машины отечественного или зарубежного производства.

ВЫВОДЫ

В настоящее время при разработке лесосек и делянок применяются несколько типовых технологических схем. Трелевка деревьев, хлыстов или сортиментов производится либо к одному погрузочному пункту, либо к усу, проходящему вдоль лесосеки (делянки), при этом штабеля деревьев, хлыстов или сортиментов располагаются вдоль этого уса.

Если до лесосеки целесообразно строительство уса, то по приведенным в работе методике и зависимостям можно определить условия, при которых целесообразно проложить ус в пределах лесосеки (делянки), снизив этим расстояние трелевки. Проведенными расчетами доказано, что при прокладке уса внутри лесосеки (делянки) суммарные затраты на трелевку, прокладку магистральных волоков, временных дорог и транспортировку до точки примыкания уса к лесосеке в сравнении с базовым вариантом (трелевка до погрузочного пункта, находящегося на периферии лесосеки) меньше на 10–30 % (в зависимости от формы, площади лесосеки и запаса леса).

Экономический эффект определяется в основном снижением расстояния трелевки; также он обусловлен соотношением удельных затрат на вывозку леса по усу автопоездами и трелевку форвардерами. Наибольший эффект может быть получен при устройстве покрытия уса из древесных отходов по описанной в работе технологии, при заготовке сортиментов с использованием ВПТМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алябьев В. И. Оптимизация производственных процессов на лесозаготовках. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 232 с.
2. Виногоров Г. К. Лесосечные работы. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 272 с.
3. Кочегаров В. Г., Бит Ю. А., Меньшиков В. Н. Технология и машины для лесосечных работ. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 392 с.
4. Патент РФ на изобретение «Способ выполнения лесосечных работ агрегатной машиной» № 2426303, зарегистрирован в Государственном реестре полезных моделей РФ 20 августа 2011 г.
5. Патент РФ на полезную модель «Валочно-трелевочно-процессорная машина» № 94111, зарегистрирован в Государственном реестре полезных моделей РФ 10 мая 2010 г.
6. Рекомендации по организации и планированию освоения разрозненных лесосек / Весоюзное лесопромышленное объединение Кареллеспром, Карельский научно-исследовательский институт лесной промышленности. Петрозаводск, 1978. 112 с.
7. Скрыпник В. И., Кузнецов А. В. Обоснование целесообразности строительства временных лесовозных дорог (усов) // Актуальные проблемы лесного комплекса: Сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-техн. конф. / Под общ. ред. Е. А. Памфилова. Вып. 30. Брянск: БГИТА, 2011. С. 168–171.
8. Шегельман И. Р., Скрыпник В. И., Галактионов О. Н. Техническое оснащение современных лесозаготовок. СПб.: Профи-информ, 2005. 337 с.
9. Шегельман И. Р., Скрыпник В. И., Кузнецов А. В., Пладов А. В. Вывозка леса автопоездами. Техника. Технология. Организация. СПб.: ПРОФИКС, 2008. 304 с.
10. Шегельман И. Р., Скрыпник В. И., Кузнецов А. В. Анализ показателей работы и оценка эффективности лесозаготовительных машин в различных природно-производственных условиях // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. № 4 (109). С. 66–75.

ПАВЕЛ СЕРГЕЕВИЧ РЫБНИКОВ

аспирант кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии лесопромышленного факультета, Воронежская государственная лесотехническая академия (Воронеж, Российская Федерация)
 ribnikovpavels@yandex.ru

ОПТИМАЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ ПОГРУЗОЧНЫХ ПУНКТОВ ВДОЛЬ ЛЕСОВОЗНОГО УСА

Получены аналитические зависимости для расчета оптимального расстояния между погрузочными пунктами на лесосеке при смещении лесовозного уса от равновесного положения по направлению грузопотока по ветке с учетом влияния угла примыкания уса к ветке. Анализ полученных зависимостей показал, что угол примыкания уса к ветке не оказывает существенного влияния на расстояние между погрузочными пунктами. В то же время смещение уса приводит к значительным изменениям расстояний между погрузочными пунктами, располагаемыми по разные стороны от уса.

Ключевые слова: лесовозный ус, погрузочный пункт, расстояние, трелевочный волок, затраты, размещение

Положение лесовозного уса на лесосеке определяет величину затрат на трелевку лесоматериалов и их перевозку по лесовозной ветке. Для снижения себестоимости заготовки древесины в узких лесосеках ус целесообразно прокладывать по краю лесосеки со стороны магистрали, а в широких лесосеках смещать его от середины лесосеки в сторону магистрали на некоторое расстояние, определяемое из условия минимизации затрат на перевозку древесины по ветке и трелевку лесоматериалов.

В работах [5], [6] смещение уса по направлению грузопотока по ветке установлено без учета изменения расстояний между погрузочными пунктами, которое зависит от среднего расстояния трелевки. В работе [6] не рассмотрен вариант примыкания трелевочных волоков длинных и коротких пасек под разными углами. Смещение уса в сторону магистрали приводит к образованию на лесосеке ряда коротких пасек (со стороны магистрали) и ряда длинных пасек (со стороны границы зоны тяготения магистрали). Если ус примыкает к ветке под углом α , то при трелевке лесоматериалов тракторами и валочно-трелевочными машинами целесообразно следующее размещение трелевочных волоков [5], [6]: магистральные волокна расположены вдоль уса, пасечные волокна со стороны магистрали (в коротких пасеках) размещаются перпендикулярно усу, а пасечные волокна со стороны границы зоны тяготения магистрали (в длинных пасеках) размещаются под углом α к усу или параллельно направлению ветки (рис. 1а); пасечные волокна расположены параллельно усу, магистральные волокна со стороны магистрали (в коротких пасеках) размещаются перпендикулярно усу, а магистральные волокна со стороны границы зоны тяготения магистрали (в длинных пасеках) – под углом α к усу или параллельно направлению ветки (рис. 1б).

Предложенное размещение трелевочных волоков в пасеках обусловлено сокращением рас-

ходов на трелевку лесоматериалов. Идеализированная форма лесосеки при таком размещении волоков деформируется, и ее часть со стороны границы зоны тяготения магистрали имеет форму параллелограмма, а со стороны магистрали – прямоугольную. Когда ус примыкает к ветке под прямым углом, пасечные и магистральные волокна в коротких и длинных пасеках размещаются одинаково.

Оптимальное расстояние между погрузочными пунктами определяется по минимуму суммарных удельных затрат z_{CV} (в рублях на кубический метр) на устройство погрузочного пункта и трелевку древесины к этому погрузочному пункту [3], [4], [7]. Целевая функция имеет вид

$$z_{CV} = \frac{c_{ПП} + z_{MB} + z_{ПВ}}{q} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $c_{ПП}$ – затраты на устройство, содержание и ликвидацию погрузочного пункта, руб.; z_{MB} – затраты на устройство магистральных трелевочных волоков и на трелевку древесины по ним, руб.; $z_{ПВ}$ – затраты на устройство пасечных трелевочных волоков и на трелевку древесины по ним, руб.; q – объем заготавливаемой древесины в пасеке – объем вывозки с погрузочного пункта, м³.

$$z_{MB} = C_{MB}l_{MB} + l_{CMB}b_{MB}q_O + l_{CM}b_Mq_P, \quad (2)$$

где C_{MB} – удельная стоимость устройства магистрального волока, руб./км; l_{MB} – протяженность магистрального волока в пасеке, км; l_{CMB} – среднее расстояние трелевки по магистральному волоку при основных работах, км; b_{MB} – стоимость трелевки по магистральному волоку при основных работах, руб./м³ · км; q_O – объем трелевки древесины при основных работах, м³; l_{CM} – среднее расстояние трелевки по магистральному волоку при подготовительных работах, км; b_M – стоимость трелевки по магистральному волоку при подготовительных работах, руб./м³ · км;

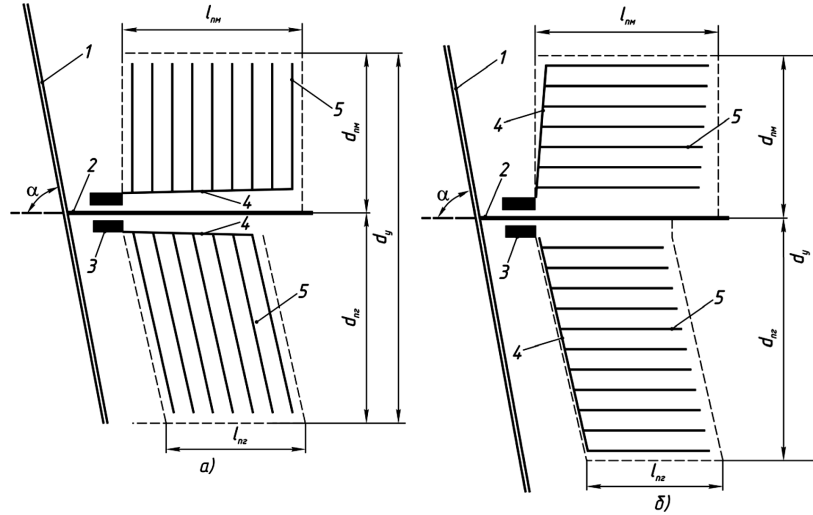


Рис. 1. Схемы размещения трелевочных волоков и погрузочных пунктов относительно лесовозного уса: 1 – лесовозная ветка; 2 – лесовозный ус; 3 – погрузочный пункт; 4 – магистральный трелевочный волок; 5 – пасечный трелевочный волок; а – магистральные волоки расположены вдоль уса; б – пасечные волоки расположены вдоль уса

q_{Π} – объем трелевки древесины при подготовительных работах, м^3 .

$$z_{\Pi B} = C_{\Pi B} l_{\Pi B} + l_{\Pi B} b_{\Pi B} q_O + l_{\Pi B} b_{\Pi} q_{\Pi}, \quad (3)$$

где $C_{\Pi B}$ – удельная стоимость устройства пасечного волока, руб./км; $l_{\Pi B}$ – протяженность пасечных волоков в пасеке, км; $l_{\Pi B}$ – среднее расстояние трелевки по пасечным волокам при основных работах, км; $b_{\Pi B}$ – стоимость трелевки по пасечным волокам при основных работах, руб./($\text{м}^3 \cdot \text{км}$); l_{Π} – среднее расстояние трелевки по пасечным волокам при подготовительных работах, км; b_{Π} – стоимость трелевки по пасечным волокам при подготовительных работах, руб./($\text{м}^3 \cdot \text{км}$).

Целевая функция (1) и ее составляющие, определяемые по зависимостям (2) и (3), включают параметры, которые зависят от принятого технологического процесса лесосечных работ ($c_{\Pi B}$, $b_{\Pi B}$, b_{Π}) и размеров пасеки ($l_{\Pi B}$, $l_{\Pi B}$, q , $l_{\Pi B}$, l_{Π} , q_{Π}). Примем, что пасека имеет следующие размеры (в километрах): l_{Π} – ширина пасеки (расстояние между погрузочными пунктами); d_{Π} – длина (глубина) пасеки – расстояние по нормали от лесовозного уса до границы пасеки.

Для того чтобы найти оптимальную ширину пасеки l_{Π} , надо взять производную от $z_{\Pi B}$ по l_{Π} и, приравняв ее к 0, решить полученное уравнение относительно l_{Π} . Найдем производную и приравняем ее к 0. Получаем

$$\frac{dz_{\Pi B}}{dl_{\Pi}} = \frac{(c_{\Pi B} + z_{\Pi B} + z_{\Pi})' q - q' (c_{\Pi B} + z_{\Pi B} + z_{\Pi})}{q^2} = 0. \quad (4)$$

Так как объем заготовки древесины на пасеке не равен 0, то $q^2 \neq 0$, следовательно,

$$(c_{\Pi B} + z_{\Pi B} + z_{\Pi})' q = q' (c_{\Pi B} + z_{\Pi B} + z_{\Pi}). \quad (5)$$

При примыкании уса к ветке под некоторым углом α , как было сказано ранее, пасека име-

ет форму параллелограмма. При равномерном распределении запаса ликвидной древесины по площади лесосеки объем заготовки древесины на пасеке q составит

$$q = 100 \gamma_{\Pi} l_{\Pi} d_{\Pi}, \quad (6)$$

где γ_{Π} – ликвидный запас древесины на лесосеке, $\text{м}^3/\text{га}$.

Из формулы (6) можно найти, что $q' = 100 \gamma_{\Pi} d_{\Pi}$. Подставим выражения, определяющие q и q' , в уравнение (5) и, выполнив его преобразование с учетом того, что $c_{\Pi B} = \text{const}$, получим

$$l_{\Pi} \left(\frac{dz_{\Pi B}}{dl_{\Pi}} + \frac{dz_{\Pi B}}{dl_{\Pi}} \right) = c_{\Pi B} + z_{\Pi B} + z_{\Pi}. \quad (7)$$

Для решения уравнения (7) требуется определить затраты $z_{\Pi B}$ и z_{Π} в зависимости от параметров пасеки и технологического процесса лесосечных работ и их производные.

Протяженность трелевочных волоков и средние расстояния трелевки зависят не только от размеров пасеки, но и от расположения волоков. При размещении магистрального волока вдоль уса (рис. 1а) его протяженность в пасеке

$$l_{\Pi B} = k_{\Pi B} \left(a_0 + l_{\Pi} - \frac{a_K}{\sin \alpha} \right), \quad (8)$$

где $k_{\Pi B}$ – коэффициент удлинения магистрального волока; a_0 – протяженность магистрального волока за пределами пасеки, км; a_K – расстояние от конца магистрального волока до границы пасеки, км.

Среднее расстояние трелевки по магистральному волоку будет одинаковым как при основных, так и при подготовительных работах, то есть $l_{\Pi B} = l_{\Pi}$. Величину $l_{\Pi B}$ определим из условия равномерного распределения запаса древе-

сины на пасеке и того, что форма пасеки близка к правильной:

$$l_{CMB} = k_{PM} \left[a_0 + 0,5 \left(l_{II} - \frac{a_K}{\sin \alpha} \right) \right]. \quad (9)$$

Подставим зависимости (8) и (9) в формулу (2) с учетом, что $q_O = 100\gamma_{II}l_{II}(d_{II} - s)$, $q_{II} = 100\gamma_{II}l_{II}s$, и выполним преобразования

$$z_{MB} = k_{PM} \left\{ \begin{aligned} & C_{MB} \left(a_0 + l_{II} - \frac{a_K}{\sin \alpha} \right) + \\ & + 50\gamma_{II}l_{II} \left(2a_0 - \frac{a_K}{\sin \alpha} \right) [b_{MB}(d_{II} - s) + b_Ms] + \\ & + 50\gamma_{II}l_{II}^2 [b_{MB}(d_{II} - s) + b_Ms] \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где s – расстояние от оси уса до бровки магистрального волокна, км.

$$\frac{dz_{MB}}{dl_{II}} = k_{PM} \left\{ \begin{aligned} & C_{MB} + 50\gamma_{II} \left(2a_0 - \frac{a_K}{\sin \alpha} \right) [b_{MB}(d_{II} - s) + b_Ms] + \\ & + 100\gamma_{II}l_{II} [b_{MB}(d_{II} - s) + b_Ms] \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

Протяженность пасечных волоков l_{II} определяется как произведение количества волоков в пасеке, равное $l_{II}\sin\alpha/a$, на протяженность волокна, которая составляет $(d_{II} - a_{II} - s)/\sin\alpha$, где a – ширина зоны тяготения к пасечному волоку, км; a_{II} – расстояние от конца пасечного волокна до границы пасеки, км. Следует также учесть прокладку пасечных волоков в зоне между лесовозным усом и магистральным волокном; при размещении этих пасечных волоков перпендикулярно магистральному волоку их количество составит l_{II}/a , протяженность волокна $(s - s_{MB} - a_S)$, где s_{MB} – ширина магистрального волокна, км; a_S – расстояние от конца пасечного волокна до оси уса, км. На основе вышеизложенного получаем

$$l_{II} = \frac{k_{PII}l_{II}}{a} (d_{II} - a_{II} - s_{MB} - a_S), \quad (12)$$

где k_{PII} – коэффициент удлинения пасечного волокна.

Среднее расстояние l_{CPIB} и объем q_{CPIB} трелевки древесины по пасечным волокнам равны:

$$l_{CPIB} = \frac{k_{PII}(d_{II} - a_{II} - s)}{2\sin\alpha}; \quad q_O = 100\gamma_{II}l_{II}(d_{II} - s). \quad (13)$$

Среднее расстояние l_{CPI} и объем q_{PI} трелевки древесины по пасечным волокнам при подготовительных работах составляют:

$$l_{CPI} = 0,5k_{PII}(s - s_{MB} - a_S); \quad q_{II} = 100\gamma_{II}l_{II}(s - s_{MB}). \quad (14)$$

Подставим выражения (12)–(14) в формулу (3):

$$z_{PIB} = k_{PII}l_{II} \left\{ \begin{aligned} & \frac{C_{PIB}(d_{II} - a_{II} - s_{MB} - a_S)}{a} + \\ & + 50\gamma_{II} \left[\frac{b_{PIB}(d_{II} - s)(d_{II} - a_{II} - s)}{\sin\alpha} + \right. \\ & \left. + b_{PI}(s - s_{MB})(s - s_{MB} - a_S) \right] \end{aligned} \right\}. \quad (15)$$

Возьмем производную от функции (15):

$$\frac{dz_{PIB}}{dl_{II}} = k_{PII} \left\{ \begin{aligned} & \frac{C_{PIB}(d_{II} - a_{II} - s_{MB} - a_S)}{a} + \\ & + 50\gamma_{II} \left[\frac{b_{PIB}(d_{II} - s)(d_{II} - a_{II} - s)}{\sin\alpha} + \right. \\ & \left. + b_{PI}(s - s_{MB})(s - s_{MB} - a_S) \right] \end{aligned} \right\}. \quad (16)$$

Совместный анализ формул (15) и (16) позволил установить, что $z_{PIB} = l_{II}dz_{PIB}/dl_{II}$. С учетом этого уравнение (7) можно упростить:

$$l_{II} \frac{dz_{MB}}{dl_{II}} = c_{PII} + z_{MB}. \quad (17)$$

Подставим выражения (10) и (11) в уравнение (17) и произведем его преобразование. Решение уравнения (17) при подстановке зависимостей (10) и (11) и с учетом, что $l_{II} > 0$, имеет вид

$$l_{II} = 0,14 \sqrt{\frac{c_{PII}\sin\alpha + k_{PM}C_{MB}(a_0\sin\alpha - a_K)}{\gamma_{II}k_{PM}[b_{MB}(d_{II} - s) + b_Ms]\sin\alpha}}. \quad (18)$$

При примыкании уса к ветке под прямым углом ($\alpha = 90^\circ$), $\sin\alpha = 1$ формула (18) примет вид

$$l_{II} = 0,14 \sqrt{\frac{c_{PII} + k_{PM}C_{MB}(a_0 - a_K)}{\gamma_{II}k_{PM}[b_{MB}(d_{II} - s) + b_Ms]}}. \quad (19)$$

При одинаковых затратах на трелевку при основных и подготовительных работах ($b_{MB} = b_M$) формулы (18) и (19) примут вид

$$l_{II} = 0,14 \sqrt{\frac{c_{PII}\sin\alpha + k_{PM}C_{MB}(a_0\sin\alpha - a_K)}{\gamma_{II}k_{PM}b_{MB}d_{II}\sin\alpha}}; \quad (20)$$

$$l_{II} = 0,14 \sqrt{\frac{c_{PII} + k_{PM}C_{MB}(a_0 - a_K)}{\gamma_{II}k_{PM}b_{MB}d_{II}}}. \quad (21)$$

В известных формулах для определения расстояния между погрузочными пунктами [1], [2], [3], [4], [7] параметры a_0 и a_K не учитывали. Если принять $a_0 = a_K$ или $a_0 = a_K = 0$, то формула (19) еще упростится. Получаем известную зависимость [2], [3], [4], в которой $d_{II} = d_{II}/k_{PII}$.

На рис. 2 представлены графики зависимостей $l_{II} = f(d_{II})$ при углах примыкания уса к ветке 60° и 90° . Угол 60° принят из условия, что ус располагается параллельно направлению грузопотока по магистрали, а стоимость вывозки по магистрали b_M составляет половину от стоимости вывозки по ветке b_B . Оптимальный угол примыкания ветки к магистрали [7] составляет $\cos\alpha = b_M/b_B$. При принятом условии, что $b_M = 0,5b_B$, $\cos\alpha = 0,5$ соответственно $\alpha = 60^\circ$.

Из рис. 2 видно, что оптимальное расстояние между погрузочными пунктами l_{II} при размещении магистрального волокна вдоль лесовозного уса убывает с возрастанием глубины пасеки d_{II} , причем при небольших значениях глубины пасеки ($d_{II} = 100...200$ м) убывание наиболее

интенсивное. Уменьшение ликвидного запаса древесины приводит к возрастанию расстояния между погрузочными пунктами. Сравнение рис. 2а и 2б показывает, что влияние угла примыкания уса к ветке на расстояние между погрузочными пунктами несущественно. При угле примыкания 60° указанное расстояние больше всего на 2...3 м, чем при угле примыкания 90° . Если к усу примыкают две пасаки глубиной соответственно 200 и 300 м, то разница в расстояниях между погрузочными пунктами, располагаемыми по разные стороны от уса, составит более 30...50 м.

При размещении пасечных волоков вдоль уса (рис. 1б) протяженность магистрального волока в пасеке l_{MB} составит

$$l_{MB} = k_{PM} \left(a_0 + \frac{d_{II} - a_K - s}{\sin \alpha} \right), \quad (22)$$

где s – расстояние от оси лесовозного уса до границы зоны безопасности, км.

Среднее расстояние трелевки по магистральному волоку l_{CMB} определим исходя из тех же условий, что и для формулы (9). Оно составляет

$$l_{CMB} = k_{PM} \left(a_0 + \frac{d_{II} - a_K - s}{2 \sin \alpha} \right). \quad (23)$$

Подставим полученные зависимости (22) и (23) в формулу (2), при этом учтем, что среднее расстояние трелевки, определяемое по формуле (23), соответствует объему древесины q_O , а объемом q_{II} имеет расстояние трелевки a_0 . После преобразований имеем

$$z_{MB} = k_{PM} \left\{ C_{MB} \left(a_0 + \frac{d_{II} - a_K - s}{\sin \alpha} \right) + 100 \gamma_{II} b_{MB} l_{II} \left[\left(a_0 + \frac{d_{II} - a_K - s}{2 \sin \alpha} \right) (d_{II} - s) + a_0 s \right] \right\}. \quad (24)$$

$$\frac{dz_{MB}}{dl_{II}} = 100 \gamma_{II} k_{PM} b_{MB} \left[\left(a_0 + \frac{d_{II} - a_K - s}{2 \sin \alpha} \right) (d_{II} - s) + a_0 s \right]. \quad (25)$$

Пользуясь формулами (24) и (25), получаем

$$z_{MB} - l_{II} \frac{dz_{MB}}{dl_{II}} = k_{PM} C_{MB} \left(a_0 + \frac{d_{II} - a_K - s}{\sin \alpha} \right). \quad (26)$$

С учетом зависимости (26) уравнение (7) примет вид

$$l_{II} \frac{dz_{II}}{dl_{II}} = c_{III} + z_{II} + k_{PM} C_{MB} \left(a_0 + \frac{d_{II} - a_K - s}{\sin \alpha} \right). \quad (27)$$

Протяженность пасечных волоков l_{II} зависит от глубины пасаки d_{II} и ее ширины l_{II} . Пользуясь схемой рис. 1б, можно установить, что

$$l_{II} = \frac{k_{PII} d_{II}}{a} (l_{II} - a_{II} - s_{MB}). \quad (28)$$

Среднее расстояние трелевки по пасечным волокам при основных и подготовительных работах будет одинаковым ($l_{CPII} = l_{CPI}$) и составит

$$l_{CPII} = 0,5 k_{PII} (l_{II} - a_{II} - s_{MB}). \quad (29)$$

Подставим формулы (28) и (29) в выражение (3). Выполним преобразование, получим

$$z_{II} = k_{PII} (l_{II} - a_{II} - s_{MB}) \left\{ \frac{d_{II} C_{PII}}{a} + 50 \gamma_{II} l_{II} [b_{PII} (d_{II} - s) + b_{PI} s] \right\}. \quad (30)$$

Производная от функции (30) имеет вид

$$\frac{dz_{II}}{dl_{II}} = k_{PII} \left\{ \frac{d_{II} C_{PII}}{a} + 50 \gamma_{II} [b_{PII} (d_{II} - s) + b_{PI} s] (2l_{II} - a_{II} - s_{MB}) \right\}. \quad (31)$$

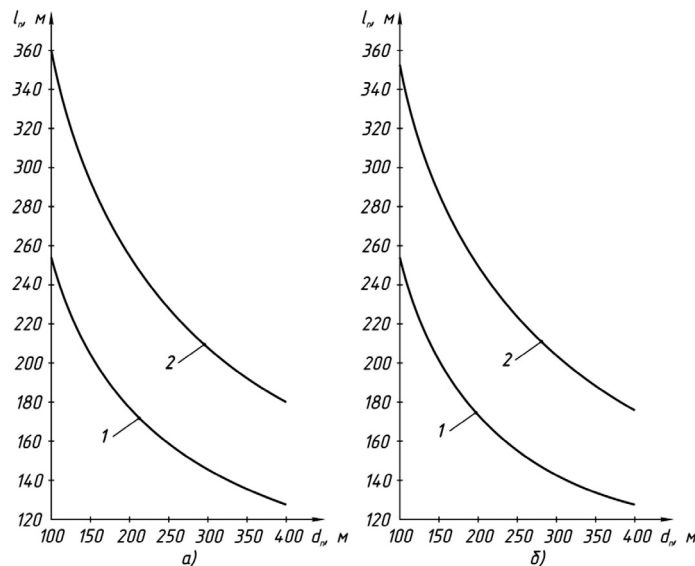


Рис. 2. Графики зависимости оптимального расстояния между погрузочными пунктами от глубины пасаки при размещении магистрального волока вдоль уса: 1 – $\gamma_{II} = 200 \text{ м}^3/\text{га}$; 2 – $\gamma_{II} = 100 \text{ м}^3/\text{га}$; а – $\alpha = 60^\circ$; б – $\alpha = 90^\circ$

Для нахождения зависимости, определяющей оптимальное расстояние между погрузочными пунктами, формулы (30) и (31) подставляем в уравнение (27). Решая полученное уравнение относительно аргумента l_{Π} , имеем

$$l_{\Pi} = 0,14 \sqrt{\frac{c_{\Pi\Pi}a - d_{\Pi}C_{\Pi\Pi}k_{\Pi\Pi}(a_{\Pi} + s_{\Pi\Pi}) + l_{\Pi\Pi}C_{\Pi\Pi}a}{\gamma_{\Pi}k_{\Pi\Pi}a[b_{\Pi\Pi}(d_{\Pi} - s) + b_{\Pi}s]}}. \quad (32)$$

В формуле (32) протяженность магистрального волокна $l_{\Pi\Pi}$ определяется по зависимости (22), которая при примыкании уса к ветке под прямым углом ($\alpha = 90^\circ$, $\sin \alpha = 1$) имеет вид

$$l_{\Pi\Pi} = k_{\Pi\Pi}(a_0 + d_{\Pi} - a_K - s). \quad (33)$$

Когда затраты на трелевку при основных и подготовительных работах одинаковы ($b_{\Pi\Pi} = b_{\Pi}$), формула (32) выглядит следующим образом:

$$l_{\Pi} = 0,14 \sqrt{\frac{c_{\Pi\Pi}a - d_{\Pi}C_{\Pi\Pi}k_{\Pi\Pi}(a_{\Pi} + s_{\Pi\Pi}) + l_{\Pi\Pi}C_{\Pi\Pi}a}{\gamma_{\Pi}k_{\Pi\Pi}ab_{\Pi\Pi}d_{\Pi}}}. \quad (34)$$

Формулы (34) и (32) в совокупности с выражениями (22) и (33) показывают сложную зави-

симость оптимального расстояния между погрузочными пунктами от глубины пасеки при размещении пасечных волоков вдоль уса. Для представления указанной зависимости построены графики зависимостей $l_{\Pi} = f(d_{\Pi})$ при углах примыкания уса к ветке 60° и 90° (рис. 3).

Оптимальное расстояние между погрузочными пунктами l_{Π} при размещении пасечных волоков вдоль лесовозного уса убывает с возрастанием глубины пасеки d_{Π} , убывание наиболее интенсивное при небольших значениях глубины пасеки ($d_{\Pi} = 100 \dots 200$ м). Уменьшение ликвидного запаса древесины приводит к возрастанию расстояния между погрузочными пунктами. Сравнение рис. 3а и 3б показывает, что влияние угла примыкания уса к ветке на расстояние между погрузочными пунктами незначительно. При угле примыкания 60° указанное расстояние больше всего на 4...6 м, чем при угле примыкания 90° . Если к усу примыкают две пасеки глубиной 200 и 300 м, разница в расстояниях между погрузочными пунктами, располагаемыми по разные стороны от уса, составит 27...38 м в зависимости от ликвидного запаса древесины, или 16 %.

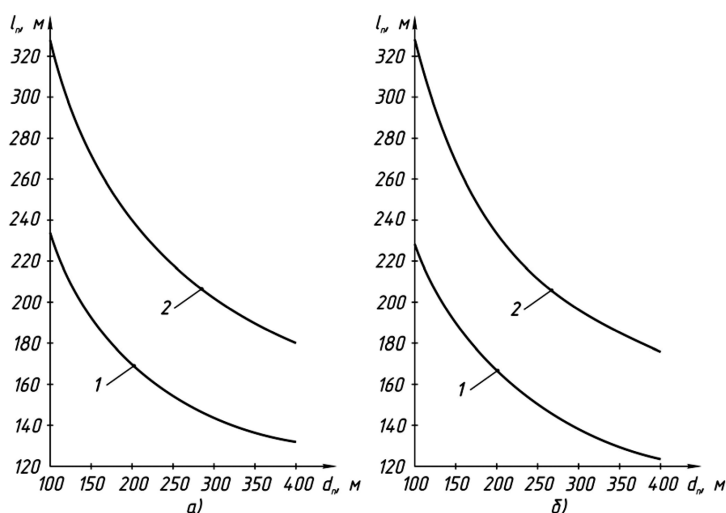


Рис. 3. Графики зависимости оптимального расстояния между погрузочными пунктами от глубины пасеки при размещении пасечных волоков вдоль уса: 1 – $\gamma_{\Pi} 200 \text{ м}^3/\text{га}$; 2 – $\gamma_{\Pi} = 100 \text{ м}^3/\text{га}$; а – $\alpha = 60^\circ$; б – $\alpha = 90^\circ$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афоничев Д. Н. Оптимизация размещения внутриплощадочных дорог в сырьевых базах лесозаготовительных предприятий // Природопользование: ресурсы, техническое обеспечение. Воронеж, 2007. Вып. 3. С. 36–42.
- Афоничев Д. Н. Алгоритм расчета в системе автоматизированного проектирования оптимальных параметров размещения лесовозных веток и усов // Вестник МГУЛА – Лесной вестник. 2010. № 5. С. 82–86.
- Афоничев Д. Н., Пядухов А. В., Рыбников П. С. Размещение погрузочных пунктов вдоль лесовозного уса // Перспективные технологии, транспортные средства и оборудование при производстве, эксплуатации, сервисе и ремонте: Межвуз. сб. науч. тр. / ВГЛТА. Воронеж, 2010. Вып. 5. С. 84–87.
- Ильин Б. А. Основы размещения лесовозных дорог в сырьевых базах лесозаготовительных предприятий. Л.: ЛТА, 1987. 63 с.
- Пядухов А. В. Размещение лесовозного уса на лесосеке с учетом направления грузопотока // Ресурсосберегающие и экологически перспективные технологии и машины лесного комплекса будущего. Воронеж, 2009. С. 340–344.
- Пядухов А. В. Влияние угла примыкания лесовозного уса к ветке на величину смещения уса по направлению грузопотока // Актуальные проблемы лесного комплекса. Воронеж, 2010. Вып. 1. Т. 2. С. 98–103.
- Сухопутный транспорт леса / В. И. Алябьев, Б. А. Ильин, Б. И. Кувалдин, Г. Ф. Грехов. М., 1990. 416 с.

СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ДАНИЛОВ

аспирант кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
sdanilov@psu.karelia.ru

АНАТОЛИЙ ДМИТРИЕВИЧ ФОФАНОВ

доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
afofanov@psu.karelia.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

В статье описан процесс формирования моделей многослойных углеродных нанотрубок типов «русская матрешка» и «свиток». Обсуждаются особенности геометрии, из-за которых невозможно существование многослойных нанотрубок произвольной конфигурации. Рассмотрено получение координат атомов в моделях нанотрубок типа «русская матрешка» с учетом всех ограничений и особенностей построения однослойных нанотрубок.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, алгоритм построения, структура, координаты атомов

В последние годы в физике конденсированного состояния все более популярными становятся объекты нанометрового масштаба. Особый интерес проявляется к углеродным наноматериалам как из наиболее перспективным для применения в различных областях промышленности. К одной наиболее интересных полиморфных модификаций углерода относятся нанотрубки. Выделяют одно- и многослойные нанотрубки, среди которых, в свою очередь, также выделяются несколько подвидов [4], [8].

Модельно процесс формирования однослойной нанотрубки можно представить как сворачивание плоской графеновой сетки вокруг некоторого выбранного кристаллографического направления [3], [7], [8]. Данное направление сворачивания определяется так называемыми индексами хиральности (n , m), характеризующими вектор хиральности (сворачивания) $\vec{C}_h$ (рис. 1). Индексы хиральности [3], [7], [12] определяют количество элементарных трансляций вдоль двух направлений гексагональной графитовой сетки с параметром ячейки $a = 2,46 \text{ \AA}$ (рис. 1).

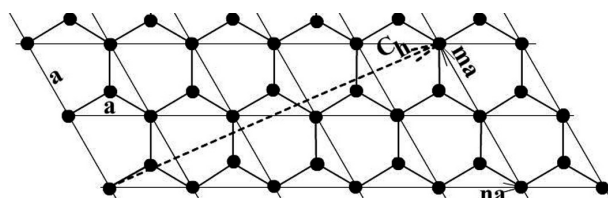


Рис. 1. Сворачивание графитовой сетки (1 слой) вдоль вектора C_h

Набор индексов хиральности (n , m) должен удовлетворять следующим условиям [3]:

$$n > 0, m \geq 0, n \geq 2m. \quad (1)$$

Длина вектора хиральности определяет радиус формируемой нанотрубки [3], [7]:

$$R = \frac{|\vec{C}_h|}{2\pi} = \frac{a}{2\pi} \sqrt{n^2 - nm + m^2}. \quad (2)$$

Кроме радиуса индексы хиральности также определяют так называемый трансляционный вектор, характеризующий минимальный шаг по длине нанотрубки (то есть вдоль ее оси) [3], [7]:

$$T = \frac{\sqrt{3}a}{2\pi * d_R} \sqrt{n^2 - nm + m^2}, \quad (3)$$

где $d_R = \text{НОД}(2n - m, 2m - n)$.

В качестве характеристики нанотрубки дополнительно вводят такой параметр, как степень хиральности [2]:

$$k = \frac{m}{n}. \quad (4)$$

Степень хиральности k меняется в пределах от 0 (нанотрубки типа «зиг-заг») до 0,5 (нанотрубки типа «кресло»). Эти два типа нанотрубок считаются прямыми (или ахиральными). Все остальные нанотрубки – хиральные, степень хиральности лежит в пределах $0 < k < 0,5$ [2], [3], [7].

Таким образом, индексы хиральности полностью определяют геометрические размеры формируемой нанотрубки – минимальные радиус и длину. Для получения нанотрубок той же степени хиральности, но большего радиуса следует использовать соответствующие индексы, кратные минимальным. Для получения нанотрубок большей длины необходимо использовать длину, равную целому числу трансляционных векторов.

После определения геометрических характеристик нанотрубки рассчитываются все остальные параметры моделирования и находятся координаты всех атомов, образующих нанотрубку [3].

Многослойная нанотрубка состоит из нескольких определенным образом расположенных слоев. Наиболее часто многослойные нанотрубки подразделяются на 2 вида: типа «русская матрешка» и типа «свиток» (рис. 2) [2], [4], [8], [10], [13].

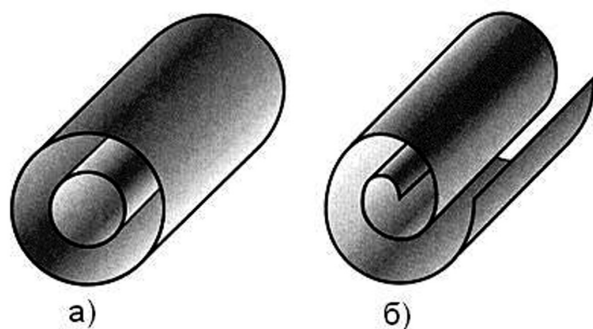


Рис. 2. Типы многослойных нанотрубок:
а) «русская матрешка»; б) «свиток»

Иногда можно встретить описание многослойных нанотрубок, образованных в виде «шестигранных призм» [5]. В основании таких трубок лежит правильный шестиугольник. Таким образом, углы между любыми двумя смежными гранями равны по 120° . Но такие структуры встречаются крайне редко.

Многослойная нанотрубка типа «русская матрешка» – это структура, представляющая собой набор соосно расположенных однослойных нанотрубок на определенном расстоянии друг от друга. Каждая такая трубка определяется собственными индексами хиральности (n, m) . Однако в данном случае радиусы слоев должны быть такими, чтобы межслоевое расстояние также находилось в допустимых для углеродных материалов пределах (3,354–3,600 Å). Средним для многослойных нанотрубок при этом считается расстояние, равное 3,444 Å [2], [13]. Таким образом, одна из главных задач при моделировании многослойных нанотрубок типа «русская матрешка» – это определение индексов хиральности всех «слоев» – однослойных нанотрубок, образующих данную структуру. На основании полученных индексов и заданной длины возможно моделирование каждого слоя в отдельности, аналогично моделированию однослойных нанотрубок [3], [7].

При формировании многослойных нанотрубок типа «русская матрешка» следует учитывать тот факт, что слои могут иметь как одинаковую степень хиральности, так и различную [2]. Поэтому общая хиральность многослойной нанотрубки определяется не так однозначно, как в случае однослойных нанотрубок. В случае же

различной хиральности слоев следует учитывать, что величина трансляционного вектора для каждого слоя также будет различной [3], поэтому для такой трубки нельзя четко задать определенную длину.

Для начала рассмотрим случай, когда многослойная нанотрубка образована из слоев одинаковой степени хиральности. В данном случае степень хиральности многослойной нанотрубки будет такой же, как и хиральность отдельных однослойных нанотрубок, ее образующих. Поэтому величина межслоевого расстояния будет одинаковой в пределах многослойной нанотрубки определенной хиральности [2], [9].

С учетом (2) и (4) после преобразований можно прийти к следующему выражению для радиуса однослойной нанотрубки [2]:

$$R = \frac{a}{2\pi} n \sqrt{1 - k + k^2}. \quad (5)$$

Таким образом, межслоевое расстояние между двумя однослойными нанотрубками с одинаковой степенью хиральности k можно выразить следующим образом [2]:

$$\begin{aligned} d_R = R_2 - R_1 &= \frac{a}{2\pi} \sqrt{1 - k + k^2} (n_2 - n_1) = \\ &= \frac{a}{2\pi} \sqrt{1 - k + k^2} * (n_{\min} f), \end{aligned} \quad (6)$$

где n_1, n_2 – индексы n двух соседних трубок, $n_{\min}$ – минимальный индекс n для нанотрубок данной степени хиральности k , f – параметр, определяющий число периодических трансляций вдоль направления, задаваемого индексами (n, m) между двумя соседними нанотрубками ($f = 1, 2, 3, \dots$) [2].

Поскольку межслоевое расстояние – это величина, лежащая в некоторых пределах [2], [13], из всего множества индексов хиральности необходимо подобрать только те, для которых это условие будет выполняться. Путем компьютерного перебора [2] всевозможных индексов хиральности: n в диапазоне от 1 до 10 000 (m , соответственно, в диапазоне от 0 до 5000 для соответствующих n) было выявлено, что лишь 5 степеней хиральности дают требуемый результат (см. таблицу).

Степени хиральности, для которых возможно формирование многослойных нанотрубок одинаковой хиральности

n (min)	m (min)	$k = m/n$	f	$d_R, \text{\AA}$
1	0	0,0	9	3,5237
5	1	0,2	2	3,5884
10	3	0,3	1	3,4799
5	2	0,4	2	3,4132
2	1	0,5	5	3,3907

Таким образом, исходя из заданных индексов хиральности внутреннего слоя на основании вышеприведенных рассуждений возможен расчет

индексов хиральности всех слоев формируемой многослойной нанотрубки. Для этого производится:

1. Ввод индексов хиральности (n , m) внутреннего слоя;
2. Расчет степени хиральности по (4);
3. Расчет внутреннего радиуса нанотрубки по (2) или (5);
4. Расчет n_{min} для нанотрубок данной хиральности и определение параметра f согласно таблице;
5. Ввод количества слоев и расчет межслоевого расстояния по (6);
6. Последовательный расчет радиусов всех слоев на основании информации о радиусе предыдущего рассчитанного слоя и величины межслоевого расстояния;
7. Исходя из радиусов слоев и степени хиральности – расчет соответствующих индексов n и m каждого слоя;
8. Расчет трансляционного вектора по (3) и всей длины нанотрубки;
9. Расчет координат атомов во всех слоях аналогично расчету однослойных нанотрубок [3].

В связи с одинаковой степенью хиральности как «исходных» трубок, образующих отдельные слои, так и итоговой многослойной величина трансляционных векторов и, соответственно, длина всех слоев будет одинаковой.

В случае, когда каждая нанотрубка, образующая отдельный слой, имеет свою степень хиральности, нельзя судить об итоговой хиральности получаемой таким образом многослойной нанотрубки. В данном случае указывается хиральность трубки, образующей внутренний слой. Далее путем перебора индексов (n , m) определяется хиральность каждого следующего слоя при условии того, что межслоевое расстояние должно лежать в указанных ранее пределах. Для этого производится перебор индексов хиральности: индекс n меняется начиная от индекса n предыдущего слоя; m – от нуля до $n/2$ (согласно условиям (1)). По причине того, что индекс n в большей степени отвечает за радиус нанотрубки, изменение n ограничено радиусом внешнего слоя (максимальным радиусом многослойной нанотрубки), который можно приблизительно оценить исходя из внутреннего радиуса трубки, максимального допустимого межслоевого расстояния и числа слоев.

В том случае, когда условие по межслоевому расстоянию выполняется для нескольких нанотрубок (с различными степенями хиральности), выбирается та, для которой величина межслоевого расстояния оказывается минимальной, попадающей в данный интервал, то есть наиболее близкой к межслоевому расстоянию в графите (3,354 Å) [2], [13]. Таким образом, индексы хиральности каждого следующего слоя рассчитываются исходя из индексов хиральности

предыдущего. Очевидно, что в данном случае межслоевое расстояние не будет величиной постоянной: оно будет меняться от слоя к слою в зависимости от индексов хиральности соседних слоев [2], [9].

Как отмечалось ранее, в зависимости от индексов хиральности величина трансляционного вектора для разных слоев также будет различной (рис. 3). И может возникнуть ситуация, когда при заданной длине нанотрубки один слой будет иметь длину, намного превышающую заданную по причине большого значения трансляционного вектора (рис. 3).

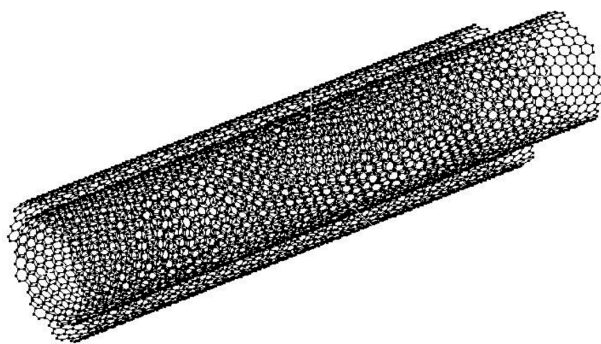


Рис. 3. Различная длина слоев разной хиральности

В данном случае вначале рассчитываются величины трансляционных векторов всех слоев. Далее длина нанотрубки подбирается в соответствии со следующими условиями.

1. Выбранная длина должна быть как можно ближе к требуемой. Если это невозможно, то в качестве длины выбирается величина самого большого трансляционного вектора.
2. Длины всех слоев должны быть примерно одинаковыми. В случае более коротких слоев используется некоторое целое число трансляционных векторов. Тогда получаемая модель будет наиболее адекватной.

Последовательность действий при формировании моделей многослойных нанотрубок с различной степенью хиральности слоев будет следующей:

1. Ввод индексов хиральности (n , m) и расчет радиуса внутреннего слоя;
2. Ввод количества слоев и расчет максимального возможного радиуса внешнего слоя;
3. Путем перебора индексов (n , m) расчет всевозможных радиусов следующего слоя;
4. Из полученных радиусов (и соответствующих им индексов) выбор тех, которые:
 - а) дают межслоевое расстояние, попадающее в требуемые границы [2], [13];
 - б) дают наименьшее межслоевое расстояние;
5. Получение индексов всех слоев аналогично п. 3–4;
6. Задание предполагаемой длины нанотрубки;
7. Расчет значений векторов трансляций всех слоев;

8. Расчет длин всех слоев, соответствующих заданной длине;
9. Выбор векторов трансляции для каждого слоя и пересчет длины согласно приведенным ранее требованиям;
10. Расчет координат атомов во всех слоях аналогично расчету однослойных нанотрубок [3].

После того как определены индексы хиральности каждого слоя и выбрана длина формируемой нанотрубки, производится расчет координат атомов в каждом слое аналогично расчету отдельных однослойных нанотрубок.

При формировании нанотрубок типа «свиток» (рис. 2б) производится сворачивание одного графенового листа вокруг некоторого кристаллографического направления с непрерывным увеличением радиуса [10]. Таким образом, имеется некий внутренний радиус (начало свитка) и внешний. Нанотрубка при этом остается незамкнутой. Радиусы витков не могут быть абсолютно произвольными – они подчиняются тем же правилам, которые действуют для однослойных нанотрубок [3], [7], и также определяются индексами хиральности. К тому же межслоевое расстояние (между любыми двумя соседними витками) должно находиться в допустимых для углеродных материалов пределах [2], [13]. Поэтому должен иметься четкий механизм, согласно которому при построении каждого витка производилось бы плавное увеличение радиуса. Таким образом, при моделировании нанотрубок типа «свиток», при сворачивании графенового листа для расчета координат каждого следующего атома необходим пересчет радиуса (приращение на некоторую величину) [9], [11]. Так как межслоевое расстояние должно быть постоянным (для обеспечения плавности переходов от витка к витку), существует ограниченное число нанотрубок типа «свиток», которые могут быть построены. Это ограничение накладывается условием, что все витки, если бы их взяли по отдельности, должны иметь одинаковую степень хиральности. То есть возникает ситуация, схожая со случаем формирования многослойной нанотрубки типа «русская матрешка» со слоями одинаковой хиральности. Таким образом, возможно лишь 5 видов нанотрубок типа «свиток» (см. таблицу).

Более того, моделирование хиральных нанотрубок с переменным радиусом – задача далеко не тривиальная. Поэтому в данной работе произведено моделирование лишь «идеальных» (или ахиральных) нанотрубок типа «свиток».

Для иллюстрации того, что нанотрубки типа «свиток» и «русская матрешка» возможно отличить друг от друга, были смоделированы следующие многослойные нанотрубки:

- нанотрубка «русская матрешка» типа «зиг-заг»; внутренний слой имеет индексы хиральности (9, 0), что соответствует радиусу $\sim 3,5$ Å,

число слоев равно 3, все слои имеют одинаковую хиральность, длина трубки ~ 20 Å;

- нанотрубка «свиток» типа «зиг-заг», внутренний виток имеет радиус $\sim 3,5$ Å, число витков равно 3, расстояние между витками $\sim 3,35$ Å, длина трубки ~ 20 Å.

Далее были рассчитаны теоретические дифракционные картины рассеяния от полученных моделей в FeK α излучении и в качестве наиболее контрастной для сравнения выбрана s-взвешенная интерференционная функция $H(S)$ [1], [3], [6]. Результат сравнения полученных картин рассеяния от выбранных моделей нанотрубок (рис. 4) показал: положения пиков интенсивности в данных моделях находятся примерно в одинаковых пределах величины дифракционного вектора [1], [6], но характер данных пиков отличается.



Рис. 4. Картины рассеяния от нанотрубок типа «свиток» и «русская матрешка»

На рис. 4 видно, что пики интенсивности рассеяния «русской матрешкой» более четкие, менее размытые, сформированы при определенных положениях модуля дифракционного вектора, в отличие от «свитка».

При моделировании многослойных нанотрубок типа «русская матрешка» других конфигураций с большим числом слоев картины рассеяния сохраняли характер в расположении пиков интенсивности, однако сами пики возрастали по величине и становились еще более четкими. Моделирование многослойных трубок «русская матрешка» других конфигураций (по длине, радиусу, числу слоев) и сопоставимых им нанотрубок типа «свиток» и сравнение картин рассеяния от полученных моделей дает аналогичный результат. Необходимо учитывать, что в нанотрубках типа «свиток» происходит постоянное увеличение радиуса при формировании каждого витка, соответственно, каждый такой виток имеет как внутренний радиус, так и внешний. При этом:

- внутренний радиус отличается от внешнего на величину межслоевого расстояния;
- внутренний радиус очередного витка равен внешнему предыдущего.

Таким образом, при построении многослойных нанотрубок типа «русская матрешка» и «свиток» с одинаковыми внешним и внутренним радиусами получается, что «свиток» будет иметь меньшее количество слоев. На рис. 5 видно, что нанотрубки «свиток» и «русская матрешка» имеют одинаковые внутренний и внешний радиусы. Однако у «свитка» всего 2 витка, а «русская матрешка» образована тремя слоями.

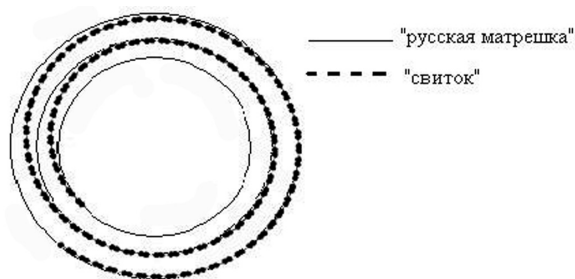


Рис. 5. Многослойные нанотрубки «свиток» и «русская матрешка» с одинаковыми внешним и внутренним радиусами

Соответственно, нанотрубка типа «свиток» из трех витков в результате будет иметь больший внешний радиус, чем трехслойная нанотрубка типа «русская матрешка». Также число атомов в данных моделях у «свитка» будет несколько большим. Это необходимо учитывать при моделировании и сравнении многослойных нанотрубок данных типов.

ВЫВОДЫ

В данной работе разработана методика и построен алгоритм формирования моделей, расчета координат атомов в многослойных углеродных нанотрубках типа «русская матрешка» различных конфигураций. Показаны ограничения, накладываемые на формируемые модели, связанные с геометрией и характеристиками нанотрубок, в связи с чем невозможно построить абсолютно произвольные многослойные трубки. Также разработан алгоритм формирования многослойных ахиральных («зиг-заг» и «кресло») нанотрубок типа «свиток» различных конфигураций.

Моделирование нанотрубок различных типов («русская матрешка» и «свиток») и последующий анализ теоретических дифракционных картин рассеяния, рассчитанных от полученных моделей, показали, что существует возможность (на основе рентгенографического эксперимента) идентификации нанотрубок, присутствующих в исследуемом образце.

Исследования проведены при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы № П801 от 24 мая 2010 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешина Л. А., Фофанов А. Д. Рентгеноструктурный анализ аморфных материалов. Петрозаводск: Изд-во ПГУ, 1987. 88 с.
2. Беленков Е. А. Закономерности структурного упорядочения многослойных углеродных нанотрубок // Известия Челябинского научного центра. 2001. Вып. 1. С. 25–30.
3. Данилов С. В., Фофанов А. Д. Построение моделей однослойных углеродных нанотрубок и расчет координат атомов в них // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2011. № 6 (119). С. 109–114.
4. Золотухин И. В., Калинин Ю. Е. Замечательные качества углеродных нанотрубок // Природа. 2004. Вып. 5. С. 20–27.
5. Федоров А. С., Сорокин П. Б., Аврамов П. В., Овчинников С. Г. Моделирование свойств, электронной структуры ряда углеродных и неуглеродных нанокластеров и их взаимодействия с легкими элементами. Новосибирск: Изд-во ИСО РАН, 2006 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.kirensky.ru/master/articles/monogr/Book/>
6. Фофанов А. Д., Лобов Д. В., Логинов Д. В. Диагностика порошковых материалов методами рентгенографии // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. № 4 (109). С. 106–115.
7. Dresselhaus M. S., Dresselhaus G., Saito R. Physics of Carbon Nanotubes // Carbon. 1995. Vol. 33. № 7. P. 883–891.
8. Meeyappan M. Carbon Nanotubes: Science and Application. London: CRC Press, 2005. 279 p.
9. Pleshakov V. F. Geometry and X-RAY Diffraction Characteristics of Carbon Nanotubes // Crystallography Reports. 2009. Vol. 54. № 7. P. 1230–1241.
10. Reznik D., Olk C. H., Neumann D. A., Copley J. R. D. X-RAY powder diffraction from carbon nanotubes and nanoparticles // Phys. Rev. B. 1995. Vol. 52. № 1. P. 116–124.
11. Ruland W., Schaper A. K., Hou H. Multi-wall carbon nanotubes with uniform chirality: evidence for scroll structures // Carbon. 2003. Vol. 41. P. 423–427.
12. Saito R., Dresselhaus G., Dresselhaus M. S. Physical properties of carbon nanotubes. London: Imperial College Press, 1995. 274 p.
13. Saito Y., Yoshikawa T., Bandow S. etc. Interlayer spacings in carbon nanotubes // Phys. Rev. B. 1993. Vol. 48. № 3. P. 1907–1909.

УДК 539.264; 544.233

ОЛЬГА ВЛАДИМИРОВНА СИДОРОВА

аспирант кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
solvak@yandex.ru

ЛЮДМИЛА АЛЕКСАНДРОВНА АЛЕШИНА

кандидат физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
aleshina@psu.karelia.ru

АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ КАЛИНКИН

доктор химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории химии и технологии сырья тугоплавких редких элементов Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева, Кольский научный центр РАН (Апатиты, Мурманская область, Российская Федерация)
kalinkin@chemy.kolasc.net.ru

ЕЛЕНА ВЛАДИМИРОВНА КАЛИНКИНА

кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории минерального сырья и силикатного синтеза Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева, Кольский научный центр РАН (Апатиты, Мурманская область, Российская Федерация)
kalinkina@chemy.kolasc.net.ru

БЛИЖНИЙ ПОРЯДОК В МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ ТИТАНИТАХ

Показано, что скорость размола титанита в атмосфере CO_2 и на воздухе совпадает. Число кислородных соседей атома титана уменьшается в образцах, размолотых в обеих атмосферах. Число кислородных соседей атома кальция уменьшается только при размолоте в воздухе.

Ключевые слова: титанит, механоактивация, рентгенографический анализ, ближний порядок, аморфизация

ВВЕДЕНИЕ

Синтез новых соединений является одной из основных задач химии и современной науки в целом. Для решения этой проблемы применяются и разрабатываются новые методы инициирования и ускорения химических реакций и физико-химических превращений. Одним из таких методов является метод механоактивации, заключающийся в тонком измельчении материалов при помощи различных измельчительных аппаратов. Было обнаружено, что Са- и Mg-содержащие силикаты способны поглощать при определенных режимах измельчения углекислый газ из окружающей среды в количествах, сопоставимых с массой измельчаемого образца. Данный эффект был назван механохимическим [1], [2], [5], [6], и его открытие стимулировало интерес к исследованиям сопровождающих его структурных изменений.

Информацию о характере изменения структуры материалов при механоактивации в различных средах можно получить дифракционными методами.

Целью данной работы были рентгенографические исследования влияния размола в воздухе и атмосфере углекислого газа на структурное состояние титанита (сфена) CaTiSiO_5 .

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектами исследования были образцы мономинеральной фракции сфена Ковдорского

месторождения (Кольский полуостров), предоставленные для исследований институтом химии и технологии редких элементов и минерального сырья (ИХТРЭМС, Апатиты), в исходном состоянии и после размола в течение 30 мин. в атмосфере углекислого газа и воздуха. Методика приготовления образцов изложена в [4].

Рентгенографирование проводилось на автоматизированных установках ДРОН-3 в Fe- и MoK_α -излучениях. Монохроматором служил кристалл пиролитического графита. Методика рентгенографирования изложена в [7].

Анализ результатов эксперимента проводился методом Финбака – Уоррена с использованием пакета прикладных программ X-гау. Подробно методика обработки экспериментальных данных изложена в [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Из рентгенограмм, приведенных на рис. 1а, видно, что после 30 мин. размола в атмосферах углекислого газа и на воздухе на рентгенограммах сфена сохраняются слабые и размытые отражения от кристаллической фазы.

Размол сфена в атмосфере углекислого газа CO_2 и на воздухе приводит к выходящему за пределы погрешности различию в рентгенограммах в области до $5 \text{ \AA}^{-1}$, что и обуславливает

различие в кривых $D(r)$ (рис. 1б). Для расчета характеристик ближнего порядка (радиусов и размытий координационных сфер и координационных чисел) использовались кривые рассеяния, полученные на излучении MoK_α .

Кривые распределения парных функций $D(r)$ (рис. 1б) размыты, максимумы перекрываются, поэтому прежде чем проводить из них расчет характеристик ближнего упорядочения, была проанализирована кристаллическая структура сфена. Известно, что сфен кристаллизуется в моноклинной модификации. При комнатной температуре и нормальном давлении стабильна фаза с пространственной группой $P2_1/a$ [8], [10], [11]. При температуре 270°C происходит фазовый переход в высокотемпературную форму с сохранением сингонии, но с изменением пространственной группы на $A2/a$ [8], [9], [11].

В табл. 1 приведены периоды (a , b , c), угол моноклинности β , число формульных единиц на элементарную ячейку (Z), объем элементарной ячейки V и плотность ρ обеих модификаций сфена.

Таблица 1

Кристаллографические характеристики полиморфных модификаций сфена, $Z=4$

Пр. гр. сим.	a , Å	b , Å	c , Å	β , °	V , Å ³	ρ , г/см ³
$P2_1/a$ [11]	7,068	8,714	6,562	113,82	369,73	3,52
$A2/a$ [11]	7,060	8,737	6,565	113,70	370,80	3,51

Основу структуры сфена составляют зигзагообразные цепочки октаэдров TiO_6 (рис. 2а), вытянутые вдоль оси a . Октаэдры связаны через анион O1 (рис. 2а). Тетраэдры SiO_4 представляют собой изолированные друг от друга структурные единицы, то есть они не соединены между собой, а связывают цепочки октаэдров TiO_6 (рис. 2б). Кальций находится в окружении 7 атомов кислорода и располагается между октаэдрическими цепочками координационных многогранников титана (рис. 2в). Анион кислорода, находящийся в позиции O1 , связан с двумя ионами титана и одним ионом кальция; анионы O2 и O3 окружены тремя катионами: Ti , Si и Ca ;

анионы O4 и O5 — четырьмя катионами: Ti , Si и двумя ионами кальция (рис. 2в).

Полиморфный переход от низко- к высокотемпературной модификации сфена ($P2_1/a \rightarrow A2/a$) относится к классу деформационных и связан с повышением симметрии в расположении катионов в координационных многогранниках. В низкотемпературной форме (группа симметрии $P2_1/a$) ион титана смещен из геометрического центра октаэдра на $0,21 \text{ Å}$ в направлении оси цепочек. В результате фазового перехода при 270°C (группа симметрии новой фазы $A2/a$) ион титана размещается в геометрическом центре октаэдра: расстояния Ti-O попарно одинаковы (табл. 2). Атом кремния также смещается в центр симметрии тетраэдра (табл. 2).

Таблица 2

Расстояния между анионами и катионами в координационных многогранниках

$P2_1/a$			$A2/a$			$P2_1/a$			$A2/a$		
Ca	O1	2,270	Ca	O1	2,286	Ti	O1	1,772	Ti	O1	1,867
Ca	O3	2,406	Ca	O2	2,418	Ti	O1	1,974	Ti	O1	1,867
Ca	O2	2,427	Ca	O2	2,418	Ti	O3	1,971	Ti	O2	1,994
Ca	O4	2,678	Ca	O3	2,630	Ti	O2	2,010	Ti	O2	1,994
Ca	O4	2,389	Ca	O3	2,415	Ti	O5	2,049	Ti	O3	2,016
Ca	O5	2,585	Ca	O3	2,630	Ti	O4	1,986	Ti	O3	2,016
Ca	O5	2,433	Ca	O3	2,415						
Si	O5	1,634	Si	O3	1,646	Si	O3	1,654	Si	O2	1,640
Si	O4	1,659	Si	O3	1,646	Si	O2	1,624	Si	O2	1,640

Атомы кислорода с одинаковыми номерами, но с различными расстояниями до одного и того же катиона связаны между собой симметричными преобразованиями соответствующей пространственной группы. В координационном многограннике Ca в обеих фазах 4 расстояния Ca-O близки: $\sim 2,4 \text{ Å}$. Расстояния Ca-O3 и Ca-O5 в высокотемпературной фазе одинаковы и составляют $2,63 \text{ Å}$. Один атом кислорода в координационном многограннике кальция имеет короткую связь Ca-O1 : $2,27 \text{ Å}$ в низкотемпературной и $2,286 \text{ Å}$ в высокотемпературной фазе.

Анализ рентгенограммы исходного образца сфена показал, что его структура соответствует моноклинной модификации, пространственная группа $P2_1/a$.

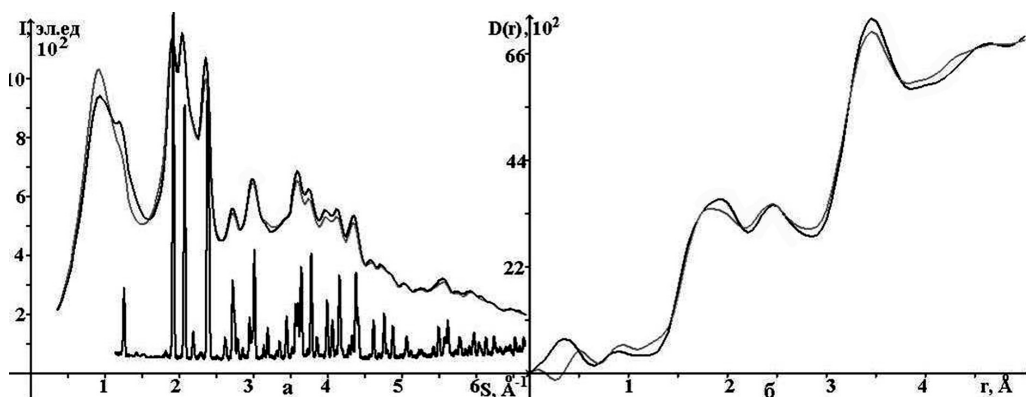


Рис. 1. Рентгенограммы кристаллического (в нижней части рисунка) и размолотых образцов сфена: а) — 30 мин. в CO_2 ; — 30 мин. в воздухе; б) кривые распределения парных функций $D(r)$

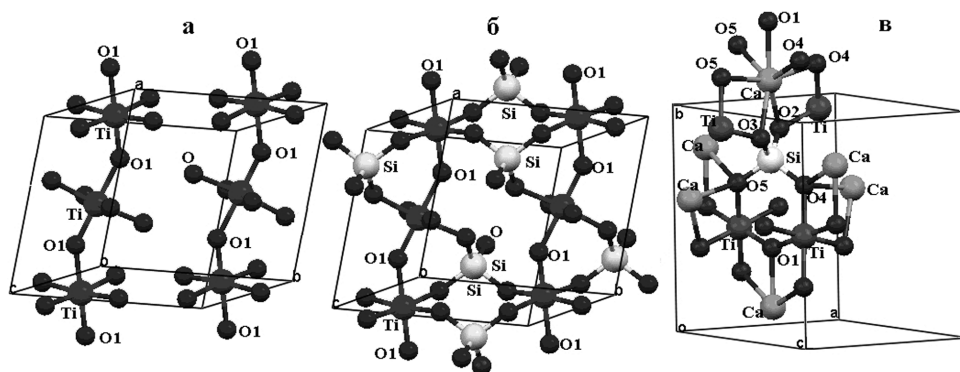


Рис. 2. Координационные многогранники в структуре сфена: а – цепочки октаэдров TiO_6 ; б – тетраэдры SiO_4 , связывающие цепочки октаэдров TiO_6 ; в – связь между координационными многогранниками Ti, Ca и Si

Однако поскольку, температура фазового перехода $\text{P2}_1/\text{a} \rightarrow \text{A2}/\text{a}$ невысока и, кроме того, увеличение давления также приводит к указанному фазовому переходу [9], следует ожидать, что механическое воздействие при размоле может его активизировать. Поэтому с целью анализа кривых $D(r)$ были рассчитаны радиусы координационных сфер и координационные числа для обеих кристаллических модификаций сфена. Результаты расчета представлены в табл. 3.

Значения радиусов и координационных чисел, рассчитанные из экспериментальных кривых $D(r)$, соответствовали данным для объединенных координационных сфер (табл. 3). Поскольку объединялись сферы, состоящие из пар атомов разного сорта (i, j; i1, j1), координационные числа для кристаллов пересчитывались согласно соотношению

$$N_{ij} = N_{i1j1} \cdot \frac{Z_{i1}Z_{j1}}{Z_iZ_j}, \quad (1)$$

вытекающему из равенства площадей под максимумами [1].

В табл. 4 значения радиусов координационных сфер и координационных чисел размолотых образцов сфена, рассчитанные из экспериментальных кривых $D(r)$, сравниваются с соответствующими данными для кристаллов.

Из табл. 4 следует, что при размоле сфена на воздухе расстояния $r_{\text{Si-O}}$ в тетраэдрах SiO_4 совпадают с соответствующим средневесовым расстоянием для кристаллов. Для размолотого в атмосфере CO_2 сфена значение радиуса координационной сферы $r_{\text{Si-O}}$ завышено примерно на 2 %. Координационное число $N_{\text{Si-O}}$ для размолотого на воздухе и в атмосфере CO_2 сфена совпадает в пределах погрешности с координационным числом $N_{\text{Si-O}}$ для кристаллических модификаций сфена. Таким образом, координационные многогранники кремния SiO_4 в структуре размолотых образцов сохраняются (табл. 4).

Число ближайших кислородных соседей (первое координационное число) около атомов титана уменьшается на 4 % при размоле в воздухе и на 8 % при размоле в атмосфере углекислого газа. Среднее значение межатомного расстояния

$r_{\text{Ti-O}}$ для образца, размолотого на воздухе, совпадает по величине с данными для высокотемпературной фазы сфена, тогда как для образца, размолотого в атмосфере CO_2 оно практически равно соответствующему значению для низкотемпературной фазы (табл. 4).

При размоле на воздухе на 25 % уменьшается число кислородных соседей $N_{\text{Ca-O}}$ около атома кальция, но при размоле в атмосфере CO_2 оно близко к значениям, теоретически рассчитанным для кристаллов. Уменьшение числа ближайших кислородных соседей в координационном многограннике кальция при размоле в аналогичных условиях ранее было обнаружено для образцов псевдоволластонита [3], однако наиболее интенсивно этот процесс протекал при размоле в атмосфере CO_2 .

Вследствие уменьшения числа ближайших соседей Ca-O и Ti-O координационные числа $N_{\text{O-O(1)}}$ для размолотых на воздухе и в CO_2 образцов сфена занижены, причем сильнее при размоле в атмосфере углекислого газа.

Координационные числа $N_{\text{Ca-Si}}$ и $N_{\text{O-O(2)}}$ для размолотых на воздухе и в атмосфере CO_2 образцов сфена совпадают в пределах погрешности с координационными числами $N_{\text{Ca-Si}}$ и $N_{\text{O-O(2)}}$ для кристаллов.

Сферы Ti-Si, Ca-Ti, Ti-Ti, Ti-O(2), Ti-O(3), Ca-Si не являются индивидуальными в кристалле (табл. 3, 4), поскольку в каждом случае одинаковые радиусы имеют сферы разного типа. Например, близкие по значениям радиусы имеют сферы Ti-Si, Ca-O и Si-O (табл. 3). При расчете координационных чисел из экспериментальной $D(r)$ задавали тип сферы как Ti-Si, а координационные числа Ca-O и Si-O пересчитывались на Ti-Si по формуле (1).

Из приведенных в табл. 4 данных для указанных выше сфер видно, что рассчитанные из эксперимента координационные числа для сфена, размолотого в атмосфере CO_2 , наиболее близки к суммарным координационным числам, рассчитанным для высокотемпературной модификации сфена (A2/a). В то же время рассчитанные из эксперимента координационные числа для сфена, размолотого на воздухе, не совпадают с соответствующими суммарными координа-

Таблица 3

Радиусы координационных сфер r_{ij} , разброс межатомных расстояний Δr_{ij} , координационные числа N_{ij} , средневесовые значения радиусов $\langle r_{ij} \rangle$ и суммарные координационные числа N'_{ij} , рассчитанные для сфена

Сфен P2/a			Сфен A2/a_270C			Сфен P2/a			Сфен A2/a_270C		
	r _{ij} , Å	N _{ij} , ат.		r _{ij} , Å	N _{ij} , ат.		⟨r _{ij} ⟩, Å	N' _{ij} , ат		⟨r _{ij} ⟩, Å	N' _{ij} , ат.
Si-O	1,64	4,0	Si-O	1,64	4,0	Si-O	1,64	4,00	Si-O	1,64	4,00
Ti-O	1,77	1,0	Ti-O	1,87	2,0	Ti-O	1,88	6,00	Ti-O	1,94	6,00
Ti-O	2,00	5,0	Ti-O	2,01	4,0						
Ca-O	2,27	1,0	Ca-O	2,29	1,0	Ca-O	2,44	7,00	Ca-O	2,44	7,00
Ca-O	2,41	4,0	Ca-O	2,41	4,0						
Ca-O	2,63	2,0	Ca-O	2,63	2,0						
O-O	2,60	0,8	O-O	2,63	1,2	O-O	2,80	8,40	O-O	2,81	8,40
O-O	2,74	7,0	O-O	2,72	3,6						
O-O	3,06	0,6	O-O	2,82	2,4						
			O-O	3,07	1,2						
Ca-Si	3,06	1,0	Ca-Si	3,07	1,0	Ca-Si	3,06	1,00	Ca-Si	3,07	1,00
Ca-O	3,22	2,0	Ca-O	3,22	2,0	Ti-Si	3,26	3,77	Ti-Si	3,26	3,77
Ti-Si	3,28	2,0	Ti-Si	3,28	2,0						
Si-O	3,29	2,0	Si-O	3,29	2,0						
O-O	3,33	1,4	O-O	3,32	1,2	O-O	3,33	1,40	O-O	3,38	1,60
			O-O	3,44	0,4						
Ca-Ti	3,38	4,0	Ca-Ti	3,38	4,0	Ca-Ti	3,41	6,16	Ca-Ti	3,41	6,16
Si-O	3,41	3,0	Si-O	3,41	3,0						
Ti-Si	3,43	2,0	Ti-Si	3,43	2,0						
Ca-Si	3,53	4,0	Ca-Si	3,53	4,0	Ti-Ti	3,55	5,70	Ti-Ti	3,55	5,81
Ti-Ti	3,53	2,0	Ti-Ti	3,53	2,0						
Ti-O	3,49	1,0	Ti-O	3,55	2,0						
Ca-O	3,58	2,0	Ca-O	3,58	2,0						
Ti-O	3,60	1,0	O-O	3,57	0,8						
O-O	3,69	2,2	O-O	3,75	2,0	Ti-O	3,75	5,34	Ti-O	3,79	7,27
Si-O	3,77	4,0	Si-O	3,77	4,0						
Ti-O	3,78	2,0	Ti-O	3,86	4,0						
Ca-O	3,86	4,0	Ca-O	3,86	4,0	Ti-O	3,89	8,86	Ti-O	3,91	7,86
Si-Si	3,91	2,0	Si-Si	3,91	2,0						
Ti-O	3,92	3,0	Ti-O	3,95	2,0						
Ca-Ca	3,99	2,0	Ca-Ca	3,99	2,0	Ca-Ca	4,06	5,57	Ca-Ca	4,09	4,82
O-O	4,00	0,8	O-O	4,01	0,8						
Ti-O	4,09	4,0	O-O	4,17	0,8						
Si-O	4,16	6,0	Ti-O	4,11	2,0						
			Si-O	4,16	6,0						

ционными числами, рассчитанными для обеих полиморфных фаз.

Таким образом, при размоле на воздухе нарушается характер распределения атомов по координационным сферам, тогда как при размоле атмосфере CO_2 он соответствует таковому для высокотемпературной фазы сфена.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Установлено, что при 30-минутном размоле сфена на воздухе и в атмосфере CO_2 полной

аморфизации не происходит, содержание кристаллической фазы не зависит от атмосферы размола. Следует отметить, что в исследованном ранее в [2] псевдоволластоните после 30-минутного размола не было следов кристаллической фазы.

В размолотых образцах сфена координационные многогранники кремния сохраняются. Число ближайших кислородных соседей атома титана уменьшается при размоле, причем это изменение выражено наиболее ярко в образцах, размолотых в CO_2 . Число кислородных соседей

Таблица 4

Результаты расчетов радиусов координационных сфер r_{ij} , координационных чисел N_{ij} и дисперсии радиусов для размолотых образцов титанита.
 Ошибка в определении радиусов $dr_{ij} = \pm 0,01 \text{ \AA}$, размытий $d\sigma_{ij} = \pm 0,02 \text{ \AA}$

Тип сферы	CaTiSiO ₅ Размол в воздухе 30 мин.			CaTiSiO _{5,44} C _{0,22} Размол в CO ₂ 30 мин.			P2 ₁ /a		A2/a	
	$r_{ij}, \text{\AA}$	$\sigma_{ij}, \text{\AA}$	$N_{ij}, \text{ат.}$	$r_{ij}, \text{\AA}$	$\sigma_{ij}, \text{\AA}$	$N_{ij}, \text{ат.}$	$\langle r_{ij} \rangle, \text{\AA}$	$N_{ij}, \text{ат.}$	$\langle r_{ij} \rangle, \text{\AA}$	$N_{ij}, \text{ат.}$
Si-O	1,64	0,18	$3,94 \pm 0,01$	1,67	0,27	$3,99 \pm 0,02$	1,64	4,00	1,64	4,00
Ti-O	1,95	0,25	$5,76 \pm 0,01$	1,90	0,25	$5,55 \pm 0,05$	1,88	6,00	1,94	6,00
Ca-O	2,44	0,19	$5,59 \pm 0,02$	2,44	0,17	$6,84 \pm 0,12$	2,44	7,00	2,46	7,00
O-O(1)	2,80	0,20	$7,12 \pm 0,04$	2,80	0,17	$6,41 \pm 0,06$	2,80	8,40	2,81	8,40
Ca-Si	3,06	0,20	$0,92 \pm 0,10$	3,00	0,02	$1,20 \pm 0,24$	3,06	1,00	3,07	1,00
O-O(2)	3,33	0,17	$1,32 \pm 0,45$	3,32	0,01	$1,88 \pm 0,41$	3,33	1,40	3,38	1,60
Пересчет на сферы типа										
Ti-Si	3,26	0,20	$3,16 \pm 0,17$	3,25	0,08	$2,10 \pm 0,15$	3,26	3,77	3,26	3,77
Ca-Ti	3,41	0,24	$3,70 \pm 0,34$	3,41	0,27	$5,09 \pm 0,64$	3,41	6,16	3,41	6,16
Ti-Ti	3,55	0,13	$10,11 \pm 1,24$	3,56	0,01	$7,59 \pm 0,75$	3,55	5,70	3,55	5,81
Ti-O(2)	3,75	0,15	$7,60 \pm 0,87$	3,75	0,15	$7,67 \pm 0,87$	3,75	5,34	3,79	7,27
Ti-O(3)	3,89	0,20	$3,89 \pm 0,66$	3,89	0,11	$7,81 \pm 0,46$	3,89	8,86	3,91	7,86
Ca-Ca	4,06	0,20	$12,83 \pm 0,18$	4,06	0,07	$7,48 \pm 0,86$	4,06	5,57	4,09	4,82

около атома кальция после размол сфена на воздухе уменьшается, но после размол в атмосфере CO₂ оно близко к значению, теоретически рассчитанному для кристалла.

Аналогичные исследования, проведенные в [2] для образцов псевдоволластонита CaSiO₃, показали, что при размол псевдоволластонита также происходит уменьшение числа кислородных соседей у атомов кальция [2], однако наибо-

лее интенсивно этот процесс протекает при размол в атмосфере CO₂.

Работа выполнена при поддержке проекта № П801 в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (мероприятие 1.2.1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алешина Л. А., Никитина Е. А., Фофанов А. Д. Рентгенографические исследования ближнего порядка в аморфных анодных окисных пленках алюминия. Деп. в ВИНТИ. 21.04.1995. № 1134-B95. 23 с.
- Алешина Л. А., Сидорова О. В., Осауленко Р. Н., Фофанов А. Д., Калинин А. М. Рентгенографические исследования влияния размол на структурные характеристики образцов псевдоволластонита // Электронный журнал «Исследовано в России», 030, 297–306, 2009 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2009/030.pdf>
- Калинkin А. М. Механосорбция диоксида углерода перовскитом CaTiO₃ и структурно-химические изменения // Журнал физической химии. 2008. Т. 82. № 2. С. 331–336.
- Калинkin А. М., Калинин Е. В., Васильева Т. Н. Влияние механической активации сфена на его реакционную способность // Коллоидный журнал. 2004. Т. 66. № 2. С. 190–197.
- Калинkin А. М., Калинин Е. В., Залкинд О. А. Механосорбция углекислого газа Ca- и Mg-содержащими силикатами и алюмосиликатами. Поглощение CO₂ и структурно-химические изменения // Коллоидный журнал. 2009. Т. 71. № 2. С. 194–201.
- Калинkin А. М., Неведомский В. Н., Калинин Е. В. Наноструктура диоксида CaMgSi₂O₆ и перовскита CaTiO₃, механоактивированных в углекислом газе // Неорганические материалы. 2008. Т. 44. № 6. С. 727–733.
- Лобов Д. В., Фофанов А. Д., Осауленко Р. Н., Калинин А. М. Рентгенографическое исследование структурного состояния образцов диоксида после длительного помола. // Электронный журнал «Исследовано в России», 085, 889–907, 2005 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/085.pdf>
- Kunz M., Arlt T., Stolz J. In situ powder diffraction study of titanite (CaTiOSiO₄) at high temperature // Am. Min. 2000. Vol. 85. P. 1465–1473.
- Kunz M., Xirouchakis D., Lindsley D. H., Hausermann D. High-pressure phase transition in titanite (CaTiOSiO₅) // Am. Min. 1996. Vol. 8. P. 1527–1530.
- Speer J. A., Gibbs G. V. The crystal structure of synthetic titanite, CaTiOSiO₄, and the domain textures of natural titanites // Am. Min. 1976. Vol. 61. P. 238–247.
- Taylor M., Brown G. E. High-temperature structural study of the P2₁/a → A2/a phase transition in synthetic titanite CaTiSiO₅ // Am. Min. 1976. Vol. 61. P. 435–447.

АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ ШЕЛЕСТОВ

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

ВАЛЕРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ ГОСТЕВ

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

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА

Разработано устройство для осуществления несамостоятельного разряда, инициируемого жидкостным микроплазмотроном, и проведены измерения основных его характеристик.

Ключевые слова: плазма, плазматрон, газовый разряд, подготовка топлива

ВВЕДЕНИЕ

Плазменные генераторы и генерируемые ими плазменные потоки благодаря их уникальным особенностям прочно завоевали лидирующие позиции в технике и промышленности. Примерами применения плазменных генераторов являются сварка и резка металлов и тугоплавких материалов, нанесение защитных покрытий на различные материалы, термическое обезвреживание высокотоксичных органических отходов, обеззараживание и стерилизация медицинских инструментов, обработка биологических объектов и др. [1]. В последнее время наблюдается все больший рост интереса к холодной плазме, получаемой при атмосферном давлении. Это связано прежде всего с особенностями работы с такой плазмой: отсутствие необходимости создания вакуума, простота ввода, вывода и обработки материала, технически приемлемые требования к источникам электропитания, невысокие эксплуатационные расходы.

Целью данной работы является проведение экспериментов по исследованию спектроскопических характеристик микроплазмотрона – генератора холодной плазмы и генерируемого им плазменного потока.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА

Исследование спектрального состава плазменного потока производилось с помощью многоканального высокоскоростного триггерного спектрометра AvaSpec-2048FT, измеренная аппаратная ширина которого составила 0,3 нм. Схема экспериментальной установки по регистрации спектров приведена на рис. 1.

Регистрация спектров производилась в поперечном и продольном направлениях по отношению к плазменному потоку при напряжении $U = 1500$ В, токе разряда $I = 25$ мА и давлении $p = 0,5$ атм. В качестве рабочего вещества использовался воздух, воздух + пары воды, воз-

дух + пары воды и бензина. Полученные в эксперименте спектры анализировались согласно [2], [3]. Они приведены на рис. 2.

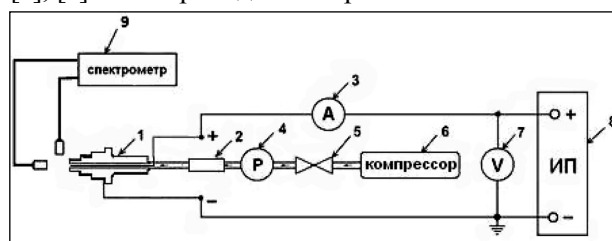


Рис. 1. Схема экспериментальной установки регистрации спектров: 1 – микроплазматрон; 2 – барботирующее устройство; 3 – амперметр; 4 – манометр; 5 – вентиль регулирования избыточного давления; 6 – компрессор; 7 – вольтметр; 8 – источник питания; 9 – спектрометр

В случае использования воздуха в качестве плазмообразующего газа в зарегистрированных спектрах были обнаружены интенсивные линии O , O^+ , N , N^+ , полосы молекул O_2 , O_2^+ , O_3 , N_2 , NO , а также атомарные линии элементов материала электродов [4]. Для регистрации спектров применялся метод [5]. Спектры, зарегистрированные в продольном направлении, отличались от зарегистрированных в поперечном направлении только значением интенсивности.



Рис. 2. Спектр излучения плазменного факела; рабочее вещество – воздух; 600–800 нм

В случае использования в качестве плазмообразующего газа смеси воздуха и паров воды

в спектрах излучения, кроме атомарных линий и молекулярных полос, зарегистрированных при использовании воздуха в качестве плазмообразующего газа, были обнаружены более интенсивные линии H_{α} и полоса молекулы H_2 . Как и в предыдущем случае, спектры, зарегистрированные в продольном направлении, отличались от зарегистрированных в поперечном направлении только значением интенсивности.

На рис. 3, 4 приведены спектры излучения плазменного факела для рабочего вещества – воздух + пары воды и бензина. При наличии в рабочем веществе паров бензина в УФ-области наблюдается присутствие в плазме атомов углерода и возбужденных углеводородных радикалов CH , CH_2 , CH_3 , электронные переходы которых лежат в области 200–280 нм. Также визуально наблюдалось значительное увеличение плазменного факела по сравнению с аналогичной величиной при использовании в качестве рабочего вещества воздуха и воздуха с парами воды.

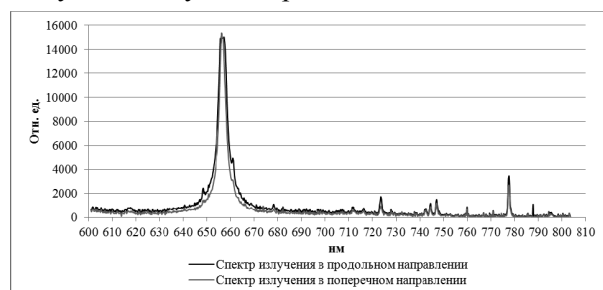


Рис. 3. Спектр излучения плазменного факела; рабочее вещество – воздух + пары воды и бензина; 600–800 нм



Рис. 4. Спектр излучения плазменного факела в ультрафиолетовой области; рабочее вещество – воздух + пары воды и бензина; 200–270 нм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

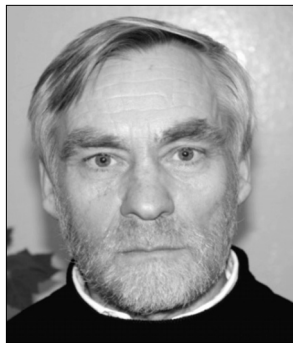
Настоящая работа посвящена исследованию спектров плазменного потока, генерируемого микроплазмотроном. Со ссылкой на известный метод спектрального исследования были получены и отождествлены спектры излучения для нескольких плазмообразующих веществ. В результате анализа полученных спектров был сделан ряд выводов относительно присутствия в плазме атомов углерода и возбужденных углеводородных радикалов в бензино-воздушной плазмообразующей среде, а также увеличения размеров плазменного факела при использовании паров воды по сравнению с аналогичной величиной при использовании в качестве рабочего вещества воздуха. Благодаря возможности работы в условиях воздушной атмосферы, низкой среднетемпературе воздушно-плазменного потока, использованию воздуха в качестве плазмообразующего газа, а также наличию в потоке плазмы химически активных компонентов, в особенности экзогенного оксида азота, и интенсивному оптическому излучению в УФ-области спектра значительно расширяются возможности применения данного газоразрядного генератора в различных областях и сферах деятельности человека.

Одним из основных и перспективных технических применений модели созданного инжектора является его использование в качестве плазменного устройства подготовки топлива в двигателях внутреннего сгорания.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки Российской Федерации по федеральной целевой программе «Научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., Государственный контракт № П1452 от 03.09.2009, по конкурсу № НК-152П, проект «Разработка микроплазмотрона в качестве устройства подготовки топлива ДВС».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

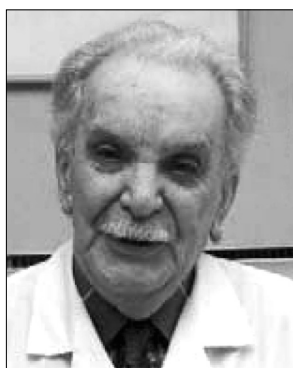
1. Подураев В. И., Татаринов Д. С., Петрова В. Д. Механическая обработка с охлажденным ионизированным воздухом // Вестник машиностроения. 1991. № 11. С. 27–31.
2. Зейдель А. Н., Прокофьев В. К., Райский С. М. и др. Таблицы спектральных линий. М.: Наука, 1977. 800 с.
3. Пирс Р., Гейдон А. Отождествление молекулярных спектров / Под ред. С. Л. Мандельштама, М. Н. Аленцева. М.: Иностранная литература, 1949. 240 с.
4. Стриганов А. Н., Свентицкий Н. С. Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов. М.: Атомиздат, 1966. 900 с.
5. Таммет У. Д. Аспирационный метод измерения спектра аэроионов // Ученые записки ТГУ. Вып. 195. Тарту, 1967.



14 апреля 2012 года исполнилось 70 лет профессору, доктору биологических наук, заведующему кафедрой лесного хозяйства лесотехнического факультета Петрозаводского государственного университета *Владимиру Васильевичу Луканину*.

ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ ЛУКАНИН **К 70-летию со дня рождения**

После окончания в 1968 году биологического факультета Петрозаводского университета В. В. Луканин работал в Зоологическом институте АН СССР. За время работы защитил кандидатскую (1974) и докторскую (1999) диссертации. С 1999 года работает в ПетрГУ. Им опубликовано 85 научных и методических работ. Сегодня Владимир Васильевич является председателем Общества охраны природы Карелии, членом Совета неправительственных организаций при Законодательном собрании РК, экспертом Coalition Clear Baltic (CCB). В 2000–2006 годах стажировался в Дании, Норвегии, Швеции и Санкт-Петербурге. Участвовал в проектах по вопросам энергосбережения совместно со шведскими организациями CCB и Acid rains, Норвежским обществом охраны природы.



23 апреля 2012 года исполнилось 80 лет профессору, доктору медицинских наук, заведующему кафедрой детской хирургии медицинского факультета Петрозаводского государственного университета *Игорю Николаевичу Григовичу*.

ИГОРЬ НИКОЛАЕВИЧ ГРИГОВИЧ **К 80-летию со дня рождения**

Профессиональная деятельность И. Н. Григовича с 1962 года связана с ПетрГУ. В 1968 году он защитил кандидатскую диссертацию, в 1981 году в Московском НИИ педиатрии и детской хирургии – докторскую. Игорь Николаевич является автором более 250 научных работ, в том числе 10 монографий, многих запатентованных рационализаторских предложений. Под его руководством защищены 6 диссертаций, он организатор многих конференций по детской хирургии в РК и северо-западных регионах России, член редакционного совета трех центральных российских журналов, член методической комиссии по преподаванию детской хирургии при МЗ РФ. И. Н. Григович является руководителем Карельского центра детской хирургии. Игорь Николаевич – почетный член Российской ассоциации детских хирургов, заслуженный врач РФ и РК, заслуженный педагог высшей школы, лауреат высшей профессиональной премии по детской хирургии им. С. Д. Терновского. Удостоен званий «Народный врач Республики Карелия», «Почетный гражданин Республики Карелия», награжден орденом Почета.



28 мая 2012 года исполнилось 60 лет доктору физико-математических наук, профессору, заведующему кафедрой математического анализа математического факультета Петрозаводского государственного университета *Виктору Васильевичу Старкову*.

ВИКТОР ВАСИЛЬЕВИЧ СТАРКОВ **К 60-летию со дня рождения**

В. В. Старков работает в ПетрГУ с 1977 года после окончания аспирантуры ЛГУ. В 1978 году он защитил кандидатскую диссертацию, в 1999-м – докторскую в Институте математики и механики Уральского отделения РАН. Виктор Васильевич – один из ведущих российских специалистов по теории функций комплексной переменной. Им опубликовано более 110 научных и учебно-методических трудов. Под его руководством за последние годы защищены 2 кандидатские диссертации и 5 магистерских. В. В. Старков активно участвует в международных научных конференциях. Под его руководством проводится Петрозаводская международная конференция по комплексному анализу и приложениям PICCAN.

От всей души поздравляем юбиляров и желаем им крепкого здоровья и новых профессиональных достижений!

ЕДИНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К РУКОПИСЯМ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ В ЖУРНАЛ

Публикации в журнале подлежат статьи, ранее не печатавшиеся в других изданиях.

Статья предоставляется в распечатанном виде на бумаге формата А4 (в двух экземплярах) и в электронном виде, на носителе или вложении в электронное письмо на адрес редакции журнала. Печатная версия статьи подписывается всеми авторами.

Статья набирается в текстовом редакторе Microsoft Word и сохраняется с расширением .doc. Объем оригинальной и обзорной статьи как правило не должен превышать 0,5–0,7 печатного листа, кратких сообщений, отчетов о конференциях и рецензий на книги – до 3 страниц. Поля: верхнее и нижнее – 2 см, правое и левое – 3 см. Абзацный отступ – 0,5 см. Шрифт: Times New Roman, размер – 14 пунктов, аннотация, список литературы – 12 пт, межстрочный интервал – полуторный. Нумерация страниц – справа внизу страницы.

Статья должна состоять из следующих элементов: названию статьи должен предшествовать индекс универсальной десятичной классификации (УДК) в левом верхнем углу. Далее через 1 интервал – название статьи жирным шрифтом заглавными буквами, название должно быть по возможности кратким, точно отражающим содержание статьи. Точка в конце названия статьи не ставится. Сведения об авторе (имя, отчество, фамилия автора (-ов) полностью; ученая степень и звание; место работы: вуз, факультет, кафедра; должность; электронный адрес и контактные телефоны). Аннотация (объемом 6–8 строк) на русском и английском языках, перед ней – название статьи и фамилия (-ии) автора (-ов) также на двух языках; ключевые слова от 3 до 8 слов (или словосочетаний, несущих в тексте основную смысловую нагрузку) также на двух языках. Все перечисленные элементы статьи отделяются друг от друга пустой строкой и печатаются без абзацного отступа через 1 интервал.

Основной материал статьи и цитат, приводимых в статье, должен быть тщательно выверен автором. Сокращения слов не допускается, кроме общепринятых сокращений химических и математических величин и терминов. Размерность всех физических величин следует указывать в системе единиц СИ.

Список литературы, примечания, комментарии и пояснения по тексту статьи даются в виде концевых сносок. Список литературы должен быть напечатан через одинарный интервал, на отдельном листе. Цитируемая в статье литература (автор, название, место, издательство, год издания и страницы (от и до или количество))

приводится в алфавитном порядке в виде списка в конце статьи (сначала отечественные, затем зарубежные. Фамилии иностранных авторов приводятся в оригинальной транскрипции). В тексте статьи ссылка на источник делается путем указания в квадратных скобках порядкового номера цитируемой книги или статьи, через точку с запятой – цитируемых страниц, если это необходимо. В книгах иностранных авторов, изданных на русском языке, после заглавия книги через двоеточие указывают, с какого языка сделан перевод. Выходные данные по статьям из журналов и сборников указывают в следующем порядке: фамилия (-ии) автора (-ов) с инициалами, название статьи, через две косые черты – название журнала (год, том, номер, страницы (от и до) или сборника (место издания, год, страницы (от и до))). По авторефератам – фамилия, инициалы, полное название автореферата, после которого ставят двоеточие и указывают, на соискание какой степени и в какой области науки защищена диссертация, место издания, год, страницы.

Таблицы – каждая печатается на отдельной странице, нумеруется соответственно первому упоминанию ее в тексте и снабжается заголовком. Таблицы должны быть предоставлены в текстовом редакторе Microsoft Word (формат .doc). В тексте следует указать место таблицы и ее порядковый номер.

Иллюстрации (рисунки, фотографии, схемы, диаграммы) нумеруются, снабжаются подписями и представляются в виде отдельных растровых файлов (в формате .tif, .jpeg), а в тексте рукописи указывается место, где они должны быть размещены. Для оригиналов (бумажная версия) на обороте каждой иллюстрации ставится номер рисунка, фамилия автора и пометка «верх», «низ». Каждый рисунок должен иметь название и объяснение всех кривых, цифр, букв и прочих условных обозначений, размещенных под ним. В тексте статьи должна быть ссылка на конкретный рисунок, например (рис. 1).

Статьи, поступившие в редакцию, обязательно рецензируются. Если у рецензентов возникают вопросы, статья возвращается на доработку. Редакция оставляет за собой право внесения редакторских изменений в текст, не искажающих смысла статьи.

Материалы, не соответствующие предъявленным требованиям, к рассмотрению не принимаются.

Решение о публикации принимается редакционной коллегией журнала.

CONTENTS

BIOLOGY

Nemova N. N., Institute of Biology, Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Bogdan V. V., Institute of Biology, Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Shklyarevich G. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

AMPHIPODS AS INDICATORS OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC FACTORS' IMPACT ON COSTAL AREAS OF WHITE SEA

Summary: A comparative study of the morphometric characteristics, phospholipid and fatty acid composition of the White Sea intertidal amphipods was carried out. Complex studies of the biochemical composition of the lipids and morphometric features of the amphipods showed the degree of the organisms' response to pollutants in the conditions of the Far North.

Key words: Amphipods, lipids, size classes, xenobiotics, salinity, Kandalaksha Bay, White Sea. 7

Rozhkov S. P., Institute of Biology, Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Goryunov A. S., Institute of Biology, Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

CLUSTERIZATION OF PROTEIN MOLECULES IN WATER-SALT LISOZYME SOLUTIONS

Summary: Electron paramagnetic resonance technique was employed to reveal the nonmonotonous and reversible alterations of the average distance between spin-labeled lysozyme molecules (35 mg/mL). The changes depend on the NaCl concentration within the range of 0 to 3 mol/L and are parallel to the variations in the solution heterogeneity. The obtained results are interpreted based on the idea of continuous overcritical phase transitions and different types of protein clusters' development.

Key words: Dipole interaction of spin-labels, protein clusters, phase diagram 13

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

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

Markovskaya E. F., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Kurbatova Yu. A., A. N. Severtsev Institute of Ecology and Evolution (Moscow, Russian Federation)

WATER STATUS OF SOME PLANT SPECIES IN TROPICAL FOREST OF SOUTH VIETNAM DURING WET SEASON

Summary: Basic parameters of the water balance (the rate of transpiration, water deficit, and saturating water content), of the six understory and young undergrowth species of the tropical monsoonal forest during wet seasons were studied. We defined two groups of species. The first well-adapted group is characterized by the stability of the water balance, while the second group has unstable water status due to the competition with other species of this plant association.

Key words: Transpiration, water deficit, saturating water content, understory, young growth, monsoonal tropical forest. 19

Kantserova L. V., Institute of Biology, Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Kuznetsov O. L., Institute of Biology, Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

VEGETATION DYNAMICS OF FLOODED ROADSIDE HABITATS IN SOUTH KARELIA

Summary: Research results of the vegetation dynamics on flooded roadside habitats in South Karelia are presented. Based on the analysis of 200 sample plots, 10 associations of vegetation were revealed. Dynamic relations and main composition factors critical for the floral diversity (site fertility and soil humidity) were defined by the DCA ordination method.

Key words: Vegetation, roadside habitats, dynamic, Karelia 25

Sushchuk A. A., Institute of Biology, Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Gruzdeva L. I., Institute of Biology, Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

SOIL NEMATODE COMMUNITIES UNDER HEAVY METAL POLLUTION

Summary: Nematode fauna and nematode community structure of the urban soil containing high level of heavy metals were studied. High density of nematode population, increase in the number of the plant parasites, decrease in the fauna diversity, and maturity index of the nematode communities were determined as resulting effects of the heavy metal pollution. The possibility of using nematodes as indicators of the disturbed soil ecosystem is shown.

Key words: Soil nematodes, soil pollution, heavy metals, bioindication, nematode community structure 29

Davydov D. A., Polar-Alpine Botanical Garden Institute, Kola Science Center of RAS (Apatity, Murmansk region, Russian Federation)

Melekhin A. V., Polar-Alpine Botanical Garden Institute, Kola Science Center of RAS (Apatity, Murmansk region, Russian Federation)

Borovichev E. A., Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Center of RAS (Apatity, Murmansk region, Russian Federation)

CYANOPROKARYOTES, LICHENS AND LIVERWORTS OF AINOVY ISLANDS, KANDALAKSHA NATURE RESERVE (MURMANSK REGION)

Summary: The study conducted on Ainovy Islands (Kandalaksha State Reserve) revealed 6 species of cyanoprokaryotes, 14 species of liverworts, and 100 species of lichens. 7 species of lichens (*Absconditella lignicola* Vezda et Pisut, *Lecidea lapicida* (Ach.) Ach., *Lichenomphalia umbellifera* (L.: Fr.) Redhead et al., *Porpidia glaucophaea* (Korb.) Hertel et Knoph, *Rhizocarpon leptolepis* Anzi, *R. polycarpum* (Hepp) Th. Fr., *Verrucaria striatula* Wahlenb.), one type of liverworts (*Lo-phozia savicziae* Schljakov), and 11 species of cyanoprokaryotes are found at the Kandalaksha State Nature Reserve for the first time. Lichen *Absconditella lignicola* is new to Murmansk region. Species' diversity of the studied groups resulted

from the small size of the territory, low diversity of ecotopes, and tough competition with higher plants. On the other hand, diversity of the species is caused by the negative ornitogenic impact.

Key words: Murmansk Region, Kandalaksha State Nature Reserve, cyanoprokaryotes, lichens, liverworts, biodiversity. 33

MEDICAL SCIENCE

Poltorak A. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation), Sackler School of Biomedical Sciences, Tufts University (Boston, United States of America)

MECHANISMS OF INNATE IMMUNITY. MOUSE MODEL BASED STUDY

Summary: Determination and research of the numerous functions of the human genes is one of the main tasks of modern immunogenetics. Due to high homology level between murine and human genomes, an important role in solving this problem belongs to the mouse model, the use of which has increased owing to successful breeding of various inbred strains. The differences in immune responses in mouse strains have been repeatedly used for the research of immunologically competent genes. The review describes some of the most successful and well-known examples of the mice use for the study of innate immunity.

Key words: Innate immunity, mouse model, human genome, infections, inflammatory 39

Andreev V. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Zachinyaeva A. V., S. M. Kirov Military Medical Academy (Saint Petersburg, Russian Federation)

Remizova L. A., Saint Petersburg State University (Saint Petersburg, Russian Federation)

BACTERICIDAL AND FUNGICIDAL PROPERTIES OF ACETYLENIC QUATERNARY AMMONIUM SALTS

Summary: Disco-diffusion method revealed that monoacetylenic quaternary ammonium salts have weaker but more selective bactericidal and fungicidal activity against *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *Escherichia coli* ATCC 25922, *Proteus vulgaris*, *Proteus mirabilis*, *Penicillium spp.* and *Bacillus cereus* microorganisms than trioctylmethylammonium iodide and diacetylenic dioctylidihex-2-ynyl ammonium bromide, which do not contain a triple bond. Only trioctyl (hept-2-ynyl) ammonium iodide is active against *Saccharomyces cerevisiae*.

Key words: Monoacetylenic quaternary ammonium salts; antimicrobial, bactericidal and fungicidal activity; disinfection 47

Novikova L. A., North State Medical University (Archangelsk, Russian Federation)

Ishekov N. S., Institute of Natural Science and Biomedicine, North Arctic Federal University named after M. V. Lomonosov (Archangelsk, Russian Federation)

Solov'ev A. G., Institute of Mental Medicine, North State Medical University (Archangelsk, Russian Federation)

CHARACTERISTIC INTERRELATION FEATURES OF CARDIAC RHYTHM VARIABILITY, CENTRAL AND CEREBRAL HEMODYNAMICS IN BEER DRINKING PUPILS AGED 12–17

Summary: Interrelations of cardiac rhythm variability, central and cerebral hemodynamics in pupils aged 12–17 who drink beer are shown. An increase of interrelations with parameters of central hemodynamics and a decrease in cerebral hemodynamics are observed in students consuming beer. The increased number of interrelations with sympathetic activity and weakened parasympathetic effects of cardiac rhythm variability on parameters of central and cerebral hemodynamics were determined as resulting from beer drinking.

Key words: Beer, pupils, cardiac rhythm variability, central and cerebral hemodynamics 52

Ryabkova N. L., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Vezikova N. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

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

ACTIVITY OF INFLAMMATION IN RHEUMATOID ARTHRITIS IN CONDITIONS OF COMORBID INFECTIONS

Summary: Changes of acute-phase reactants, some types of cytokines, and neopterin in rheumatoid arthritis with comorbid infections were studied. Sanitation of the infectious focus was followed by the significant decrease in concentration of some acute-phase reactants and neopterin in serum. Comorbid infections induce superfluous cytokines and acute-phase reactants production in rheumatoid arthritis patient, thus influencing inflammation activity and stimulating development of the disease complications.

Key words: Rheumatoid arthritis, comorbid infections, cytokines, neopterin 58

GEOSCIENCES

Kuleshevich L. V., Institute of Geology, Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

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

MINERALS AND SOURCES OF RARE-EARTH ELEMENTS IN KARELIA

Summary: Rare-earth elements (Y and the lanthanoids La, Ce, Nd...) have been widely used in various industries in recent years. In the depths of the earth crust they form different aggregates of minerals (bastnaesite, parisite, monacite, xenotime, orthite and others), in alkaline rock complexes, in carbonatites, in high-alikali granites and their metasomatic haloes, and in pegmatites. Rare-earth elements are characteristic of gold occurrences too. The paper also deals with some non-conventional sources of REE and their anomalous concentrations, and with accessory minerals found in Karelian rocks and ores.

Key words: Rare-earth elements and minerals, bastnaesite, parisite, monacite, xenotime, Karelia. 62

Rybakov D. S., Institute of Geology, Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Slukovskiy Z. I., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF CONTAMINATED BOTTOM SEDIMENTS OF REGULATED URBAN RIVER

Summary: Characteristic features of chemical elements' accumulation in the subsurface layer of the bottom sediments found in a small water reservoir in the estuary of Lososinka River (Petrozavodsk) are researched. The zones of the riverbed hydrological regime transition into a relatively slow water exchange regime under conditions of massive inflow of municipal wastewater are studied.

Key words: Chemical elements, pollution, bottomsediments, correlation analysis 67

Sobisevich A. V., S. I. Vavilov Institute of Natural Science and Technology of RAS (Moscow, Russian Federation)

MAP OF OLONETS PROVINCE AS SOURCE OF SOCIOECONOMIC INFORMATION ABOUT TERRITORY OF KARELIA IN FIRST QUARTER OF XVIII CENTURY

Summary: The information value of the first Russian large-scale map of karelian territory is studied. «The map of Olonets uyezd», put together by the cartographer Akim Rleshnin in 1728, contains useful information on the social and economic infrastructure of the territory. To verify reliability of the map a comparative study of the reported information with various data from other written sources was carried out.

Key words: Karelia, Olonets uyezd, history, social history, economic history, old maps 74

AGRICULTURAL SCIENCE

Karpechko Yu. V., Northern Water Problem Institute, Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Myasnikova N. A., Northern Water Problem Institute, Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

CALCULATION OF FOREST PHYTOMASS

Summary: The influence of stands' productivity on foliage mass is quantified and correlation between foliage mass and root mass is shown. The existing methods of foliage mass calculation are reviewed. Formulae for calculations of foliage mass, total phytomass, and total phytomass increment for pine, spruce, and birch forests are suggested.

Key words: Phytomass, foliage mass, productivity class, phytomass increment 77

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

Tsarev A. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

GENETIC RESEARCH OF SUKACHEV'S LARCH *LARIX SUKACZEWII* DYL. IN WESTERN LIMIT OF ITS NATURAL AREAL

Summary: General characteristics, problems of systematization, and the areal of the *Larix sukaczewii* Dyl. within Karelia are presented. Data on the allocation of its valuable sites on the territories of the Republic and growth indicators of its natural population in Pudozhsky area are provided. Results of the larch selection inventory carried out by different organizations on artificial plantation sites are shown. Preservation and use of the allocated genetic resources of the species will allow creating high-priced plantations.

Key words: Sukachev's larch, selection, plus trees, plus stands, genetic reservations 82

ENGINEERING SCIENCE

Levin V. M., Mexican Oil Institute (Mexico City, Mexico)

Kanaun S. K., Technological Institute of Higher Education of Monterrey (Mexico City, Mexico)

GENERALIZED MAXWELL METHOD FOR CALCULATION OF EFFECTIVE CONDUCTIVITY OF MATRIX COMPOSITE MATERIALS

Summary: An anisotropic medium with an array of anisotropic ellipsoidal inclusions is considered. The generalized Maxwell method is used for calculation of the effective conductive properties of such medium. The predictions of the method are compared with the results of other self-consistent schemes known in literature.

Key words: Matrix composites, homogenization problem, self-consistent schemes, Maxwell's method, effective properties 87

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

Kuvshinov D. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

DECOMPOSITION ALGORITHM OF FINITE ELEMENT MODEL OF MECHANICAL SYSTEM WITH UNILATERAL CONTACTS

Summary: A mathematical model of the mechanical system with semi-coercive (unilateral) contacts is studied. The model is obtained as a physically reasonable description of contact interaction of the subsystems in the mechanical system. Efficiency of the algorithm for computerized model realization is studied.

Key words: Decomposition method, finite element method, contact interaction 91

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

Golshteyn G. Yu., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

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

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF LOGGING MACHINES' MAINTENANCE AND REPAIR

Summary: The article is concerned with technical approaches assessing scheduled and actual periodicity and effectiveness of technical maintenance. Technical approaches of assessment for factually completed repair of the logging machines are considered.

Key words: Parametric failure, mean operating time before parametric failure, confidence interval, confidence limit, maintenance rate, types and means of repair, maintenance rate, correction 93

Derbin V. M., Forest Engineering Institute, North Arctic Federal University named after M. V. Lomonosov (Archangelsk, Russian Federation)

Morozov I. V., Forest Engineering Institute, North Arctic Federal University named after M. V. Lomonosov (Archangelsk, Russian Federation)

INFLUENCE OF FOREST CERTIFICATION ON LOGGING SITES' DEVELOPMENT: CASE STUDY OF NON-COMMERCIAL FOREST LANDS

Summary: Reasons influencing development of voluntary forestlands' certification are provided. Possible types of biodiversity that are subject to preservation and maintenance under the standard forest certification are indicated. The influence of biodiversity preservation on the technology of forestlands' development is defined. The study was carried out on the example of non-commercial forestlands.

Key words: Voluntarily forest certification, non-commercial plots, timber-loading point, lot of land, skidding. 96

Skrypnik V. I., Karelian Scientific Research Center of Timber Complex, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

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

Ratmanova J. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

COST MINIMIZATION METHODS FOR PRIMARY TRANSPORTATION OF TIMBER

Summary: The article is concerned with transport cost minimization in the process of forest development by a forest logging enterprise. Economic efficiency of temporary logging roads' construction, extension of the spur roads within the bounds of the cutting area, and long-distance transport by skidders are assessed based on the obtained research results, which in turn allowed us to make conclusions and introduce recommendation.

Key words: Logging area, skidding lines, skidding, forest road, critical mass transportation, technology scheme development. . . 98

Rybnikov P. S., Voronezh State Forest Engineering Academy (Voronezh, Russian Federation)

OPTIMAL PLACEMENT OF LOADING POINTS ALONG LOGGING SPUR ROAD

Summary: Analytical dependence for calculation of optimal distance between loading points on the logging site in case of spur road deviation from the equilibrium location in the direction of the cargo traffic was studied. Analysis of the dependence shows that the angle of the logging spur road contiguity to the secondary logging road doesn't considerably influence the distance between loading points, while the logging spur road displacement causes dramatic influence on the distance between loading points of the secondary logging road in both directions

Key words: Logging spur road, loading point, skid trail, costs, placement 102

PHYSICS AND MATHEMATICS

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

Fofanov A. D., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES MODELLING

Summary: A modeling process of multi-walled «Russian doll» and «scroll» carbon nanotubes is introduced in the article. Some geometry features, especially interval between layers, according to which the existence of nanotubes with any configuration is impossible, are discussed. Acquisition of atom coordinates in «Russian doll» nanotubes is considered. All restrictions and features of single-walled carbon nanotubes construction are taken into account.

Key words: Carbon nanotubes, construction algorithm, structure, atom coordinates 107

Sidorova O. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Aleshina L. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Kalinkin A. M., I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Minerals, Kola Science Center of RAS (Apatity, Murmansk region, Russian Federation)

Kalinkina E. V., I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Minerals, Kola Science Center of RAS (Apatity, Murmansk region, Russian Federation)

SHORT-RANGE ORDER IN MECHANICALLY ACTIVATED TITANITES

Summary: It is shown, that the rate of titanite grinding is the same in the air and carbon dioxide. The number of oxygen neighbors of titanium atom decreases in milled samples in both atmospheres. The number of oxygen neighbors of calcium atom decreases only by grinding in the air.

Key words: Titanite, mechanoactivation, X-ray study, short-range order, amorphous state 112

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

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

SPECTRAL INVESTIGATION OF PLASMA FLOW

Summary: The device is developed for the realization of dependent discharge initiated by liquid microplasmatron. Measurements of its basic characteristics are performed.

Key words: Plasma, plasmatron, gas discharge, fuel preparation. 117

JUBILATIONS

To the 70th Birthday Anniversary of V. V. Lukanin

To the 80th Birthday Anniversary of I. N. Grigovich

To the 60th Birthday Anniversary of V. V. Starkov 119

INFO FOR THE AUTHORS 120