

Федеральное агентство по образованию

Научный журнал

**УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ
ПЕТРОЗАВОДСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

(продолжение журнала 1947–1975 гг.)

№ 8 (113). Декабрь, 2010

Серия: Естественные и технические науки

Главный редактор

A. B. Воронин, доктор технических наук, профессор

Зам. главного редактора

H. B. Дориакова, доктор медицинских наук, профессор

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

H. B. Ровенко, кандидат филологических наук,
ответственный секретарь журнала

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

Статьи журнала рецензируются.

Адрес редакции журнала

185910, Республика Карелия,

г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 272.

Тел. (8142) 76-97-11

E-mail: uchzap@mail.ru

uchzap.petrsu.ru

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)

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 (г. 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 (г. 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 (г. 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. И. СЫСУН

доктор физико-математических наук,
профессор (Петрозаводск)

Н. Н. НЕМОВА

доктор биологических наук,
профессор, член-корреспондент
РАН (Петрозаводск)

В. С. СЮНЁВ

доктор технических наук,
профессор (Петрозаводск)

В. И. ПАТЯКИН

доктор технических наук,
профессор (Санкт-Петербург)

Б. М. ШИРОКОВ

кандидат физико-математических наук,
доцент (Петрозаводск)

Е. И. РАТЬКОВА

ответственный секретарь серии (Петрозаводск)

В. В. ЩИПЦОВ

доктор геолого-минералогических наук,
профессор (Петрозаводск)

Federal Educational Agency

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

№ 8 (113). December, 2010

Natural & Engineering Sciences

Chief Editor

Anatoly V. Voronin, Doctor of Technical Sciences, Professor

Chief Deputy Editor

Natalia V. Dorshakova, Doctor of Medical Sciences, Professor

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

Nadezhda V. Rovenko, Candidate of Philological Sciences,
Executive Secretary

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.petrusu.ru

Editorial Council**V. BOLSHAKOV**

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

I. DUDANOV

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

V. ZAKHAROV

Doctor of Philological Sciences,
Professor (Moscow)

A. ISAYEV

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

N. MEL'NIKOV

Doctor of Technical Sciences,
Professor, the RAS Member (Apatiti)

I. MULLONEN

Doctor of Philological Sciences,
Professor (Petrozavodsk)

V. ORPHINSKY

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

PAAVO PELKONEN

Doctor of Technical Sciences, Professor (Joensuu, Finland)

I. ROMANOVSKY

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

E. SENYAVSKAYA

Doctor of Historical Sciences, Professor (Moscow)

HELENA SULKALA

Doctor of Philosophy,
Professor (Oulu, Finland)

L. TIMOFEEVA

Doctor of Political Sciences, Professor (Moscow)

A. TITOV

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

M. CHARKICH

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

R. YUSUPOV

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

**Editorial Board of the Series
“Natural & Engineering Sciences”****A. BOLGOV**

Doctor of Agricultural Sciences,
Professor (Petrozavodsk)

V. SISUN

Doctor of Physical-Mathematical Sciences,
Professor (Petrozavodsk)

N. NEMOVA

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

V. SYUNEV

Doctor of Physical-Mathematical Sciences,
Professor (Petrozavodsk)

V. PATYAKIN

Doctor of Technical Sciences,
Professor (St. Petersburg)

B. SHIROKOV

Candidate of Physical-Mathematical Sciences,
Docent (Petrozavodsk)

E. RAT'KOVA

Series Executive Secretary (Petrozavodsk)

V. SCHIPTSOV

Doctor of Geological-Mineralogical Sciences,
Professor (Petrozavodsk)

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЯ

Боровичев Е. А., Шалыгин С. С., Давыдов Д. А.	
Дополнение к флоре цианопрокариот и печеночников Лапландского заповедника (Мурманская область)	7
Геникова Н. В., Гнатюк Е. П., Крышень А. М., Лейбонен Е. Э.	
Разнообразие сосудистых растений лесных сообществ на автоморфных песчаных почвах в Карелии	11
Паршуков А. Н., Сидорова Н. А.	
Бактериальное самоочищение водоемов рыбохозяйственного назначения	14
Сергиенко Л. А., Кищенко И. Т.	
О морфологической изменчивости в роде Ложечница семейства Капустные (<i>Cochlearia L.</i> семейства <i>Brassicaceae</i>)	18
Хохлова Т. Ю.	
Черный дрозд <i>Turdus merula L.</i> у северо-восточной границы ареала: характеристика постювенальной линьки	21

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Кулешевич Л. В.	
Золотое оруденение в докембрийских щитах Земли (геодинамическая позиция, систематика и основные принципы изучения)	29

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

Карацурова Е. С., Спектор Е. Н., Разнатовский К. И.	
О смешанных инфекциях у женщин с аногенитальными бородавками	42
Польская И. И., Марусенко И. М., Везикова Н. Н.	
Проблема сочетания метаболического синдрома и подагры	45
Соколов А. Л., Зарипова Ю. Р., Мейгал А. Ю.	
Нейромышечный статус у здоровых детей первого года жизни по данным на кожной электромиографии	49

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

Евсеева Г. В., Яковлева К. Е., Голубева О. А.	
Продуктивность бобово-злаковых пастбищных агрофитоценозов в условиях Карелии	54
Бердников И. А., Ананьев В. А.	
Рост и качество плантационных культур соны обыкновенной на осушенных болотах	57
Вайс А. А.	
Толщина коры нижней части деревьев ели сибирской (<i>Picea sibirica</i>) в условиях Средней Сибири	60

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Орлов А. В., Кистерная М. В., Козлов В. А.	
Комплексная хронологическая атрибуция часовни Спаса Нерукотворного из заонежской деревни Вигово	64
Костюкевич В. М., Шиловский В. Н.	
Оценка оптимального уровня сервиса лесозаготовительных предприятий	71
Пошарников Ф. В., Усиков А. В.	
Снижение температурной напряженности в подшипниках скольжения с полимерными антифрикционными материалами	76
Шегельман И. Р., Кузнецов А. В., Баклагин В. Н., Будник П. В., Скрыпник В. И.	
Подготовка и переработка древесного сырья для получения щепы энергетического назначения (биотоплива)	79

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Варфоломеев А. Г., Кириков П. В., Рогов А. А.	
Вероятностный подход к сравнению расстояний между подмножествами конечного множества	83
Токарева Ю. С.	
Модифицированная арбитражная процедура по последнему предложению с комитетом	89
Щеголева Л. В.	
Задача построения графика работы нескольких передвижных установок	93
Логинов Д. В., Алешина Л. А., Фофанов А. Д.	
Модели строения областей когерентного рассеяния антрацита, стеклоуглерода и шунгита	99

Всероссийская школа-семинар для молодых ученых России по теме «Проблемы и приложения электроразрядной обработки в индустрии наносистем и наноматериалов».

Паль А. Ф., Рудавец А. Г., Рябинкин А. Н., Серов А. О.	
Осаждение тонких металлических пленок на поверхность микрочастиц в плазме магнетронного ВЧ-разряда	105
Сасин А. В.	
Формирование пленок в разряде в скрещенных полях	110

Юбилеи

К 75-летию со дня рождения Э. В. Ивантера	114
К 65-летию со дня рождения В. Н. Шиловского	116
Contents.....	117

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

Учредитель: ГОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет»

Редактор Г. А. Мехралиева. Корректор С. Л. Смирнова. Переводчик Н. К. Дмитриева. Дизайн, верстка И. Г. Лежнев.

Подписано в печать 22.12.2010. Формат 60x90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
10 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. (1-й завод – 140 экз.) Изд. № 247.

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

УДК 582.33, 582.232 (470.21)

ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ БОРОВИЧЕВ

инженер лаборатории флоры и растительных ресурсов Полярно-альпийского ботанического сада-института, Кольский научный центр РАН (г. Апатиты, Мурманская область)
borovichev@yandex.ru

СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ ШАЛЫГИН

инженер лаборатории флоры и растительных ресурсов Полярно-альпийского ботанического сада-института, Кольский научный центр РАН (г. Апатиты, Мурманская область)
nq.87@mail.ru

ДЕНИС АЛЕКСАНДРОВИЧ ДАВЫДОВ

кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории флоры и растительных ресурсов Полярно-альпийского ботанического сада-института, Кольский научный центр РАН (г. Апатиты, Мурманская область)
d_disa@mail.ru

**ДОПОЛНЕНИЕ К ФЛОРЕ ЦИАНОПРОКАРИОТ И ПЕЧЕНОЧНИКОВ
ЛАПЛАНДСКОГО ЗАПОВЕДНИКА (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)**

В результате обработки коллекций печеночников и цианопрокариот, собранных с территории Лапландского заповедника, выявлены девять видов печеночников и десять видов цианопрокариот, новых для этой территории. Находки печеночников *Radula lindenbergiana* и *Mannia pilosa* являются вторыми точками обнаружения в области, еще 6 – редкими видами,ключенными в Красную книгу Мурманской области. Все виды цианопрокариот, за исключением *Gloeocapsopsis pleurocapsoides*, для Мурманской области приводятся впервые.

Ключевые слова: Мурманская область, Лапландский заповедник, печеночники, цианопрокариоты, новые и редкие виды, распространение

Лапландский государственный природный биосферный заповедник (ЛЗ), расположенный в центральной части Мурманской области, был создан в 1930 году. Площадь заповедника составляет 278 400 га. Печеночники здесь изучаются с самого его основания, история их исследования была кратко рассмотрена нами ранее [3], изучение цианопрокариот началось лишь в 2005 году. Ранее были опубликованы данные о находках редких и новых для области видов печеночников и цианопрокариот с территории ЛЗ [4], [2], [3], [8], [14], [17]. Между тем совершенно ясно, что эти компоненты биоты заповедника остаются малоизученными.

Длительное время отдел Моховидные – *Bryophyta* – был разделен на три самостоятельных класса: листостебельные мхи – *Bryopsida*, антоцеротовые мхи – *Anthocerotopsida* и печеночные мхи – *Marchantiopsida*. По современным представлениям, растения с преобладанием в жизненном цикле гаметофита делятся на три отдела: мхи (*Bryophyta*), антоцеротовые (*Anthocerophyta*) и печеночники (*Marchantiophyta*) [16]. Несмотря на отчасти морфологическое сходство этих групп, они представляют собой обособленные друг от друга ветви филогенетического дерева [22], [29].

Цианопрокариоты долгое время по наличию оксигенного типа фотосинтеза относили к водорослям в ранге отдела *Cyanophyta*. В 1970-х годах R. Stanier и C. van Niel разработали теорию

эу- и прокариот, и синезеленые водоросли, имеющие прокариотический тип генома и ряд биохимических особенностей, были отнесены к бактериям (*Cyanobacteria*) [30]. В рамках современного подхода к изучению этой группы приравнивание организмов со столы продвинутым типом метаболизма к бактериям признано необоснованным, в связи с чем было предложено название *Cyanoprokaryota* [23], [26].

В настоящей статье мы рассматриваем цианопрокариоты и печеночники совместно, так как эти организмы приурочены к микроместообитаниям, в которых решающее значение имеют узко-экологические факторы среды.

В результате обработки коллекций, собранных в 2008–2009 годах на территории ЛЗ, были выявлены новые для Мурманской области цианопрокариоты и ранее не обнаруженные в заповеднике виды печеночников, известные из единичных точек в области. Подавляющее большинство этих видов редки не только в Мурманской области, но и в России, поэтому каждая новая точка их нахождения представляет значительный интерес, дополняя наши представления о распространении и экологии видов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сборы цианопрокариот и печеночников проводились маршрутно-рекогносцировочным мето-

дом в 2008–2009 годах. Точки сбора: (1) северо-западный макросклон Монче-тундры, оз. Вайкис – (1А) скалы юго-западной экспозиции ($68^{\circ}01'59''$ с. ш. – $32^{\circ}26'38''$ в. д., 370 м над уровнем моря), верхний предел пояса березовых криволесий; (1Б) скальные обнажения вдоль ручья Вайкис, впадающего в озеро, по обоим берегам, точка в среднем течении ниже водопада ($68^{\circ}01'28''$ с. ш. – $32^{\circ}26'2''$ в. д., 340 м над уровнем моря); (1В) сфагново-осоковое болото выше водопада Вайкис ($68^{\circ}01'28''$ с. ш. – $32^{\circ}26'92''$ в. д., 340 м над уровнем моря); (2) горный массив Нявка-тундра, правый берег ручья Холодный, ельник разнотравный черничный ($67^{\circ}55'04''$ с. ш. – $31^{\circ}58'58''$ в. д., 243 м над уровнем моря).

Названия таксонов цианопрокариот приводятся по системе J. Komárek, K. Anagnostidis [24], [25], [26], Anagnostidis, Komárek [19]. Названия печеночников даются в соответствии с последним списком печеночников России [27].

Ниже приводятся аннотированные списки цианопрокариот и печеночников, виды в них располагаются по алфавиту. Для каждого таксона приведены номер местонахождения, характеристика местообитания и номер образца. Кроме того, для печеночников указывается наличие в образцах репродуктивных структур: gem. – выводковые почки (gemmae), per. – периантиты (perianths), ant. – антеридии (antheridia), fem. rec. – архегониальные подставки (female receptacle). Для иллюстрации распространения приводится информация по ближайшим местонахождениям: для печеночников по Мурманской области, для цианопрокариот по России и миру. Образцы хранятся в гербарии ПАБСИ (КРАБГ).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Цианопрокариоты

Chroococcus tenax (Kirchn.) Hieron. – (1А), на скалах в условиях средней освещенности, в углублении наклонной плоскости глыбы (S106-2-09). Совместно с *Gloeocapsa sanguinea* (C. Ag.) Kütz., *Nostoc calcicola* Bréb. ex Born. et Flah., *Nostoc commune* Vauch. ex Born. et Flah. Этот монтаный циркумполярный вид известен с территории Карелии [10] и архипелага Шпицберген [32], [29].

C. varius A. Braun – (1Б), в углублении скалы на берегу ручья, в условиях средней освещенности, на вертикальной плоскости сырой кальций-содержащей глыбы (S55-2-09). Совместно с *Calothrix parietina* (Näg.) Thur. ex Born. et Flah., *Chroococcus cohaerens* (Bréb.) Näg., *Gloeocapsa compacta* Kütz., *G. sanguinea*, *Gloeocapsopsis magma* (Bréb.) Komárek et Anagn., *Stigonema mammosum* (Lyngb.) C. Ag. ex Born. et Flah., *S. ocellatum* (Dillwyn) Thur. Широко распространенный вид, в северных регионах отмечен в Швеции [32] и на архипелаге Шпицберген [7].

Gloeocapsa bituminosa (Bory) Kütz. – (1Б), там же на горизонтальной плоскости сырой кальций-

содержащей глыбы (S47-2-09). Совместно с *Aphanocapsa parietina* Näg., *Cyanothece aeruginosa* (Näg.) Komárek, *G. sanguinea*, *Synechococcus elongatus* (Näg.) Näg., *S. sciophilus* Skuja. Вид характеризуется арктомонтанным распространением, ближайшие местонахождения – архипелаг Шпицберген [28] и Полярный Урал [15].

G. violacea (Corda) Rabenh. – (1А), на скале около ручья в условиях высокой освещенности, на влажной наклонной поверхности глыбы (66-1-09). Совместно с *Aphanocapsa parietina*, *Chroococcus pallidus* (Näg.) Näg., *Gloeocapsa kuetzingiana* Näg., *Gloeocapsopsis magma*, *Nostoc commune*, *Stigonema ocellatum*. Этот вид имеет ограниченное распространение в Центральной Европе (Австрия, Германия, Чехия) [26].

Gloeocapsopsis pleurocapsoides (Nováček) Komárek et Anagn. – (1А), в небольшом углублении скалы в условиях низкой освещенности, на вертикальной поверхности влажной бескальциевой глыбы (S67-3-09). Совместно с *Chroococcus pallidus*, *Synechococcus elongatus*. Этот монтанный вид ранее был известен в России только в антропогенном местообитании из Мурманской области (г. Апатиты) [6].

Gloeothece fusco-lutea Näg. – (1А), в условиях средней освещенности в десятисантиметровом углублении скалы, на наклонной поверхности влажной кальцийсодержащей глыбы (S106-2-09). Совместно с *Chroococcus spelaeus* Erceg., *C. tenax* (Kirchn.) Hieron., *Cyanothece aeruginosa*, *Gloeocapsa bituminosa*. Известен из большого числа местонахождений бореальной зоны Европы [26].

G. palea (Kütz.) Rabenh. – (1Б), в долине ручья в условиях высокой освещенности, на сырой вертикальной поверхности глыбы в 1 м от воды (S152-1-09). Бореальный циркумполярный вид, ближайшие местонахождения известны из Швеции [32], Финляндии [26] и Таймыра [9].

Leptolyngbya compacta (Kütz) Kom. – (1А), между глыб в углублении в условиях низкой освещенности, на сырой вертикальной поверхности (S67-1-09). Совместно с *Chroococcus montanus* Hansg., *C. varius*, *Synechococcus elongatus*. Распространение ограничено рядом стран Центральной Европы [24].

Pseudanabaena minima (G. S. An) Anagn. – (1Б), в русле ручья, на сырой горизонтальной поверхности глыбы (S159-3-09). Малоизученный вид, известный только из Северной Кореи [24].

Schizothrix cuspidata (W. West et G. S. West) W. West et G. S. West – (1А), на вертикальной стене скалы, среди мохообразных (S62-4-09). Совместно с *Hapalosiphon fontinalis* (C. Ag.) Born. Вид спорадически встречается в Европе, Северной Америке и тропической Африке [24].

Печеночники

Athalamia hyalina (Sommerf.) S. Hatt. (fem. rec.) – (1Б), правый берег ручья между двумя небольшими водопадами, в основании скальной стенки, на мелкоземе (B36-15/a-09). В смеси с *Mannia pilosa* и *Peltolepis quadrata*. Этот обли-

гатный кальцефил известен с юго-запада области [18] и Ловозерских гор [1]. Вид внесен в Красную книгу Мурманской области (ККМО) с категорией 3 – редкий [12].

Mannia pilosa (Horn.) Frye et Clark (ant., fem. rec.) – (1Б), там же, в основании скальной стенки, на мелкоземе (B36-15/a-09). В смеси с *Athalamia hyalina* и *Peltolepis quadrata*. Приводится из нескольких местонахождений на юго-западе области [21]. ККМО: 3 – редкий вид [12].

Cephalozia connivens (Dicks.) Lindb. (per.) – (1Б), по краю заболоченной тропы (B25-12-09) в смеси с *Sphagnum* sp. и *Blepharostoma trichophyllum* (L.) Dumort. ККМО: бионадзор [12].

Porella platyphylla (L.) Pfeiff. – (1А), в глубокой расщелине, на скальных стенках (B47-12-09, 47-18-09), в чистых ковриках. Ранее этот неморальный вид указывался для Имандровской Лапландии [20] и юго-запада области (скалы Хирвеакаллио) [21]. ККМО: 3 – редкий вид [12].

Radula lindbergiana Gottsche ex Hartm. f. (ant., arch. – dioicous) – (1А), там же, в плотных ковриках (B48-12-09). Этот монтанный вид ранее был известен лишь из юго-запада области – ущелье Пюхякуру [21]. ККМО: 3 – редкий вид [12].

Scapania cuspiduligera (Nees) Müll. Frib (gem., per.) – (1А), скальная стенка с сочавшейся водой, основание скалы, на почве (B48-18-09) в смеси с *Lophoziopsis excisa* (Dicks.) Konstant. & Vilnet, *Ptilidium ciliare* (L.) Hampe, *Sphenolobus minutus* (Schreb.) Berggr.; (1Б) берег ручья, между двумя небольшими водопадами, в углублении скалы, на мелкоземе (B41-28б-09) и там же (B36-28-1-09), среди листостебельных мхов с примесью *Blepharostoma trichophyllum*. Этот аркто-монтанный вид известен в Хибинах [18], в Кандалакшском заповеднике (остров Великий) [13] и на юго-западе области (заказник Кутса) [18]. ККМО: редкий вид [12].

S. gymnostomophila Kaal. (per.) – (1А), укрытая расщелина скалы, в основании стенки, на мелкоземе (B44-21-09). В смеси с *Blepharostoma trichophyllum*, *Leiocolea heterocolpos* (Thed. ex Hartm.) H. Buch, *Plagiochila poreloides* (Torr. ex

Nees) Lindenb. Вид изредка встречается в области [11], [18].

S. spitsbergensis (Lindb.) Müll. Frib (gem.) – (1Б), левый берег ручья, в основании скальной стенки (B35-19/a-09, 35-18/a-09). В Мурманской области известен из нескольких точек [1], [3], [12], [18]. ККМО: 2 – уязвимый вид [12].

S. umbrosa (Schrad.) Dumort. (gem.) – (2), край полуразложившегося ствола ели (B3-16-08), в смеси с *Crossocalyx hellerianus* (Nees ex Lindenb.) Meyl. и *Cephalozia lunulifolia* (Dumort.) Dumort. Бореальный вид, ККМО: 3 – редкий вид [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подавляющее большинство новых для заповедника печеночников и цианопрокариот обнаружено на северо-восточном берегу оз. Вайкис. Данная территория рекомендована к включению в разряд ключевых ботанических территорий, что позволит надеяться на длительное существование естественных биоценозов без катастрофических вмешательств, к тому же водопад Вайкис привлекает внимание туристов и альпинистов. Кроме того, данные о редких видах необходимо учитывать при корректировке и оптимизации территории заповедника, а также при планировании в нем возможной рекреационной и хозяйственной деятельности, особенно принимая во внимание тот факт, что этот участок находится на периферии заповедника и в целом является более уязвимым.

БЛАГОДАРНОСТИ

Благодарим администрацию Лапландского заповедника за всевозможную помощь, оказанную при проведении работ. Благодарим А. И. Максимова и А. В. Сонину, чьи замечания позволили значительно улучшить статью.

Работа частично выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты № 09-04-00281, 09-04-10078, 10-04-01446.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белкина О. А., Константинова Н. А., Костица В. А. Флора высших растений Ловозерских гор. СПб.: Наука, 1991. 205 с.
2. Боровичев Е. А. К флоре печеночников Лапландского заповедника // Устойчивость экосистем и проблема сохранения биоразнообразия на севере: Материалы междунар. конф. Кировск, 2006. С. 32–37.
3. Боровичев Е. А. Новые находки печеночников в Мурманской области. 1 // Arctoa. 2008. № 17. С. 191.
4. Боровичев Е. А. Дополнение к флоре печеночников Лапландского заповедника (Мурманская область) // Новости систематики низших растений. 2009. Т. 43. С. 313–321.
5. Голлербах М. М., Коссинская Е. К., Полянский В. И. Синезеленые водоросли // Определитель пресноводных водорослей СССР. М.: Сов. наука, 1953. Вып. 2. 653 с.
6. Давыдов Д. А. Аннотированный список цианопрокариот Мурманской области. I. Chroococcales // Новости систематики низших растений. 2009. Т. 43. С. 50–62.
7. Давыдов Д. А. Цианопрокариоты, участвующие в зарастании моренных отложений в долине ледника Альдегонда (Западный Шпицберген) // Проблемы морской палеоэкологии и биогеографии в эпоху глобальных изменений: Материалы VII Всерос. школы по морской биологии и IX Междунар. науч. конф. «Комплексные исследования природы архипелага Шпицберген» (Мурманск, 12–14 ноября 2009 г.). М.: ГЕОС, 2009. С. 223–228.
8. Давыдов Д. А., Шалыгин С. С. Биоразнообразие цианопрокариот на особо охраняемых природных территориях Мурманской области // Сохранение биологического разнообразия наземных и морских экосистем в условиях высоких широт: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. Мурманск: МГПУ, 2009. С. 58–59.

9. Ермолаев В. И., Левадная Г. Д., Сафонова Т. А. Альгофлора водоемов окрестностей Таймырского стационара // Биогеоценозы Таймырской тундры и их продуктивность. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1971. С. 116–129.
10. Комулинен С. Ф., Чекрыжева Т. А., Висяnsкая И. Г. Альгофлора озер и рек Карелии. Таксономический состав и экология. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2006. 81 с.
11. Константинова Н. А. Печеночники Кандалакшского заповедника (острова и побережье Кандалакшского залива Белого моря). Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1997. 46 с.
12. Константинова Н. А. Печеночники // Красная книга Мурманской области. Мурманск: Кн. изд-во, 2003. С. 122–132.
13. Константинова Н. А. Дополнение к флоре печеночников Хибин (Мурманская область) // Актуальные проблемы сохранения биоразнообразия растительного и животного мира северной Фенноскандии и сопредельных территорий: Доклады Междунар. конф. М., 2005. С. 14–18.
14. Константинова Н. А., Боровичев Е. А. К флоре печеночников (*Hepaticae*) Мурманской области // Ботанический журнал. 2006. Т. 91. № 2. С. 322–328.
15. Патова Е. Н., Демина И. В. Водоросли водоемов Полярного Урала, не подверженных антропогенному воздействию // Биология внутренних вод. 2008. № 1. С. 58–67.
16. Потёмкин А. Д., Софронова Е. В. Печеночники и антоцеротовые России. Т. 1. СПб.; Якутск, 2009. 368 с.
17. Шалыгин С. С., Давыдов Д. А. Цианопрокариоты хребта Монче-тундра (Лапландский заповедник) // Водоросли: проблемы таксономии, экологии и использование в мониторинге: Материалы II Всерос. конф. Сыктывкар, 2009. С. 245–247. http://ib.komisc.ru/add/conf/alg0_2009.
18. Шляков Р. Н., Константинова Н. А. Конспект флоры мохообразных Мурманской области. Апатиты: Кн. изд-во, 1982. 222 с.
19. Anagnostidis K., Komárek J. Modern approach to the classification system of cyanophytes. 5-Stigonematales // Arch. Hydrobiol. 1990. Suppl. 86. H. 1. (Alg. Stud. 59). P. 1–73.
20. Arnell S. Illustrated moss flora of Fennoscandia. I. Hepaticae. Gleerups, Lund, Sweden, 1956. P. 1–308.
21. Auer A. V. Kuusamon mäksasammalkasviston aineisto // Ann. Bot. Soc. Vanamo. 1944. Vol. 21. № 1.
22. He-Nygren X., Juslen A., Ahonen I., Glenney D., Piippo S. Illuminating the evolutionary history of liverworts (Marchantiophyta) – towards a natural classification // Cladistics. 2006. 22. P. 1–31.
23. Komárek J. Taxonomy of cyanoprokaryotes // Hydrobot. Rep. (1991–1993). Acad. Si. Czech Rep. Inst. Bot., Set. Plant Ecol. Trebon. 1993. P. 6–8.
24. Komárek J., Anagnostidis K. Modern approach to the classification system of cyanophytes. 4 – Nostocales / Arch. Hydrobiol. 1989. Suppl. 82. H. 3. (Alg. Stud. 56). P. 247–345.
25. Komárek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota. I. Chroococcales / Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 19 (1). Jena; Stuttgart; Lübek; Ulm, 1998. 548 p.
26. Komárek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota. II. Oscillatoriaceae / Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 19 (2). Jena; Stuttgart; Lübek; Ulm, 2005. 759 p.
27. Konstantinova N. A., Bakalin V. A., Andreeva E. N., Bezgodov A. G., Borovichov E. A., Dulin M. V., Mamontov Yu. S. Checklist of liverworts (Marchantiophyta) of Russia // Arctoa. 2009. Vol. 18. P. 1–63.
28. Sculberg O. M. Part. 9. Terrestrial and limnic algae and cyanobacteria // Norsk Polarinst., Skr. 1996. Bd. 198. P. 383–395.
29. Shaw J., Renzaglia K. Phylogeny and diversification of bryophytes // Amer. J. Botany. 2004. Vol. 91. №. 10. P. 1557–1581.
30. Stanier R. Y., Cohen-Bazire G. Phototrophic Prokaryotes: The Cyanobacteria // M. P. Starr, J. L. Ingraham, A. Balows (Eds.) Annual Review of Microbiology – Palo Alto. CA: Annual Reviews Inc., 1977. P. 225–274.
31. Thomasson K. Zur planktonkunde Spitzbergens, 1 // Hydrobiologia. 1958. Vol. 12. № 2–3. P. 226–236.
32. Willen E. Checklist of Cyanobacteria in Sweden. Uppsala, 2001. 71 p.

УДК 581.55:581.93

НАДЕЖДА ВАСИЛЬЕВНА ГЕНИКОВА

аспирант Института леса, Карельский научный центр РАН
mylazydays@mail.ru

ЕЛЕНА ПЕТРОВНА ГНАТЮК

кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет
elenat@kryshen.net

АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ КРЫШЕНЬ

доктор биологических наук, старший научный сотрудник Института леса, главный научный сотрудник лаборатории лесовосстановления, Карельский научный центр РАН
alexander@kryshen.net

ЕКАТЕРИНА ЭЙНАРИЕВНА ЛЕЙБОНЕН

аспирант Института леса, Карельский научный центр РАН
eynari@mail.ru

РАЗНООБРАЗИЕ СОСУДИСТЫХ РАСТЕНИЙ ЛЕСНЫХ СООБЩЕСТВ НА АВТОМОРФНЫХ ПЕСЧАНЫХ ПОЧВАХ В КАРЕЛИИ

В статье приведен список видов сосудистых растений лесов на песчаных автоморфных почвах в Карелии (всего 81 вид) в пределах выделенных типов лесорастительных условий: *Pinus sylvestris* – *Cladonia* (13 видов), *Pinus sylvestris* – *Vaccinium vitis-idaea* (32 вида), *Pinus sylvestris* – *Vaccinium myrtillus* (77 видов). Показано наличие зависимости видового состава от типа лесорастительных условий и стадии развития лесного сообщества.

Ключевые слова: видовое разнообразие, сосудистые растения, сосновки, Карелия

На автоморфных песчаных почвах водораздельных пространств в Карелии выделены три типа лесорастительных условий [3]: 1) сухие олиготрофные с климаксовым сообществом сосновка лишайниковый (*Pinus sylvestris*–*Cladonia* (P.s.–Cl.)), 2) сухие мезоолиготрофные с климаксовым сообществом сосновка брусничный (*Pinus sylvestris*–*Vaccinium vitis-idaea* (P.s.–V.v-i.)), 3) свежие мезоолиготрофные с климаксовым сообществом сосновка черничный (*Pinus sylvestris*–*Vaccinium myrtillus* (P.s.–V.m.)). В пределах каждого типа лесорастительных условий по признакам древостоя выделены несколько стадий развития сообщества [3], которые в данной работе сгруппированы в три этапа: 1) молодняки (этап, начинающийся с момента формирования сокнувшего древостоя до завершения процесса самоизреживания загущенного древостоя); 2) средневозрастные (с момента завершения периода наиболее интенсивного самоизреживания древостоя и продолжающейся до момента естественного отмирания лиственных пород); 3) старовозрастные леса. В третий этап мы включили спелые, субклиматические и климатические сообщества, которые практически не отличаются по видовому составу. Объединение их, однако, объясняется главным образом ограниченным распространением на территории Карелии, то есть недостатком фактического материала по отдельным стадиям.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для анализа ценофлор [5] сосновок послужили геоботанические описания, выполненные

в 2001–2009 годах на всей территории Карелии и внесенные в базу данных «Местообитания Восточной Фенноскандии» [4], большей своей частью представленной в Интернете (<http://dl.krc.karelia.ru/collec.html?id=11>). Всего были проанализированы 115 описаний, из них в условиях P.s.–Cl. – 19, P.s.–V.v-i. – 41, P.s.–V.m. – 55; 57 описаний молодняков, средневозрастных – 23, старовозрастных – 35. Количество описаний отражает как распространение указанных типов леса на территории Карелии, так и их возрастную структуру [1], [6].

Видовой состав сообщества учитывался в пределах естественных границ исследуемого выдела, при этом минимальная площадь описываемых участков была не менее 400 м². Для данного исследования выбирались относительно однородные участки леса, не примыкающие к дорогам и другим антропогенно нарушенным местообитаниям, что особенно важно при исследовании естественных процессов формирования сообществ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Всего в исследуемых сообществах отмечен 81 вид сосудистых растений (см. таблицу) из 63 родов и 32 семейств, что составляет около 5 % от общего списка флоры сосудистых растений Карелии, включающей, согласно последним данным [2], 1814 видов. И это при том, что сосновки преобладают на территории Карелии и занимают более 64 % от покрытой растительностью площади [8].

Встречаемость видов сосудистых растений в лесных сообществах

Тип лесорастительных условий	P.s.-Cl.			P.s.-V.v-i.			P.s.-V.m.		
	M.	Cр.	Ст.	M.	Cр.	Ст.	M.	Cр.	Ст.
Этап развития	M.	Cр.	Ст.	M.	Cр.	Ст.	M.	Cр.	Ст.
<i>Agrostis tenuis</i>	-	-	-	+	-	-	-	+	-
<i>Alnus incana</i>	-	-	-	+	-	-	+	+	-
<i>Angelica sylvestris</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	-
<i>Antennaria dioica</i>	-	-	-	-	-	-	-	+	-
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	-	-	-	-	-	-	-	+	-
<i>Anthriscus sylvestris</i>	-	-	-	-	-	-	+	-	-
<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>	+	-	+	-	-	-	-	-	-
<i>Avenella flexuosa</i>	-	-	-	+	+	+	+	+	+
<i>Betula spp.</i>	+	-	+	+	+	+	+	+	+
<i>Carex canescens</i>	-	-	-	-	-	-	-	+	-
<i>C. digitata</i>	-	-	-	-	-	-	+	-	-
<i>C. epigeios</i>	-	-	-	-	-	-	+	-	-
<i>C. globularis</i>	-	-	-	+	-	-	+	+	-
<i>C. vaginata</i>	-	-	-	-	+	-	-	-	-
<i>Calamagrostis arundinacea</i>	-	-	-	+	-	-	+	+	+
<i>Calluna vulgaris</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Chamaedaphne calyculata</i>	-	-	+	-	-	-	-	-	-
<i>Chamaenerion angustifolium</i>	+	-	+	+	+	+	+	+	+
<i>Convallaria majalis</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	+
<i>Dactylis glomerata</i>	-	-	-	-	-	-	-	+	-
<i>Dactylorhiza maculata</i>	-	-	-	+	-	-	-	+	-
<i>Daphne mezereum</i>	-	-	-	-	-	-	+	-	-
<i>Diphasiastrum complanatum</i>	-	-	+	+	-	-	-	+	+
<i>Dryopteris carthusiana</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	+
<i>D. expansa</i>	-	-	-	-	-	-	+	-	-
<i>Empetrum nigrum s.l.</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Equisetum sylvaticum</i>	-	-	-	-	-	-	-	+	-
<i>Festuca ovina</i>	-	-	-	-	-	-	+	-	-
<i>Fragaria vesca</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	-
<i>Frangula alnus</i>	-	-	-	-	-	-	+	-	-
<i>Galium album</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	-
<i>Geranium sylvaticum</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	+
<i>Goodyera repens</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	-
<i>Gymnocarpium dryopteris</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	-
<i>Hieracium sylvaticum</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	-
<i>H. umbellatum</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	+
<i>Hypericum maculatum</i>	-	-	-	-	-	-	+	-	-
<i>Juniperus communis</i>	-	-	-	+	+	+	+	+	+
<i>Ledum palustre</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Linnaea borealis</i>	-	-	-	+	+	-	+	+	+
<i>Lonicera xylosteum</i>	-	-	-	-	-	-	+	-	-
<i>Luzula pilosa</i>	-	-	-	+	+	-	+	+	+
<i>Lycopodium annotinum</i>	-	-	-	+	+	-	+	+	+
<i>L. clavatum</i>	-	-	-	+	-	-	+	+	-
<i>Maianthemum bifolium</i>	-	-	-	+	-	-	+	+	+
<i>Melampyrum nemorosum</i>	-	-	-	-	-	-	+	-	-
<i>M. pratense</i>	-	-	+	+	+	+	+	+	+
<i>M. sylvaticum</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	-
<i>Melandrium dioicum</i>	-	-	-	-	-	-	+	-	-
<i>Melica nutans</i>	-	-	-	-	-	-	-	+	-
<i>Milium effusum</i>	-	-	-	-	-	-	-	+	-
<i>Moneses uniflora</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	-
<i>Orthilia secunda</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	+
<i>Oxalis acetosella</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	+
<i>Paris quadrifolia</i>	-	-	-	-	-	-	-	+	-
<i>Picea abies</i>	+	-	-	+	+	+	+	+	+

Тип лесорастительных условий	P.s.-Cl.			P.s.-V.v-i.			P.s.-V.m.		
	M.	Cр.	Ст.	M.	Cр.	Ст.	M.	Cр.	Ст.
Этап развития	M.	Cр.	Ст.	M.	Cр.	Ст.	M.	Cр.	Ст.
<i>Pinus sylvestris</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Platanthera bifolia</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	-
<i>Poa nemoralis</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	+
<i>Populus tremula</i>	-	-	-	+	+	+	+	+	+
<i>Potentilla erecta</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	-
<i>Pyrola chlorantha</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	+
<i>P. media</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	+
<i>P. rotundifolia</i>	-	-	-	+	-	-	+	+	-
<i>Rosa acicularis</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	-
<i>Rubus idaeus</i>	-	-	-	-	-	-	-	+	-
<i>R. saxatilis</i>	-	-	-	-	-	-	-	+	+
<i>Salix caprea</i>	-	-	-	+	+	+	+	+	+
<i>S. phyllicifolia</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	-
<i>Solidago virgaurea</i>	-	-	-	+	+	+	-	+	+
<i>Sorbus aucuparia</i>	-	-	-	+	+	+	+	+	+
<i>Trientalis europaea</i>	-	-	-	+	-	-	+	+	+
<i>Trommsdorffia maculata</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Vaccinium myrtillus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>V. uliginosum</i>	-	-	-	+	+	+	+	+	+
<i>V. vitis-idaea</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Veronica chamaedrys</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>V. officinalis</i>	-	-	-	-	-	-	-	+	-
<i>Viola mirabilis</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	+
<i>V. nemoralis</i>	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Всего видов	11	5	12	31	21	19	55	63	38

Примечание. М. – молодняки, Ср. – средневозрастные, Ст. – старовозрастные.

В типе леса P.s.-Cl. отмечено 14 видов сосудистых растений, в том числе в молодняках – 11, в средневозрастных – 5 (выполнено всего 2 описания по причине слабой представленности в Карелии), в старовозрастных – 12. Небольшое и почти равное количество видов в молодых сообществах и в лесах старше 100 лет можно объяснить тем, что условия P.s.-Cl. накладывают очень жесткие ограничения на формирование видового состава сообщества. 2 вида (*Arctostaphylos uva-ursi* и *Chamaedaphne calyculata*) встречены только в этом типе леса.

В условиях P.s.-V.v-i. выявлено уже 33 вида сосудистых растений, в том числе в молодняках – 31, в средневозрастных – 21, в старовозрастных – 19 видов. Для всех возрастных стадий P.s.-V.v-i. общими являются 17 видов (52 %). Разнообразие средневозрастных сообществ в брусличных условиях снижается на 10 видов. При переходе к старовозрастному этапу выпали еще 3 вида, но при этом добавились *Salix phyllicifolia* и *Carex vaginata*.

В условиях P.s.-V.m. всего обнаружено 78 видов сосудистых растений, в том числе в молодняках – 55, в средневозрастных – 63, в старовозрастных – 38. Аналогичная зависимость описана финскими исследователями для сообществ Южной Финляндии [7]. Видов, которые не встречены в других типах леса, здесь 38. Видовое богатство связано, с одной стороны, с отно-

сительно благоприятными почвенными условиями, а с другой стороны – с широким распространением условий P.s.–V.m. по всей территории Карелии [6]. При переходе от молодняков к средневозрастным сообществам 10 видов из 55 заменяются на 21 новый вид. С переходом на следующую возрастную стадию ценобиота теряет почти половину – 36 видов, пополняясь только 3 видами. На наш взгляд, очень важно отметить то, что абсолютное большинство (86 %) видов, появившихся в ценобиоте средневозрастного сообщества после стадии молодняка, не были обнаружены затем в старовозрастных черничных сосняках. Этот факт может указывать на специфичность условий каждой воз-

растной стадии и будет нами подробнее рассматриваться в последующих публикациях. Для всех возрастных стадий в условиях P.s.–V.m. общими являются 30 видов (38 % ценобиота).

Таким образом, исследования показали, что видовой состав сосудистых растений лесов на автоморфных песчаных почвах в целом определяется как спецификой лесорастительных условий, так и возрастом сообщества. Этот результат указывает на актуальность динамического подхода к классификации лесов. В то же время «предпочтения» отдельных видов неочевидны, и этот вопрос требует дополнительного эколого-ценотического и географического анализа ценобиота сосновых лесов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2007 г. / Отв. ред. А. Н. Громцев. Петрозаводск: Карелия, 2008. 304 с.
- Кравченко А. В. Конспект флоры Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 403 с.
- Крышень А. М. Типы лесорастительных условий на автоморфных почвах в Карелии // Ботан. журн. 2010. Т. 95. № 3. С. 281–297
- Крышень А. М., Полевой А. В., Гнатюк Е. П. и др. База данных местообитаний (биотопов) Карелии // Труды КарНЦ РАН. № 4. Сер. Биогеография. Вып. 9. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 3–10.
- Методы исследования ценобиот (на примере растительных сообществ вырубок Карелии): Учеб.-метод. пособие / Е. П. Гнатюк, А. М. Крышень. Петрозаводск, 2005. 68 с.
- Юровская Т. К., Елина Г. А. Восстановленная растительность Карелии на геоботанической и палеокартах. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. 136 с.
- Tontegi T. Species richness of boreal understorey forest vegetation in relation to site type and successional factors // Ann. Zool. Fennici. 1994. Vol. 31. P. 53–60.

АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ПАРШУКОВ

аспирант Института биологии, Карельский научный центр
РАН

eco-logya@mail.ru

НАТАЛЬЯ АНАТОЛЬЕВНА СИДОРОВА

кандидат биологических наук, доцент кафедры фармакологии и организации экономики фармации с курсами микробиологии и гигиены медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет

vanlis@petrsu.ru

БАКТЕРИАЛЬНОЕ САМООЧИЩЕНИЕ ВОДОЕМОВ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

На примере двух рыбных хозяйств Карелии, действующих в акватории озер Хедо и Муй, изучена динамика процессов водного самоочищения в период с осени 2008 по осень 2009 года. Показано, что процессы самоочищения активно шли осенью 2008 года с воде с температурой 11,7 °C при недавнем вводе в эксплуатацию рыбных хозяйств. К осени 2009 года на оз. Муй вследствие массового развития плесневых грибов были вытеснены бактерии, основные участники процессов водного самоочищения. На оз. Хедо нарушение самоочищения к осени 2009 года было следствием доминирования аллохтонной бактериальной флоры над автохтонной.

Ключевые слова: самоочищение, водная экосистема, органическое вещество, гетеротрофные бактерии, плесневые грибы

Аквакультура в России – одно из направлений рыбного хозяйства с целым рядом перспектив и преимуществ перед другими отраслями, производящими белки животного происхождения [8]. Современная ситуация в Карелии в области товарной аквакультуры выглядит особенно привлекательной и успешной. Достичь высоких результатов стало возможным благодаря умеренному климату, обилию водных ресурсов, а также богатому опыту в форелеводстве. В 2007 году в садках было выращено 9 300 т рыбы, а в перспективе эти объемы могут достигнуть показателей 20–25 тыс. т [5], [16].

Процесс искусственного выращивания рыбы сопровождается привнесением в водоем вместе с кормом и метаболитами рыб большого количества органических веществ [5], скорость деструкции которых зависит от многих факторов: водообмена, кислородного режима, среднегодовой температуры [9]. При низких температурах замедляются темпы самоочищения – одного из главных природных свойств любого водоема. Вследствие этого в окружающей среде происходит увеличение числа загрязнителей органического происхождения, определяющих высокую биогенную нагрузку. Кроме того, осадочный слой органики под садком будет являться резервуаром для возбудителей ряда инфекций [17], [18]. Дополнительным фактором, неблагоприятно влияющим на состояние экосистемы, является недоброкачественный корм. Высокая контаминация плесневыми грибами способствует накоплению в корме микотоксинов [4]. В водной среде плесневые грибы, контактирующие с кормом, при определенных гидрологических и гидрохимических условиях способны провоциро-

вать сукцессию и вытеснять водные бактерии – естественных участников самоочищения [3], [10], [11], [14]. Перечисленные природные процессы необратимо сказываются на стабильности водных экосистем.

Экстенсивное самоочищение происходит благодаря комплексному действию биотических и абиотических факторов, значимость которых варьирует и зависит от экологических условий конкретного водоема [6]. Поэтому изучение характера самоочищения можно считать актуальным для разработки мероприятий по предотвращению угрозы локального эвтрофирования и изменения эпизоотического статуса водоемов.

Целью настоящей работы явилось изучение самоочистительной способности водоемов Хедо и Муй с действующими в их акваториях форелевыми хозяйствами по количественному соотношению двух групп бактерий (дающих рост на питательной среде при 21 и 37 °C), а также по наличию споровых и санитарно-показательных микроорганизмов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В акватории водоемов Хедо и Муй (Муезерский район, Карелия) радужную форель разводят с 2008 года.

В качестве параметров гетеротрофного самоочищения мы использовали следующие.

1. Общее микробное число (ОМЧ) сапротрофных бактерий, дающих рост при 21 и 37 °C соответственно. Последние являются представителями аллохтонной микрофлоры и не должны присутствовать в водоеме или доминировать над бактериофлорой воды. Со-

отношение численности гетеротрофов разных температур инкубации позволяет судить об интенсивности процессов бактериального самоочищения. Эта разница более выражена при завершении процесса самоочищения (коэффициент соотношения указанных групп бактерий равен 4 и выше). В местах загрязнения хозяйствственно-бытовыми сточными водами численные значения обеих групп близки [12].

2. Количество спорообразующих бактерий.
3. Количество представителей семейства *Enterobacteriaceae*.

Санитарно-бактериологическая оценка водоемов проводилась в соответствии с основными действующими нормативными документами [2], [13], [12], [15]. Отбор проб бактериопланктона соответствовал стандартным методам бактериологических исследований. Для идентификации бактерий применяли общие (рыбопептонный агар) и дифференциально-диагностические среды (Эндо, Кесслера, висмут-сульфит агар, Плоскирева, Левина, Сабуро).

Все полученные данные подвергали статистической обработке с помощью программы StatGraphics Plus 2.1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ численности микрофлоры воды в период с июня 2008 года по сентябрь 2009-го позволил установить, что общее количество бактерий колебалось в широких пределах – от 0 до 2503 ± 152 КОЕ/мл (КОЕ – колониеобразующая единица) (табл. 1 и 2). Максимальное значение численности бактерий (2503 ± 152 КОЕ/мл) было в начале сентября 2008 года (оз. Хедо) при температуре воды $11,7^{\circ}\text{C}$ ($P < 0,05$), минимальное (0 КОЕ/мл) – в конце декабря 2008 года (озера Хедо и Муй) при температуре воды $1,5^{\circ}\text{C}$ и весной 2009 года (оз. Муй) при температуре воды $6,5^{\circ}\text{C}$ ($P = 0,05$).

Детальное изучение микробиологических данных, полученных в период с осени 2008 года по осень 2009-го, позволило зафиксировать максимальную численность бактерий на оз. Хедо для осенних периодов 2008–2009 годов при средней температуре воды $10,6^{\circ}\text{C}$ (рис. 1). Сапрофиты (2503 ± 152 КОЕ/мл), дающие рост при 21°C , доминировали над представителями аллохтонной микрофлоры (1502 ± 31 КОЕ/мл) ($P < 0,05$). Далее с похолоданием численность бактериопланктона постепенно снижалась, и процесс бактериального самоочищения замедлялся. К весне 2009 года численность гетеротрофных бактерий в водоеме снизилась до 35 ± 2 КОЕ/мл, а осенью 2009 года доминировала аллохтонная бактериофлора (концентрация бактериальных клеток, дающих рост при 21°C , составила 1789 ± 10 КОЕ/мл, а при $37^{\circ}\text{C} - 1971 \pm 4$ КОЕ/мл) ($P < 0,05$).

На оз. Муй максимальная численность бактерий (1520 ± 7 КОЕ/мл) была зафиксирована

осенью 2008 года при температуре воды $11,7^{\circ}\text{C}$, когда наиболее активно проходили процессы водного самоочищения (рис. 2). Но в отличие от оз. Хедо, где после зимне-весеннего периода численность бактериопланктона возросла с 0 до 1789 ± 10 КОЕ/мл, на оз. Муй численность бактерий после зимы 2008 года (температура воды – $1,4^{\circ}\text{C}$) к осени 2009-го выросла незначительно (температура воды – $8,2^{\circ}\text{C}$) – с 0 до 96 ± 6 КОЕ/мл ($P < 0,05$).

Таблица 1
Характеристика проб для микробиологического анализа (оз. Хедо)

Время отбора проб	Температура воды, $^{\circ}\text{C}$	Температура термостатирования, $^{\circ}\text{C}$	$M \pm m$, КОЕ/мл	P
осень 2008	$11,7$	37	1502 ± 31	0,0000
		21	2503 ± 152	0,0001
зима 2008	$1,5$	37	0	0,05
		21	50 ± 4	0,0003
весна 2009	$3,9$	37	19 ± 1	0,0000
		21	35 ± 2	0,0001
осень 2009	10	37	1971 ± 4	0,0000
		21	1789 ± 10	0,0000

Таблица 2
Характеристика проб для микробиологического анализа (оз. Муй)

Время отбора проб	Температура воды, $^{\circ}\text{C}$	Температура термостатирования, $^{\circ}\text{C}$	$M \pm m$, КОЕ/мл	P
осень 2008	$11,7$	37	862 ± 2	0,0000
		21	1520 ± 7	0,0000
зима 2008	$1,4$	37	0	0,0527
		21	98 ± 2	0,0000
весна 2009	$6,5$	37	0	–
		21	64 ± 7	0,0022
осень 2009	$8,2$	37	84 ± 7	0,0006
		21	96 ± 6	0,0001

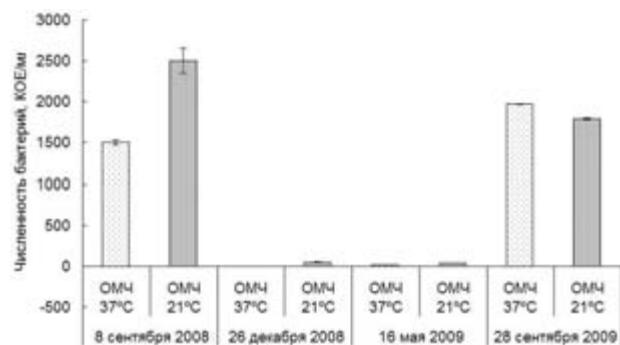


Рис. 1. Количественное соотношение основных групп бактерий (показателей процессов водного самоочищения) оз. Хедо

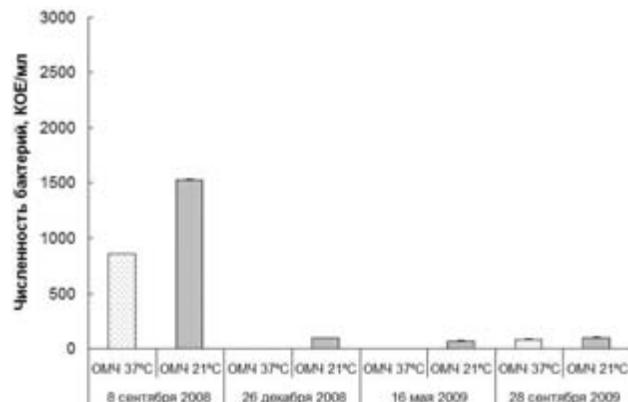


Рис. 2. Количественное соотношение основных групп бактерий (показателей процессов водного самоочищения) оз. Муй

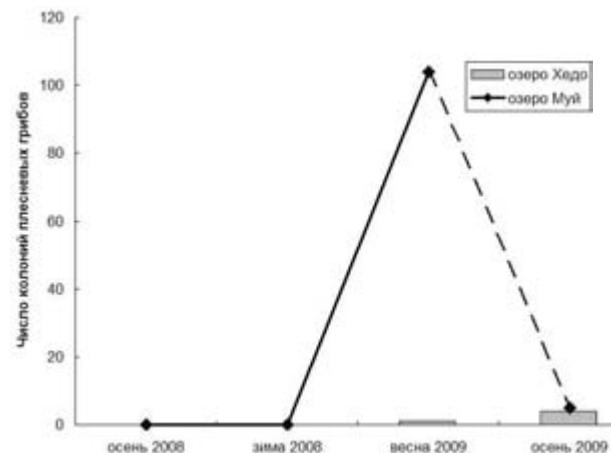


Рис. 3. Микологическая характеристика водоемов

Во всех пробах количество плесневых грибов варьировало от 1 до 104 колоний в 1 мл воды (рис. 3). Максимальное количество (104 колонии) зафиксировано весной 2009 года на оз. Муй при температуре воды 6,5 °С. К осени 2009 года наблюдалось постепенное снижение их численности. В пробах из оз. Хедо микроскопических грибов не выявлено.

Обязательным для исследования водоемов является определение споровых форм бактерий и санитарно-показательных микроорганизмов. Бактерии, способные к спорообразованию, были обнаружены только в пробах из оз. Муй в количестве 4 КОЕ/мл.

Из проб с оз. Хедо на среде Эндо были выделены 160 штаммов лактозопозитивных энтеробактерий, а из оз. Муй – 23 штамма. Среди выделенных бактерий из оз. Муй весной (в момент вспышки численности плесневых грибов) и осенью 2009 года была обнаружена *Enterobacter aerogenes*.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты изучения параметров гетеротрофного самоочищения на озерах Хедо и Муй позволили установить снижение его интенсивности к концу годового цикла наблюдений (соотношение

численности гетеротрофов разных температур инкубации либо выравнивается, либо представители аллохтонной микрофлоры, дающие рост при 37 °С, начинают доминировать над представителями автохтонной микрофлоры, дающими рост при 21 °С). Возможно, это связано с низкими внутриводоемными температурами и избытком органического вещества в виде недоброкачественного корма, поступающего от рыбных хозяйств.

Индикатором изменения скорости самоочищения на оз. Муй можно считать плесневые грибы, максимальная численность которых была зафиксирована весной 2009 года. Из литературных данных известно, что в жизни водоема плесневые грибы играют огромную роль [19]. Ряд исследователей отмечают, что характер взаимоотношений между эукариотическими и прокариотическими организмами может влиять на динамику численности последних [1]. Эти взаимоотношения построены в основном на трофических и метаболических связях, приводящих либо к взаимовыгодному сожительству, либо к антагонизму. В нашем случае на оз. Муй температура воды весной 2009 года была выше на 2,6 °С по сравнению с оз. Хедо, и рыбу на оз. Муй запустили в садки раньше, а значит, и кормов, основного источника грибов, привнесено было больше. В результате после такой сильной обсемененности грибами бактериальная микрофлора оз. Муй была полностью вытеснена и не смогла восстановиться к осени 2009 года так, как это произошло на оз. Хедо, где грибы не доминировали.

Полученные данные об общей численности бактериопланктона свидетельствуют о корреляции между количеством бактерий и температурой воды. Это подтверждает выводы С. И. Кузнецова [7] о том, что на конец периода летней стагнации приходится максимальное количество бактерий, а наименьшее – на зимний период. Однако следует учитывать, что для водоемов, на которых действуют рыбохозяйственные предприятия, дополнительным источником легкоусвояемых органических веществ, помимо планктона, являются комбикорма и продукты метаболизма рыб. Поэтому водоемы, в пределах которых действуют форелевые хозяйства, стоят особняком от природных водоемов, не подвергающихся подобному воздействию, и численность бактерий здесь может достигать особенно большой величины.

Обязательным для исследований водоемов является определение споровых форм бактерий и санитарно-показательных микроорганизмов. По С. И. Кузнецова [7], наибольшее количество бесспоровых форм встречается в эвтрофных озерах, их больше как в абсолютном количестве, так и по отношению к споровым формам. На оз. Хедо на всем протяжении отбора проб споровые бактерии отсутствовали. Из вышесказанного следует, что оз. Хедо подвергается усиленной эвтрофикации.

Крайне низкое количество споровых бактерий в пробах воды из оз. Муй также свидетель-

ствует об усиленных процессах эвтрофикации, а выделение *Enterobacter aerogenes* – о нарушениях процессов самоочищения и не вполне благополучном санитарном состоянии водоема.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основываясь на полученных данных, можно сказать, что в озерах Хедо и Муй наблюдается снижение интенсивности гетеротрофного самоочищения. Микробиологический мониторинг на озерах в период с осени 2008 года по осень 2009-го позволил установить изменения в структуре бактериальных сообществ. Эти изменения касаются соотношений численности групп бактерий, дающих рост на рыбопептонном агаре при температурах 21 и 37 °С. Из соотношений их численности было установлено, что процессы водного самоочищения активно проходили в акватории обоих хозяйств осенью 2008 года и были нарушены к осени 2009-го. Так, на оз. Хедо после низкой численности бактерий (от 0 до 50 ± 4 КОЕ/мл) в зимне-весенний период 2009 года к осени 2009-го эти показатели поднялись до высоких значений, но аллохтонная микрофлора осенью 2009 года стала доминировать над автохтонной (сапрофиты 21 °С – 1789 ± 10 КОЕ/мл, сапрофиты 37 °С – 1971 ± 4 КОЕ/мл) ($P < 0,05$). На оз. Муй из-за весенней вспышки численности плесневых грибов к осени 2009 года количество бактерий, дающих рост на рыбопептонном агаре при 21 °С, – основных участников процесса самоочищения, оказалось низ-

ким (сапрофиты 21 °С – 96 ± 6 КОЕ/мл, сапрофиты 37 °С – 84 ± 7 КОЕ/мл) ($P < 0,05$).

На озерах Хедо и Муй на всем протяжении отбора проб споровые бактерии либо отсутствовали, либо их было крайне мало (4 КОЕ/мл), что свидетельствует об усиленных процессах эвтрофикации водоемов.

Анализ литературы по данным фундаментальным вопросам экологии и микробиологии позволил подтвердить важность процессов естественного самоочищения и рационального использования водных ресурсов. Обладая уникальной особенностью, а именно способностью к самоочищению, водные экосистемы поддерживают гомеостаз на первоначальном уровне. Исключительная роль в самоочищении водоемов принадлежит всей совокупности живых организмов, населяющих данный водоем, и, конечно же, не последнее место здесь занимают гетеротрофные бактерии.

Поскольку форелеводство в той или иной степени влияет на процессы водного самоочищения, для сохранения благополучия среды и выращивания здоровой рыбы необходимо проводить систематический мониторинг с использованием микробиологических методов исследования в целях предупреждения необратимых нарушений в природных сообществах.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» № П 1299.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Глаголева О. П., Зенова Г. М., Звягинцева А. Г. Особенности функционирования водорослей в ассоциации с бактериями // Микробиология. 1992. Т. 61. Вып. 2. С. 256–261.
- Головина Н. А., Стрелков Ю. А., Воронин В. Н., Головин П. П., Евдокимова Е. Б., Юхименко Л. Н. Ихиопатология / Под ред. Н. А. Головиной, О. Н. Баузера. М.: Мир, 2003. 448 с.
- ГОСТ 17.1.3.07-82 Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков.
- Заварзин Г. А., Колотилова Н. Н. Введение в природоведческую микробиологию. М.: Книжный дом «Университет», 2001. 256 с.
- Китаев С. П., Ильмаст Н. В., Стерлигова О. П. Методы оценки биогенной нагрузки от форелевых ферм на водные экосистемы. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2006. 39 с.
- Копытов Ю. П., Миронов О. Г., Цуканов А. В. Влияние некоторых экофакторов на самоочищение морской воды от нефти // Водные ресурсы. 1982. № 2. С. 129–136.
- Кузнецова С. И. Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1970. 440 с.
- Мамонтов Ю. П. Аквакультура в России // Рыбное хозяйство. 2006. № 6. С. 16–19.
- Михеев В. П. Садковое выращивание товарной рыбы. М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1982. 216 с.
- Моисеенко Т. И. Влияние закисления на водные экосистемы // Экология. 2005. № 2. С. 110–119.
- МУК №13-4-2/1742 Методические указания по санитарно-бактериологической оценке рыбохозяйственных водоемов.
- МУК 4.2.1884-04 Методические указания. Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов.
- Остроумов С. А. Водная экосистема: крупноразмерный диверсифицированный биореактор с функцией самоочищения воды // Доклады РАН. 2000. Т. 374. № 3. 427–429.
- Остроумов С. А. О полифункциональной роли биоты в самоочищении водных экосистем // Экология. 2005. № 6. С. 452–459.
- РД 52.24.620-2000 Руководящий документ. Методические указания. Охрана природы. Гидросфера. Организация и функционирование подсистемы мониторинга антропогенного эвтрофирования пресноводных экосистем.
- Рыжков Л. П. Садковая аквакультура – программа действий // Садковое рыбоводство. Технология выращивания. Кормление рыб и сохранение их здоровья: Материалы науч. конф. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. С. 3–6.
- Engel I. and et. al. Presence of the fish pathogen *Vibrio salmonicida* in fish farm sediments // Appl. Environ. Microbiol. 1989. Nov. P. 2815–2818.
- Wakabayashi H. Effect of environmental conditions on the infec-tivity of *Flexibacter columnaris* to fish // J. of Fish Diseases. 1991. Vol. 14. P. 279–290.
- Weston W. H. The role of the aquatic fungi in hydrobiology. A symposium on hydrobiology. 1941. P. 129–151.

ЛЮДМИЛА АЛЕКСАНДРОВНА СЕРГИЕНКО

кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет

saltmarsh@mail.ru

ИВАН ТАРАСОВИЧ КИЩЕНКО

доктор биологических наук, профессор кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет

ivanki@karelia.ru

О МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ В РОДЕ ЛОЖЕЧНИЦА СЕМЕЙСТВА КАПУСТНЫЕ (*COCHLEARIA L.* СЕМЕЙСТВА *BRASSICACEAE*)

Виды рода Ложечница находятся в стадии активного видообразования из-за нестабильных условий существования на границе литорали и супралиторали. На основании изучения морфологических признаков растений и строения ультраструктуры поверхности семян приводится корректировка объема вида Ложечница. Обосновано выделение трех видов – *Cochlearia arctica*, *C. groenlandica* и *C. oblongifolia*.

Ключевые слова: приморская полоса, галофиты, эпидермис листовой пластинки, видообразование

ВВЕДЕНИЕ

Изменение разнообразия живой природы – основной и наиболее чувствительный показатель неблагоприятного воздействия человека на окружающую его природу. В последние годы Россия приступила к осуществлению проектов разработки нефтяных и газовых месторождений на шельфе Баренцева моря. При реализации таких масштабных проектов неизбежны значительные и длительные экологические нарушения в толще воды как в непосредственной близости от объектов нефтепромысла, так и в отдалении от них. В связи с этим побережья Российской Арктики и виды растений, произрастающие на них, несомненно, испытывают опасность из-за загрязнения прибрежных экосистем. Род *Cochlearia L.* (ложечница, ложечная трава) является ценозообразователем на приморской полосе всех приливных морей Арктики. На примере полиморфного рода *Cochlearia L.* видно, что этот вид как приспособившийся к суровым климатическим условиям мог выжить в эпохи оледенения на свободных ото льда участках, расположенных на прибрежной полосе Баренцева моря, и только потом распространиться на побережья Белого моря. Авторами обработок рода в различных сводках, флорах и конспектах объем видов, входящих в этот род, понимается по-разному [1], [3], [4], [5].

Под основным критерием вида мы понимаем специфичность его морфофизиологической реакции на изменение условий существования, выявляемую при изучении изменчивости вида в пространстве и во времени. Поэтому мы согласны с Р. В. Камелиным, который считает, что видообразование – это процесс глубокого и всестороннего приспособления одной или нескольких популя-

ций предкового вида к новой среде или образу жизни, связанный с изменением положения вида в биогеоценозе [2]. Применение в наших исследованиях морфолого-географического метода показало, что вид – это не только (и не столько) определенный тип структуры и функции, а прежде всего множество особей, объединенных в целостное природное образование [6].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для установления более четкого объема арктического циркумполярного рода *Cochlearia L.* кроме личной коллекции (120 листов) нами были изучены гербарные образцы (240 листов) из коллекции Ботанического института им. В. Л. Комарова РАН, а также немонтированные сборы сотрудников лаборатории растительности Крайнего Севера (120 листов), сделаны препараты ультраструктуры поверхности семян (42 препарата), 38 микрофотографий поверхности семени. Помимо анализа морфометрических признаков (характеристики побегов, формы и размера пластинки листа, характера соцветия, формы, цвета и типов поверхности семян) с помощью сканирующего микроскопа JSM-35 были изучены наиболее устойчивые и консервативные признаки генеративной сферы – строение поверхности семени.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Р. Элвен в проекте Панарктическая флора [4] в роде *Cochlearia L.* принимает следующие виды и подвиды (написание авторов таксонов дается в редакции Элвена).

1. *Cochlearia officinalis* L. 1753, Sp. Pl. : 647 – атлантическое побережье Европы, северо-

- европейское побережье Норвегии и России с тремя подвидами: 1) *Cochlearia officinalis* L. subsp. *officinalis* – двулетник, галофильная раса вида, 2) *Cochlearia officinalis* L. subsp. *norvegica* Nordal & Stabbetorp – двулетник, слабогалофильная раса вида, 3) *Cochlearia officinalis* L. subsp. *integrifolia* (Hartm.) Nordal & Stabbetorp – многолетнее хионофильное, негалофитное растение, предпочитающее переувлажненные местообитания.
2. *Cochlearia groenlandica* L. Sp. Pl. 647 (1753) – *Cochlearia officinalis* L. subsp. *groenlandica* (L.) A. E. Porsild, 1957, Bull. Natl. Mus. Canada 146: 92. – циркумполярный арктический вид, облигатный галофит.
 3. *Cochlearia lenensis* Adams ex Fisch., in: DC. 1821, Syst. Nat. 2: 367. Вид описан из Северной Якутии, из эстуария р. Лены. Слабый галофит.
 4. *Cochlearia arctica* Schlecht. in: DC., 1927, Syst. Nat. 2: 367 – *Cochlearia officinalis* L. subsp. *arctica* (Schlecht.) Hultén, 1928, Fl. Kamtchatka 2: 147, с двумя подвидами: *Cochlearia arctica* Schlecht. subsp. *arctica* и *Cochlearia arctica* Schlecht. subsp. *oblongifolia* (DC.) V. V. Petrovsky, 1975, в Аркт. фл. СССР, 7: 159. – *Cochlearia oblongifolia* DC., 1821, Syst. Nat. 2: 363 – *Cochlearia officinalis* L. subsp. *oblongifolia* (DC.) Hultén, 1928, Fl. Kamtchatka 2: 147. – оба подвида являются облигатными галофитами.

По данным В. В. Петровского, род *Cochlearia* L. представлен на побережье Европейской Арктики двумя близкородственными видами: *C. groenlandica* L. и *C. arctica* Schlecht. ex DC, состоящим из 2 подвидов: subsp. *arctica* и subsp. *oblongifolia* (DC.) Petrovsky [1].

А. В. Кравченко в «Конспекте флоры Карелии» для рода *Cochlearia* L. принимает только 2 приморских вида – *C. arctica* Schlecht. ex DC. [*C. officinalis* subsp. *arctica* (Schlecht. ex DC.) Hult., *C. officinalis* subsp. *norvegica* Nordal. & Stabbetore] с распространением на всем побережье Карелии и *Cochlearia officinalis* L. (*C. groenlandica* aust. non L.) со спорадическим распространением на севере Карелии [3].

Проведенное нами исследование этих таксонов (морфометрический анализ признаков ряда органов растений, просмотр гербарного материала из Российской и зарубежной Арктики, изучение живых растений в Арктике в различных экологических условиях, исследование ультраструктуры поверхности семян) привело к выводу о недостаточности признаков названных растений, использованных в «Арктической флоре СССР», в которой основной упор сделан на форму роста и структуру вегетативных органов. Между тем основные различия между растениями состоят в строении чашелистиков, плодов и семян, а также в ультраструктуре поверхности семян.

Приводим краткую синонимику принимаемых нами видов, краткое описание отличительных признаков и данные по их экологии.

1. *C. arctica* Schlecht. ex DC. 1821, Reg. Veg. Syst. Nat. 2 : 367; Н. Буш, 1939, во Фл. СССР, 8 : 568; Побед. 1969, Новости сист. высш. раст. 6: 89; Петровский, 1975, в Аркт. фл. СССР, 7 : 158. – *C. lenensis* Adams et Fisch. 1821, in DC. Reg. Veg. Syst. Nat. 2 : 367; Н. Буш, 1939, цит. соч. : 569. – *C. officinalis* subsp. *arctica* (Schlecht.) Hult. 1928, Fl. Kamtch. 2: 147; id. 1968, Fl. Al. : 499.

Мезогалофит, характерный для растительных сообществ приморской полосы, выносит сильное кратковременное хлоридное засоление почвы на первичных маршах, отмечается также в умеренно увлажненных щебнистых тундрах на известьсодержащих субстратах. У *C. arctica* чашелистики лиловатые, стручочки невздутые, семена яйцевидные, рыжеватые, в числе 14–16; ультраструктура поверхности семени – в виде мелкоскладчатых конических, плотно (но не рядами) расположенных пологих бугорков с углублением на верхушке (рис. 1).

2. *C. oblongifolia* DC. 1821, Reg. Veg. Syst. Nat. 2 : 363; Н. Буш, 1939, во Фл. СССР, 8 : 569. – *C. arctica* subsp. *oblongifolia* (DC.) Petrovsky, 1975, в Аркт. фл. СССР, 7: 158.

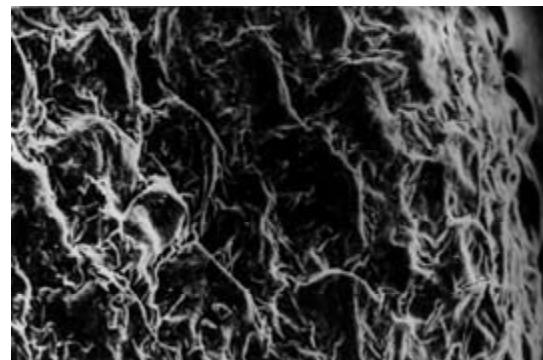


Рис. 1. Микроструктура поверхности семени *Cochlearia arctica* Schlecht. ex DC. По образцу: восточное побережье

Чукотского п-ова, окрестности пос. Янракыннат, песчано-галечная коса Большого острова. С. А. Баландин, Л. А. Сергиенко, Б. А. Юрцев. 26.VII.1978. Сканирующий микроскоп JSM-35, x240

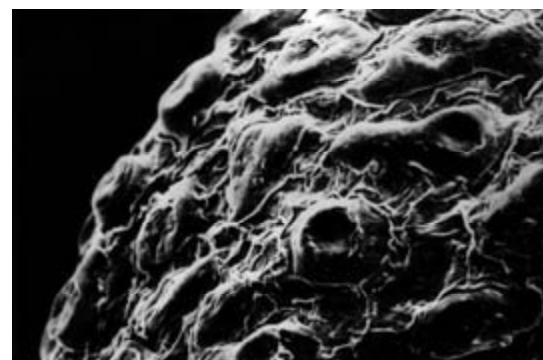


Рис. 2. Микроструктура поверхности семени *Cochlearia oblongifolia* DC. По образцу: северо-восточное побережье Чукотского п-ова, устье р. Неттевеем в 15 км западнее мыса Сердце-Камень, песчано-галечная отмель в устье, № 413, 23.VIII.1976. Сканирующий микроскоп JSM-35, x240

Мезогалофит, растущий на приморских косах и барах, по берегам непроточных засоленных озер на вторичных маршах, реже в зоне контакта первичных маршей с коренным берегом, отмечается также на береговых торфах. У *C. oblongifolia* чашелистики почти прозрачные, стручочки вздутие, семена яйцевидные, реже яйцевидно-шаровидные, темнобурые, в числе 10–15; ультраструктура поверхности семени в виде мелкоскладчатых, параллельно расположенных рядов вытянутых пологих выступов без углубления на верхушке (рис. 2).

3. *C. groenlandica* L. 1753, Sp. Pl. : 647; Н. Буш, 1939, во Фл. СССР, 8 : 570; Петровский, 1975, в Аркт. фл. СССР, 7 : 160. – *C. officinalis* L. subsp. *arctica* (Schlecht.) Hult. 1928, Fl. Kamtch. 2 : 147, р. р.; id. 1968, Fl. Al. : 499, р. р. – *C. polaris* Pobed. 1969, Новости сист. высш. раст. 6 : 99.

Эвгалафит, выносящий высокую степень хлоридного и хлоридно-сульфатного засоления почвы; растет в зоне активной седиментации на вторичных маршах приморских баров и кос, на щебнистом субстрате клифов и птичьих базаров. У *C. Groenlandica* чашелистики беловатые с широкими прозрачными краями, стручочки вздутие, семена шаровидные, реже яйцевидно-шаровидные, светло-рыжие, в числе 8–12; ультраструктура поверхности

семени имеет вид очень плотно расположенных мелкоскладчатых чешуек (рис. 3).

Все названные признаки рассмотренных таксонов являются выдержаными, что дает нам основание считать [5] *C. oblongifolia* самостоятельным видом, а не подвидом *C. arctica*.

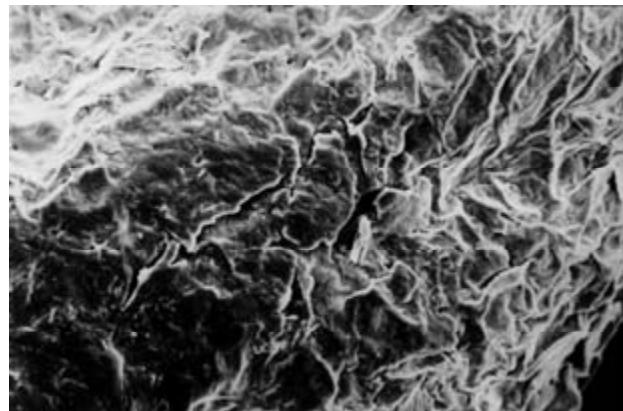


Рис. 3. Микроструктура поверхности семени *Cochlearia groenlandica* L. По образцу: горловина Анадырского лимана, земля Гека, песчано-галечная коса по внутреннему берегу лагуны Толи, 8.VIII.1978, Л. А. Сергиенко, Т. В. Плиева, Сканирующий микроскоп JSM-35, x240

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арктическая флора СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1975. Т. 7. С. 155–162.
2. Камелин Р. В. Лекции по систематике растений. Главы теоретической систематики растений. Барнаул: Азбука, 2004. 228 с.
3. Кравченко А. В. Конспект флоры Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 403 с.
4. Проект Панарктическая флора [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.binran.ru/projects/paf/index.htm>.
5. Сергиенко Л. А. Флора и растительность побережий Арктики и сопредельных территорий. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. 225 с.
6. Скворцов А. К. Становление современного понимания вида // Совещание по объему вида и внутривидовой систематике. Л.: Наука, 1967. С. 16–18.

ТАТЬЯНА ЮРЬЕВНА ХОХЛОВА

кандидат биологических наук, доцент, Институт биологии,
Карельский научный центр РАН
hokhlova@karelia.ru

ЧЕРНЫЙ ДРОЗД *TURDUS MERULA L.* У СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ГРАНИЦЫ АРЕАЛА: ХАРАКТЕРИСТИКА ПОСТЮВЕНАЛЬНОЙ ЛИНЬКИ

В статье детально описан ход постювенальной линьки (5 стадий) и ее особенности (объем, сроки и пр.) у черных дроздов в Карелии по данным отловов 1978–2007 годов ($n = 1034$). Установлено, что у разных особей она начинается 22.07–16.09 в возрасте 70–45 дней и продолжается 70–56, в среднем 65 дней. Из-за поздних сроков линьки большинство птиц частично совмещают ее с осенней миграцией. Выявлена тенденция к медленному сдвигу линьки на более ранние сроки, что можно рассматривать как свидетельство постепенной адаптации вида к северным условиям.

Ключевые слова: черный дрозд, *Turdus merula*, постювенальная линька, северо-восточная граница ареала, адаптации

Черный дрозд номинативного подвида (*T. merula merula L.*) – представитель фауны европейских широколиственных лесов, более 150 лет неуклонно расширяющий границы гнездовой области в северо-восточном направлении [36], [35], [9], [15], [17], [18], [21] и др. Движение на север сопровождается значительными сдвигами в годовом цикле птиц, в том числе включением в него регулярных сезонных миграций. Это резко сокращает возможности осуществления в гнездовой области смены оперения – обязательной фазы годового цикла, которая в центральных популяциях вида заканчивается только к концу октября [28].

Вместе с тем линька – наиболее гибкий процесс из всех явлений жизненного цикла птиц: за счет его модификаций происходит «подгонка» годовых циклов птиц к условиям регионов с разными климатическими и фотопериодическими параметрами [3], [4], [36], [31]. Регуляция линьки осуществляется совместным действием двух механизмов фотопериодического контроля – эндогенного и экзогенного. Степень влияния каждого из них варьирует как в разных популяциях одного вида, так и у разных видов, каждый из которых сформировался в процессе приспособления к жизни в определенном широтном диапазоне [5], [31], [13]. Межвидовые различия в линьке проявляются в ее сроках, объеме, последовательности, длительности и особенностях, зависящих от местоположения птиц в пределах ареала [28], [27], [29], [31].

В предлагаемой статье представлена подробная характеристика постювенальной линьки черного дрозда в условиях Карелии. Аналогичное описание смены оперения белобровика – вида, высоко адаптированного к жизни в северо-таежной зоне, опубликовано ранее [24]. Сравнение линьки этих близкородственных видов, принадлежащих разным фаунистическим комплексам, позволило выявить ряд различий и особенностей, которые в условиях данного региона обеспечивают преимущество аборигенному виду

и препятствуют продвижению на север выходца из южных широт.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В работе проанализированы данные исследований и отловов птиц, проводившихся в разных точках Южной Карелии в 1972–2008 годах. Основная часть материалов собрана в 1979–2007 годах в Восточном Приладожье на Ладожском стационаре Института биологии КарНЦ РАН «Маячино», где велись многолетние экологопопуляционные исследования с применением массовых отловов и индивидуального мечения птиц [8], [6], [7]. Дополнительно использованы данные отловов птиц в заповеднике «Кивач» (Центральная Карелия, 1981–2008), на Педасельгском стационаре КарНЦ РАН (Прионежье, 1974–1977) и Ладожском стационаре ЛГУ (Гумбарицы, 1970–1981).

Всего для характеристики постювенальной линьки использовано 970 описаний состояния оперения при первых и повторных отловах 607 птиц неизвестного происхождения и 64 описания 44 местных сеголетков с точно известным возрастом, а также данные наблюдений за ходом линьки оперения 7 птенцов, взятых в вольере. При оценке процесса формирования ювенального наряда использованы данные ежедневных наблюдений за ростом и развитием птенцов из 5 гнезд и 1–2-кратные описания гнездового наряда птенцов с известной датой вылупления из 89 гнезд. Состояние оперения пойманых дроздов описывали по методике А. Р. Гагинской и Т. А. Рымкевич [2]. Наименования отдельных участков оперения приводятся в тексте с использованием принятых сокращений [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сроки и ход постювенальной линьки птиц во многом зависят от сроков репродукции популя-

ции. На территории Карелии черные дрозды регулярно встречаются в течение 8–9 месяцев – с марта по ноябрь. Откладка яиц в годы с ранней весной начинается в последней декаде апреля (22.04.2007), с поздней – только в середине мая (17.05.1978). Последние кладки появляются в конце июня – начале июля (14.07.2003). Таким образом, в зависимости от характера погоды продолжительность периода откладки яиц может варьировать от 6 до 9 недель, но даже в годы с поздним началом гнездования птицы имеют возможность осуществить 2 цикла размножения. И хотя не все пары выкармливают по два выводка, благодаря большому количеству повторных кладок, возобновленных после гибели части ранних гнезд, доля поздних выводков, вылетающих в июле – августе, превышает 35 % (рис. 1).

В ранних гнездах черного дрозда птенцы появляются в первой декаде мая при увеличивающемся световом дне, в последних – только в конце июля в период его быстрого сокращения. Разрыв в возрасте птенцов с предельными сроками вылупления составляет более 2,5 месяца. Это сказывается на всех параметрах ювенальной линьки, и прежде всего на возрасте, в котором начинается выпадение ювенального пера. У птенцов большинства воробыниных птиц он значительно меньше при поздних сроках рождения, чем при ранних, за счет чего происходит частичная синхронизация годовых циклов птиц одной популяции [5], [14], [12], [31].

Ювенальный наряд черных дроздов, как и других воробыниных, начинает формироваться на первой неделе жизни. Еще в гнезде оформляются большинство птерилий, перо на которых начинает расти в возрасте от 3–4 (брюшная, спинная) до 6–7 дней (средние нижние кроющие крыла). Черные дрозды обычно начинают насиживание задолго до завершения кладок, из-за чего вылупление птенцов иногда растягивается до 3–3,5 суток. Различия в развитии птенцов сохраняются до самого вылета, нередко увеличиваясь при неблагоприятных условиях из-за отставания в росте наиболее слабых.

К моменту вылета птенцов из гнезд (13–16-й день) их оперение уже достаточно развито для того, чтобы они могли взлетать с небольшим набором высоты. Однако окончательное формирование ювенального наряда заканчивается значительно позже.

Полное отрастание части контурного пера, заложенного в гнездовой период, завершается к 15–20 дням. Рулевые и маховые заканчивают рост и освобождаются от остатков роговых чехликов к 38–43 дням. Только после вылета из гнезда начинает оперяться боковой отдел брюшной птерилии, появляются большие нижние кроющие первостепенных и второстепенных маховых (БНКПМ, БНКВМ), верхний ряд нижних маргинальных кроющих (НКмарг), нижние кроющие плеча (НКпл); зарастают еще неоперенные участки в верхней проксимальной части

пропотагиальной складки и верхней наружной части голени; отрастают дополнительные ряды перьев на брюшной, спинной, плечевой, головной (ушной отдел) и анальной птерилиях.

Из перечисленных категорий контурных перьев только БНКПМ и БНКВМ закладываются в определенный период. Их рост начинается в 17–27 дней и заканчивается в 32–43 дня одновременно или чуть позднее, чем у маховых и рулевых перьев. Но у некоторых особей отдельные перья нижних кроющих могут появляться позднее и завершают рост только к середине линьки. Сроки и последовательность зарастания остальных участков сильно варьируют, но в целом прослеживается тенденция к сокращению периода формирования их первой генерации к концу сезона. Так, у молодых птиц, появившихся в ранние или нормальные сроки, разрыв между началом роста БНКПМ, БНКВМ и других дополнительных участков оперения больше: в возрасте 40–50 дней после полного отрастания нижних кроющих крыла у них наступает пауза, когда не заметно каких-либо признаков отрастания пера других категорий. У птенцов из поздних выводков такой перерыв отсутствует.

Лишь у незначительной части птиц формирование ювенального оперения заканчивается до линьки, у многих происходит его совмещение с начальными этапами смены пера (I–II стадии), у единиц оно захватывает также III–IV стадии (рис. 2). При этом четкой связи между степенью перекрывания этих процессов и сроками линьки не выявлено.

Процесс зарастания аптерий очень индивидуален. Обычно он начинается незадолго до линьки или вскоре после ее начала. В отдельных случаях спинная и боковая аптерии могут оставаться неопущенными до середины II стадии, а брюшная – до III–IV стадии. В наиболее типичном варианте сначала появляется пух на спинном и боковом участках, позднее – на брюшном. Зарастание боковой аптерии может завершиться полностью уже к середине I стадии линьки, спинной – в начале III, брюшной – только на V. Рост пуха на всех трех аптериях заканчивается лишь к концу линьки.

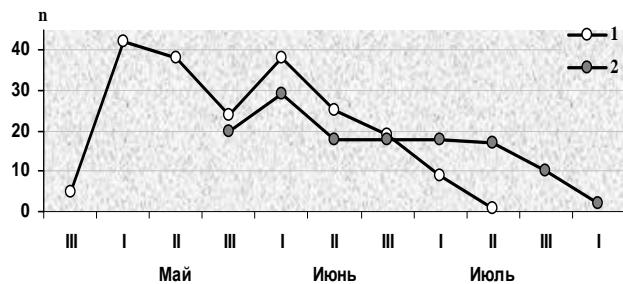


Рис. 1. Сроки начала откладки яиц (1) и вылета выводков (2) в гнездах, находившихся под наблюдением в Приладожье в 1978–2007 годах (n = 201)

Части оперения		Стадия линьки и ее продолжительность (сутки)				
Птерилия	Отделы птерилий	I	II	III	IV	V
		10-12	9-18	12-20	9-17	11-14
Головная	лобно-затылочный		-----	-----	-----	-----
- " -	глазной			○○○○○○○○○○	-----	-----
- " -	ушной		-----	-----	-----	-----
- " -	челюстной			-----	-----	-----
- " -	межчелюстной			-----	-----	-----
Брюшная	шейный	÷÷÷÷÷÷÷÷÷÷÷÷	-----	-----	-----	-----
- " -	центральный	÷÷÷÷÷÷÷÷÷÷÷÷	-----	-----	-----	-----
- " -	постцентральный	○○○○○○○○○○	-----	-----	-----	-----
- " -	pectorальный	-----	○○○○○○○○○○	-----	○○○○○○○○○○	-----
- " -	боковой	:::::::::::	:::::::::::	:::::::::::	:::::::::::	:::::::::::
Спинная:	межлопаточный	-----	-----	-----	-----	-----
- " -	крестцовый	:::::::::::	:::::::::::	:::::::::::	-----	-----
Плечевая		-----	-----	-----	-----	-----
Бедренная		-----	-----	-----	-----	-----
Голенная		-----	-----	○○○○○○○○○○	-----	-----
Аналльная		-----	-----	○○○○○○○○○○	-----	-----
Хвостовая	НКХ		-----	-----	-----	-----
- " -	ВКХ		-----	-----	-----	-----
Крыловая	СВКПМ		-----	-----	-----	-----
- " -	БВКВМ		○○○○○○○○○○	-----	-----	-----
- " -	СВКВМ		-----	-----	-----	-----
- " -	МВКВМ		-----	-----	○○○○○○○○○○	-----
- " -	КК		-----	-----	-----	-----
- " -	ВК проп.	÷÷÷÷÷÷÷÷÷÷÷÷	-----	-----	○○○○○○○○○○	-----
- " -	М ал.		-----	-----	-----	-----
- " -	Кр ал.		○○○○○○○○○○	-----	-----	-----
- " -	ВКК	-----	○○○○○○○○○○	-----	-----	-----
- " -	НКТМ		-----	-----	-----	-----
- " -	СНКПМ		○○○○○○○○○○	-----	-----	-----
- " -	СНКВМ		○○○○○○○○○○	-----	-----	-----
- " -	НКК	-----	○○○○○○○○○○	-----	-----	-----
- " -	НК проп.	-----	○○○○○○○○○○	-----	○○○○○○○○○○	-----
- " -	НК марг.	÷÷÷÷÷÷÷÷÷÷÷÷	○○○○○○○○○○	-----	÷÷÷÷÷÷÷÷÷÷÷÷	-----
- " -	НК плеча	○○○○○○○○○○	-----	-----	○○○○○○○○○○	-----
Аптерии	Брюшная	:::::::::::	:::::::::::	:::::::::::	:::::::::::	:::::::::::
- " -	Боковая	:::::::::::	:::::::::::	:::::::::::	:::::::::::	:::::::::::
- " -	Спинная	:::::::::::	:::::::::::	:::::::::::	:::::::::::	:::::::::::

Рис. 2. Схема постювенальной линьки черного дрозда:

Рис. 2. Тема поэтической линии яркого дрозда.

Последовательность смены пера у молодых черных дроздов в основных чертах укладывается в схему, обычную для дроздовых [14], но имеет свои особенности. Как правило, линька начинается с брюшной и спинной птерилий, на периферии которых у многих птиц в этот период еще продолжают отрастать перья первой генерации (рис. 2). Процесс вовлечения в нее всей массы пера можно разделить на 3 стадии,

опираясь на несколько основных птерилий, которые вступают в нее строго последовательно, в отличие от остальных птерилий, порядок замены пера которых характеризуется большой индивидуальной изменчивостью. Период отрастания пера разделен еще на 2 стадии. Кроме того, в случае необходимости по состоянию оперения на ключевых птерилиях для каждой стадии можно выделить начальную и конечную фазы.

1 - я стадия: от начала выпадения пера на спинной птерилии и вентральном отделе брюшной птерилии до начала смены нижних и верхних кроющих хвоста (НКХ, ВКХ). На этой стадии в линьку вступают бедренная и голеная птерилии, у многих птиц – шейный и постцентральный отделы брюшной птерилии (шея, ПВБ), верхние кроющие пропотагиальной складки (ВКпроп) и нижние кроющие плеча (НКпл), у единиц – пекторальный отдел брюшной птерилии, верхние и нижние кроющие крыла (ВКК, НКК), нижние кроющие пропотагиальной складки (НКпроп), верхний ряд нижних маргинальных кроющих (НКмарг).

Продолжительность стадии – 10–12 дней. Показателем перехода к ее завершающему этапу может служить появление на брюшной и спинной птерилиях перьев, опахала которых достигли половины длины пера (6–7-й день).

2 - я стадия: от выпадения ювенальных НКХ и ВКХ до начала смены перьев на межчелюстном и челюстном участках головной птерилии. К концу этой стадии у всех птиц начинается смена перьев шейного отдела, ПВБ, ВКпроп, НКпл, НКК. У многих особей включаются в линьку пекторальные, большие верхние кроющие первостепенных (БВКПМ) и второстепенных маховых (БВКВМ), кроющие крыльышка (Кал), ВКК, средние нижние кроющие первостепенных и второстепенных маховых (СНКПМ, СНКВМ), НКпроп, НКмарг. У некоторых птиц процесс распространяется также на лобно-затылочный и ушной отделы головной птерилии, средние верхние кроющие первостепенных и второстепенных маховых (СВКПМ, СВКВМ), малые верхние кроющие второстепенных маховых (МВКВМ), карпальное перо (КК), нижние кроющие третьестепенных маховых (НКТМ). У некоторых птиц заканчивается отрастание НКК. У разных особей эта стадия продолжается от 9 до 18 дней. Ее «продвинутость» легко оценить по состоянию НКХ и ВКХ, опахала которых раскрываются на 4–5-й день отрастания и достигают половины длины пера после 7-го дня.

3 - я стадия: от начала выпадения перьев межчелюстного и челюстного отделов до полного отрастания БВКВМ. На этом этапе в линьку включаются все оставшиеся птерилии. Лишь у некоторых особей смена пера на анальной, голеной птерилиях и в глазном отделе головной птерилии сдвигается на начало следующей стадии. У всех птиц в этот период завершается отрастание НКК, у большинства оканчивается также рост СВКПМ и СВКВМ, КК, Кал, ВКК, СНКПМ, СНКВМ, НКмарг, а у некоторых, кроме того, пекторальных, МВКВМ, ВКпроп, НКпроп, НКпл. Продолжительность стадии – 12–20 дней. Ее завершающий этап выделяется по состоянию межчелюстного и челюстного отделов, а также по превышению длины опахал всех НКХ и ВКХ половины длины пера.

4 - я стадия укладывается в промежуток между окончанием отрастания БВКВМ и всех

нижних кроющих крыла и длится от 9 до 17 дней. К концу стадии у всех птиц завершается обновление ВКХ, НКХ и кроющих крыла, за исключением отдельных случаев, когда еще продолжается рост ряда ВКпроп, поздно вступивших в линьку. У многих особей заканчивается также смена контурного пера на отдельных участках туловища и головы, и только в вентральном отделе, межлопаточном отделе и на головной птерилии оперение у всех птиц продолжает расти до конца следующей стадии.

5 - я стадия определяется по отсутствию признаков линьки нижних кроющих крыла, а также НКХ и ВКХ. Наряду на этой стадии уже почти полностью сформирован, лишь небольшая часть пера находится на последних стадиях отрастания. Продолжается 11–14 дней. Завершающая фаза наступает после того, как опахала наиболее поздно сменяющихся перьев голеной и головной птерилий достигнут половины длины пера.

В случаях, когда определение «продвинутости» линьки по всем ключевым птерилиям затруднено (при плохом освещении, дожде и т. п.), для ориентировочной оценки могут быть использованы только НКХ и ВКХ, которые начинают сменяться на 2-й стадии и полностью отрастают к началу 5-й стадии линьки. При обычной растянутости периода выпадения перьев (до 1 недели) рост нового пера на этих птерилиях продолжается 33–38 дней.

Шелушение кожных покровов можно наблюдать у отдельных особей еще до смены оперения. Но настояще отслоение отмерших слоев у большинства птиц начинается лишь на 3–4-й стадиях линьки и заканчивается уже после ее завершения. Наличие признаков обновления кожных покровов у перелинявших особей свидетельствует о недавнем завершении смены пера и может условно считаться 6-й стадией постювенальной линьки вида.

Полнота постювенальной линьки. Юношеское оперение черных дроздов, особенно самцов, хорошо контрастирует по цвету с пером следующей генерации. Это позволяет с большой точностью оценивать полноту его замены.

Постювенальная линька у данного вида, как и у большинства воробыиных птиц в Карелии, частичная. Не обновляются рулевые, первостепенные и второстепенные маховые перья. У подавляющего большинства сохраняются также старые БВКПМ, БНКПМ, перья бокового отдела брюшной птерилии, нижний ряд Нмарг, часть БВКВМ. У многих не сменяются Ккарп и Мал, у отдельных особей – СВКВМ, верхний ряд Нмарг, перья в дистальной части голени и отдельные контурные, преимущественно на участках, закладывающихся в послегнездовой период. При наибольшей полноте линьки сменяется все мелкое оперение, за исключением части БНКПМ и БНКВМ. Известен даже случай замены одного третьестепенного махового пера. При этом четко выявляется тенденция к сокращению полноты линьки к концу сезона.

Таблица 1

Число несменяющихся ювенальных больших верхних кроющих второстепенных маховых перьев (БВКМ) при разных сроках постювенальной линьки черных дроздов в Карелии

Стадия линьки	Число несменившихся БВКМ у молодых особей, отловленных в данный период, M + m / n (lim)				
	01–15.08	16–31.08	01–15.09	16–30.09	01.10–15.11
3	<u>3,42 ± 0,67</u> 6 (1–5,5)	<u>3,85 ± 0,27</u> 23 (2–6)	<u>4,28 ± 0,21</u> 38 (2–7)	<u>5,12 ± 0,32</u> 21 (2,5–9)	<u>5,00 ± 0,00</u> 1 (5)
4	–	<u>3,50 ± 0,43</u> 5 (2–4)	<u>3,83 ± 0,19</u> 43 (1–6)	<u>4,52 ± 0,19</u> 45 (2–7)	<u>4,63 ± 0,20</u> 8 (4–5)
5	–	–	<u>3,26 ± 0,30</u> 17 (0–5)	<u>3,58 ± 0,18</u> 70 (0–9)	<u>4,57 ± 0,37</u> 14 (1–7)
6	–	–	–	<u>3,28 ± 0,27</u> 9 (2–4)	<u>3,44 ± 0,48</u> 9 (1–5)

Таблица 2

Возраст молодых дроздов, окольцованных в гнездах, при повторных отловах во время постювенальной линьки в Карелии

Стадия линьки	n	Возраст (сутки)		
		min	max	M ± m
0	48	14	57	34,60 ± 1,44
1	4	46	59	53,50 ± 3,21
2	2	64	68	66,00 ± 2,83
3	5	76	91	84,20 ± 2,95
4	3	85	110	98,33 ± 8,90
5	2	104	114	109,00 ± 7,07

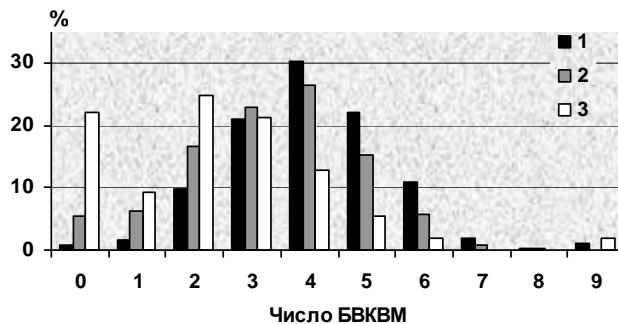


Рис. 3. Число несменяющихся ювенальных БВКМ у молодых черных дроздов на северо-востоке (Карелия) и юго-западе ареала (Великобритания, по [25])
(1 – Карелия, 61–62° с. ш., 2 – Великобритания, 57° с. ш., 3 – Великобритания, 51° с. ш.)

Наиболее широко используемым показателем полноты линьки является число несменившихся ювенальных БВКМ и БВКТМ. В Карелии у молодых черных дроздов ($N = 258$) может оставаться от 0 до 9 перьев, при этом у большинства (75 %) – 3–5 перьев, в среднем 3,9 пера. Их разное число на левом и правом крыльях отмечено у 7,4 % птиц, хотя, по-видимому, во многих случаях это вызвано внешними причинами (травмами). При поздних сроках линьки ее объем сокращается и, соответственно, число неменяющихся БВКМ увеличивается (табл. 1). Однако связь полноты замены БВКМ и остаточно-го оперения у черного дрозда лишь статистическая из-за большого разнообразия индивидуаль-

ных вариаций. Так, например, у птицы, сменившей не только все БВКМ и КК, но и 19-е маховое перо, все же сохранились 2-е и 3-е Мал. Вместе с тем у нескольких особей с 5 и 6 старыми БВКМ полностью заменилось оперение крыльышка.

Полнота линьки у дроздов в Карелии достоверно меньше, чем в юго-западных частях ареала вида, причем не только в сравнении с их местными популяциями, но и с зимующим населением этих регионов [34], [33], [37], [25], [19]. Его уменьшение по направлению к северо-востоку вполне закономерно (рис. 3) и соответствует возрастанию доли птиц с поздними сроками линьки в северных популяциях. Вместе с тем сравнение этих же популяций по другим показателям, характеризующим линьку, выявило различия, которые, вероятно, обусловлены генетически. Так, у дроздов, обитающих в Англии у 57° с. ш. [25] и отличающихся значительно большим объемом линьки БВКМ, неожиданно низкой оказалась доля особей, сменивших КК (38 % против 40 % в Карелии) и особенно Мал (1 и 12 %).

Возраст, в котором у черных дроздов карельской популяции начинается постювенальная линька, колеблется от 45 до 70 дней. Лишь в одном случае она отмечена у 42-дневного птенца из очень позднего выводка, содержавшегося в вольере. У этой птицы начало линьки совпало с завершением отрастания ювенальных первостепенных маховых перьев, у основания которых в тот момент еще сохранились остатки роговых чехликов. Как и у других птиц, смена оперения у молодых черных дроздов из поздних выводков протекает в более раннем возрасте. Однако эта известная закономерность выражена у данного вида слабее, чем у северных видов дроздов, и выявляется только при сопоставлении крайних вариантов.

В отличие от белобровиков, меняющих оперение в ранние сроки, большинство молодых черных дроздов вынуждены покидать регион до полного отрастания нового оперения: на его завершающем этапе (5-я стадия) поймано всего 2 птенца из первых выводков, вылупившихся 02 и 10.06 (табл. 2).

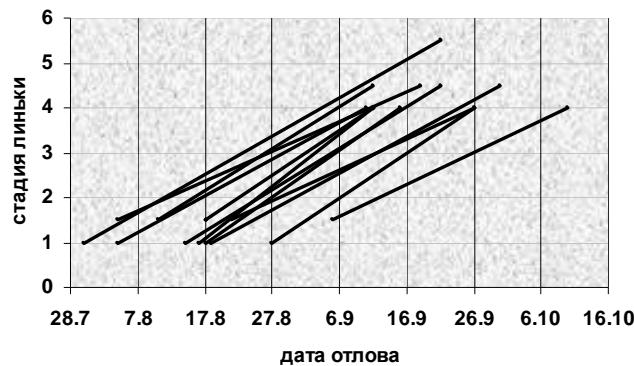


Рис. 4. Примеры хода постювенальной линьки черных дроздов при разных сроках ее начала (по данным повторных отловов маркированных особей)

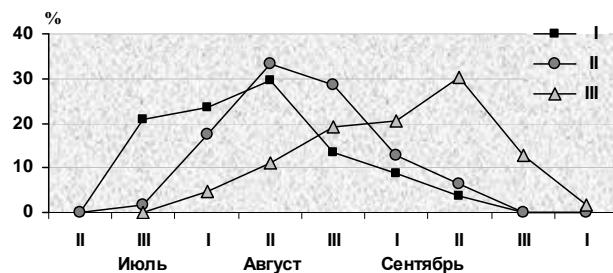


Рис. 5. Динамика отловов молодых черных дроздов с оперением на I-III стадиях его замены в Карелии

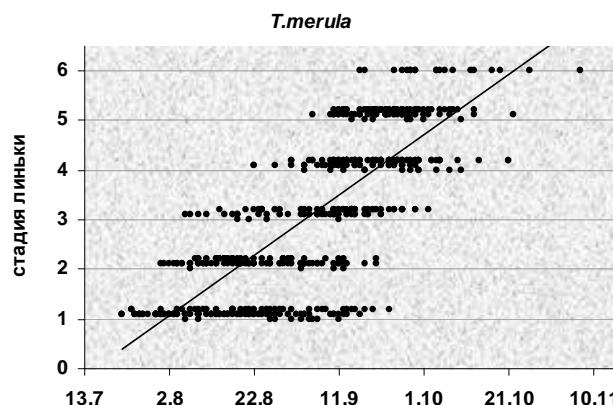


Рис. 6. Распределение в отловах молодых черных дроздов ($n = 598$) с оперением на разных стадиях постювенальной линьки

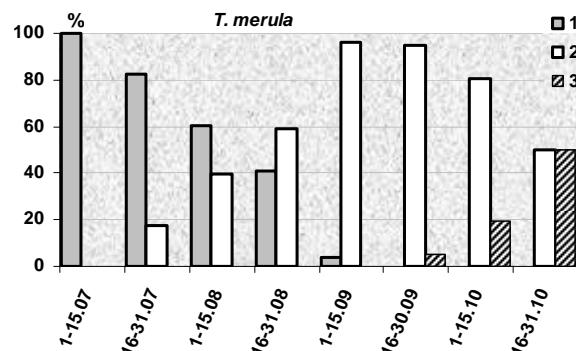


Рис. 7. Состояние оперения молодых черных дроздов ($n = 969$) при разных сроках отловов (1 – до линьки, 2 – линяющие, 3 – перелинявшие)

Индивидуальная продолжительность линьки, по данным повторных отловов меченых особей (рис. 4) и расчетным данным, варьирует в Карелии в пределах 2 недели – от 56 до 70 дней, составляя в среднем 65 дней. Все оперение вовлекается в линьку за 35–45 дней, формирование перьев новой генерации продолжается еще 20–25 дней.

Разные особи проходят отдельные этапы смены ювенального наряда с разной скоростью. При этом существует тенденция к более дружному включению в нее всех участков оперения при поздних сроках линьки, хотя и среди птиц с ранней сменой оперения встречаются особи с сокращенным периодом выпадения ювенального пера. Маркерами, позволяющими оценить это явление, могут служить нижние и верхние кроющие хвоста (НКХ и ВКХ), которые начинают меняться позднее других категорий перьев. У 90 % птиц, линяющих в августе, опахала достигают половины длины пера только после полного отрастания БВКВМ (4-я стадия), у 2/3 особей с более поздними сроками линьки – задолго до его завершения (3-я стадия). Однако ускоренное выпадение перьев на мелких птерилиях мало влияет на общую продолжительность линьки, поскольку она зависит, прежде всего, от растянутости замены оперения наиболее крупных птерилий – спинной и брюшной. В связи с этим при поздних сроках линьки, как правило, сокращаются 2–3-я и удлиняются 4–5-я стадии, что оказывается на конфигурации кривых распределения в отловах птиц с оперением на разных стадиях замены, включая начальные (рис. 5).

Сроки линьки популяции. Молодые черные дрозды меняют оперение в очень поздние сроки (рис. 6, 7). Наиболее ранние встречи сеголетков с первыми признаками смены ювенального наряда – 22.07 (Маячино, 1989 и 1993), поздняя – 16.09 (Кивач, 1985; 23.09 эта птица все еще находилась на 1-й стадии линьки). К моменту, когда у птенцов из поздних гнезд только начинает выпадать перо, некоторые слетки уже успевают завершить линьку, однако даже они часто заканчивают ее в дискомфортных условиях из-за резкого ухудшения погоды и сужения кормовой базы к концу сентября. Поскольку подавляющее большинство черных дроздов включаются в линьку только к середине сентября (рис. 7), значительная часть особей завершает ее уже за пределами региона. Однако постепенно сроки первой регистрации птиц, завершивших смену наряда, сдвигались на более ранний период.

В первые годы полностью перелинявшие молодые птицы появлялись в отловах лишь в самом конце сентября – начале октября. Наиболее ранние даты их отловов крупногабаритными ловушками в Гумбарицах – 26.09.1973 и 28.09.1980. В Маячино, в биотопах, где молодые черные дрозды оседают на линьку, птицы, завершившие смену пера, попадались с 04.10 в 1981 и 1983 годах, а затем все раньше – 29.09.1988, 17.09.1990,

16.09.1992. Соответственно, росла доля особей, заканчивающих (5-я стадия) или закончивших линьку (imm) в более ранние сроки [30].

Видовые особенности постювенальной линьки черного дрозда, обусловленные его «южным» происхождением, ярко проявляются при сравнении с белобровиком, высоко адаптированным к жизни в северных широтах. Сравнение показало, что в условиях Карелии смена оперения этих двух видов проходит по сходной схеме и одинаково подчиняется известным закономерностям, обусловленным наличием фотопериодической регуляции: возраст, в котором птенцы начинают смену пера, и ее объем к концу сезона уменьшаются, а скорость несколько увеличивается. Вместе с тем сами показатели, по-видимому, закрепленные генетически, различны. Вариабельность включения в линьку разных птерилий и скорость смены пера у северного вида выше, а возраст, в котором сеголетки меняют оперение, и полнота его замены меньше [24]. Это позволяет северному виду обновлять наряд на месяц раньше, избегая массового совмещения линьки с миграцией [16], [20], [23].

Миграция – следующая фаза годового цикла птиц, которая требует больших энергетических затрат и сопровождается перестройкой всего обмена веществ [5]. Поскольку в условиях Севера в более выгодном положении оказываются особи, рано заканчивающие смену наряда, можно было ожидать, что процесс закрепления черных дроздов в северных широтах будет сопровождаться сдвигом линьки на более ранний и благоприятный период. И такая тенденция была обнаружена при анализе распределения в отловах птиц с разным состоянием оперения в первые годы формирования популяции и в последующий период [30]. Так, если во второй декаде сентября в 1979–1990 годах перелинявшие особи составляли 33 % от числа пойманых птиц,

то в 1991–2005 годах уже 42,1 % (n = 45 и 46), а в третьей декаде месяца – соответственно 50 и 66,7 % (n = 34 и 42). Применение критерия Фишера для оценки этих различий показало их высокую достоверность ($p < 0,01$). При этом анализ весенних температур и хода размножения птиц в Маячино [10], [1], [26] показал, что этот сдвиг нельзя связать с влиянием погодных факторов на сроки размножения. Первый период (1979–1990) в целом характеризовался более ранними, теплыми и ровными веснами, а также немного более ранними сроками гнездования птиц. Ранние даты начала кладок черных дроздов, зарегистрированные до 1990 года (n = 102), – 26.04.1990 и 27.04.1989. После 1990 года они сдвинулись на 29–30.04.2001 (n = 84); в более поздние календарные сроки (в среднем на 1 неделю) отмечено и массовое появление выводков.

Таким образом, анализ постювенальной линьки черных дроздов периферийной северо-восточной популяции выявил ряд особенностей, связанных с их «южным» происхождением, которые могут тормозить экспансию этого вида на север. Вместе с тем прослеживается тенденция к постепенному смещению линьки на более ранние сроки, что можно расценивать как показатель постепенной адаптации черного дрозда к обитанию в условиях сокращенного благоприятного периода.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаю искреннюю признательность В. Б. Зимину, Н. В. Лапшину, А. В. Артемьеву, М. В. Яковлевой, Л. С. Захаровой и сотрудникам Ладожского орнитологического стационара ЛГУ, которые на протяжении многих лет принимали участие в сборе материала, а также А. В. Коросову за помощь в статистической обработке материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемьев А. В. Влияние погоды на биологию гнездования мухоловки-пеструшки, *Ficedula hypoleuca* (Passeriformes, Muscicapidae) в Карелии // Зоологический журнал. 2002. Т. 81. № 7. С. 841–849.
2. Гагинская А. Р., Рымкевич Т. А. Методические указания к прикинзенной обработке птиц // Исследование продуктивности вида в пределах ареала. Вильнюс: Мокслас, 1973. С. 155–166.
3. Дольник В. Р. Биоэнергетика линьки воробышных птиц как адаптация к миграции // Новости орнитологии. Алма-Ата: Наука, 1965. С. 124–126.
4. Дольник В. Р. Годовые циклы биоэнергетических приспособлений к условиям существования у 16 видов Passeriformes // Миграции птиц Прибалтики. Л.: Наука, 1967. С. 115–163.
5. Дольник В. Р. Миграционное состояние птиц. М.: Наука, 1975. 398 с.
6. Зимин В. Б., Лапшин Н. В., Артемьев А. В., Хохлова Т. Ю. Результаты кольцевания птиц в Карелии // Кольцевание и мечение птиц в России и сопредельных государствах в 1988–1999 гг. М.: Центр кольцевания птиц, 2002. С. 73–116.
7. Зимин В. Б., Лапшин Н. В., Артемьев А. В., Хохлова Т. Ю. Обзор орнитологических исследований на территории Карелии // Наземные и водные экосистемы Северной Европы: управление и охрана: Материалы междунар. конф., посвящ. 50-летию КарНЦ РАН. Петрозаводск, 2003. С. 55–60.
8. Зимин В. Б., Сазонов С. В., Лапшин Н. В., Хохлова Т. Ю., Артемьев А. В., Анненков В. Г., Яковleva M. B. Орнитофауна Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1993. С. 1–220.
9. Мальчевский А. С., Пукинский Ю. Б. Птицы Ленинградской области и сопредельных территорий. Т. 2. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983. 504 с.
10. Назарова Л. Е., Филатов Н. Н. Изменчивость климата по данным метеорологических наблюдений // Климат Карелии: изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2004. С. 12–34.

11. Носков Г. А., Рымкевич Т. А. Методика изучения внутривидовой изменчивости у птиц // Методика исследования продуктивности и структуры видов птиц в пределах их ареалов. Вильнюс: Мокслас, 1977. С. 37–48.
12. Рыжановский В. Н. Экология послегнездового периода жизни воробьиных птиц Субарктики. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 1997. 288 с.
13. Рыжановский В. Н. Роль фотопериодических условий в жизни воробьиных птиц высоких широт // Зоологический журнал. 2008. Т. 87. № 6. С. 732–747.
14. Рымкевич Т. А., Савинич И. Б., Носков Г. А. и др. Линька воробьиных птиц Северо-Запада СССР. Л.: Изд-во ЛГУ, 1990. С. 1–304.
15. Хохлова Т. Ю. Эколого-фаунистическая характеристика орнитофауны Заонежья // Вестник ЛГУ. Сер. биологии. 1977. № 15. С. 22–30.
16. Хохлова Т. Ю. Соотношение сроков вылупления и постювенальной линьки у трех видов дроздов в Южной Карелии // Тез. докл. XI Прибалт. орнитол. конф. Таллинн, 1983. С. 213–215.
17. Хохлова Т. Ю. О формировании периферийной популяции черного дрозда в Южной Карелии // Изучение птиц СССР, их охрана и рациональное использование: Тез. докл. IX Всесоюзн. орнитол. конф. Л., 1986. С. 309–310.
18. Хохлова Т. Ю. Особенности биологии черного дрозда *Turdus merula* L. у северо-восточной границы ареала // Фауна и экология наземных позвоночных. Петрозаводск: КНЦ АН СССР, 1988. С. 51–71.
19. Хохлова Т. Ю. Опыт оценки масштаба иммиграции в периферийных популяциях птиц с использованием явления географической изменчивости полноты их линьки // ТERRITORIAL'NOE ПОВЕДЕНИЕ ПТИЦ. Петрозаводск: КНЦ РАН, 1994. С. 134–151.
20. Хохлова Т. Ю. Адаптивные особенности репродукции и линьки периферийной популяции черного дрозда *T. merula* L. // Экосистемы Севера: структура, адаптации, устойчивость: Материалы общеросс. совещания (Петрозаводск, 1993). М., 1995. С. 204–211.
21. Хохлова Т. Ю. Особенности динамики численности черного дрозда (*T. merula* L.) в период экспансии и закрепления вида на территории Карелии // Динамика численности птиц в наземных ландшафтах: Материалы Всеросс. совещания. М., 2007. С. 101–110.
22. Хохлова Т. Ю. Черный дрозд (*Turdus merula*) у северо-восточной границы ареала: особенности территориальных связей и миграций в период формирования периферийной популяции в Южной Карелии (обзор) // Зоологический журнал. 2010. Т. 89. № 2. С. 212–221.
23. Хохлова Т. Ю., Захарова Л. С., Зимин В. Б. Сроки и динамика сезонных явлений годового цикла у дрозда-белобровика в Карелии // Фауна и экология птиц и млекопитающих северо-запада СССР. Петрозаводск: КНЦ АН СССР, 1983. С. 11–29.
24. Хохлова Т. Ю., Яковлева М. В. Постювенальная линька дрозда-белобровика в Карелии // Экология наземных позвоночных. Петрозаводск, 1991. С. 40–57.
25. Baille S. R., Swann R. L. The Extent of Post-Juvenile Moult in the Blackbird // Ringing & Migration. 1980. Vol. 3. P. 21–26.
26. Both C., Artemeyev A. V., Blaauw B., Cowie R. J. et al. Large-scale geographical variation confirms that climate change causes birds to lay earlier // Proc. Royal Society of London. 2004. Ser. B. Vol. 271. P. 1657–1662.
27. Busse P. Key to sexing and ageing of European Passerines // Beitr. Natur. Niedersachsens. 1984. Vol. 37 (Suppl.). P. 1–224.
28. Ginn H. B., Melville D. S. Moult in birds. British Trust of Ornithology Guide. 19. UK: Tring, 1983. 342 p.
29. Jenni L., Winkler R. Moult and ageing of European passerines. London: Academic Press, 1994. 225 p.
30. Khokhlova T. Y. Juvenile moult and spatial behaviour of first-year Blackbirds *Turdus merula* on the northeast edge of the range // Avian Ecol. Behav. 2009. Vol. 15. P. 1–22.
31. Noskov G. A., Rymkovich T. A., Iovchenko N. P. Intraspecific variation of moult: adaptive significance and ways of realization // Proc. 22 Int. Ornithol. Congr. (August 1998, Durban, South Africa). Durban: University of Natal, 1999. P. 544–563.
32. Parslow J. L. Changes in status among breeding birds in Britain and Ireland. P. 5 // Brit. Birds. 1967. Vol. 60. P. 390–404.
33. Richter A. Zum Umfang der Jugendmauser am Flugel der Amsel *Turdus merula* // Ornit. Beobach. 1972. Vol. 69. P. 1–16.
34. Snow D. W. A Study of Blackbirds. Second ed. London: Brit. Museum (Nat. History), 1988. P. 1–196.
35. Spencer R. Changes in the Distribution of Recoveries of Ringed Blackbirds // Bird Study. 1975. Vol. 22. P. 177–190.
36. Stresemann E., Stresemann V. Inheritance of the adaptation in moult // Proc. 14th Int. Ornithol. Congr. Oxford, 1967. P. 75–80.
37. Swansson L. Identification Guide to European Passerines. Second edition. Stockholm, 1975. 184 p.

ЛЮДМИЛА ВЛАДИМИРОВНА КУЛЕШЕВИЧ

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии, Карельский научный центр РАН, доцент кафедры геологии и геофизики горно-геологического факультета, Петрозаводский государственный университет
kuleshev@krc.karelia.ru

ЗОЛОТОЕ ОРУДЕНЕНИЕ В ДОКЕМБРИЙСКИХ ЩИТАХ ЗЕМЛИ (геодинамическая позиция, систематика и основные принципы изучения)

С раннедокембрийским периодом развития земной коры (3,3–1,6 млрд лет) связаны наиболее крупные золото-рудные месторождения Земли. Представления ведущих ученых-докембрристов о геодинамической позиции, магматизме, условиях локализации и генезисе этих месторождений, состав руд и измененных пород позволяют их систематизировать и выработать методические приемы металлогенических исследований и поисков применительно к дислоцированным и высокометаморфизованным докембрийским комплексам Карелии.

Ключевые слова: докембрийские щиты, зеленокаменные пояса, месторождения золота, генетические и формационные типы руд

МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ РАННЕДОКЕМБРИЙСКИХ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

С раннедокембрийским периодом развития земной коры (3,3–1,6 млрд лет) связаны наиболее интенсивные процессы образования месторождений золота в позднем архее и позднем палеопротерозое. В этом интервале времени были сформированы крупные месторождения Австралии, Канады, ЮАР, Зимбабве, Ганы, Бразилии, Индии и небольшие месторождения в Финляндии, Швеции, Карелии. В сводке (см. таблицу) по зарубежным месторождениям приводятся запасы золота в зеленокаменных поясах (ЗП).

Суммарные запасы в архейских месторождениях Канады оцениваются в 11–13 тыс. т золота [33], [51]. В провинции Супериор размещаются 120 месторождений с запасами более 3 т, из них 33 содержат более 30 т золота и относятся к крупным рудным объектам. Они сосредоточены главным образом в ЗП Абитиби, который дает 80 % продукции Канады. Крупнейшими месторождениями являются рудное поле (РП) Поркьюпайн (запасы узла Тимминс-Поркьюпайн – 2,5 тыс. т), Холлинджер-Макинтайр (920 т), Киркленд-Лейк (760 т), Норанда (400 т), Ред-Лейк (500 т), Хемло (600 т). В СЗ части провинции Слэйв на РП Йеллоунайф месторождения Джант и Дискавери имеют запасы > 287 т, Хоумстейк – 1250 т (Северная Америка).

Запасы архейского золота на Западно-Австралийском щите близки к 4,9 тыс. т. В ЗП Йилгарнского кратона известны 160 месторождений, содержащих более 1 т золота, из которых 19 – объекты мирового класса (> 100 т [34]). Они дают 80 % продукции от всех запасов Австралии, сосредоточенных в РП Калгурли (2,4 тыс. т, Голден Майл – 1,8 тыс. т). Запасы месторождения Бад-

дингтон – 600–800 т, а Fe-O-Cu-Au-U-S рифейского месторождения Олимпик Дэм – 1200 т.

На кратоне Зимбабве Африканского континента известны 3500 золоторудных объектов, из них 49 крупных (> 100 т): Престиа (220 т), Кем-Мотор (150 т), Глоб-Феникс (125 т) и др. [31], [51]. В ЗП Гванда в полосчатой железистой формации расположены месторождения среднего масштаба Бубачикве, Бланкет, Бар-20, Лима с суммарными запасами 36 т [70]. В Южной Африке находится золоторудный гигант – уникальное по запасам и генезису РП Витватерсранд, дающее 50 % добычи всего золота в мире из кварцевых конгломератов, а также U и МПГ с запасами по отдельным рифам в 2–10 тыс. т. С ЗП Барбертон связаны месторождения Новый Консорт (55 т) и Шеба (65 т). В ЗП Мурчисон месторождение золото-сурьмяных руд Монарх в мафит-ультрамафитовых толщах имеет запасы 60 т золота. На Танзанийском кратоне расположены палеопротерозойские объекты среднего масштаба Уганды, Танзании и Кении. На рудниках Гейты и Лупы было добыто до 27,4 и 25 т золота. Запасы жильных месторождений Ганы на РП Ашанти ~700 т (Обуаси – 460 т, Бибиани – 50 т, Престиа – 44 т), Тарква – 250 т [10], [38], [57].

На Дарвардском кратоне в Индии запасы РП Колар составляют 790 т, объекта Хатти ~30 т. Глубина разработки жилы Чемпион достигла 3,3 км, ее длина – 7 км, мощность от 40 м вблизи поверхности и до 0,3–0,4 м на глубине при содержании Au 4–20 г/т [19], [63].

На российской территории Фенноскандинавского щита (рис. 1) известны пока только небольшие месторождения и проявления позднеархейского и раннепротерозойского возраста.

В Карелии ресурсы золота месторождения Рыбозеро и проявлений Заломаевского РП достигают около 15 т, Педролампи – 40 т, Таловейс и Берендей – 46 т, Майского – 20 т. На Au-Ag-

полиметаллическом месторождении Лобаш-1 запасы увеличены с 8,7 до 150 т Au. На Кольском полуострове известно несколько позднеархейских месторождений: Оленинское (28 т), Няльм 1 и 2 (7,5 + 3,4 т) и Au-Ag-Cu-Mo Пеллапахк (Au 24 т) [2]. На территории Финляндии суммарные запасы архейского ЗП Хатту составляют 50 т, месторождения Валкеасуо – 17,5 т [37], [39], [47], [48], [72], сайт GSF. В протерозойских структурах Южной Финляндии, в Раахе-Ладожской зоне и Лапландском ЗП известны месторождения Осиконмяки (4,4 т), Кутемаярви (6,6 т), Хавери (28,4 т), Копса (25 т), Пахтаваара (15 т), Сааттапора (8,75 т), Суурюкосикко (110 т), вблизи с границей Карелии – Юомасуо (3,4 т), в Швеции – Болиден (128 т) [28].

Соотношение запасов золота в докембрийских (75 %) и молодых (25 %) геологических областях по основным золотодобывающим странам мира позволяет отметить, что основными рудными объектами в докембрии являются преимущественно коренные архейские месторождения [1]. Открытие новых месторождений и прирост запасов золота в Австралии, Бразилии, Южной Африке произошел в последние 20 лет.

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В размещении месторождений золота кайнозойской и мезозойской металлогенических эпох наиболее отчетливо обнаруживается их приуроченность к островным дугам, задуговым окраинным бассейнам и окраинно-континентальным структурам над зонами субдукции Тихоокеанской плиты, а также к аккреционно-коллизионным складчатым зонам [18]. Сложно-складчатое строение и метаморфизм докембрийских ЗП и неоднократность процессов преобразований затрудняют расшифровку условий их формирования. Тем не менее исследования, проводимые на Канадском щите, кратонах Ийлгарн и Пилбара в Австралии, Зимбабвийском и Каапвальском в Южной Африке, и современные взгляды на тектонику этих территорий позволили представить ЗП как коллажированные (аккреционно-коллизионные) террейны, сформировавшиеся в разных обстановках, и подойти к металлогенезу древних щитов так же, как в фанерозойских областях, – дифференцированно на геодинамической основе и не относить месторождения к одной группе «месторождений докембрийских зеленокаменных поясов», время формирования которых находилось в интервале 3,3–2,6 млрд лет, что укладывается в несколько циклов развития с разными режимами [67], [41], [45], [55].

На Канадском щите на примере неоархейского ЗП Абитиби геологами-докембрисками продемонстрировано, как в результате субдукционных процессов формировались древние островодужные системы, а затем происходила их коллизия с микроконтинентами [32], [73]. Смена условий сопровождалась сменой интрузивного гранитоидного магматизма – от тоналитов до субщелочных

пород (диоритов, гранодиоритов, сиенитов, двуслюдяных гранитов) и оруденением около 2,72–2,68 млрд лет [33], [35]. На стадии поздней коллизии сформировалась широтная система разломов Дестор – Поркьюпайн и Киркленд Лейк – Кадиллак-Лардер, благоприятная для поступления флюидов и ограничивающая пулл-апарт бассейн. Для этих поздних бассейнов характерны: 1) веерное накопление конгломератов, в том числе гранитных и мелководных косослоистых осадков группы Тимискаминг; 2) субщелочной магматизм (внедрение монцонитов, гранитов) [66], [74]. Вблизи глубинных разломов и полей проявления гранитоидного магматизма сосредоточены все наиболее крупные месторождения золота ЗП Абитиби и провинции Вава. Близость геологической истории ЗП Учи и Сачиго (в интервале 2890–2865 и 2742–2699 млн лет [46]) и формирования месторождений золота и ЗП Карелии в обрамлении Водлозерского блока отмечается российскими геологами [4], [5].



Рис. 1. Размещение месторождений золота на Фенноскандийском щите [9], [47], 72]. Белые кружки – протерозойские месторождения, черные – архейские. Геологические образования показаны в различных оттенках серого. Линейные объекты – тектонические зоны

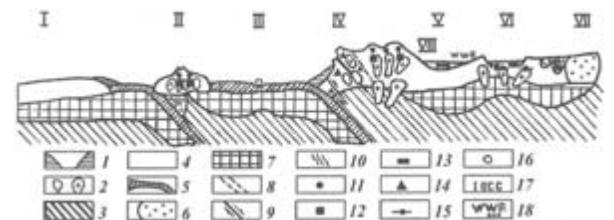


Рис. 2. Геодинамические обстановки формирования золоторудных месторождений [43], [7]. Условные обозначения: I – континентальная, II – океаническая дуга (месторождения эпитетримальные, медно-порфировые и скарновые), III – задуговый бассейн (VMS), IV – аккреционные террейны (орогенные комплексы, месторождения золота, медно-молибден-порфировые, окраинно-континентальные), V – континентальная дуга (Cu-Au-Fe-O месторождения), VI – тыловая дуга-2 (месторождения «карлинского типа»), VII – край кратона, VIII – прибрежный бассейн (тип палеороссыпи Витватерсранд). Вмещающие толщи см. по [43]

В провинции Слэйв на СЗ Канады в гранитогнейсовом основании установлены как более древние возрасты толщ, так и сопоставимые с группой Тимискаминг [56]. Предполагаемая субдукция была направлена с востока на запад. Нижняя супергруппа включает ассоциации пород ранних ЗП ($> 2,8$ млрд лет), сохранившиеся в некоторых местах кварциты, конгломераты, железистую формацию, амфиболиты, риолиты и карбонаты (~2,8 млрд лет). Верхняя перекрывающая супергруппа (пост-Йеллоунайф) представлена аренитами, песчаниками и полимиктовыми конгломератами, сопоставимыми с неоархейскими группами Тимискаминг. Граниты (2,7–2,58 млрд лет), прорывающие ЗП, занимают 50 % площади. Плутоны ТТГ-комплекса – (ранние диориты, тоналиты), поздние пералюминиевые граниты (2,65–2,62 млрд лет) – ассоциируют с вулканитами и знаменуют начало коллизионного этапа. С этим событием связывается формирование складчатых структур позднеархейского возраста, деформации и метаморфизм. С более поздними гранитами (2,58 млрд лет) связана вторая фаза деформаций, наложенная на перекрывающие конгломераты. Самые поздние деформации в краевых частях провинции связаны с протерозойскими событиями – Вопмэй и Телон орогенеией (1,84–1,74 млрд лет). Месторождения золота в ЗП Йеллоунайф локализованы в меридиональных шир-зонах в базальтах с кварцево-жильной «пропиткой», хлоритом и карбонатом. Возраст жил близок по времени к грандиоритам Дефейт (~2,62 млрд лет).

Африканский щит. Смена океанических, шельфовых и островодужных ассоциаций в Зимбабве связывается с субдукцией океанической коры под окраину Зимбабвийского кратона (с запада на восток). В центральной части эти породы перекрываются конгломератами и осадками группы Шамва (параллелизуемыми с осадками Тимискаминг). Внедрение Na-Ca гранитов Сесомби знаменует начало коллизии. В ореоле этих плутонов в зонах деформаций (шир-зонах) расположены многие месторождения Зимбабве. Заключительная стадия развития ЗП связана с коллизией кратонов Зимбабве и Каапвальского и формированием разделяющего их складчатого пояса Лимпопо, образованием надвигов, внедрением поздних гранитов [61]. Сопряженно возникли ССВ шир-зоны, благоприятные для поступления флюида. К ним приурочены месторождения золота ЗП Мидландс. По центральной тектонической зоне внедрилась Великая Дайка (2,58 млрд лет).

На Каапвальском кратоне (ЮАР) в ЗП Барбертон (3,57–3,08 млрд лет) золоторудные месторождения формировались ~3,1 млрд лет назад в связи с последовательными орогеническими событиями: внедрение гранитного plutона Каапваль (3227 млн лет), батолитов Нелспрут (3105 млн лет) и Витватерсrand (3070 млн лет). Ранняя структурно-тектоническая перестройка и

смена режима компрессии (~3080 млн лет) на транстенцию [30] завершилась формированием шир-зон, гидротермальными процессами и образованием месторождений Консорт, Шеба, Фэирвью, Агнесс и др. Отложение базальтов и осадков формации Доминион – малопродуктивных рифов нижних уровней с возрастом 3,12–3,07 млрд лет, предшествовало заложению бассейнов Пангола и Витватерсrand. Накопление прибрежных осадков в этих бассейнах (конгломератов и сланцев с возрастом 2,84–2,71 млрд лет) завершилось излиянием базальтов группы Вентерсдорп (2,7–2,6 млрд лет). Интракратонный бассейн Витватерсrand, ограниченный субширотными тектоническими зонами, по-видимому, можно рассматривать как структуру длительного развития. Золото и платиноиды, как сейчас установлено, накапливались благодаря коллоидно-гидротермальному привносу по тектоническим зонам, а источник мог быть связан с длительно живущим плюром, сформировавшим в том числе многофазный Бушвельдский комплекс [20], [23], [24]. Осадки палеопротерозойской мульды Трансвааль (2,6–2,1 млрд лет) западнее частично перекрывают позднеархейский бассейн.

Раннепротерозойские месторождения Африканского щита связаны с эволюцией ЗП этого возраста. Они известны на территории Ганы, Буркина-Фасо, Мали, Гвинеи. Формирование ЗП связано с заложением внутренконтинентального рифта, накоплением базальтов и осадков серии Бирим – турбидитов, вулканогенно-кластического материала, аргиллитов, реже химических осадков с сульфидами [10], [59]. Эбурнейский тектоногенез и гранитный магматизм (2177–2081 млн лет) вызвали деформации и метаморфизм вмещающих пород от преит-пумпеллитовой до амфиболитовой фации. Во впадинах накапливались конгломераты Тарквинской серии. На рудном поле (РП) Ашанти осадки прорываются гранитами Бонго (2,1 млрд лет). К СЗ шир-зонам в гранитах и их ореолах в биримийских базальтах и осадках приурочены золото-кварцево-жильные руды.

Австралийский щит. Наиболее древние геологические последовательности установлены на кратоне Пилбара (~3,6–2,8 млрд лет) [25], [26]. Они представлены мелководными осадками, вулканитами, карбонатами, эвапоритами серии Варравуна (3,6–3,2 млрд лет), осадками и вулканитами задуговых бассейнов серии Джордж Крик (3,33–3,18 млрд лет). С ними связаны самые древние колчеданы (~3,46–3,3 млрд лет). Комплекс Джордж Крик прорывает ранние граниты (3,33–3,18 млрд лет). Осадки Роебурни отложились 3,2–2,9 млрд лет назад в морском бассейне; последовательность Маунт Негри – это толеиты и коматиты континентального рифта. С коматитами Регал связаны S-Cu-Ni руды, с осадками Вим Крик – колчеданы. Золоторудные месторождения образовались на заключительном коллизионном этапе в СЗ шир-зонах (~2,9 млрд лет).

На кратоне Йилгарн в ЮЗ Австралии основные месторождения золота приурочены к неоархейским ЗП, заложившимся как рифты и испытавшим поздние деформации орогенного этапа развития [27], [34]. Ранние вулканогенно-осадочные последовательности ЗП районов Норсмен, Мурчисон, Южный Крест имеют возраст $> 2,9$ млрд лет, мафит-ультрамафиты ЗП Марда – 2,85 млрд лет. Возраст известково-щелочных пород и фельзитов – 2734–2736 млн лет. ЗП Норсмен – Вилуна приурочен к зоне спрединга как энсиалический, он формировался как задуговый бассейн вблизи окраины континента. С коматитовым магматизмом, существовавшим здесь 2715–2675 млн лет назад (над плюмом на границе океан-континент), связаны S-Cu-Ni-месторождения. Вулканиты района Камбалда отлагались 2,69 млрд лет назад [27], [62]. Пик метаморфизма здесь приходится на 2685 млн лет. В СВ районе Золотых Полей накапливались кислые вулканиты, типичные для острородужной системы аккреционной стадии развития и связанные с ними колчеданно-полиметаллические руды (VMS-тип).

Структурные деформации, метаморфизм и внедрение гранитов в западных ЗП кратона Йилгарн имеют более длительную историю. В ЗП Мурчисон ранние деформации и граниты имеют возраст 2,9 млрд лет. Возраст дотектонических гранитов района Калгурули – 2,68 млрд лет, синтектонических – 2,66 млрд лет, позднетектонических К-гранитов – 2,62–2,6 млрд лет [62]. Формирование большинства месторождений золота как в молодом ЗП Норсмен – Вилуна, так и в более древних западных ЗП (Мурчисон, Южный Крест, Марда) связано уже с коллизионной стадией их развития, заложением ССЗ шир-зон около 2,66 млрд лет и гидротермальными процессами [42], [77]. Это время окончательной кратонизации блока Йилгарн. Обобщенная модель формирования месторождений золота предполагает привнос металла растворами с нижних – средних коровых и глубоких уровней в период максимальных деформаций и метаморфизма зеленосланцевой-амфиболитовой фации.

Таким образом, помимо сингенетических месторождений (рис. 2), непосредственно связанных с формированием рудовмещающего комплекса вулканогенно-осадочных пород или эпигенетических, сопровождающих гранитоидный магматизм ранних стадий развития, зарубежные исследователи стали выделять наиболее значительную группу крупных и гигантских месторождений, сформировавшихся в зонах сдвиговых деформаций (шир-зонах) заключительных стадий коллизионного этапа развития. Этим орогеническим событиям в архее соответствует, по Д. Гровсу, основная мировая эпоха накопления золота (2,7–2,6 млрд лет), близкая к наиболее интенсивным метаморфогенно-метасоматическим преобразованиям [41], [42], [43], [44], [45], [64]. Эта группа месторождений была названа орогенической.

На Фенноскандинавском щите для позднеархейских ЗП Карелии в последнее двадцатилетие также были созданы модели, позволяющие рассматривать их как разновозрастные аккреционно-коллизионные структуры [4], объединившие океанические островодужные, окраинно-континентальные, задуговые системы и пулл-апарт бассейны. Развитие Фенноскандинавского щита в раннем протерозое сопровождалось формированием на ЮЗ окраине Карельского кратона орогенических структур Раахе-Ладожской зоны, на СЗ – Лапландского рифта и СЗ шир-зон орогенической стадии [37]. Завершающие орогенические события оказали влияние на весь Карельский кратон в целом. Анализ обстановок формирования, включающий изучение магматизма, состава вмещающих толщ, структур и тектоники в региональном масштабе и на локальном уровне, формирует представления о позиции, геодинамическом режиме и условиях образования месторождений/проявлений.

ВМЕЩАЮЩАЯ СРЕДА И ГЕОЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ТИПИЗАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Вмещающие толщи и генетически близкие оруденению интрузивные комплексы наиболее полно передают информацию об условиях образования золотого оруденения (генезисе) – геодинамическом режиме и палеотектонической обстановке. Именно на этом принципе чаще всего бывает основана геолого-генетическая типизация месторождений золота [7], [17], [18]. Месторождения в докембрии так же, как и в молодых областях, обнаруживают приуроченность к определенным вулканогенно-осадочным толщам и прорывающим их гранитоидным массивам и редко встречаются в гранито-гнейсовых ареалах и гранулитовых областях. Это позволяет предполагать связь золота с определенными этапами формирования этих толщ, магматизмом и гидротермально-метасоматическими процессами, сопровождающими его. Однако вмещающая среда, будучи рудоактивирующим фактором, не всегда является рудоконтролирующим. Последовавшая пенепленизация и глубокая эрозия докембрийских кратонов сопровождались образованием россыпей, которые затем со временем могли быть захоронены под платформенными осадками и метаморфизованы. Учитывая состав вмещающей среды и связь с магматизмом, можно выделить следующие группы месторождений в докембрии.

Сингенетичное оруденение (*первая группа*) связано с вулканогенно-осадочными толщами. К полосчатой железистой формации (BIF) железистых, сульфидных и карбонатных фаций приурочены месторождения, в которых наблюдается чередование вмещающих толщ с сульфидодержащими горизонтами (с пиритом, пирротином, арсенопиритом, золотом), иногда с магнетитовым оруденением. Особо выделяют ме-

сторождения в углеродистых толщах, благоприятных для отложения сульфидов. Генезис рудных объектов этой группы обусловлен экскальационно-гидротермальными процессами. К ним относят месторождения Вубачикве в Зимбабве, Люпин в Канаде, Маллапоконда в Индии, а также деформированные в складки и разообщенные руды месторождения Хоумстейк (север США). Но принадлежность большинства этих месторождений к группе сингенетических руд, на наш взгляд, требует тщательного анализа. В эту же группу попадает класс колчеданных стратифицированных месторождений, в которых встречается рассеянное золото.

Вторая группа объединяет докембрийские месторождения в гидротермально-измененных толщах кислого-среднего состава (туфах, туффитах, вулканитах), прорванных дайками, силлами либо штоками кислых порфиров. Они представлены Au-S-кварцевыми (карбонат-кварцевыми) прожилковыми типами либо локализованы в зонах эруптивных брекчий [11], [12]. Месторождения такого генезиса небольшие, но в целом по РП могут обладать большими запасами, например, РП Поркьюпайн – 1800 т (Холинджер). Среди них встречаются такие гиганты, как месторождение Хемло в Канаде. Генезис, субпластиовая локализация, источник золота и формационная принадлежность месторождения вызывают споры. Существуют две точки зрения на его образование: 1) вулканогенно-осадочное [76]; 2) связанное с внедрением гранит-порфиров Моус-Лейк [58], [60].

Третья группа объектов связана с вулканизмом кислого-среднего состава, гранитами и трещинной тектоникой и представлена месторождениями Au-Ag-содержащих полиметаллических руд (Pb-Zn-Cu). Они называются вулканогенные массивные сульфидные руды (VMS). Это месторождения Главного сульфидного пояса Финляндии, РП Норанда в Канаде (Хорн, Буска-2, Номагами) [49], [51], [54].

Четвертая группа – месторождения порфирового типа (Au-Cu-Мо- и Au-Cu-порфиревые), такие как Мак-Интар и Лак-Троилус в Канаде, Баддингтон в Австралии. Они связаны с малоглубинными интрузиями порфирового типа. К этой же группе относятся протерозойские месторождения Финляндии и Швеции [65], [36], [72], связанные с гранитами и представленные зональными рудными объектами Cu-Mo, Pb-Cu-Zn, W-Cu-Mo с Bi, Te, Au, Ag. В своей полиметаллической части эти руды сближены с подобными вулканогенного генезиса.

К *пятой группе* относятся Au-кварцевые, Au-S-кварцевые жильные или штокверковые месторождения, связанные с интрузивными комплексами Na-Ca и субщелочного ряда (гранит-порфирами, габбро-диорит-гранитами, монцонитами-сиенитами-гранитами). К ним относятся месторождения Сигма, Ламакви, Киркленд Лейк в Канаде, Глоб Феникс в Зимбабве, Морнинг Стар в Австралии. Оруденение локализуется как

в магматитах, так и в экзоконтактах интрузивов. Золоторудная минерализация в районе Тимиска-минг наложилась на толщи пулл-апарта и прорывающие их монцониты и лампрофиры.

Шестая группа – Au-Ag-содержащие Си-полиметаллические руды в скарнах [29], или Au-апоскарновые [18]. Они связаны с гранитами, прорывающими карбонатные толщи и формирующими сложного состава скарны с магнетитом, кассiterитом, висмутотеллуридами.

Седьмая группа – месторождений золота в базитах и ультрабазитах делится на две подгруппы: 1) имеющие непосредственную генетическую связь с базит-гипербазитовыми интрузиями и приуроченные к сульфидным горизонтам в раслоенных интрузиях и 2) локализованные в ширзонах и наложенные на базит-ультрабазитовые толщи. Месторождения 1-й подгруппы характерны для рифтогенных структур и представлены комплексными S-Cu-Ni и Cr-рудами магматического генезиса с ЭПГ и Au (к ним относятся Великая Дайка в Зимбабве, Бушвельд в ЮАР, Мончегорский и Бураковский массивы в Фенноскандии). Примерами объектов 2-й подгруппы являются золоторудные месторождения-гиганты в базитах и коматитах Австралии (Голден Майл, Калгурули, Норсмен), Индия (Колар), Зимбабве (Кем-Мотор), ЮАР (Монарх).

К *восьмой группе* относятся Au-Cu-U месторождения (а также более сложного комплексного состава, содержащие U, Cu, Au, Ag, Co, Mo, Se, РЗЭ, иногда V, Ti, Pd, Pt) в углеродистых или других осадочных протерозойских толщах, обычно приуроченные к стратиграфическим или иным структурным несогласиям, к трещиноватым или сдвиговым зонам (Падминское РП в Карелии). Для них редко устанавливается связь с гранитоидами. Уникальным объектом, расположенным в зоне дробления и метасоматической переработки вмещающих толщ, над апикальной областью монцонит-гранитного массива Баргоен, является месторождение-гигант Олимпик Дэм в ЮВ Австралии (Fe-O-Ag-Au-U-Cu-S) с запасами 1,2 тыс. т золота и возрастом ~1,6 млрд лет [53].

Девятая группа объединяет месторождения Au и U в кварцевых конгломератах – древних метаморфизованных россыпях (в ЮАР (Витватерсrand), в Гане, Канаде, Бразилии). Для многих месторождений этой группы сейчас доказано существование дополнительного гидротермального источника и привноса золота и других компонентов с отложением в кварцевых жилах.

СТРУКТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ И УСЛОВИЯ МЕТАМОРФИЗМА

Основными рудоконтролирующими структурами докембрийских золоторудных месторождений являются зоны сдвиговых деформаций, связанные с формированием аккреционно-коллизионных структур, которые коррелируются с пиком основных орогенических событий (де-

формации, гранитообразование, метаморфизм и метасоматоз) или завершают эти процессы. Среди критериев локализации крупных (с запасами > 100 т золота и содержанием Au 10 и более г/т), суперкрупных и гигантских ($> 500\text{--}1000$ т) экономически значимых месторождений золота главную роль играют структурные элементы трещинной и складчатой тектоники, в меньшей степени их размещение контролируется магматическими и литологическими образованиями [6], [7], [11], [12], [17], [18].

К рудоконтролирующим нарушениям относятся любые трещинные нарушения дорудного заложения, вдоль направления которых размещается оруденение. Систематизация рудоконтролирующих структур позволяет выделять среди них региональные и локальные. Региональные нарушения в пределах металлогенической зоны (от нескольких десятков до сотен километров) осуществляют контроль месторождений разных генетических типов. Локальные нарушения характеризуются меньшей протяженностью (1–10 км), отделены или оперяют главное направление и осуществляют контроль оруденения в пределах рудных узлов, полей и месторождений. Рудные поля и месторождения золота докембрия во всех известных случаях пространственно связаны с протяженными системами глубинных разломов. Считается, что сами разломы играют роль флюидо- иrudоподводящих каналов, тогда какrudовмещающими являются спаренные и оперяющие их сдвиговые зоны, литолого-стратиграфические горизонты или границы толщ. На основе этого выделяют две группы объектов: 1) стратифицированные и 2) структурно контролируемые. К стратифицированным относятся сингенетические месторождения, контроль оруденения в которых осуществляется неоднородностями пород, прослоями и тесно связан с литологическим фактором, иногда с синвулканическими разломами. К структурно контролируемым относятся крупные месторождения эпигенетических руд, имеющие непосредственную связь с интрузивами (границами, гранодиоритами, порфирами), близкие к главной фазе деформаций и постметаморфические. Рудо-контролирующими структурами в этом случае являются сдвиговые зоны: нарушения типа пологих надвигов (thrust), крутых (shear) и косо-наклонных (oblique) сдвигов и сдвигов с горизонтальной составляющей (strike-slip). Рудолокализующие структуры более разнообразны – это зоны разломов, рассланцевания и трещиноватости с широко проявленным метасоматозом и вкрашенным или жильным золото-сульфидным и золото-кварцевым оруденением. В масштабе рудных полей и месторождений выделяются следующие наиболее благоприятные для локализации оруденения деформации: пересечение разломов, крылья и осевые поверхности складок, асимметричные складки, флексуры, дуплексы, будинаж, реверсивные и ротационные

структуры, зоны рассланцевания, эшелонированные трещины и трещины типа «конского хвоста», штокверки и жильные зоны в ореоле порфировых даек и интрузий. Существуют закономерности в морфологии золото-кварцевых жил (в масштабе рудных тел) в зависимости от условий хрупко-пластичных деформаций и Р–Т условий среды. В условиях зеленосланцевой фации образуются ветвящиеся жилы, прожилки, в условиях амфиболитовой фации – более четкие пластовые и крупные жилы.

На Канадском щите в богатейшей золоторудной провинции Супериор, хорошо геологически и геохронологически изученной [33], [35], [49], [71], [73], известны два типа гидротермальных месторождений – сингенетические стратифицированные и структурно контролируемые в ореоле известково-щелочных гранитов, секущих ЗП. Среди последних главными рудоконтролирующими структурами в провинции Супериор (ЗП Абитаиби) являются тектонические зоны Кадиллак-Лардер и Дестор-Поркьюпайн, в пределах которых развиты гранитные тела и нарушения 2–3-го порядка. Формирование месторождений связывается с флюидами, поступающими по разломам. Они, в свою очередь, связаны с процессами обезвоживания погружающегося слэба, нижнекоровым метаморфизмом, образованием гранулитов (в зоне Капускасин), коровым магmatизмом и горячими инъекциями из мантии.

Первичное гидротермальное накопление золота в Зимбабве на Африканском континенте связывается с фельзитовым вулканизмом на стратифицированных месторождениях в полосчатых железистых формациях типа Вубачикве в ЗП Гванда и Булавайо [31], [70]. Структурно-контролируемое Au-кварцевое, Au-S-кварцевое и Au-S-оруденение Зимбабве связано с шир-зонами: 1) зоны деформаций и складки вокруг раннеорогенных plutонов (тоналитов, гранодиоритов) группы Сесомби либо 2) вдоль ССВ линейных сдвиговых зон, развивающихся спаренно с деформациями коллизионного пояса Лимпопо, образованного в результате коллизии кратонов Каапваль и Зимбабве. Шир-зоны представляют здесь продольные в плане, круто и умеренно падающие зоны сдвиговых дислокаций (или скальвания), в которых породы гораздо сильнее дислоцированы или брекчированы. Метаморфические преобразования в шир-зонах не превышают цеолитовой-зеленосланцевой фации, увеличиваясь к югу до амфиболитовой фации. В ЗП Бухва-Мвеза, примыкающего к северной части складчатого пояса Лимпопо, метаморфизм достигает $T = 580^\circ\text{C}$, $P = 5$ кбар [75]. Золоторудных месторождений в пояссе Лимпопо и шир-зонах ЗП Бухва-Мвеза, за исключением месторождения Ренко, неизвестно. Образование золотой минерализации в ЗП Мидландс происходило во время трех фаз деформаций [31]: главная 1-я фаза и гидротермального образования золота коррелируется со становлением гранитов групп-

пы Сесомби ($2,65 \pm 0,06$ млрд лет), деформациями Д1 с направлениями СЗ-ЮВ и З-В и левосторонней транспрессией по всей территории. 2-я фаза образования золотого оруденения связана с ремобилизацией вещества при региональных термических событиях около 2,52–2,57 млрд лет, коррелируемых с посттектоническими монцогранитами группы Чилиманзи (2,55–2,57 млрд лет). Эта фаза деформаций близка ко времени экскумации гранулитов Лимпопо – 2595 ± 13 млн лет [61]. 3-я фаза ($2,41 \pm 0,07$ млрд лет) образования золота коррелируется с образованием поздних фаз Великой дайки.

Архейские орогенические золоторудные месторождения широко представлены на Иллгарнском кратоне в Австралии. Несмотря на то что месторождения в ЗП этого кратона приурочены преимущественно к основным-ультраосновным породам РП Калгурли, встречаются также рудные объекты в вулканогенно-осадочных толщах (Кановна Белле, Санрайс Дем) и в гранитах (Голден-Ситес, Тармоола), поэтому литологический контроль не является определяющим. Здесь месторождения мирового класса контролируются структурами, которые образовались и/или были реактивированы во время основного регионального пика сдавливающих деформаций (Д2-Д4) ВСВ-ЗЮЗ направления [26], [34], [40], [41], [68], [69]. Оруденение «привязывают» к основному термальному пику метаморфизма (до амфиболитовой фации) и выведению на поверхность гранулитов на ЮЗ кратона [68]. На РП Калгурли золоторудная минерализация несколько оторвана от орогенных порфиров, гранитов и посттектонических сиенитов, монцогранитов (2665–2650 млн лет) и возникла позднее на 20 млн лет (~2640–2630 млн лет). Основной тип структур месторождений Австралии – это средне- или крутопогружающиеся шир-зоны, жилы, реже пологие надвиговые структуры. Золото встречается в нескольких типах залежей: 1) в хрупко-пластичных шир-зонах с кварцево-жильной системой; 2) во вкрапленных рудах, ассоциирующих с шир-зонами; 3) в форме штокверковых тел; 4) в пластовых телах («золоторудных рифах»). Для месторождений характерно сочетание нескольких структурно-текстурных типов руд и пересечения минерализованных зон.

Месторождение Колар в Индии [17] контролируется СЗ зонами разломов (Балагхатским, Майсурским и Гиффордским), имеющим горизонтальную и вертикальную компоненту смещения до 100–150 м и относимым к левосторонним сбросо-сдвигам. Золото приурочено к структурам меридионального простирания, к крутопадающим жилам и зонам с сульфидной вкрапленностью. Вмещающие толщи претерпели складчатость и метаморфизм амфиболитовой фации.

В соответствии с коллажированным характером ЗП Карелии и с учетом стадийности их развития (акреционно-коллизионной) можно наметить перспективные типы рудоконтролирующих структур для этой территории: 1) зоны де-

формаций, контролирующие размещение кисло-средних порфировых даек и тел, и ареал их распространения; 2) сдвиговые зоны в ореоле ранне-, син- или позднеорогенных интрузивов; 3) сдвиговые зоны синеклизаационных этапов деформаций позднеархейского или свекофеннского возрастов и сопровождающие их разломы; 4) раннерифейские деформации.

РУДОПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЙ ЭТАП И ДЛЯТЕЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССОВ

Как показывает геохронологическое датирование, формирование крупных и гигантских месторождений имеет длительную историю от начала заложения структур, к которым они приурочены, накопления оруденения дорудного этапа до образования промышленных концентраций, а также и их более позднего переотложения [6]. Длительная подготовка идет и на уровне нижней мантии, и в коре, а непосредственное рудоотложение происходит в относительно короткий промежуток времени. Например, формирование месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь) началось в рифее с накопления осадков со слабозолотоносным пиритом [8], [15]. Золото-арсенопирит-пиритовые руды отложились в герцинскую эпоху. В кайнозое произошло переотложение Au и его локальное скопление в карсте, а затем образование россыпей (от 1,2–0,9 до 0,3 млрд лет).

Учитывая значительную роль предрудной подготовки, можно выделить два варианта формирования месторождений [14]: 1) в результате одного тектономагматического цикла; 2) в течение нескольких циклов. В первом случае подготовка по длительности и смене геодинамических режимов укладывается в один цикл Вильсона или его часть (~200 млн лет). Этот вариант присущ кайнозойским и современным вулканическим островодужным системам и был установлен для многих позднеархейских ЗП, не подвергшихся наложенной тектономагматической активизации и метаморфизму, вызывающих омоложение, реовинацию земной коры и приводящих к появлению новых генераций руд. Например, в провинции Супериор в Канаде в ЗП Абитаи (возраст пород – 2,75–2,67 млрд лет [35]) отложение золота укладывается в интервал 20–50 млн лет на рубеже 2663–2580 млн лет (U-Pb возраст по титаниту, рутилу, монациту из метасоматитов) и происходит после главной фазы складчатости и метаморфизма. (Возраст по слюдам – 2579–2450 млн лет; K-Ar метод.)

В варианте с длительностью более 200 млн лет возможна реовинация коры, повторение тектономагматических циклов, смена геодинамических обстановок. Это характерно для мезозойских месторождений СВ России. На Украинском щите в Чертомлыкской архейской зеленокаменной структуре золотая минерализация имеет AR-и PR-возраст [3], [21]. Подобная ситуация характерна для многих архейских объектов Карелии и месторождения Колар в Индии.

РУДНО-ФОРМАЦИОННЫЕ ТИПЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА

Общепризнанной классификации золоторудных месторождений не существует, хотя накоплен большой опыт их систематизации [6], [7], [13], [17], [18], [22], [29], [50], [51], [52]. Используется и геолого-промышленная типизация месторождений [1], [11]. В систематиках зарубежных и отечественных ученых доминируют такие признаки, как состав вмещающей среды, глубина формирования, структурный критерий и тип изменений [16]. По температуре образования традиционно выделяют эпи-, мезо- и гипотермальные месторождения, иногда даже эти слова вводят в название РФ [72]. Многомерная систематика рудных объектов фанерозоя [6; 8–9] представляется наиболее полной, так как учитывает обстановки их формирования. Среди гидротермальных месторождений золота Ю. Г. Сафонов выделяет до 20 типов, три из них отнесены к типичным для докембрия: 1) золотосиликатно-сульфидные стратиформные в железистой формации ЗП (Лупин в Канаде, Морроу-Велью в Бразилии, Хоумстейк в США, Бубачикве в Зимбабве); 2) Au-кварцевые и Au-карбонатные жильные в ЗП (Колар в Индии, Доум, Холлинджер, Лардер Лейк, Йеллоунайф в Канаде, Калгурли, Норсмен в Австралии, Кем Мотор в Зимбабве); 3) Au-S-барит-кварцевые вкрапленно-прожилковые в ЗП (Хемло, Канада). Для зарубежной части Фенноскандии выделены: 1) золотосодержащие вулканогенные массивные колчеданные руды (VMS), 2) Au-Cu-порфировые, 3) Au-скарновые, 4) орогенические мезотермальные в шир-зонах, 5) палеороссыпные [47], [48], [72].

Рудно-формационные типы называются по ведущим элементам руд: золоторудная, золото-сульфидная, золото-полиметаллическая, золото-теллуровая. В длительно развивающихся областях возможно совмещение разных РФ типов. *Минеральные типы* руд традиционно выделяются по ведущим минералам. К ним относятся золото, пирит, пирротин, арсенопирит, халькопирит, галенит, сфалерит, молибденит, стибнит, висмутотеллуриды, сульфосоли, серебро. Из нерудных минералов наиболее широко развиты кварц, карбонаты (доломит, кальцит, анкерит), турмалин, хлорит, серицит, фуксит, альбит, микроклин, барит (см. таблицу). На месторождении Хемло (Канада) встречаются кварц, барит, золото, пирит,

молибденит, арсенопирит, теллуриды, реальгар, киноварь; в ультрабазитах РП Калгурли (Австралия) – Au-Te-минерализация (золото, пирит, шеелит, арсенопирит, теллуриды). На месторождении Монарх (ЮАР) среди ультрабазитов распространены стибнит, бертьерит, арсенопирит, ульманнит, герсдорфит, тетраэдрит, золото, шеелит, что указывает на разные источники вещества.

ВЫВОДЫ

Учитывая геодинамику развития древних щитов и эволюцию магматизма, в раннем докембрии можно выделить несколько ведущих обстановок образования месторождений золота [7], [42], [43], [44]. Особо выделяются кварцевые конгломераты, в которых формирование богатых золотоносных рифов связывается с поздними гидротермами и глубинными источниками. Орогенический режим максимального проявления гранитного плутонизма и структурно-тектонических деформаций относится к наиболее перспективным условиям локализации гидротермальных золоторудных объектов (в шир-зонах). Рифтогенные обстановки стоят на третьем месте по значимости: в этих условиях Au накапливается с ЭПГ в расслоенных базитах-ультрабазитовых интрузиях.

Факторами, контролирующими месторождения золота в орогенных областях докембрийских щитов, являются: 1) литологический (благоприятные рудовмещающие толщи, углеродистые сланцы, полосчатые железистые формации); 2) магматический (малоглубинные интрузии и дайки кисло-среднего состава); 3) структурно-тектонический (формирование крупных региональных шир-зон, локальных складчато-разрывных дислокаций, непосредственно рудных тел, жил и сопровождающих метасоматитов); 4) метаморфический фактор (фации низких и умеренно барических режимов, зеленосланцевая-амфиболитовая); 5) средне- и низкотемпературные метасоматические изменения в ореоле интрузивных тел, даек и в шир-зонах; 6) кислотность-щелочность среды и состав флюидов.

Представления о генезисе месторождений можно составить, понимая всю историю его развития и накопления руд. Знание всех этих факторов необходимо при проведении металлогенического анализа территории Восточной Фенноскандии, ее оценки на золото и планировании поисковых работ.

Докембрейские мезотермальные месторождения золота

Месторождения	Запасы золота	Тип месторождений	Вмещающие породы	Метаморфизм	Рудная минералогия	Стиль изменений
Канада						
З/п Абигиби						
Холинджер-Макинтайр. РП Поркьюпайн	1000 т 1,8 тыс. т	кварцевые жилы, штокверки, шир-зоны	мафитовые и фельзито-вые потоки, кварц-плагиопорфиры, пирокласти	3С	золото, пирит, пирротин, (галенит, сфалерит)	серцицит, анкерит (хлорит, кальцит, кварц, альбит)
Доум	> 350 т	кварцевые или анкеритовые жилы и штокверки	мафические вулканиты, сланцы, конгломераты, фельзитовые порфиры	3С	золото, пирит, пирротин, (халькопирит, сфалерит)	анкерит, пирит, серцицит
Кэрр Эдисон, Лардер Лэйк. Кирклэнд Лэйк. РП Поркьюпайн	> 320 т > 700 т 760 т	штокверки и лестничные жилы	высоко-Mg-базальты, толеиты, порфиры, дайки сиенитов, осадки	3С	золото, пирит, шеелит, арсенопирит	анкерит, доломит, альбит, мусковит
Ламаква (Сигма) Вал-д-Ор	150 т > 110 т	крутые жилы и брекчии в шир-зонах, пологие жилы	долериты, андезитовые потоки, плагиопорфировые дайки	3С	золото, пирит, пирротин, (сфалерит, халькопирит, галенит, теллуриды, шеелит)	кальцит, белая слюда
Лэйк Шоур, Райт-Хэгрилас, Тег-Хугс	> 250 т 150 т 115 т	Листоватые жилы, штокверки и брекчии внутри шир-зон	щелочные интрузивы, кластические осадки, щелочные вулканиты	3С	Золото, пирит, халькопирит, (молибденит, теллуриды, гематит, галенит, сфалерит, барит)	анкерит, доломит, белая слюда
Хемло						
Пэйдж Вильямс Голден Гиант, Дэвид Белл	> 290 т ~190 т ~105 т Сум. 600 т	вкрашенные рассланцованные в туфах	кварц-полевошпат-мусковитовые сланцы (кристаллотуфы), конгломераты	3С-А	золото, пирит, молибденит, сфалерит, арсенопирит, стибнит, тетраэдрит, тенинантит, реальгар, киноварь, барит	микроклин, мусковит, V-слюда, биотит, флогопит, (кианит, силлиманит)
Ред Лэйк						
Кэмпбелл, Рэд Лэйк	~170–190 т	жильная система параллельная и косая к шир-зоне	химические осадки (карбонатные и BIF)	3С	золото, пирит, пирротин, арсенопирит, магнетит, шеелит	доломит, кальцит, кварц хлорит, альбит
Йеллоунайф						
Гигант Кон-Рикон Йеллоунайф	> 180 т (107) т Сум. 300 т	кварцевые жилы в крутой хрупко-пластичной шир-зоне	шаровые потоки базальтов	А	золото, пирит, (стибнит, сульфосоли шеелит, галенит)	серцицит, анкерит, хлорит, альбит
Австралия						
Йилгарн						
РП Калгурли Голден Майл	2500 т ~1800 т	сдвиги круговые, пластичные и хрупкие разломы, реже брекчии	силл толеитовых долеритов	3С	золото, пирит, (шеелит), арсенопирит, теллуриды	мусковит, анкерит, пирит, кварц
Сонс Гвалиа	> 90 т	круглая шир-зона, будинированные кварцевые жилы	толеиты и высоко-Mg-базальты	3С	золото, пирит, арсенопирит, реже пирротин, халькопирит	мусковит, биотит, анкерит, пирит
Марароа-Краун, Норсмен	> 70 т	смятые ленточные кварцевые жилы	толеитовые базальты и ультрамафиты	3С	золото, пирит, (галенит, шеелит, теллуриды)	биотит, амфибол, (хлорит, карбонат)
Биг-Белл, Марчисон	> 90 т	кварцевые жилы	толеитовые базальты и долериты	А	золото, пирит, арсенопирит, пирротин, стибнит, халькопирит, галенит шеелит, магнетит	пирит, мусковит, (кварц, микроклин, рутил, силлиманит)
Г. Шарлотта, Калгурли	> 70 т	–	гранофиры, силл долеритов	3С	золото, пирит, шеелит	серцицит, кварц, альбит анкерит

*Продолжение таблицы***Зимбабве**

Мидландс						
Кэм-Мотор	~150 т	крутые жилы и штокверки, в шир-зоне	толеитовые и высоко-Mg-базальты, андезиты, долериты, осадки	3С	золото, пирит, арсенопирит, стибинит, (сфалерит, шеелит)	кварц, анкерит
Феникс	> 105 т	кварцевые жилы и штокверки	дуниты, перидотиты	3С	золото, пирит, стибинит, арсенопирит	магнезит, фуксит, тальк
Дэлни	> 50 т	жилы и вкрапленность в круtyх хрупко-пластичных шир-зонах	потоки толеитовых базальтов	3С	золото, пирит, арсенопирит, реже халькопирит, галенит, шеелит, тетраэдрит, сфалерит	анкерит, белая слюда, хлорит, альбит
Голден Вэллей-Пачвэй	> 45 т	ленточные кварцевые жилы в узких шир-зонах	толеитовые базальты, реже порфиры кварц-полевошпатовые	3С	золото, пирит, арсенопирит, реже шеелит, галенит, халькопирит, сфалерит	кальцит, белая слюда, рутил, пирит
Глоб-Феникс	120 т	кварцевые жилы и штокверки в измененных ультрамафитах	граниты, магнезитовые сланцы по ультрамафитам	3С	золото, стибинит, арсенопирит, пирит, (сфалерит, галенит)	магнезит, тальк; белая слюда, карбонат (в гранитах)
Шамва	> 50 т	узкие кварцевые жильные тела в рас-сланцованных поро-дах	переработанные риода-цитовые агломераты и туфы	3С	золото, пирит, реже сфалерит, пирротин, халькопирит, галенит арсенопирит	карбонат, пирит, белая слюда
Ренко, пояс Лим-попо	~17 т	хрупко-пластичные шир-зоны, поздние жилы	гранулиты по эндерби-там	Г	золото, пирротин, халькопирит, пирит, висмутин	серпентин, биотит, серицит (эпидот)

Индия

Колар	> 790 т	кварцевые жилы и жильные тела в шир-зонах в амфиболитах и в BIF	базальты, ультрамафиты, химические осадки (BIF)	А	золото, пирит, пирротин, арсенопирит, реже сфалерит, галенит, шеелит	кварц, диопсид, роговая обманка, биотит (серицит, хлорит, кальцит, анкерит)
Хатти	> 30 т	рассеянные жилы в шир-зонах	Fe-толеиты, фельзито-вулканиты и метаосадки	3С-А	золото, арсенопирит, пирит, халькопирит, пирротин, шеелит	хлорит, биотит, серицит, кальцит и анкерит

Бразилия

Минас Жераис, Морроу Велью, Рапосос	320 т	массивные, гнездовые сульфидные и сульфид-кварцевые руды в сланцах	кварц-доломит-(цидерит)-альбитовые сланцы (карбонатные фации BIF)	3С-А	золото, пирротин, арсенопирит, пирит, (халькопирит, тетраэдрит, борнит, сфалерит, стибинит, галенит)	фуксит, пирит, (альбит, кварц)
-------------------------------------	-------	--	---	------	--	--------------------------------

ЮАР

Барбертон						
Новый Консорт, Шеба, Фаирвью, Агнес	55 т 65 т 38 т 19 т	массивные и вкрапленные сульфидные руды в шир-зонах, брекчии	кварциты, кластические осадки, ультрамафиты	3С	золото, арсенопирит, пирротин, пирротин, пирит, (халькопирит, пентландит)	карбонат, кварц
Мурчисон	60 т	залежи-линзы, параллельные шир-зоны. Руды массивные и вкрапленные	ультрамафитовые потоки (измененные), метаосадки	3С	золото, стибинит, бертьерит, пирит, арсенопирит, реже тетраэдрит, ульманнит, герцдорфит, шеелит	карбонат, кварц

Карелия (архейские з/к пояса и протерозойские структуры)

Педролампи (AR ₂)	40 т	кварцевые жилы в милонитах шир-зоны (AR ₂ , PR ₁) и их ССВ и СЗ пересечения	базальты, карбонат-хлорит-серийцитовые сланцы по песчаникам и конгломератам	3С	золото, пирит, халькопирит, МПГ, серебро	карбонат, пирит, кварц, серийцит, хлорит, турмалин
РП Таловейс: Таловейс (1), Берендей	Сум. 46 т	кварцевые жилы в шир-зоне и вкрапленность	гранит-порфиры, кварцевые диориты (1)	А (вмещающие)	золото, пирит, реже Ви-Te	кварц, серийцит, альбит, микроклин

Окончание таблицы

Рыбозеро	15 т	колчеданы массивные (1) и вкрапленные (2) в шир-зоне	вулканогенно-осадочная толща 1), метакоматиты (2)	3С-ЭА	золото, пирит, халькопирит, арсенопирит, Ni-Sb-As, галенит, Bi-Te и др. (1). Пирит, золото, МПГ (2)	серицит, кварц, цинцит (1), пирит, карбонат, тальк, хлорит (2)
Лобаш-1	8,7 (50)	пологие залежи, вблизи контакта с дайками. Руды вкрапленно-прожилковые	метатуфы и андезиты, метагаббро, порфировые дайки	ЭА-А	пирротин, халькопирит, сфалерит, галенит, Bi-Te, золото, электрум	биотит, эпидот, кварц, карбонат, хлорит
Майское	(C ₂ +P ₁) – 9 и 11 т (20 т)	кварцевые жилы в СВ шир-зонах	метабазальты (PR ₁ jt)	3С	золото (пирит, пирротин, галенит, сфалерит)	хлорит, альбит, кальцит, кварц, серицит, Ba-полевые шпаты
Воицкое		кварцевые жилы в СВ шир-зонах	кварцито-песчаники (PR ₁ jt)	3С	золото, борнит, халькопирит, Ag-Se	серицит, барит, кварц, монацит

Кольский п-ов

Пеллапахк	P ₁ -24 т	сульфидно-кварцевые жилы	граниты, вмещающие толщи	А	молибденит, халькопирит, золото	кварц, мусковит
Оленинское	P ₁ -3 т P ₂ -5 т	шир-зона с гнездово-вкрапленной минерализацией	амфиболиты	А	арсенопирит, золото, серебро	Кварц, биотит, актинолит, эпидот
Няльм 1, 2	P ₁ -3 т (1) + 3,4 т (2)	жилы кварцевые и штокверк	шток габбро-диоритов (1). Габбро-диабазы (2)	А	пирит пирротин, золото, халькопирит Bi-Te, арсенопирит	кварц, мусковит, биотит, эпидот актинолит

Финляндия

З/п Хатту (AR ₂). РП Иломантси (Валкеасуо (1), Пампало)	Запасы 50 т 2,75 т 8,1 т	С-Ю шир-зона. Контакты с гранитоидами и порфировыми дайками	слюдистые сланцы по туфам, дайки, гранодиориты (1). Метабазальты и метакоматиты (2)	3-А	пирротин, пирит, арсенопирит (1). Пирротин, пирит, халькопирит, Bi-Te галенит, золото(2)	кварц, серицит, турмалин (1), биотит, альбит, микроклин, кальцит (2)
Лапландский з/п Сааттапора (PR ₁)	6,3 т	зона 3-В (линия Сиркка)	сланцы по метаосадкам и туфам среднего состава. Прорваны долеритами.	3	пирит, пирротин, халькопирит, герсдорфит, пентландит, золото и др.	альбит, карбонат серицит, в жилах – кварц, Fe-карбонат, турмалин
Пахтаваара	15 т	пересечение зон разломов С3 и СВ	метакоматиты	3	магнетит, пирит, халькопирит, золото пентландит, миллерит, пирротин	карбонат, тальк, хлорит, барит, кварц, турмалин
Сурикосикко	110 т	вкрапленно-прожилковое в шир-зоне	черные сланцы, туффи-ты	3С	арсенопирит, золото, мальдонит, сам. висмут	альбит, карбонат, серицит
Юомасуо	3,36 т	С-Ю шир-зона	основные метавулканиты, серицитовые кварциты	ЭА-3С	пирротин, пирит, Со-пентландит, халькопирит, Bi-Te золото, галенит	альбит, хлорит, актинолит, серицит, биотит, карбонат
Сланцевый пояс Тампере: Кутемаярви (Оривеси), Хавери	13 т 28 т	зона рассланцевания; Хавери: VMS-тип в складчатой структуре	вулканогенно-осадочная толща среднего состава; фельзиты, метабазальты	ЭА	пирит, Te-Bi, галенит, золото; пирит, пирротин, халькопирит, Bi-Te, сфалерит, золото	биотит, хлорит, в жилах – кварц, эпидот, биотит, хлорит, амфибол, сульфиды
Зона Раахе-Хаапаярви: Лайвакангас, Лауриноя, Осиконмяки	33,7 т 4,6 т 4,4 т	шир-зоны С3 и ЮВ простирации и расланцевание вблизи контакта	тоналиты и вмещающие сланцы, метабазальты	ЭА-А	пирротин, арсенопирит, леллингит, халькопирит, сфалерит, галенит, золото, электрум, Bi-Te, шеелит	биотит, кварц, микроклин, турмалин серицит, альбит, хлорит, (диопсид)
Копса	14 т	пересечение С3 и СВ зон, жильная штокверкового типа	шток гранит-порфиров в вулканогенно-осадочной толще	А	халькопирит, арсенопирит, золото пирротин, сфалерит леллингит, Bi-сульфосоли	кварц, биотит, микроклин, амфибол

Примечание. Данные по [51], [48], [72], [9], [2]. 3 – зеленосланцевая, ЭА – эпидот-амфиболитовая, А – амфиболитовая, Г – гранулитовая.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беневольский Б. И. Золото России. М.: Геоинформцентр, 2002. 462 с.
2. Гавриленко Б. В. Минерагения благородных металлов и алмазов северо-восточной части Балтийского щита: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Апатиты, 2003. 60 с.
3. Коваль В. Б., Коптюх Ю. М., Ярошук М. А. и др. Золоторудные месторождения Украинского щита (Украина) // Геология рудных месторождений. 1997. Т. 39. № 3. С. 229–247.
4. Кожевников В. Н. Архейские зеленокаменные пояса как аккреционные орогены. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. 269 с.
5. Кожевников В. Н., Головбев А. И., Рыбаков С. И. Рудоконтролирующие факторы золотоносности в архейских зеленокаменных поясах (на примере Сьююриор и Карельского кратонов) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. С. 5–23.
6. Константинов М. М., Некрасов Е. М., Сидоров А. А., Стружков С. Ф. Золоторудные гиганты мира. М.: Научный мир, 2000. 269 с.
7. Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. Т. 2. Стратегические виды рудного сырья. М.: ИГЕМ РАН, 2006. 672 с.
8. Лаверов Н. П., Дистлер В. В., Миторфанов Г. Л. и др. Платина и другие самородные металлы в рудах месторождения золота Сухой Лог // ДАН. 1997. Т. 255. № 5. С. 664–668.
9. Минерально-сыревая база Республики Карелия. Петрозаводск: Карелия, 2005. Кн. 1. 278 с.
10. Михайлов В. А. Геологические особенности месторождений золота Западной Африки // Геология рудных месторождений. 2002. Т. 44. № 6. С. 500–509.
11. Некрасов Е. М. Зарубежные эндогенные месторождения золота. М.: Недра, 1988. 286 с.
12. Некрасов Е. М. Главные геолого-структурные типы и особенности крупных эндогенных месторождений золота // Отечественная геология. 1996. № 2. С. 19–29.
13. Петровская Н. В., Сафонов Ю. Г., Шер С. Д. Формации золоторудных месторождений // Рудные формации эндогенных месторождений. Т. 2. М.: Наука, 1976. С. 3–110.
14. Рундквист Д. С. Фактор времени при формировании гидротермальных месторождений: периоды, эпохи, этапы и стадии рудообразования // Геология рудных месторождений. 1997. Т. 39. № 1. С. 1–24.
15. Рундквист И. К., Бобров В. А., Смирнова Т. Н. и др. Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района // Геология рудных месторождений. 1992. Т. 34. № 6. С. 3–15.
16. Сazonov V. N., Ogorodnikov V. N., Koroteev V. A., Polenov Yu. A. Mestorozhdeniya zolota Urala. Ekaterinburg: Izd-vo UGGA, 2001. 621 c.
17. Сафонов Ю. Г. Гидротермальные золоторудные месторождения: распространность – геолого-генетические типы – продуктивность рудообразующих систем // Геология рудных месторождений. 1997. Т. 39. № 1. С. 25–40.
18. Сафонов Ю. Г. Золотосульфидные и золотосодержащие месторождения мира – генезис и металлогенический потенциал // Геология рудных месторождений. 2003. Т. 45. № 4. С. 305–320.
19. Сафонов Ю. Г. и др. Золоторудное поле Колар (Индия). М.: Наука, 1988. 232 с.
20. Сафонов Ю. Г., Прокофьев В. Ю. Модель конседиментационного гидротермального образования золотоносных рифов Витватерсрранда (ЮАР) // Геология рудных месторождений. 2006. № 6. С. 1–37.
21. Фомин Ю. А., Демихов Ю. Н., Лазаренко Е. Е. Генетические типы золотого оруденения архейских зеленокаменных структур Украинского щита // Минералогический журнал. 2003. Т. 25. № 1. С. 95–103.
22. Шер С. Д. Металлогенез золота: В 2 кн. М.: Недра, 1972.
23. Щеглов А. Д. О металлогении Южно-Африканской Республики, генезисе золоторудных месторождений Витватерсрранда и проблеме открытия их аналогов в России. СПб: ВСЕГЕИ, 1994. 34 с.
24. Щеглов А. Д. Генетическая модель месторождений Витватерсрранд и проблема золотоносности конгломератов // Отечественная геология. 1996. С. 47.
25. Barley M. E. The Pilbara craton // Greenstone belts. Oxford, 1997. P. 581–607.
26. Barley M. E., Brown S. Y. A. et al. Tectonic evolution of the Kalgoorlie terrane: gold mineralisation in a Late archean orogen // 4-th International Archean symposium. Extended abstracts. AGSO-Geoscience Australia. 2001. P. 379–381.
27. Barley M. E., Groves D. I. Deciphering the tectonic evolution evolution of archaean greenstone belts: the importance of contrasting histories to the distribution of mineralization in the Yilgarn craton, Western Australia // Precambrian Research. Vol. 46. 1990. P. 3–20.
28. Bergman Weihed J., Bergston U. et al. Geologic, tectonic setting, and origin of the Paleoproterozoic Boiliden Au-Cu-As deposit, Skellefte district, northern Sweden // Economic geology. 1996. Vol. 91. P. 1073–1097.
29. Boyce R. W. The geochemistry of gold and its deposits (together with a charter on geochemical prospecting for the element) // Canada geological Survey Bull. 1979. Vol. 280. 584 p.
30. Brandal G., de Wit M. J. The Kaapval craton // Greenstone belts. Oxford, 1997. P. 581–607.
31. Campbell S. D. G., Pitfield P. E. J. Struktural controls of gold mineralization in Zimbabwe Craton-Exploration guidelines // Zimbabwe geological Survey Bull. 1994. № 101. 270 p.
32. Card K. D. A review of the Superior Province of the Canadian Shield, a product of Archaean accretion // Precambrian Research. Vol. 48. P. 99–156.
33. Card K. D., Poulsen K. H., Robert. The Archean Superior Province of the Canadian Shield and its Code gold deposits // Econ. Geol. 1989. № 6. P. 19–36.
34. Cassidy K. F., Hegemann S. G. «World-class» archean orogenic gold deposits, eastern Yilgarn Craton: Diversity in timing, structural controls and mineralization styles // 4-th International archean symposium. Extended abstracts. AGSO-Geoscience Australia. 2001. P. 382–384.
35. Corfu F. The evolution of the Southern Abitibi greenstone belt in light of precise U-Pb geochronology // Econ. Geol. 1993. Vol. 88. № 6. P. 1323–1340.
36. Gaal G. Tectonic styles of Early Proterozoic ore deposition in Fennoscandian Shield // Precambrian Research. 1990. Vol. 46. P. 83–114.
37. Gaal G., Sundblad K. Metallogeny of gold in the Fennoscandian Shield // Min. Deposita. 1990. Vol. 25. P. 104–114.
38. Gabert G. Lithostratigraphic and tectonic setting of gold mineralization in the archean cratons of Tanzania and Uganda, East Africa // Precambrian Research. Vol. 46. 1990. P. 59–69.
39. Geological development, gold mineralization and exploration methods in the late Archean Hattu Shist belt, Ilomantsi, eastern Finland / Ed. by Pekka A. Nurmi and P. Sorjonen-Ward // Geological Survey of Finland. Sp. paper 17. Espoo, 1993. 386 p.

40. Grigson M. W., Groves D. I. Structural controls on orogenic lode-gold deposits of the Yilgarn Craton // Econ. Geol. 1999. № 94. P. 388–390.
41. Groves D. I. The crustal continuum model for late-archean lode-gold deposits of the Yilgarn Block, Western Australia // Min. Deposita. 1993. Vol. 28. P. 366–374.
42. Groves D. I., Barley M. E. Archean mineralization // Archean evolution / Ed. K. Kondi. 1994. P. 461–503.
43. Groves D. I., Condie K. C., Goldfarb R. J., Hronsky M. D., Vielreicher R. M. Secular changes in global tectonic processes and their influence mineral deposits // Econ. Geol. 2005. Vol. 100. P. 203–224.
44. Groves D. I., Goldfarb R. J. et al. Gold deposits in metamorphic belt: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance // Econ. Geol. 2003. Vol. 98. P. 1–29.
45. Groves D. I., Phillips N., Susan E. H., Housoun S. M., Standing C. A. Craton-scale distribution of Archean greenstone gold deposits: predictive capacity of the metamorphic model // Econ. Geol. 1987. № 8. P. 2045–2058.
46. Gulson L. B., Mizon K. J., Atkinson B. T. Source and timing of gold and other mineralization in the Red Lake area, northwestern Ontario, based on lead-isotope investigations // Can. J. Earth Sci. Vol. 30. P. 2366–2379.
47. Eilu P. FINGOLD. Geological Survey of Finland. 1999. 146. 224 p.
48. Eilu P., Sorjonen-Ward P., Nurmi P., Niiranen T. A review of gold mineralization styles in Finland // Econ. Geol. 2003. Vol. 98. P. 1329–1353.
49. Feng R., Fan J., Kerrich R. Noble metal abundances and characteristics of six granitic magma series, Archean Abitibi belt, Poontiac Sudprovince: relationships to metallogeny and overprinting of mesothermal gold deposits // Econ. Geol. 1993. Vol. 88. № 6. P. 1376–1401.
50. Hagemann S. G., Cassidy K. F. Archean orogenic lode gold deposits // Rev. Econ. Geol. 2000. № 13. P. 9–68.
51. Herrington R. J., Evans D. M., Buchanan D. L. Metallogenic aspects // Greenstone Belts. Oxford, 1997. P. 176–219.
52. Hytchinson R. W. Metallogeny of Precambrian gold deposits: space and time relationships // Econ. Geol. 1987. Vol. 82. № 8. P. 1993–2007.
53. Johnson J. P., Cross K. C. U-Pb geochronological constraints on the genesis of the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, South Australia // Econ. Geol. 1995. Vol. 90. № 5. P. 1012–1045.
54. Kerr D. Y., Gibson H. L. A comparison of Horne volcanogenic massive sulfide deposit and Intracauldron deposits of the mine sequence, Noranda, Quebec // Econ. Geol. 1993. Vol. 88. № 6. P. 1419–1442.
55. Kerrich R., Goldfarb R. J., Groves D. I., Garwin S. The geodynamics world class gold deposits: Characteristics, space-time distribution, and origins // Reviews in Econ. Geol. 2000. Vol. 13. P. 501–551.
56. King J., Helmstaedt H. The Slave Province, North-West Territories // Greenstone belts. Oxford, 1997. P. 233–254.
57. Kuehn St., Ogola Y., Sango F. Regional setting and nature of gold mineralization in Tanzania and Southwest Kenya // Precambrian Research. Vol. 46. 1990. P. 71–82.
58. Kuhns R. Y., Sawkins F. I., Ito E. Magmatism, metamorphism and deformation at Hemlo, Ontario and the Timing of Au-Mo mineralization in the Golden Giant mine // Econ. Geol. 1984. Vol. 89. P. 720–756.
59. Leube A., Hirdes W., Mauer R., Kesse G. O. The Early Proterozoic Birimian super group of Ghana and some aspects of its associated gold mineralization // Precambrian Research. 1990. Vol. 46. P. 139–165.
60. Lin S. Stratigraphic and structural setting of the Hemlo Gold Deposit, Ontario, Canada // 4-th International Archean symposium. Extended abstracts. AGSO-Geoscience Australia. 2001. P. 446.
61. McCourt S., Armstrong R. A. Shrimp U-Pb zircon geochronology of granites from the Central Zone Limpopo belt, Southern Africa: Implications for the age of the Limpopo orogeny // 4-th International Archean symposium. Extended abstracts. AGSO-Geoscience Australia. 2001. P. 332–333.
62. Myers J. S. Swager C. The Yilgarn craton, Australia // Greenstone belts. Oxford, 1997. P. 640–656.
63. Naganna C. Gold mineralization in the Hatti Mining area, Karnataka, India // Econ. Geol. 1987. Vol. 82. № 8. P. 2008–2016.
64. Neumayr R., Hagemann S. G., Groves D. I. Chemical signatures of hydrothermal fluids in archean transcrustal fault zones // 4-th International Archean symposium. Extended abstracts. AGSO-Geoscience Australia. 2001. P. 396–397.
65. Nurmi P. Applications of lithogeochemistry in the search for Proterozoic porphyry-type molybdenum, copper and gold deposits, southern Finland // Geological survey of Finland. Espoo, 1984. Bul. 329. 42 p.
66. Percival Y. A., Skulski T. et al. Neoarchean assembly of the Superior Province // 4-th International Archean symposium. Extended abstracts. AGSO-Geoscience Australia. 2001. P. 341–342.
67. Phillips N. E., Powell R. Link between gold provinces // Econ. Geol. 1993. Vol. 88. P. 1084–1098.
68. Qui Y., Groves D. I. Late Archean collision and delamination in the southwest Yilgarn Craton: the driving force for archean orogenic lode-gold mineralisation // Econ. Geol. 1999. № 94. P. 115–122.
69. Ross A. A., Barley M. E. et al. Two generations of gold mineralisation at the Kanowna Belle gold mine, Yilgarn Craton // 4-th International Archean symposium. Extended abstracts. AGSO-Geoscience Australia. 2001. P. 398–399.
70. Saager R., Oberthir T., Tomosci H. P. Geochemistry and mineralogy of banded iron-formation-hosted gold mineralization in the Gwanda greenstone belt, Zimbabwe // Econ. Geol. 1987. № 8. P. 2017–2032.
71. Stott G. M. The superior Province, Canada // Greenstone Belts. Oxford, 1997. P. 480–507.
72. Sundblad K. Metallogeny of gold in the Precambrian of Northern Europe // Econ. Geol. 2003. Vol. 98. P. 1271–1290.
73. Sutcliffe R. H., Barrie C. T., Burrows D. R., Beakhouse G. P. Plutonism in southern Abitibi Subprovince: a tectonic and petrogenetic framework // Econ. Geol. 1993. Vol. 88. № 6. P. 1359–1375.
74. Thurston P. C., Chivers K. M. Secular variation in greenstone sequence development emphasizing Superior province, Canada // Precambrian Research. Vol. 46. 1990. P. 21–58.
75. Tsunogae T., Nabara A., Fukui T. et al. Ultrahigh-temperature metamorphism of the Archean Limpopo belt and its thermal effect on the adjacent low-grade Zimbabwe Craton, Southern Africa // 4-th International Archean symposium. Extended abstracts. AGSO-Geoscience Australia. 2001. P. 362–364.
76. Valliant R. I., Badrook C. Y. Relationship between stratigraphy, faults and gold deposits, Page Williams Mine, Hemlo, Ontario, Canada // In Macdonald A. Y. ed Proceedings of gold'86 an International symposium on the geology of gold. Toronto, 1986. P. 355–376.
77. Witt W. K. A hydrothermal history of the greenstones in the Yilgarn Craton, Western Australia: implications for the exploration for lode-gold mineralization // 4-th International Archean symposium. Extended abstracts. AGSO-Geoscience Australia. 2001. P. 406–407.

УДК 616.97

ЕЛЕНА СЕРГЕЕВНА КАРАШУРОВА

кандидат медицинских наук, доцент, заведующий курсом кожных и венерических болезней медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет
7777@onego.ru

ЕКАТЕРИНА НИКОЛАЕВНА СПЕКТОР

старший инженер лаборатории теории вероятностей и компьютерной статистики Института прикладных математических исследований, Карельский научный центр РАН
spector@krc.karelia.ru

КОНСТАНТИН ИГОРЕВИЧ РАЗНАТОВСКИЙ

доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой дерматовенерологии, Санкт-Петербургская медицинская академия последипломного образования
7777@onego.ru

О СМЕШАННЫХ ИНФЕКЦИЯХ У ЖЕНЩИН С АНОГЕНИТАЛЬНЫМИ БОРОДАВКАМИ

С привлечением анализа соответствий по структуре исходных данных установлены варианты сочетаний различных инфекций, передаваемых половым путем (ИППП), у пациенток с аногенитальными бородавками (АБ) с учетом их возраста.

Ключевые слова: аногенитальные (венерические) бородавки, анализ соответствий

Сочетанные, или ассоциированные, инфекции – это процессы, развивающиеся в организме при одновременном сочетанном воздействии двух и более возбудителей. Возбудители смешанных инфекций могут быть представлены ассоциациями условно патогенных и патогенных микроорганизмов. Клинические проявления смешанных инфекций разнообразны и зависят от вида возбудителей-ассоциантов, их биологических свойств и взаимоотношений [2].

Иногда заболевания, обусловленные смешанной инфекцией, протекают тяжелее, длительнее [6]. При некоторых смешанных инфекциях не происходит изменения характера патологического процесса по сравнению с моноинфекцией или клиническая картина характеризуется отсутствием специфичности. В этом случае очень трудно распознать смешанную инфекцию без результатов лабораторных тестов.

Смешанные инфекционные заболевания, передающиеся половым путем, выявляются в 52–78 % случаев [1].

В настоящее время отмечается общий рост инфицированности вирусом папилломы человека (ВПЧ). Поскольку вирус передается половым путем, основной пик инфицирования приходится на женщин молодого, сексуально активного возраста. Частота инфицирования ВПЧ в возрастной группе 16...29 лет составляет 45–81 % [8]. По данным Европейской ассоциации по генитальным инфекциям и неоплазии, в 10 % случаев папилломовирусной инфекции (ПВИ) спонтанно регressируют в течение 3–4 месяцев. Однако даже после исчезновения вируса могут сохраняться субклинические проявления инфекции [3]. Частичное инфи-

цирование и спонтанный регресс заболевания характерны для молодых пациенток, особенно для подростков. У женщин перименопаузального возраста ВПЧ персистирует в организме. Результатом трансформирующего воздействия на эпителий является развитие дисплазий тяжелой степени, что может привести к развитию рака [5]. Вирус папилломы человека является вероятным, но недостаточным фактором в канцерогенезе [3]. Провоцирующим фактором может также являться коинфицирование другими инфекциями, передаваемыми половым путем [3].

Целью настоящей работы явилось установление вариантов сочетаний различных инфекций, передаваемых половым путем, и ассоциированных инфекций у пациенток с аногенитальными бородавками с учетом их возраста.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для анализа были использованы данные обследования 304 пациенток в возрасте от 15 до 50 лет, обратившихся к дерматовенерологу РКВД г. Петрозаводска. Возраст больных (V) был подразделен на интервалы: V₁ – 15–17 лет, V₂ – 18–20 лет, V₃ – 21–30 лет, V₄ – 31–40 лет, V₅ – 41–50 лет. Основными жалобами пациенток были зуд, жжение и выделения из влагалища. При клиническом обследовании у пациенток выявлены аногенитальные бородавки. Материалом для исследования стало отделяемое из уретры, заднего свода влагалища и цервикального канала. Выполнялась полимеразная цепная реакция (ПЦР), которой выявлялись вирусы папилломы человека разных типов (папилломовирусная инфекция). ПЦР приме-

нялась также для диагностики урогенитального хламидиоза, урогенитального микоплазмоза, урогенитального уреаплазмоза. Трихомониаз и бактериальный вагиноз были подтверждены исследованием нативных препаратов, гонорея и кандидоз – культуральными исследованиями в соответствии с протоколами ведения больных с ИППП [4].

Для решения задачи использовался анализ соответствий, одним из основных методов которого является кросс-табуляция и который позволяет компактно представить структуру исходной информации, обеспечивая простой по форме подход [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Папилломавирусная инфекция как моноинфекция у обследованных нами женщин составила 55,17 %. У остальных (44,73 %) кроме основного диагноза регистрировались одна, две, три и четыре инфекции. Среди сопутствующих инфекционных процессов были зарегистрированы следующие: урогенитальный трихомониаз (1), гонорея (2), урогенитальный хламидиоз (3), урогенитальный уреаплазмоз (4), урогенитальный микоплазмоз (5), герпес генитальный (6), кандидозный вульвовагинит (7), бактериальный вагиноз (8).

Сочетание АБ с одной инфекцией зарегистрировано у 63 пациенток. Наиболее часто они сочетались с уреаплазмозом – у 30 больных (47,7 %), у 9 женщин – с урогенитальным хламидиозом, у 9 – с кандидозным вульвовагинитом. Реже АБ сочетались с бактериальным вагинозом – у 6 пациенток, с гонореей – у 4, с микоплазмозом – у 2, с генитальным герпесом – в одном случае. Сочетание папилломавирусной инфекции с другими инфекционными процессами наиболее часто наблюдалось у пациенток в возрасте от 18 до 30 лет, что составило 77,8 % женщин всех возрастных групп. У подростков и пациенток четвертого десятилетия жизни два инфекционных процесса встречались с одинаковой частотой и составили по 9,5 %. В возрастной группе от 41 до 50 лет данное сочетание встречалось редко – в 3,17 % случаев (табл. 1).

АБ совместно с двумя другими инфекционными процессами выявлены у 54 больных. Наиболее часто они регистрировались в возрастном интервале от 18 до 30 лет (87 %). Реже три инфекции обнаруживались в возрасте 31–40 лет (11 %) и 15–17 лет (1,85 %). Среди разнообразных сочетаний встречались коинфекции: АБ с урогенитальным уреаплазмозом и урогенитальным микоплазмозом (35,19 %) и с урогенитальным уреаплазмозом и кандидозным вульвовагинитом. В старшей возрастной группе кроме перечисленных выше зарегистрированы сочетания АБ с кандидозным вульвовагинитом и бактериальным вагинозом и с урогенитальным уреаплазмозом и кандидозным вульвовагинитом (табл. 2). По результатам, представленным в табл. 2, можно выделить сочетания АБ с двумя инфекциями, вызванными преимущественно условно патогенной флорой.

Сочетание АБ с тремя инфекциями обнаружено у 16 пациенток. Три инфекции одновременно встречались преимущественно у больных в возрасте 31–40 лет и составили 43,75 %. В этой группе пациенток с одинаковой частотой регистрировались: урогенитальный хламидиоз, урогенитальный уреаплазмоз, урогенитальный микоплазмоз и АБ; урогенитальный хламидиоз, урогенитальный уреаплазмоз, кандидозный вульвовагинит и АБ; урогенитальный уреаплазмоз, урогенитальный микоплазмоз, бактериальный вагиноз и АБ. У пациенток 21–30 лет встречались самые разнообразные сочетания инфекционных процессов (табл. 3), в том числе с ИППП – урогенитальным хламидиозом, гонореей и трихомониазом (у 12 больных).

У 3 пациенток выявлены 4 инфекции одновременно. Следует отметить, что это пациентки старших возрастных групп, четвертого и пятого десятилетий жизни. У них выявлены два сочетания: урогенитальный хламидиоз, уреаплазмоз, микоплазмоз, бактериальный вагиноз и АБ у двух женщин; гонорея, урогенитальный хламидиоз, кандидозный вульвовагинит, бактериальный вагиноз и АБ – у одной (табл. 4).

Таблица 1

Аногенитальные бородавки в сочетании с одним инфекционным процессом у пациенток разных возрастных групп

Инфекционные процессы	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	Общее количество заболеваний по всем возрастам	% от всех ИППП
1 – трихомоноз	2					2	3,17
2 – гонорея	1	3				4	6,35
3 – ур. хламидиоз	2	5	2			9	14,29
4 – ур. уреаплазмоз	3	8	15	3	1	30	47,60
5 – микоплазмоз	1	1				2	3,17
6 – герпес генит.		1				1	1,59
7 – кандидозный вульвовагинит	1	1	5	1	1	9	14,29
8 – бактер. вагиноз	1	1	4			6	9,54
Общее количество всех заболеваний	6	18	31	6	2	63	100

Таблица 2

Аногенитальные бородавки в сочетании с двумя инфекционными процессами у пациенток разных возрастных групп

Сочетания двух инфекций	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	Σ сочетаний по всем возрастам
(3, 4)	–	1	4	–	5–9,26 %
(3, 7)	–	1	1	–	2–3,70 %
(4, 5)	–	9	10	–	19–35,20 %
(4, 6)	–	–	1	–	1–1,85 %
(4, 7)	1	2	5	2	10–18,52 %
(4, 8)	–	–	3	1	4–7,41 %
(5, 7)	–	–	2	–	2–3,70 %
(5, 8)	–	–	2	–	2–3,70 %
(6, 7)	–	1	1	–	2–3,70 %
(7, 8)	–	1	3	3	7–12,96 %
Сумма всех сочетаний по возрасту	1	15	32	3	54–100 %

Таблица 3
Аногенитальные бородавки в сочетании с тремя инфекционными процессами у пациенток разных возрастных групп

Сочетания	V ₂	V ₃	V ₄	Сумма сочетаний по всем возрастам
1, 4, 5	—	1	—	1–6,25 %
2, 3, 7	—	—	1	1–6,25 %
3, 4, 5	—	1	2	3–18,75 %
3, 4, 7	—	1	2	3–18,75 %
3, 4, 8	1	1	—	2–12,50 %
3, 5, 7	1	—	—	1–6,25 %
3, 7, 8	—	1	—	1–6,25 %
4, 5, 7	1	—	—	1–6,25 %
4, 5, 8	—	1	2	3–18,75 %
Сумма всех сочетаний по возрасту	3	6	7	16–100 %

Таблица 4
Аногенитальные бородавки в сочетании с четырьмя инфекционными процессами у пациенток разных возрастных групп

Сочетания	V ₄	V ₅	Сумма сочетаний по всем возрастам
2, 3, 7, 8	—	1	1–33,30 %
3, 4, 5, 8	2	—	2–66,70 %
Сумма всех сочетаний по возрасту	2	1	3–100 %

У женщин этой группы также преобладают ассоциации условно патогенной флоры, но об-

наружены и инфекции, передаваемые половым путем, – гонорея и урогенитальный хламидиоз.

Таким образом, одновременное выявление 3, 4 и 5 инфекционных процессов составило более половины всех ассоциаций. Чаще всего аногенитальные бородавки встречались в сочетании с урогенитальным уреаплазмозом, кандидозным вульвовагинитом и бактериальным вагинозом. 4 и 5 инфекционных процессов, среди которых были ИППП, одновременно регистрировались в основном у пациенток старшего возраста. У подростков и лиц до 20 лет превалировала мононинфекция.

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенного исследования установлена высокая частота встречаемости смешанной инфекции с аногенитальными бородавками.
2. У молодых пациенток репродуктивного возраста регистрировались самые разнообразные сочетания аногенитальных бородавок как с ассоциированными инфекциями, так и с инфекциями, передаваемыми половым путем.
3. У женщин старших возрастных групп одновременно регистрировалось максимальное количество инфекций.
4. В связи с высокой частотой смешанных инфекций у женщин старше 40 лет с аногенитальными бородавками возникает необходимость проведения обязательных лабораторных исследований для профилактики дисплазий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаскевич В. П. Инфекции, передаваемые половым путем. М.: Медицинская книга, 1999. 414 с.
2. Козлова В. И., Пухнер А. Ф. Вирусные, хламидийные и микоплазменные заболевания гениталий: Руководство для врачей. М.: ИИД «Филин», 2000. 574 с.
3. Мелехова Н. Ю. Вирусные поражения гениталий у женщин. Смоленск, 2005. 59 с.
4. Методические материалы по диагностике и лечению наиболее распространенных инфекций, передаваемых половым путем и заболеваний кожи. Протоколы ведения больных. Лекарственные средства / Под ред. А. А. Кубановой. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2003. 448 с.
5. Роговская С. И. Папилломавирусная инфекция у женщин и патология шейки матки. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2005. 144 с.
6. Рудакова Е. Б., Семенченко С. И., Панова О. Ю. Инфекционная патология нижних отделов половых путей женщины и бесплодие // Гинекология. 2004. Т. 6. № 3. С. 132–136.
7. Халафян А. А. Statistica 6. Статистический анализ данных. М.: Бином, 2007. 503 с.
8. Brown D. R., Shew M. L., Qadadrí B. et al. A longitudinal study of genital human papillomavirus infection in a cohort of closely followed adolescent women // J. Infect. Dis. 2005. Vol. 191. P. 182.

ИРИНА ИГОРЕВНА ПОЛЬСКАЯ

ассистент кафедры госпитальной терапии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет
irina_polskaya82@mail.ru

ИРИНА МИХАЙЛОВНА МАРУСЕНКО

доктор медицинских наук, профессор кафедры госпитальной терапии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет
feva@karelia.ru

НАТАЛЬЯ НИКОЛАЕВНА ВЕЗИКОВА

доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой госпитальной терапии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет
vezikov23@mail.ru

ПРОБЛЕМА СОЧЕТАНИЯ МЕТАБОЛИЧЕСКОГО СИНДРОМА И ПОДАГРЫ

Статья посвящена оценке частоты встречаемости и особенностям метаболического синдрома (МС) у пациентов с подагрой. Оценивается влияние МС на течение суставного синдрома, а также суммарный риск сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ). Полученные результаты свидетельствуют о высокой частоте встречаемости МС при подагре, о его отрицательном влиянии на течение суставного синдрома и качество жизни пациентов с подагрой.

Ключевые слова: подагра, метаболический синдром, гиперурикемия, абдоминальное ожирение, кардиоваскулярный риск

Подагра – системное заболевание, при котором в различных тканях откладываются кристаллы моноурата натрия и у лиц с гиперурикемией развивается воспаление, обусловленное внешнедовыми и/или генетическими факторами [3].

По экспертным оценкам, распространенность подагры колеблется от 1 до 3 %. Заболеваемость подагрой составляет в различных популяциях от 5 до 50 случаев на 1000 мужчин и 1–9 случаев на 1000 женщин. Соотношение мужчин и женщин составляет 7:1. Пик заболеваемости отмечается в 40–50 лет у мужчин, 60 лет и старше у женщин.

Современные эпидемиологические данные свидетельствуют об истинном увеличении распространенности болезни [6]. В ряде работ показано, что заболеваемость подагрой удвоилась за последние 10–20 лет [6], [12].

В основе прогрессирования подагры лежит не контролируемая гиперурикемия. Ранее гиперурикемией считали уровень мочевой кислоты (МК) выше 420 мкмоль/л, однако Европейская лига по борьбе с ревматизмом рекомендует считать гиперурикемией уровень МК выше 360 мкмоль/л (6 мг/дл), что основано на результатах исследований, продемонстрировавших 4-кратное повышение риска развития подагры у мужчин и 17-кратное у женщин при превышении указанного уровня сывороточной мочевой кислоты [15; 501]. В течении заболевания выделяют 3 периода: острый артрит, межприступный период, хроническая тофусная подагра.

В настоящее время подагра рассматривается как одна из актуальных общемедицинских проблем [10; 12]. В связи с этим в последнее время акценты в

изучении подагры смешены в направлении исследования влияния гиперурикемии на прогрессирование атеросклеротического поражения сосудов.

Достоверно доказано, что клинические проявления подагры не ограничиваются поражением опорно-двигательного аппарата и почек. У значительной части больных подагрой определяется избыточная масса тела, абдоминальное ожирение [11], выявляются нарушения липидного и углеводного обмена (нарушение толерантности к глюкозе (НТГ) или сахарный диабет 2-го типа (СД 2), артериальная гипертензия (АГ)) [4]. Все вышеперечисленные нарушения являются основными компонентами МС.

Согласно новому предложению Международной федерации диабета (2005), при диагностике МС абдоминальное ожирение (окружность талии (ОТ) более 94 см для мужчин и более 80 см для женщин европеоидной расы) рассматривается как главный компонент МС. К остальным компонентам относятся: гипергликемия выше 5,6 ммоль/л, гипертриглицеридемия выше 1,7 ммоль/л, низкий уровень ХС ЛПВП (холестерин липопротеидов высокой плотности) (ниже 1 ммоль/л для мужчин и 1,2 ммоль/л для женщин), АГ (артериальное давление (АД) выше 130/85 мм рт. ст.). О необходимости изучения взаимодействия МС и подагры свидетельствуют и данные о росте в популяции заболеваемости подагрой, снижение возраста дебюта заболевания [8], [6], [7].

Настоящее исследование было предпринято с целью изучения распространенности метаболического синдрома, оценки суммарного риска развития кардиоваскулярной патологии, а также

влияния этих состояний на течение суставного синдрома у больных подагрой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследование включено 56 пациентов, среди них 43 (77 %) мужчины и 13 женщин (23 %), обратившихся в ревматологическое отделение Республиканской больницы г. Петрозаводска в период с ноября 2007 года по сентябрь 2009 года с достоверным диагнозом подагры по критериям S. Wallace (1977) [13]. Средний возраст пациентов мужского пола составил $56,4 \pm 15,4$ года, женского – $58,9 \pm 8,7$ года. Возраст пациентов в дебюте заболевания равнялся в среднем $53,1 \pm 9,7$ года для женщин и $46,8 \pm 14$ лет для мужчин. Длительность болезни на момент обращения составила $5,8 \pm 4$ года для женщин и $7,6 \pm 6,3$ года для мужчин (от 6 месяцев до 33 лет). Частота рецидивов артрита за последний год болезни – 1,2 (1,0–4,0) для женщин и 2,83 (1,0–12,0) для мужчин. В среднем за все время болезни отмечалось поражение 7,5 (1,0–24,0) сустава для мужчин и 5,4 (3,0–24,0) сустава для женщин.

На момент первого осмотра только у 1 мужчины (2 %) был диагностирован острый подагрический артрит, у 20 (36 %) пациентов артрит носил затяжной характер (длительностью от 3 недель до 3 месяцев), у 35 (62 %) больных диагностирована хроническая тофусная подагра (рис. 1). Лечение аллопуринолом (от 1 недели до 1 года и более) получали 43 (77 %) больных.

Клинические методы исследования включали оценку суставного синдрома, наличия тофусов, индекса массы тела, окружности талии, уровня артериального давления. Всем пациентам выполнялось исследование уровня мочевой кислоты, уровня глюкозы плазмы натощак и постпрандальной гликемии, креатинина, общего холестерина (ОХС), липопротеидов низкой плотности (ЛПНП), липопротеидов высокой плотности, триглицеридов (ТГ), С-реактивного белка, фибриногена, скорости оседания эритроцитов (СОЭ).

Метаболический синдром диагностировался на основании критериев Международной федерации диабета (2005). Для определения суммарного коронарного риска (СКР) была использована шкала SCORE, учитывающая возраст, пол, статус курения, уровень систолического артериального давления (САД), ОХС пациентов. Статистическую обработку проводили с использованием общепринятых методов статистики с помощью стандартного пакета программ прикладного статистического анализа (Statistica for Windows v. 6.0).

РЕЗУЛЬТАТЫ

АГ имела место у 53 (94 %) больных. Из них у 19 (35 %) больных была диагностирована АГ 1-й степени, у 24 (47 %) пациентов – АГ 2-й степени, у 10 (18 %) человек – АГ 3-й степени. Ишемическая болезнь сердца (ИБС) была выявлена у 12 (21 %) пациентов. У 8 (60 %) женщин и 25 (58 %) мужчин диагностировано абдоминальное ожирение на ос-

новании оценки окружности талии. Среди них метаболический синдром был диагностирован у 100 % больных (33 человека), что составило 59 % от общего числа обследованных больных.

СД 2-го типа был диагностирован у 12 (21 %) обследованных пациентов с подагрой, среди них 9 пациентов с метаболическим синдромом (78 %). Повышение уровня триглицеридов выявлялось у 34 человек (60,4 %), причем у 21 (62 %) из них диагностирован метаболический синдром (рис. 2).

Частота факторов риска кардиоваскулярных катастроф в исследуемой группе больных представлена в табл. 1.

Среди основных факторов риска чаще выявлялись повышение уровня ОХС (общий холестерин), холестерина ЛПНП, систолического артериального давления, реже – возраст и увеличение уровня триглицеридов. У подавляющего большинства больных выявлено увеличение индекса массы тела (ИМТ). Средний вес составил $87,9 \pm 16,9$ кг (от 43 до 120 кг). Только у 9 (16 %) пациентов вес соответствовал норме, у 19 (35 %) выявлено ожирение 1-й степени, 26 (47 %) пациентов страдали ожирением 2-й степени, 1 (2 %) человек – ожирением 3-й степени.



Рис. 1. Вариант подагрического артрита

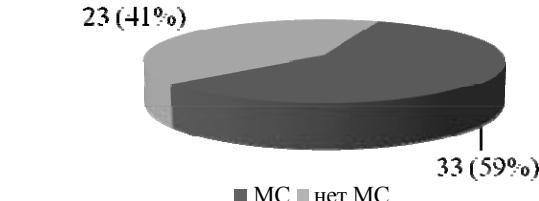


Рис. 2. Частота диагностики метаболического синдрома

Таблица 1
Частота встречаемости факторов риска ССЗ у больных подагрой (n = 56)

Факторы риска	n (%) Пациенты без МС	n (%) Пациенты с МС
Возраст > 55 лет для мужчин и > 65 для женщин	13 (55 %)	14 (44 %)
ОХС > 5,0 моль/л	17 (72 %)	24 (72 %)
ХС-ЛВП ≤ 1 моль/л	9 (38 %)	11 (32 %)
Курение	5 (22 %)	6 (20 %)
САД > 140 мм рт. ст.	20 (88 %)	34 (96 %)
Сахарный диабет	2 (11 %)	9 (28 %)
ТГ > 1,7 ммоль/л	13 (55 %)	21 (64 %)
ИМТ > 25	15 (66 %)	32 (96 %)
ОТ > 94 см для мужчин и > 80 см для женщин	0	33 (100 %)
НТГ	4 (16 %)	2 (8 %)
ХС ЛПНП > 3 ммоль/л	15 (66 %)	30 (92 %)

Таблица 2

Клиническая характеристика больных подагрой в зависимости от наличия МС

Клиническая характеристика	Больные без МС, n = 23	Больные с МС, n = 33
Длительность болезни, годы	10,6 ± 7,6	4,8 ± 4,1
Возраст дебюта подагры, годы	48,9 ± 11,9	47,4 ± 12,7
Количество пораженных за все время болезни суставов, п	7,9 ± 6,2	7,4 ± 5,9
Число атак артрита за последний год болезни, п	2,8 ± 2,6	7,4 ± 3,01
Терапия аллопуринолом, п	14	29
Гипопуриновая диета	10	21
Длительность последнего обострения, п	2,16 ± 1,2	2,76 ± 2,36

При этом у пациентов с метаболическим синдромом достоверно чаще выявлялось ожирение (в 100 % случаев абдоминальный тип), увеличение ЛПНП, ОХС, триглицеридов и снижение ЛПВП.

При оценке сывороточного уровня мочевой кислоты у пациентов 2 групп выявлено, что у больных с метаболическим синдромом в среднем концентрация МК сыворотки несколько выше ($484,5 \pm 118$) в сравнении с группой пациентов без метаболического синдрома ($478,7 \pm 147,3$).

У 11 человек (20 %) риск ССЗ был оценен как очень высокий (10–15 %), у 16 человек (28 %) – как средний (5–9 %), у 22 человек (40 %) – как умеренный (2–5 %) и только у 7 (12 %) пациентов риск ССЗ составил < 2 %.

Кроме того, проведена оценка связи метаболического синдрома и клинических особенностей течения подагры, данные представлены в табл. 2.

Средний возраст дебюта в двух сравниваемых группах существенно не отличался. У пациентов с метаболическим синдромом суставной синдром характеризовался существенно большей частотой обострений и большей длительностью атак независимо на суммарно меньший стаж болезни. Значимой разницы в приверженности к терапии аллопуринолом в 2 группах не было выявлено.

Также хотелось бы отметить, что в группе больных подагрой с диагностированным метаболическим синдромом существенно большее число пациентов указывали на свою строгую приверженность к гипопуриновой диете. Этот факт может быть связан со строгим ограничением больных в мясе и рыбе и расширением диеты за счет легкоусвояемых углеводов (каш, сдобы, молочных продуктов).

ОБСУЖДЕНИЕ

По данным разных авторов, распространенность МС в популяции колеблется от 5 до 20 % [5]. У больных подагрой частота МС достигает 67,8 % [1], [2; 24]. Полученные нами данные соответствуют литературным (59 %). У больных подагрой без МС уровень мочевой кислоты сыворотки достоверно ниже, чем при его наличии [2; 24], что также соответствует литературным данным.

АГ, по разным данным, присутствует у 25–50 % пациентов с подагрой, в нашем же случае частота артериальной гипертензии была значительно выше и встречалась у подавляющего числа больных вне зависимости от наличия метаболического синдрома (94 %).

Нарушения толерантности к глюкозе СД 2-го типа в разных исследованиях встречались у 7–74 % больных с подагрой, данные исследования соответствуют литературным. С 1960-х годов появляются описания гипертриглицеридемии у 75–84 % больных подагрой. По нашим данным, повышение триглицеридов выявлено у несколько меньшего процента больных (60,4 %), при этом в большинстве случаев среди пациентов с метаболическим синдромом.

Необходимо отметить, что, по данным эпидемиологических исследований, сочетание двух, трех или более факторов у одного больного существенно повышает риск кардиоваскулярных катастроф [14; 937]. При этом сочетание нескольких, даже умеренно выраженных, кардиоваскулярных факторов риска прогностически более неблагоприятно, чем существенное нарастание одного из них [9; 2012]. По данным исследования, наличие подагры, и в большей степени подагры в сочетании с метаболическим синдромом, ассоциируется с высоким суммарным коронарным риском. Для 11 человек (20 %) риск сердечно-сосудистых заболеваний был оценен как очень высокий (10–15 %), для 16 человек (28 %) – как средний (5–9 %), для 22 человек (40 %) – как умеренный (2–5 %) и только для 7 (12 %) пациентов риск сердечно-сосудистых осложнений составил < 2 %.

У пациентов с МС суставной синдром характеризовался существенно большей частотой обострений и большей длительностью атак независимо на суммарно меньший стаж болезни. Данные результаты наиболее вероятно объясняются достоверно более высоким уровнем мочевой кислоты сыворотки у пациентов с МС.

Приверженность к гипоурикемической терапии аллопуринолом в обеих группах оказалась низкой, в то время как в группе больных подагрой с диагностированным МС существенно большее число пациентов указывали на свою строгую приверженность к гипопуриновой диете (60 %). Однако необходимо отметить, что данный факт существенно не влиял на уровень мочевой кислоты сыворотки и характер суставного синдрома.

В целом полученные в ходе исследования данные соответствуют литературным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, метаболический синдром широко распространен среди пациентов с подагрой. Наличие изолированного метаболического синдрома, а также сочетание его с другими факторами риска увеличивают вероятность развития кардиоваскулярных заболеваний у пациентов с подагрой. Данное состояние ассоциируется с более неблагоприятным прогнозом течения подагры.

приятным течением суставного синдрома. Основываясь на полученных данных, отметим необходимость комплексного обследования пациентов с

подагрой, направленного на выявление основных факторов риска сердечно-сосудистых заболеваний и критериев метаболического синдрома.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барскова В. Г., Елисеев М. С., Насонов Е. Л. и др. Применение метформина (сиофора) у пациентов с подагрой и инсулинорезистентностью (предварительные данные 6-месячного наблюдения) // Терапевтический архив. 2005. № 12. С. 44–48.
2. Елисеев М. С. Синдром инсулинорезистентности при подагре: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. М., 2006. 24 с.
3. Насонова В. А., Барскова В. Г. Ранние диагностика и лечение подагры – научно обоснованное требование улучшения трудового и жизненного прогноза больных // Научно-практическая ревматология. 2004. № 1. С. 5–7.
4. Тареев Е. М. Гипертоническая болезнь. М.: Медгиз, 1948. 156 с.
5. Чазова И. Е., Мычка В. Б. Метаболический синдром и артериальная гипертензия // Артериальная гипертензия. 2002. № 7. С. 7–10.
6. Arromdee E., Michet C. J., Crowson C. S. et al. Epidemiology of Gout: Is the Incidence Rising? // J. Rheumatol. 2002. Vol. 29. P. 2403–2406.
7. Chen S. Y., Chen C. L., Shen M. L. et al. Trends in the manifestations of gout in Taiwan // Rheumatology (Oxford). 2003. Vol. 42. P. 1529–1533.
8. Harris C. M., Lloyd D. C., Lewis J. The prevalence and prophylaxis of gout in England // J. Clin. Epidemiol. 1995. Vol. 48. P. 1153–1158.
9. Stamler J., Stamler R., Neaton J. D. et al. Low risk-factor profile and long-term cardiovascular and noncardiovascular mortality and life expectancy: findings for 5 large cohorts of young adult and middle-aged men and women // Journal of the American medical association. 1999. Vol. 282. P. 2012.
10. Terkeltaub R. A. Gout. Epidemiology, pathology, and pathogenesis // Primer on the rheumatic diseases. 12th ed. Atlanta / Ed. Klippel J. H., Crofford L., Stone J. H. et al. // Arthritis Foundation. 2001. Vol. 307. P. 12.
11. Vague J. The degree of masculine differentiation of obesities, a factor determining predisposition to diabetes, atherosclerosis, gout and uric calculous disease // Am. J. Clin. Nutr. 1956. Vol. 4(2). P. 20–34.
12. Wallace K. L., Riedel A. A., Joseph-Ridgeway N., Worthmann R. Increasing prevalence of gout and hyperuricemia over 10 years among older adult in a managed care population // J. Rheumatol. 2004. Vol. 31. P. 1582–1587.
13. Wallace S. L., Robinson H., Masi A. T. et al. Preliminary criteria for the classification of the acute arthritis of gout // Arthritis Rheum. 1977. Vol. 20. P. 895–900.
14. Yusuf S., Hawken S., Ounpuu S. et al. Effect of potentially modifiable risk factors associated with myocardial infarction in 52 countries (the INTERHEART study): case-control study // Lancet. 2004. Vol. 364. P. 937.
15. Zhang W., Doherty M., Pascual-Gomez E. et al. EULAR evidence based recommendation for the diagnosis and management of gout // Ann. Rheum. Dis. 2005. Vol. 64 (Suppl III). P. 501.

АЛЕКСАНДР ЛЕОНИДОВИЧ СОКОЛОВ

кандидат медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой педиатрии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет

pediatr@sampo.ru

ЮЛИЯ РАФАЭЛЬЕВНА ЗАРИПОВА

кандидат медицинских наук, доцент кафедры педиатрии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет

julzar@mail.ru

АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ МЕЙГАЛ

доктор медицинских наук, профессор кафедры физиологии человека и животных медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет

meigal@petrsu.ru

НЕЙРОМЫШЕЧНЫЙ СТАТУС У ЗДОРОВЫХ ДЕТЕЙ ПЕРВОГО ГОДА ЖИЗНИ ПО ДАННЫМ НАКОЖНОЙ ЭЛЕКТРОМИОГРАФИИ

Проведено комплексное исследование нейромышечного статуса у здоровых детей первого года жизни методом накожной электромиографии (ЭМГ). Установлено, что за первый год жизни двигательная система проходит значительную модификацию в процессе созревания антигравитационных реакций. Полученные данные могут быть использованы для сравнения данными о детях, страдающими заболеваниями двигательной сферы.

Ключевые слова: электромиография, двигательные единицы, детский возраст

ВВЕДЕНИЕ

Двигательная система человека проходит длительный этап постнатального созревания, включающий в себя становление скелетной мускулатуры и нервных центров [1]. Смена видов двигательной активности и поведения плода, новорожденного, младенца и ребенка старшего возраста направлены на адекватную адаптацию организма к условиям внешней и внутренней среды на различных этапах онтогенеза [9].

Морфологическое развитие двигательной системы ребенка достаточно подробно документировано начиная с первых дней жизни [7]. Вместе с тем функциональное состояние двигательной сферы ребенка можно тестировать начиная только с 3–6-летнего возраста, например максимальную скорость, силу и ритм сокращений мышцы, точность движений [9]. В этой связи в литературе имеется очень мало данных о функционировании двигательной системы детей, особенно в раннем возрасте. Клиническими критериями функции двигательной системы младенца являются такие показатели, как мышечный тонус, глубокие рефлексы (периостальные и сухожильные), лабиринтные и шейнотонический рефлексы, пассивные и спонтанные генерализованные движения.

Двигательные единицы человека на протяжении жизни претерпевают существенные изменения [3], [4], [10]. Эти изменения связаны с созреванием супраспинальных нисходящих мо-

торных трактов, изменением соотношения возбуждения и торможения в спинном мозге, развитием мышечных волокон и иннервации. Созревание и рост мышц у детей онтогенетически тесно связаны с поздней антигравитационной активностью и температурой среды [1]. Тесная связь созревания двигательной системы с экологическими факторами была продемонстрирована на примере новорожденных нескольких видов животных [1].

Развитие двигательных единиц хорошо исследовано на новорожденных млекопитающих, например на крысятах [11], однако в силу методических ограничений на новорожденном ребенке такие исследования не проводились.

В этой связи для понимания онтогенеза спинальных механизмов движения нам представлялось важным исследовать возрастную динамику параметров интерференционной электромиограммы, характеристик потенциалов действия двигательных единиц и параметров импульсации двигательных единиц, полученных при накожном отведении у здоровых детей первого года жизни, рожденных в условиях Европейского Севера России в Республике Карелия.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Использован накожный метод электромиографии, который позволил сделать записи интерференционной электромиограммы (иЭМГ), импульсных последовательностей движательных единиц

(ДЕ) и потенциала ДЕ (ПДЕ). Выбор накожной методики обусловлен ее преимуществами перед игольчатой ЭМГ: неинвазивностью, безболезненностью и постоянством положения электродов. Для обработки иЭМГ использовали турнамплитудный анализ, так как он чувствителен к функциональному состоянию скелетной мышцы (нейропатия или миопатия, утомление, денервация и реиннервация), отличается хорошей воспроизведимостью результатов и отсутствием необходимости учета нагрузки, что важно при исследовании ребенка [2], [6], [7], [8], [10]. Измеряли среднюю амплитуду (мкВ), количество «турнов» («поворотов» амплитудой > 100 мВ) за 1 секунду (Н/с), PR (максимальное отношение количества «поворотов» к средней амплитуде ЭМГ за 1 секунду). Анализ ПДЕ включал измерение амплитуды, длительности, количества фаз [6].

Исследование проведено на базе кабинета нейрофизиологических исследований ГУЗ «Детская республиканская больница» г. Петрозаводска Республика Карелия многофункциональным компьютерным комплексом «Нейро-МВП» (ООО «Нейрософт», Иваново, Россия). Использовали bipolarные оловянные электроды размером 12x6 мм с фиксированным межэлектродным расстоянием 14 мм и толщиной 2 мм. Исследовали 4 мышцы: *m. biceps brach.* (C5, C6) и *m. triceps brach.* (C7, C8, T1) справа; *m. gastrocnemius* (S1, S2) и *m. tibialis ant.* (L4, L5) слева.

Обследованы здоровые дети первого года жизни, проживающие в Республике Карелия ($n = 85$). Все дети (42 мальчика, 43 девочки) были разделены на возрастные группы с учетом становления антигравитационных реакций по И. А. Аршавскому [1] (табл. 1). К I группе отнесены дети в возрасте от 5 суток до 28 дней, группе II – дети от 1 до 3 месяцев (грудные дети до реализации антигравитационных систем), в III группу включены дети в возрасте 3–6 месяцев (первый этап развития антигравитационных реакций), IV группу составили дети 6–9 месяцев (второй этап развития антигравитационных реакций), V группа – дети 9–12 месяцев (третий и четвертый этапы антигравитационных реакций).

Для регистрации импульсных последовательностей отдельных ДЕ электроды располагали в области сухожилия трехглавой мышцы плеча proxимальнее локтевого отростка, а также над дистальным концом прямой мышцы бедра. Подобное расположение электродов позволяет использовать «эффект зеркального генератора» вследствие близкого расположения костных массивов и снижения количества мышечных волокон в области сухожилий [8]. Всего обследовано 150 здоровых детей в возрасте до 1 года, импульсные последовательности ДЕ зарегистрированы у 36 детей (табл. 2). Перед началом каждого сеанса исследования добивались такой установки электродов, чтобы при спонтанной активности ребенка можно было бы визуально на осциллографе наблюдать активность одной или нескольких ДЕ. Для получения высоко-

качественных записей активности ДЕ нами соблюдался ряд правил регистрации электрической активности мышц накожными электродами.

Во-первых, электроды устанавливали вдоль хода мышечных волокон. Это связано с тем, что волна деполяризации проходит последовательно под обоими полюсами электрода и создает между ними разность потенциалов (потенциал ДЕ). При поперечном положении пластин электрода относительно хода мышечных волокон возбуждение наступает синхронно под каждой пластинкой электрода, в результате чего потенциал ДЕ будет низкоамплитудным. Во-вторых, электрод устанавливали так, чтобы два его полюса располагались выше или ниже моторных пластинок. Это обусловлено тем, что возбуждение движется от моторной пластины в обе стороны к краям мышечных волокон, и если электрод установить по сторонам от моторных пластинок, то деполяризация под обоими полюсами наступит одновременно, а амплитуда потенциала действия ДЕ будет минимальной.

Исследования грудных детей проводились в кабинете электрофизиологической диагностики на кушетке после предварительного распеления или раздевания, при температуре воздуха 24–25 °C и постоянной скорости движения воздуха (0,1 м/с). Контроль теплового состояния испытуемых включал измерение периферической температуры в области бедра с помощью электротермометра, с точностью измерения до 0,1 °C, через каждые 10 минут. У ребенка измеряли средневзвешенную температуру кожи (СВТК) при помощи инфракрасного термометра UT-102 (A&D, Токио, Япония) в 4 точках (плечо, ключица, бедро, голень) по формуле Раманатана [12].

Результаты исследования обрабатывались с помощью пакета статистических программ Microsoft Excel, SPSS for Windows 8,0. Определялись средние величины ($M \pm m$), достоверность средних величин по критерию Стьюдента (t). Изучена теснота связи (корреляция) между возрастными показателями и показателями электромиограммы при помощи коэффициента Спирмена (коэффициент корреляции рангов).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Турнамплитудный анализ иЭМГ показал, что в течение первого года жизни ребенка все показатели претерпевают изменения. У новорожденных детей (I группа) максимальное количество турнов составило 150–210/с. К возрасту 1–3 месяца (II группа) количество турнов возрастало до 230/с во всех мышцах, за исключением *m. gastrocnemius*. В дальнейшем, начиная с возраста 3 месяца и в течение первого года жизни, количество турнов постепенно снижалось до 70–130/с (рис. 1). Достоверных различий в количестве турнов между мальчиками и девочками не обнаружено ($p > 0,05$). В *m. gastrocnemius* максимальное количество турнов снижалось с момента рождения в течение всего первого года жизни.

Таблица 1

Характеристика групп здоровых детей при интерференционной электромиографии

Возрастная группа	Возраст, мес.	Мальчики (n = 43)		Девочки (n = 42)		Средний возраст, мес.
		Рост, м	Вес, кг	Рост, м	Вес, кг	
I (n = 20)	< 28 дней	0,53 ± 0,01	3,43 ± 0,09	0,53 ± 0,01	3,54 ± 0,09	20,75 ± 4,26*
II (n = 20)	1–3	0,56 ± 0,01	4,38 ± 0,14	0,55 ± 0,01	4,50 ± 0,19	1,15 ± 0,37
III (n = 15)	3–6	0,58 ± 0,03	6,10 ± 0,40	0,57 ± 0,02	6,40 ± 0,20	3,8 ± 0,63
IV (n = 15)	6–9	0,59 ± 0,01	8,70 ± 0,15	0,60 ± 0,01	8,30 ± 0,30	7,44 ± 0,81
V (n = 15)	9–12	0,61 ± 0,02	9,10 ± 0,30	0,60 ± 0,02	9,00 ± 0,15	9,89 ± 0,66

Примечание. * дни.

Таблица 2

Характеристика групп здоровых детей с зарегистрированными двигательными единицами

Возрастная группа	Возраст, мес.	Средний возраст, дн. ± SD	Средний вес, кг. ± SD
I (n = 7)	< 28 дней	24,43 ± 7,94	3,64 ± 0,64
II (n = 10)	1–3	48,77 ± 16,72	4,39 ± 0,58
III (n = 7)	3–6	138,85 ± 20,11	5,54 ± 0,61
IV (n = 7)	6–9	227,83 ± 33,59	7,49 ± 1,80
V (n = 5)	9–12	0,75 ± 0,15	8,45 ± 1,26

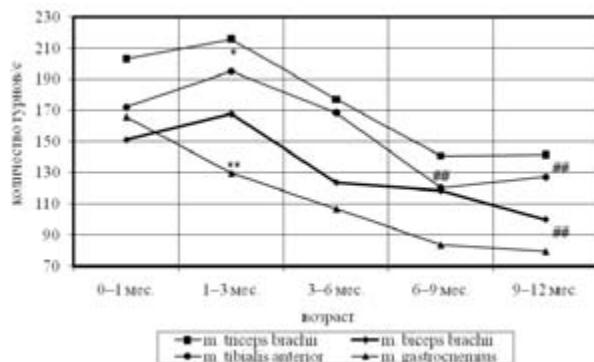


Рис. 1. Максимальное количество турнов ЭМГ мышц верхних и нижних конечностей у здоровых детей без учета пола: достоверность результатов к возрасту 0–1 месяц отмечена на рисунке: # – p < 0,05, ## – p < 0,01. Достоверность результатов между полами отмечена на рисунке: * – p < 0,05, ** – p < 0,01

Максимальная амплитуда иЭМГ у новорожденных детей (I группа) составила 200–250 мкВ во всех исследованных мышцах. В дальнейшем на протяжении первого года жизни средняя амплитуда практически не изменялась, за исключением *m. gastrocnemius*, в которой амплитуда иЭМГ снижалась с момента рождения от 220 до 150 мкВ (рис. 2). Максимальное отношение количества турнов к средней амплитуде электромиограммы за 1 с (PR) при рождении составило 0,75–0,9 во всех исследованных мышцах за исключением *m. triceps brach.*, для которой были характерны значения до 1,1. При увеличении возраста отмечено снижение показателей PR до 0,6–0,8, причем наиболее низкие значения были характерны для *m. gastrocnemius*.

Достоверных различий максимальной амплитуды и турнов между мальчиками и девочками нет (p > 0,05). Визуально электромиограмма была высокоамплитудной и низкочастотной.

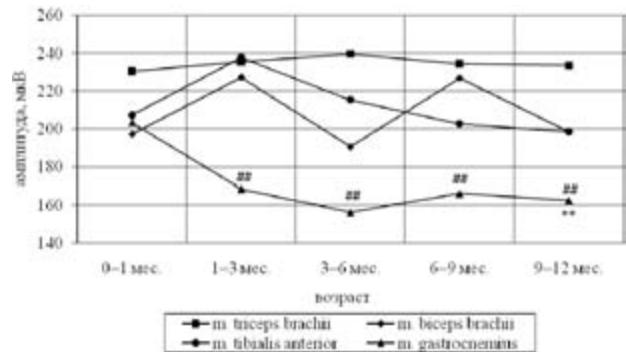


Рис. 2. Максимальная средняя амплитуда ЭМГ (мкВ) мышц верхних и нижних конечностей у здоровых детей контрольной группы без учета пола: достоверность результатов к возрасту 0–1 месяц отмечена на рисунке: # – p < 0,05, ## – p < 0,01.

Достоверность результатов между полами отмечена на рисунке: * – p < 0,05, ** – p < 0,01

Анализ ПДЕ проведен в двух мышцах верхних и нижних конечностей у 65 неврологически здоровых детей. Получено 244 ПДЕ *m. triceps brach.* и 218 ПДЕ *m. tibialis ant.*. Установлено, что в течение первого года жизни происходит увеличение средней амплитуды ПДЕ от 100–250 до 400 мкВ, длительности ПДЕ – от 6 до 15 мс. Особенно заметное увеличение амплитуды ПДЕ происходит в возрасте 9–12 месяцев (рис. 3), а длительности – в возрасте 3–6 месяцев (рис. 4). Средняя амплитуда ПДЕ при рождении была более высокой у девочек. Так, амплитуда ПДЕ *m. triceps brach.* при рождении составила у девочек 221,0 ± 99,65 мкВ, у мальчиков – 174,33 ± 78,22, в *m. tibialis ant.* при рождении у девочек 228,63 ± 65,69 мкВ, у мальчиков – 207,5 ± 45,06 мкВ. К 9–12 месяцам значения амплитуды ПДЕ девочек и мальчиков конвергировали.

При анализе количества фаз ПДЕ установлено, что у детей первого года жизни преобладали трехфазные потенциалы – 406 потенциалов из 462 (87,9 %). Обнаружено всего 42 четырехфазных ПДЕ (9,1 %), 11 двухфазных (2,4 %) и 2 полифазных ПДЕ (0,4 %). Количество фаз ПДЕ не изменялось при увеличении возраста с периода новорожденности до 1 года.

Импульсные последовательности отдельных ДЕ длительностью до 30–100 разрядов были зарегистрированы у 36 детей. Наименьший возраст с зарегистрированной импульсной активностью ДЕ отмечен у ребенка в возрасте 14 суток. Всего зарегистрирована активность 63 ДЕ в *m. triceps*

brach. Импульсные последовательности ДЕ детей подразделялись на два отчетливых электромиографических паттерна. Первый паттерн, который включал в себя 23 ДЕ, характеризовался длительной стационарной импульсацией («стабильные» двигательные единицы). Второй вид паттернов импульсации ДЕ («периодические» двигательные единицы) представлял собой короткие серии (по 5–10–20) разрядов двигательных единиц с более высокой по сравнению со стабильными двигательными единицами частотой и очень стабильными межимпульсными интервалами. Частота разрядов «периодических» двигательных единиц составила 15–30 имп/с. Характерной особенностью «периодических» двигательных единиц являлось то, что первые и последние межимпульсные интервалы в сериях не отличались от межимпульсных интервалов в середине периода их активности (рис. 5). Вследствие этого вариабельность импульсации данных двигательных единиц не превышала 5–7 мс.

Всего обнаружено 17 «периодических» ДЕ *m. triceps brach.* Наблюдалось постепенное снижение их пропорции от групп I и II (36,11% всех ДЕ) до групп IV (19,43 %) и V (0,0 %). В течение первого года жизни зарегистрировано постепенное увеличение межимпульсного интервала ДЕ, то есть снижение частоты импульсации. Вместе с тем обнаружено кратковременное увеличение частоты импульсации ДЕ в группе II (1–3 месяца) до 16 имп/с.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные электромиографические данные показали, что двигательная система здорового ребенка претерпевает существенные изменения в течение первого года жизни. Изменению подвержены амплитуда и количество турнов и ЭМГ, амплитуда и длительность ПДЕ, а также частота импульсации ДЕ и типы импульсации ДЕ. Вторая особенность заключается в том, что названные параметры изменяются скачкообразно и несинхронно.

В частности, длительность ПДЕ почти удваивается в возрасте 3–6 месяцев, тогда как амплитуда ПДЕ мало изменяется в этом возрасте, но резко увеличивается в возрасте 9–12 месяцев. По мере увеличения возраста детей в течение первых трех месяцев жизни отмечается незначительное нарастание количества турнов и амплитуды за исключением амплитуды и ЭМГ мышц нижних конечностей. Увеличение максимального количества турнов отмечено во II группе (1–3 месяца жизни) во всех мышцах, за исключением *m. gastrocnemius*. В данной мышце показатели максимального количества турнов не имели тенденцию к повышению. Значения средней максимальной амплитуды электромиограммы, зарегистрированные у новорожденных детей I группы, составили 200–250 мкВ во всех исследованных мышцах. Показатели средней амплитуды на протяжении первого года жизни практически не изменяются.

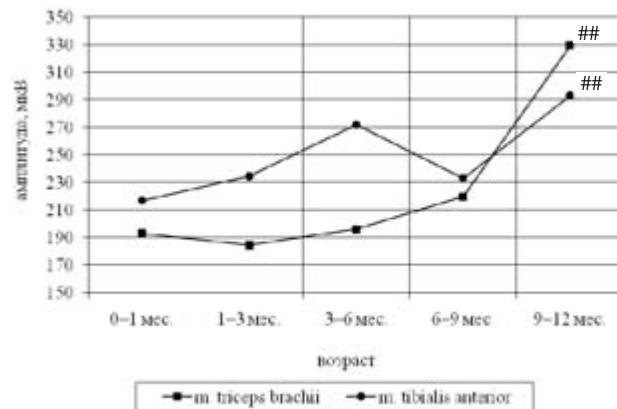


Рис. 3. Средняя амплитуда потенциалов двигательных единиц при накожном отведении электромиограммы в контрольной группе в зависимости от возраста без учета пола: достоверность результатов к возрасту 0–1 месяц отмечена на рисунке: # – $p < 0,05$, ## – $p < 0,01$

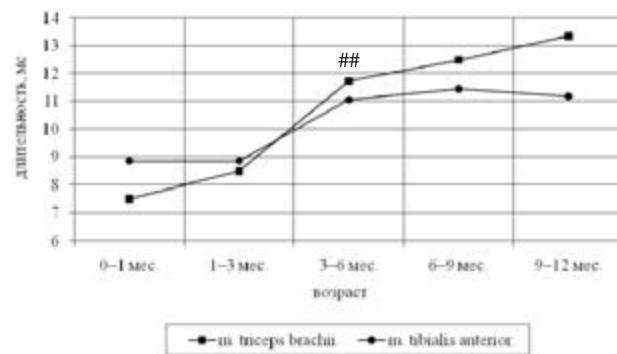


Рис. 4. Длительность потенциалов двигательных единиц при накожном отведении электромиограммы в контрольной группе в зависимости от возраста без учета пола: достоверность результатов к возрасту 0–1 месяц отмечена на рисунке: # – $p < 0,05$, ## – $p < 0,01$

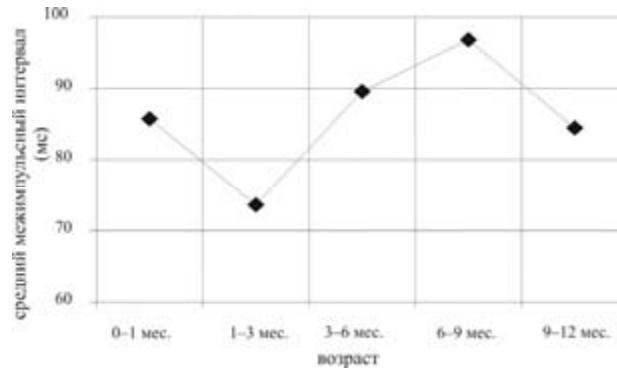


Рис. 5. Динамика среднего межимпульсного интервала двигательных единиц трехглавой мышцы плеча в течение первого года жизни у ребенка

Подобная асинхронность, которая характерна для развития функций у детей [3], [4], вероятно, отражает динамику нейромышечного статуса в зависимости от созревания антагравитационных реакций и созревания самой двигательной единицы.

Следующая особенность заключается в том, что развитие исследованных параметров зависит

от функции мышцы. В частности, динамика параметров иЭМГ икроножной мышцы явно отличалась от остальных мышц, что может быть связано с ее антигравитационной функцией.

В частности, нами обнаружены существенные особенности в динамике электромиографических показателей *m. gastrocnemius*. Эта мышца, которая является в основном антигравитационной по своей функции, показала слабую чувствительность к возрасту в течение первого года жизни. Вероятно, это связано с тем, что антигравитационная реакция, в которой участвует *m. gastrocnemius*, а именно реакция стояния, появляется только к концу первого года жизни.

ВЫВОДЫ

Таким образом, комплексное электромиографическое исследование позволяет объективно нейрофизиологически описать развитие функционального состояния периферического отдела двигательной системы человека в возрастном аспекте (от 5 дней до 12 месяцев). Это может быть использовано в качестве объективного критерия возрастной нормы развития двигательной системы и основанием для разработки критериев диагностики поражения периферической двигательной системы при перинатальном поражении центральной нервной системы у детей первого года жизни.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аршавский И. А. Принцип доминанты в индивидуальном развитии организма // Журнал высшей нервной деятельности. 1993. Т. 43. № 4. С. 785–794.
- Безруких М. М., Кисилев М. Ф., Комаров Г. Д. и др. Возрастные особенности организации двигательной активности у детей 6–16 лет // Физиология человека. 2000. Т. 26. № 3. С. 100–107.
- Бурсиан А. В. Ранний онтогенез моторного аппарата теплокровных. Л.: Наука, 1983. 165 с.
- Бурсиан А. В., Кузнецова С. В. Онтогенетические аспекты деятельности спинальных генераторов ритмического моторного возбуждения // Журн. эвол. биохим. и физиол. 1992. Т. 28. № 1. С. 112–119.
- Вельтищев Ю. Е. Проблемы охраны здоровья детей России // Российский вестник перинатологии и педиатрии. 2000. № 5.
- Герасимова Л. И., Мейгал А. Ю., Сергеев А. М., Лупандин Ю. В. Количественная оценка суммарной электромиограммы у больных дифтерийной полинейропатией // Журнал неврологии и психиатрии. 1999. Т. 99. № 5. С. 25–26.
- Маркосян А. А. Основы морфологии и физиологии организма детей и подростков. М.: Медицина, 1969. 574 с.
- Мейгал А. Ю., Кузьмина Г. И., Шигуева Т. А., Закирова А. З. Способ селективного отведения потенциалов действия двигательных единиц человека накожными электродами // Физиология человека. 2009. Т. 35. № 5. С. 134–138.
- Пальчик А. Б. Эволюционная неврология. СПб.: Питер, 2002. С. 58–265.
- Sale M. V., Semmler J. G. Age-related differences in corticospinal control during functional isometric contractions in left and right hands // J. Appl. Physiol. 2005. Vol. 99. № 4. P. 1483–1493.
- Ridge R. M., Rowleson A. Motor units of juvenile rat lumbrical muscles and fibre type compositions of the glycogen-depleted component // J. Physiol. 1996. Vol. 15. № 497. Pt. 1. P. 199–210.
- Ramanathan N. L. A new weighting system for mean surface temperature of the human body // J. Appl. Physiol. 1964. Vol. 19. P. 531–533.

ГАЛИНА ВЛАДИМИРОВНА ЕВСЕЕВА

старший научный сотрудник отдела кормопроизводства,
ГНУ КГСХОС Россельхозакадемии

kgshos@onego.ru

КСЕНИЯ ЕВГЕНЬЕВНА ЯКОВЛЕВА

кандидат биологических наук, ученый секретарь, ГНУ
КГСХОС Россельхозакадемии

kgshos@onego.ru

ОЛЬГА АЛЕКСЕЕВНА ГОЛУБЕВА

кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий отделом
кормопроизводства, ГНУ КГСХОС Россельхозакадемии

kgshos@onego.ru

ПРОДУКТИВНОСТЬ БОБОВО-ЗЛАКОВЫХ ПАСТБИЩНЫХ АГРОФИТОЦЕНОЗОВ В УСЛОВИЯХ КАРЕЛИИ

Изучена продуктивность бобово-злаковых пастбищных агрофитоценозов с включением новых сортов клевера лугового и клевера ползучего, а также межродового гибрида фестуолиума. Исследованы ботанический состав, продуктивность, питательная и энергетическая ценность пастбищных травостоев в течение трех лет использования.

Ключевые слова: многолетние травы, пастбищные бобово-злаковые агрофитоценозы, продуктивность, ботанический состав, энергетическая и питательная ценность

При создании пастбищ и сенокосов большое значение приобретает разработка низкозатратных энергосберегающих технологий на основе всестороннего использования фактора биологизации. Лидерство в современном лугопастбищном хозяйстве принадлежит бобово-злаковым травостоям. Основными бобовыми компонентами при создании сеянных бобово-злаковых пастбищ являются клевер луговой и клевер ползучий.

По результатам исследований ВНИИ кормов им. В. Р. Вильямса, именно клевер ползучий играет ведущую роль в поддержании продуктивного долголетия травостоев в течение длительного (более 40 лет) использования [3]. Клевер ползучий обладает экологической пластичностью, устойчивостью к многократному отчуждению, активным вегетативным размножением в условиях выпаса, высокой кормовой ценностью и азотфиксацией способностью. Институтом кормов созданы перспективные для использования сорта клевера ползучего (ВИК 70, Юбилейный, Смена и др.). Сорт ВИК 70 в ряде зон служит стандартом; он отличается высокой зимостойкостью, устойчивостью к болезням, невысоким содержанием клетчатки (17,7 %) и повышенным – сырого протеина. При 9-летнем испытании среднемноголетняя урожайность зеленой массы травосмеси с его включением за 3 цикла составила 44,5 т/га, сухой массы – 8,3 т/га, в том числе клевера – 3,5 т/га [2].

Районированные в Республике Карелия сорта клевера лугового высоко эффективны в составе травосмесей на почвах, произвесткованных до слабокислого или нейтрального уровня pH_{sol} . В настоящее время отечественными селекционе-

рами созданы сорта бобовых культур нового поколения для включения в состав пастбищных агрофитоценозов, приспособленные к условиям кислых почв, что позволяет расширить площади для создания сеянных клеверо-злаковых травостоев в нечерноземной зоне. Однако особенности формирования бобово-злаковых травостоев, созданных с включением этих сортов, и их адаптивный потенциал в агроклиматических и почвенных условиях Карелии прежде не изучались. При создании клеверо-злаковых травостоев на средне- и сильноискусственных дерново-подзолистых почвах рекомендуется включать в травосмесь клевер сорта Топаз, устойчивый к повышенной кислотности почвы. По данным ВНИИ кормов, травосмесь с его участием обеспечит получение с 1 га 68,4...72,6 ГДж обменной энергии, 5,3...5,5 тыс. кормовых единиц и 803...827 кг сырого протеина [5].

Целью наших исследований являлось сравнение продуктивности бобово-злаковых агрофитоценозов пастбищного типа с включением районированных и перспективных сортов клевера лугового и ползучего.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Полевой опыт заложен в 2006 году на опытном поле Карельской ГСХОС на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве с pH_{sol} 5,1...5,35, содержанием гумуса 4,4...5,35; I_2O_5 – 38,0...56,0 мг/100 г; K_2O – 17,4...26,7 мг/100 г.

Схема опыта включает следующие варианты:

1. Тимофеевка луговая + овсяница луговая + овсяница красная + клевер луговой сорт Нива + клевер ползучий сорт Белогорский – контроль.

2. Тимофеевка луговая + овсяница луговая + овсяница красная + клевер луговой сорт Топаз + клевер ползучий сорт ВИК 70.
3. Тимофеевка луговая + фестуолиум + овсяница красная + клевер луговой сорт Топаз + клевер ползучий сорт ВИК 70
4. Тимофеевка луговая + овсяница луговая + овсяница красная, фон минерального питания – N₀.
5. Тимофеевка луговая + овсяница луговая + овсяница красная, фон – N₁₂₀.
6. Тимофеевка луговая + овсяница луговая + овсяница красная, фон – N₁₈₀.

В состав травосмесей включены следующие сорта злаковых: тимофеевка луговая – Олонецкая местная, овсяница луговая – Суйдинская, овсяница красная – Сигма, фестуолиум – ВИК 90. Площадь учетной делянки – 20 м², повторность 4-кратная, размещение вариантов реномизированное. Посев 2006 года, беспокровный. На все варианты вносили фосфорно-калийные удобрения в дозе Р₆₀К₉₀. Злаковые травостои с тремя уровнями минерального питания (варианты 4–6) введены в схему опыта исключительно для расчета накопления биологического азота бобово-злаковыми травостоями. Использование травостоя проводили в фазу пастбищной пригодности, 3 раза за сезон (имитация трех циклов стравливания). В работе использовали методики ВНИИ кормов им. В. Р. Вильямса [1], [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В 1-й год использования участие в травостое клевера лугового районированного сорта Нива снижалось на протяжении пастбищного периода с 44,7 до 25,5 %, а сорта Топаз – возрастило от 19,7 до 26,5 %. Массовая доля клевера ползучего районированного сорта Белогорский варьировалась в пределах 23,1...35,9 %, перспективного сорта ВИК 70 в травосмеси с овсяницей луговой – от 24,5 до 41,3 %, с фестуолиумом – от 20,6 до 31,9 %. Все варианты обеспечили высокие показатели урожайности сухого вещества, выхода обменной энергии и сырого протеина с 1 га (табл. 1). Отмечена прямая корреляция между общей долей бобовых компонентов в травостое, содержанием сырого протеина в сухом веществе и сбором его с единицы площади: наивысшие показатели (61,4...67,8 %, 19,06...20,5 % и 2,16 т/га соответственно) отмечены в контролльном варианте, наименьшие (41,1...60,9 %, 15,88...17,56 % и 1,76 т/га) – в варианте с фестуолиумом. Полученное сырье отличалось высокой кормовой ценностью и энергонасыщенностью и соответствовало зоотехническим нормам кормления высокопродуктивного скота. Обеспеченность 1 кормовой единицы переваримым протеином составила 127...161 г.

Во 2-й год использования в начале вегетации отмечено резкое снижение участия клевера лугового и ползучего в травостое. К 3-му циклу их доля несколько возросла и составила у клевера лугового 21,6 % (сорт Нива) и 4,2...16,8 % (сорт Топаз), у клевера ползучего – 7,9 % (сорт Белогорский) и 7,8...14,3 % (сорт ВИК 70). В первых двух циклах наибольшее участие (до 17,8 %) бобовых компонентов в травостое отмечено у районированных сортов, в 3-м цикле – не только в контролльном, но и в опытном варианте с фестуолиумом (29,5 и 31,1 % соответственно). По сравнению с 1-м годом пользования урожайность сухого вещества в вариантах снизилась в 1,4...1,8 раза, выход обменной энергии – в 1,6...2,0 раза, сбор сырого протеина – в 2,1...2,2 раза, причем самые низкие показатели отмечены в опытном варианте с фестуолиумом. Содержание сырого протеина в сухом веществе составило в 1-м цикле 11,96...12,80 %, во 2-м – 12,31...14,15 %, в 3-м – 16,94...17,43 %, что ниже уровня 2007 года. При этом параметры энергетической и протеиновой ценности соответствовали зоотехническим нормам.

В 3-й год пользования массовая доля бобовых компонентов при формировании урожая варьировала от 1,2 до 14 %, четких различий между контролльным и опытными вариантами по данному показателю не отмечено. Показатели продуктивности вариантов различались несущественно и были выше, чем в 2008 году. Вследствие снижения массовой доли бобовых компонентов содержание сырого протеина в сухом веществе составило 11,07...15,10 % и достигло оптимальных значений только во 2-м варианте (2–3-й циклы). Обеспеченность 1 кормовой единицы переваримым протеином ниже оптимальной (до 105 г) отмечена только в 1-м цикле. Энергонасыщенность сухого вещества достаточно высока – 9,4...10,6 МДж/кг, что на уровне оптимальных зоотехнических норм кормления.

В 3-й год пользования массовая доля бобовых компонентов при формировании урожая варьировала от 1,2 до 14 %, четких различий между контролльным и опытными вариантами по данному показателю не отмечено. Показатели продуктивности вариантов различались несущественно и были выше, чем в 2008 году. Вследствие снижения массовой доли бобовых компонентов содержание сырого протеина в сухом веществе составило 11,07...15,10 % и достигло оптимальных значений только во 2-м варианте (2–3-й циклы). Обеспеченность 1 кормовой единицы переваримым протеином ниже оптимальной (до 105 г) отмечена только в 1-м цикле. Энергонасыщенность сухого вещества достаточно высока – 9,4...10,6 МДж/кг, что на уровне оптимальных зоотехнических норм кормления.

Таблица 1
Урожайность и продуктивность бобово-злаковых пастбищных травостоев за 3 года использования

№ варианта	Год исследования	Урожайность сухого вещества, т/га	Выход с 1 га	
			обменной энергии, ГДж	сырого протеина, т
1	2007	10,90	130,80	2,16
	2008	6,92	71,10	0,98
	2009	9,11	92,20	1,11
	среднее	8,98	98,03	1,42
2	2007	9,22	106,25	1,84
	2008	6,50	65,90	0,89
	2009	8,71	88,30	1,12
	среднее	8,14	86,88	1,28
3	2007	10,73	120,12	1,76
	2008	5,87	60,60	0,78
	2009	9,16	88,00	1,07
	среднее	8,59	89,58	1,20
НСР ₀₅	2007	1,87	23,56	0,34
	2008	1,52	15,39	0,21
	2009	1,52	15,16	0,17
	среднее	1,16	13,27	0,19

Таблица 2
**Накопление биологического азота бобово-злаковыми пастбищными травостоями
(в сумме за 2007–2009 годы)**

№ варианта	Вынос азота с урожаем, кг/га			
	цикл	всего	биологического	за счет минеральных удобрений
1	1-й	302,8	98,0	—
	2-й	241,9	132,4	—
	3-й	131,0	68,9	—
	всего	675,7	299,3	—
2	1-й	250,1	43,9	—
	2-й	236,3	126,8	—
	3-й	129,8	67,7	—
	всего	586,2	208,4	—
3	1-й	214,0	3,7	—
	2-й	232,7	123,2	—
	3-й	130,5	68,4	—
	всего	577,2	195,3	—
4	1-й	210,3	—	—
	2-й	109,5	—	—
	3-й	62,1	—	—
	всего	381,9	—	—
5	1-й	314,6	—	104,3
	2-й	229,6	—	120,1
	3-й	149,0	—	86,9
	всего	693,2	—	311,3
6	1-й	312,7	—	102,4
	2-й	324,9	—	215,4
	3-й	200,3	—	138,2
	всего	837,9	—	456,0

Накопление биологического азота в травостоях с клевером луговым и ползучим за 3 года

использования составило 195,3...299,3 кг/га, максимальные значения отмечены в контролльном варианте (табл. 2). Для оценки полученной величины биологического азота с учетом коэффициента использования минеральных удобрений (34,4 %) определен эквивалент их количества, необходимого для получения равнозначной прибавки в выносе азота на злаковых травостоях, который равен 567...870 кг. Рассчитанная экономия средств на приобретение аммиачной селитры составила 4,0...6,1 тыс. руб./га.

Все изученные бобово-злаковые травостои за три года использования обеспечили высокие средние показатели продуктивности. Содержание нитратов в зеленой массе не превышало 414 мг/кг, что находится в пределах допустимой концентрации.

ВЫВОДЫ

Бобово-злаковые травосмеси с включением клевера лугового и клевера ползучего при трехкратном режиме использования способны формировать высокопродуктивные агрофитоценозы, позволяющие получать экологически чистый и экономически выгодный корм. В 1-й год использования высокие показатели продуктивности обеспечиваются за счет высокой массовой доли (до 68 %) в травостое бобовых компонентов, тогда как во 2–3-м годах использования в формировании урожая большее участие принимают злаковые компоненты. В целом за три года использования созданные травостои с участием новых сортов клевера лугового и клевера ползучего обеспечили продуктивность на уровне контрольного варианта, но несколько уступали ему по накоплению биологического азота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Методические указания по проведению полевых опытов с кормовыми культурами. М.: Россельхозакадемия, 1997. 156 с.
- Писковацкая Р. Г., Чепрасова С. Н., Жуков А. П., Капустина Е. В. Новые сорта лугопастбищных бобовых трав – залог продуктивности кормовых угодий // Адаптивное кормопроизводство: проблемы и решения (к 80-летию ВНИИ кормов им. В. Р. Вильямса) / Под ред. А. С. Шпакова [и др.]. М.: ФГНУ «Росинформагротекс», 2002. С. 278–288.
- Привалова К. Н. Продуктивность долголетних травостоев с клевером ползучим // Кормопроизводство. 2004. № 2. С. 6–10.
- Программа и методика проведения научных исследований по луговодству. М.: Россельхозакадемия, ВНИИ кормов им. В. Р. Вильямса, 2000. 86 с.
- Шпакова Н. А., Трофимова Л. С. Создание клеверо-злаковых сенокосов на кислых почвах // Кормопроизводство. 2003. № 1. С. 7–9.

УДК 630*385.1*238

ИВАН АНДРЕЕВИЧ БЕРДНИКОВ

младший научный сотрудник лаборатории лесоведения и лесоводства Института леса, Карельский научный центр РАН
forest@krc.karelia.ru

ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ АНАНЬЕВ

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий лабораторией лесоведения и лесоводства Института леса, Карельский научный центр РАН
ananyev@krc.karelia.ru

РОСТ И КАЧЕСТВО ПЛАНТАЦИОННЫХ КУЛЬТУР СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ НА ОСУШЕННЫХ БОЛОТАХ

В статье дан анализ роста планационных культур сосны различной густоты на осушенных болотах. Выявлена эффективность внесения удобрений и применения гербицидов. Определены оптимальные параметры создания планационных культур на осушенных болотах Южной Карелии.

Ключевые слова: осушение, планационные культуры, товарная структура, рубки ухода

Многолетний опыт России и других стран показал, что гидролесомелиорация в условиях избыточного увлажнения и значительной заболоченности является объективной необходимостью [1], [3], [4]. Она улучшает водный режим земель, повышая продуктивность лесов, способствуя их лучшему транспортному освоению, отвечает требованиям рационального ведения лесного хозяйства и эффективной лесоэксплуатации. В Республике Карелия осушено 650 тыс. га. Часть их передана в сельскохозяйственное пользование. В настоящее время 530 тыс. га осушенных лесных земель включены в лесохозяйственный оборот. К лесокультурному фонду отнесено более 100 тыс. га, из них 72 тыс. га было освоено.

На Северо-Западе России в силу исторических причин сконцентрированы крупнейшие лесоперерабатывающие предприятия, устойчивая работа которых во многом зависит от своевременной обеспеченности качественной древесиной хвойных пород. Однако проводимые с середины прошлого столетия в значительных объемах сплошные рубки наиболее продуктивных хвойных лесов привели к повсеместной смене их лиственными, ухудшению генофонда, возрастной и товарной структуры древостоеов [6]. Истощение эксплуатационного фонда не позволяет ориентироваться на получение в возрастающих объемах высокотоварного крупного леса хвойных пород. Для устойчивого обеспечения лесозаготовительных предприятий лесным сырьем необходимо разработать научные рекомендации по устойчивому лесопользованию с обоснованием возможности перехода на сокращенный оборот рубки путем применения планационного лесовыращивания.

Цель работы – оценить опыт планационного выращивания культур сосны на осушенных землях в условиях Южной Карелии и выявить наиболее оптимальные варианты их создания.

Объектами исследований явились планационные культуры сосны обыкновенной, созданные на территории Киндасовского лесничества (кв.

30) под руководством научного сотрудника Петрозаводской лесной опытной станции Л. К. Цинкович [8], [9] в 1973 году на болоте переходного типа. Расстояние между каналами – 120 м. Мощность торфяной залежи в пределах участка составляла 90–120 см, зольность торфа – 6–8 %.

Подготовка почвы под культуры производилась плугом канавокопателем ПКЛН-500А в агрегате с трактором Т-100МБГС. Все борозды выведены в осушитель. Посадка проведена весной 1977 года под меч Колесова 3-летними отсортированными сеянцами сосны с расстоянием между рядами 3 м. Схема опыта включала создание культур сосны различной густоты (2–4 тыс. шт./га) с внесением удобрений и применением гербицидов.

Минеральные удобрения первый раз были внесены в 1987 году в дозе N50P50 на 1 га (дозы указаны по действующему веществу) вдоль рядов культур полосами шириной 1 м. Повторное внесение удобрений в дозе N100P100K100 в 1980 году – на полосы шириной 1,5 м. Третья подкормка (N100P200K100) выполнена в 1986 году.

Для устранения растений-конкурентов применяли гербициды: в 1979 году вносили пропазин в дозе 7 кг/га, через год пропазин в той же дозе в сочетании с дипиридилифосфатом (2,5 кг/га). В 1981 году был применен велпар в форме 90 % смаивающегося порошка в дозе 7 кг/га.

На всех вариантах опыта заложены пробные площади, где проведен перечет древостоя по ступеням толщины с подразделением на здоровые, сухостойные и поврежденные деревья. Отдельно отмечали деревья с открытой и закрытой кроной. Замер высот производили у 4–5 деревьев средних ступеней толщины и у 2–3 деревьев в каждой из остальных. Для изучения хода роста по высоте, диаметру и объему брали по 10 штук модельных деревьев на каждом варианте опыта. Выход сортиментов по категориям крупности в зависимости от густоты насаждения и лесохозяйственных мероприятий определен с помощью сортиментных таблиц [7].

Таблица 1

Год наблюдений	Состав	Густота, тыс. шт./га	Средние показатели		Класс бонитета	Относительная полнота	Запас, м ³ /га	Текущий прирост, м ³ /га
			D, см	H, м				
Густота 2 тыс. шт./га (удобрения и гербициды)								
1990*	10C	1950	9,6	4,8	I	0,6	50	-
1996*	10C	1710	13,2	7,4	I	1,0	87	6,2
2009	10C	1030	18,4	13,8	I	0,9	223	10,5
Густота 2 тыс. шт./га (контроль)								
1990*	10C	1950	6,2	3,4	II	0,5	15	-
1996*	10C	1890	8,9	5,2	III	0,7	37	3,7
2009	10C	1580	12,9	9,5	III	0,8	106	5,3
Густота 4 тыс. шт./га (удобрения и гербициды)								
1990*	10C	3670	8,8	4,8	I	1,3	60	-
1996*	10C	2440	11,4	7,4	I	1,0	91	5,2
2009	10C	1940	15,5	13,8	I	0,8	253	12,5
Густота 4 тыс. шт./га (контроль)								
1990*	10C	3800	6,4	3,8	II	1,0	32	-
1996*	10C	3350	8,8	5,5	III	1,1	65	5,5
2009	10C	2030	13	11,1	II	0,9	155	6,9

* Данные Л. К. Цинкович [8], [9].

Таблица 2

Динамика прироста культур сосны по высоте

Вариант опыта	Густота культур, тыс. шт./га	Прирост по высоте по пятилетиям, м					
		1-е	2-е	3-е	4-е	5-е	6-е
Удобрения и гербициды	2	2,1	2,0	2,5	2,8	2,2	2,3
Контроль	2	1,7	1,4	1,4	1,7	1,7	1,5
Удобрения и гербициды	4	2,2	2,4	2,3	2,3	2,1	2,2
Контроль	4	2,0	1,8	1,9	2,2	1,7	2,1

Результаты исследований хода роста плантационных культур сосны приведены в табл. 1, из которой видно, что в вариантах с внесением удобрений в зависимости от густоты высота культур по достижении ими 13-летнего возраста на 26–41 % выше, чем на контроле, а диаметр на 37–55 % больше.

Примерно такое же соотношение этих показателей по отношению к контролю наблюдалось в 19-летних культурах. В 32-летнем возрасте существенная разница (42–45 %) по высоте и диаметру деревьев сосны отмечена на удобренных и контрольных участках в редких культурах (с густотой 1,0–1,6 тыс. шт./га). В более густых культурах (2,0 и более тыс. шт./га) эти различия не превышают 25 %. Применение удобрений и гербицидов ускорило рост культур сосны по диаметру и высоте, что способствовало интенсивному наращиванию запаса. Текущий прирост по запасу в исследуемых древостоях довольно высок и составляет 10,5–12,5 м³/га. Применение интенсивной технологии создания лесных культур (удобрения + гербициды) способствовало формированию высокополнотных насаждений с запасом 220–250 м³/га. При этом ход роста культур сосны в этом случае соответствует древостоям, произрастающим на минеральных почвах по первому

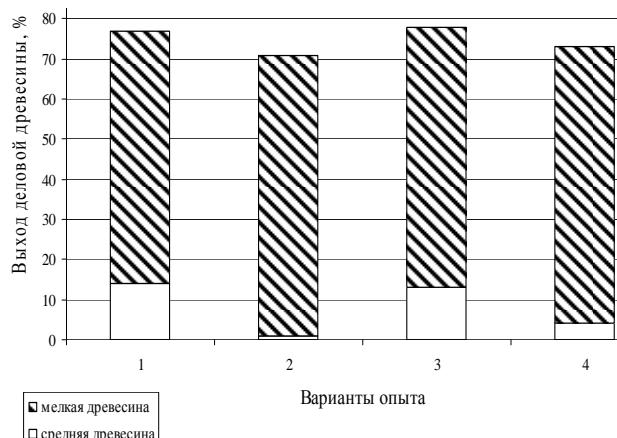
классу бонитета [2]. На контрольных участках рост древостоеv идет по II–III классам бонитета.

В течение первых 13 лет интенсивность изреживания на удобренных и контрольных участках одинакова и составляет по числу стволов 2–5 %. В дальнейшем по мере смыкания крон деревьев верхнего полога наблюдается интенсивное изреживание древостоеv. При этом на удобренных участках независимо от густоты культур отпад выше, чем на контроле. В настоящее время (через 32 года после создания культур) имеется достаточное количество деревьев для формирования высокопродуктивных насаждений. Как показал анализ хода роста древостоеv, первоначальная густота культур сосны обыкновенной на осушенных болотах должна составлять 2 тыс. шт./га, что в наибольшей степени соответствует целевому выращиванию качественной древесины в плантационном режиме.

Для определения сроков влияния удобрений на рост сосны нами по модельным деревьям проанализирована динамика прироста по диаметру и высоте (табл. 2, 3).

Текущий среднепериодический прирост по высоте на удобренных участках выше, чем на контроле. При этом наибольшая разница наблюдается в культурах с первоначальной густотой 2 тыс. шт./га. Максимальный прирост отмечен в варианте с внесением гербицидов и удобрений в четвертом пятилетии. В культурах с густотой 4 тыс. шт./га прирост по высоте на протяжении 30-летнего периода стабилен. Аналогичная картина наблюдается на контрольных участках, где он варьировал в незначительных пределах.

Причиной резкого падения прироста в высоту в пятом пятилетии послужило нарушение работы осушительной системы из-за возведения плотин бобрами и частичного потопления участка культуры. После ликвидации плотин в 2005 году прирост по высоте увеличился на всех участках.



Выход деловой древесины в 32-летних культурах сосны плантационного типа на осушенном болоте переходного типа:

- густота 2 тыс. шт./га: 1 – удобрения и гербициды,
- 2 – контроль; густота 4 тыс. шт./га:
- 3 – удобрения и гербициды, 4 – контроль

Таблица 3
Динамика прироста культур сосны
по диаметру

Вариант опыта	Густота культур, тыс. шт./га	Прирост по высоте по пятилетиям, м					
		1-е	2-е	3-е	4-е	5-е	6-е
Удобрения и гербициды	2	2,3	5,4	3,3	2,4	2,4	1,0
Контроль	2	2,0	3,5	2,3	1,3	1,4	0,8
Удобрения и гербициды	4	2,7	4,9	2,2	1,8	2,0	1,0
Контроль	4	2,6	3,8	1,7	1,2	1,5	1,2

Максимальный прирост по диаметру сосны во всех вариантах опыта отмечен во втором пятилетии (табл. 3).

На удобренных участках он выше в 1,3–1,5 раза, чем на контроле. В дальнейшем наблюдается снижение прироста по диаметру, но его величина в течение последующих 25 лет остается довольно высокой.

Анализ динамики прироста по высоте и диаметру, а также накопления запаса, обеспечи-

вающего окупаемость заготовки древесины на удобренных участках, показал, что оптимальным сроком проведения рубок ухода (прореживаний) является пятое пятилетие (25–30 лет). Согласно «Наставлению по рубкам ухода в лесах Республики Карелия» [5], процент выборки по запасу при прореживаниях равен 35 %. В плантационных культурах сосны на удобренных участках при проведении ухода в эти сроки можно получить древесину в объеме 80–90 м³/га, в том числе 60–70 м³/га деловой древесины.

При выращивании плантационных культур важным показателем качества является товарная структура насаждений. Выход деловой древесины зависит от наличия пороков. Установлено, что основными пороками древесины в плантационных культурах сосны являются сучья, кривизна, двухвершинность, пасынки. Внесение удобрений и гербицидов оказало влияние на выход деловой древесины. Так, при густоте насаждения 2 тыс. шт./га выход деловой древесины выше, чем на контрольном участке (см. рисунок).

Аналогичная картина наблюдается в варианте с густотой 4 тыс. шт./га, где выход деловой древесины на 6 % выше, чем на контроле. При этом в удобренных древостоях независимо от их густоты выход древесины средней категории крупности одинаковый.

Обобщение и анализ полученных материалов позволяют сделать следующие выводы.

1. При создании плантационных культур сосны на осушенных болотах переходного типа оптимальной является первоначальная густота 2 тыс. шт./га, обеспечивающая формирование при 3-кратном внесении удобрений к 30-летнему возрасту высокопродуктивных древостояев с запасом древесины 220–250 м³/га.
2. Совместное применение удобрений и гербицидов улучшает рост культур сосны и способствует увеличению выхода деловой древесины.
3. Для улучшения условий роста и получения крупномерной древесины в плантационных культурах сосны на осушенных болотах переходного типа первое разреживание культур необходимо проводить в возрасте 30 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабиков Б. В. Гидротехнические мелиорации лесных земель. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 190 с.
2. Казимиров Н. И., Лядинский А. Г., Преснухин Ю. В. и др. Производительность сосновых насаждений по типам леса. Петрозаводск: Карельский научный центр АН СССР, 1990. 42 с.
3. Константинов В. К. Осушение лесов России // Лесное хозяйство. 1994. № 1. С. 36–38.
4. Пятецкий Г. Е., Медведева В. М. Лесоосушение – путь умножения лесных богатств. Петрозаводск: Карельское кн. изд-во, 1967. 116 с.
5. Синькович С. М., Зябченко С. С., Ананьев В. А. Наставление по рубкам ухода в лесах Республики Карелия. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1995. 39 с.
6. Соколов А. И., Синькович С. М., Крутов В. И. и др. Перспективы ускоренного выращивания сосны в среднетаежной подзоне Карелии // Лесное хозяйство. 2010. № 1. С 42–44.
7. Таблицы для оценки древесного сырья в лесах Карелии. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1978. 25 с.
8. Цинкович Л. К., Барышева Г. И. Влияние комплексного ухода на рост культур сосны на осушенных болотах // Гидролесомелиорация северо-востока ЕТС. Горький: Горьковская областная типография областного управления издательств, 1990. С. 76–78.
9. Цинкович Л. К., Барышева Г. И. Ускоренное выращивание сосны на осушенных торфяниках // Экологико-биологическое обоснование гидролесомелиорации и реконструкции лесоосушительных систем. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1996. С. 36–38.

АНДРЕЙ АНДРЕЕВИЧ ВАЙС

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесной таксации, лесоустройства и геодезии лесохозяйственного факультета, Сибирский государственный технологический университет (г. Красноярск)

vais6365@mail.ru

ТОЛЩИНА КОРЫ НИЖНЕЙ ЧАСТИ ДЕРЕВЬЕВ ЕЛИ СИБИРСКОЙ (*PICEA SIBIRICA*) В УСЛОВИЯХ СРЕДНЕЙ СИБИРИ

Размер коры является важным показателем оценки деревьев и насаждений. На основе данных обмера модельных деревьев ели сибирской (*Picea sibirica*) были построены вспомогательные таблицы для определения абсолютных значений и значений двойной толщины коры нижней части стволов по диаметру и возрасту деревьев в условиях Средней Сибири.

Ключевые слова: кора, ель сибирская, модель, норматив, лесной район, нижняя часть ствола

ВВЕДЕНИЕ

Роль и значение коры при определении объемов древесины, ее хозяйственная ценность известны с давних пор. М. М. Орлов отмечал разнообразие методов учета коры от весового до стереометрического. Степень участия коры варьирует в общей массе дерева от 6 до 20 % и зависит от ряда факторов (древесной породы, возраста дерева, условий местопроизрастания, длины бревен). По толщине коры применительно к нижней части ствола автор указывал следующий порядок: сосна, дуб, лиственница, ель, пихта и бук [7].

В «Справочнике таксатора» [8] приведены данные процента коры в зависимости от объема ствола в коре. Таблица составлена В. Е. Шульцем для деревьев независимо от разрядов высот и средней формы стволов. Входом в таблицу являлись значения диаметров на высоте 1,3 м (ступеней толщины).

И. А. Нахабцев предложил лесотаксационное районирование по процентному содержанию коры, разделив территорию лесного фонда СССР на 20 лесотаксационных районов по основным лесообразующим породам и в зависимости от средних диаметров древостоев [5].

И. И. Гусев подробно изучил толщину и объем коры ели на высоте груди для северо-западного района и ее связь с диаметром и возрастом деревьев, а также условиями местопроизрастания. Автор отмечает резкое увеличение толщины коры в комлевой части [2].

С. Л. Шевелев и В. М. Бутенко изучили закономерности формирования коры деревьев пихты белокорой. Исследователи установили следующую закономерность: от комля до некоторой отметки относительной высоты ствола величина двойной толщины коры уменьшается, затем происходит ее увеличение. Авторы предположили, что процессы формирования коры связаны с формированием кроны, зона интенсивного развития которой обычно приурочена к 0,3 высоты ствола [10].

Закономерности формирования коры лиственницы сибирской в условиях Приангарского района подробно изучал В. Н. Евстафьев под руководством С. Л. Шевелева. Автором установлена значительная степень связи между средней двойной толщиной коры на высоте 1,3 м и средними возрастом, высотой и диаметром древостоев; выявлены закономерности изменения относительных показателей коры; установлены тенденции динамики среднего прироста коры на высоте 1,3 м и предложены таблицы, позволяющие детализировать размеры коры применительно к лесотаксационным таблицам [3].

М. М. Чебых исследовал объемное содержание коры в условиях Бурятской АССР. Автор отмечал целый ряд факторов, влияющих на содержание коры: длина хлыста, место заготовки, ширина годичных колец, разряд высоты, объем хлыста, возраст [9].

Фактор коры влияет на определение текущего прироста запаса [1] и форму стволов [4]. Толщина коры нижней части деревьев зависит, помимо общепринятых показателей, от экологических факторов – условий роста в нижнем ярусе древостоя (наличие или отсутствие подроста, лесных пожаров, крупнотравного или мелкотравного напочвенного покрова и т. д.). Косвенно размер коры в нижней части ствола отражает комплекс условий роста дерева.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью работы было установить возрастные и размерные закономерности толщины коры в нижней части стволов. Изучению были подвергнуты данные, собранные сотрудниками кафедры лесной таксации СибГТУ. Измерению подвергались учетные и модельные деревья ели сибирской (*Picea sibirica*), срубленные на пробных площадях двух районов [6]: Приангарского (Красноярский край: Казачинский и Абанский муниципальные районы)

и Среднесибирского подтаежно-лесостепного (Красноярский край: Бирюльский, Дзержинский, Усольский, Большемуртинский, Пировский и Тасеевский муниципальные районы). К сожалению, данные описаний пробных площадей были потеряны, что не позволяет провести исследование толщины коры с учетом условий местопроизрастания. Поэтому анализ был выполнен по лесохозяйственным районам [6]. Общее число моделей – 974 шт. Отбор модельных деревьев производился по ступеням толщины. Закладка пробных площадей выполнялась в соответствии с ОСТом 56-69-83.

Общая характеристика моделей приведена в табл. 1.

В статье используются следующие обозначения: $T_{1,3}$ – толщина коры на высоте груди; T_n – толщина коры на высоте пня; $T_{1,3\text{отн.}}$ – относительная толщина коры на высоте груди; $T_{\text{отн.}n}$ – относительная толщина коры на высоте пня; $d_{1,3}$ – диаметр ствола на высоте груди; d_n – диаметр на высоте пня; $\Delta T_{1,3}$ – средний прирост толщины коры на высоте груди; ΔT_n – средний прирост толщины коры на высоте пня; $\Delta T_{1,3 \text{ отн.}}$ – средний относительный прирост толщины коры на высоте груди; $\Delta T_{\text{отн.}n}$ – средний относительный прирост толщины коры на высоте пня.

Абсолютная толщина коры вычислялась по формуле:

$$2*T_i = d_{\text{в.к}} - d_{\text{б.к}}, \quad (1)$$

где T_i – толщина коры на любой точке высоты ствола, см; $d_{\text{в.к}}$ – диаметр ствола в коре, см; $d_{\text{б.к}}$ – диаметр ствола без коры, см.

Относительная толщина коры:

$$2*T_{\text{отн.}i} = \frac{2*T_i * 100\%}{d_{\text{в.к}}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{отн.}i}$ – относительная толщина коры по отношению к диаметру в коре, %.

Средний прирост:

$$\Delta T_i = \frac{2*T_i}{A}, \quad (3)$$

где ΔT_i – средний прирост толщины коры, см; A – возраст, лет.

Возраст деревьев в различных районах варьировал от 27 до 251 года, высота – от 6,8 до 37,7 м, диаметр на высоте груди – от 6,6 до 51,3 см, диаметр на высоте пня – от 7,6 до 96,0 см, нулевой коэффициент формы изменялся от 1,03 до 3,20. Все это указывает на высокое разнообразие исходного материала. Толщина коры характеризовалась следующими пределами: абсолютная толщина на высоте груди – 0,1–7,2 см; абсолютная толщина на высоте пня – 0,1–8,6 см; относительная толщина на высоте груди – 0,3–20,6 %; относительная толщина на высоте пня – 0,7–30,5 %. Необходимо отметить, что предельные значения могут относиться и к категории ошибок. Поэтому были вычислены средние параметры абсолютных и относительных значений толщины коры (табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Средние абсолютные и относительные значения толщины коры на высоте пня превышали эту величину на высоте груди. Относительные значения толщины коры на части пробных площадей больше на высоте груди, чем на высоте пня. Это объясняется недостатком формулы (2), поскольку величина относительной толщины зависит от диаметра дерева в коре и при выраженной разнице доля коры на высоте груди может превышать долю коры на высоте пня.

Варьирование абсолютной и относительной толщины характеризовалось как большое (17,0–72,3 %). Точность опыта варьировала на пробных площадях от 2,2 до 14,5 %. Превышение 10 % наблюдалось на единичном числе площадей, что является приемлемым для такой величины, как толщина коры.

Объединив материал, мы проанализировали ряд связей по исследованным районам: $2*T_{1,3} = f(A)$, $2*T_n = f(A)$, $2*T_{1,3\text{отн.}} = f(A)$, $2*T_{\text{отн.}n} = f(A)$, $2*T_{1,3} = f(d_{1,3})$, $2*T_{1,3\text{отн.}} = f(A)$, $2*T_n = f(d_{1,3})$, $2*T_{\text{отн.}n} = f(d_n)$, $2*\Delta T_{1,3} = f(A)$, $2*\Delta T_n = f(A)$, $2*\Delta T_{1,3 \text{ отн.}} = f(A)$, $2*\Delta T_{\text{отн.}n} = f(A)$. Установлены следующие закономерности в изменении толщины коры. Абсолютные значения варьировали с возрастом в широких пределах с тенденцией к увеличению. Изменчивость по ступеням толщины выражена значительно меньше, что позволило использовать модели для построения вспомогательного норматива. Относительные значения толщины коры с возрастом и по ступеням толщины уменьшались в соответствии с аппроксимирующим уравнением.

Для изучаемых связей были получены оценки регрессий. Нелинейные модели характеризовались коэффициентом детерминации и коэффициентами степенного уравнения. Показатели получены при уровне доверительной вероятности $p = 0,954$. Анализ указывает на значимость и достоверность коэффициентов всех связей во всех районах, кроме вычисления абсолютной толщины коры на высоте груди с учетом возраста для Дзержинского, Большемуртинского и Абанского районов, а также абсолютной толщины коры на высоте пня для Дзержинского района.

Возрастные тенденции толщины коры на высоте груди и на высоте пня однотипны. Максимальными размерами характеризовались деревья ели сибирской (*Picea sibirica*) из Абанского и Тасеевского района, затем следуют Дзержинский, Большемуртинский, Казачинский и Бирюльский районы. По ступеням толщины распределение размеров коры на высоте груди характеризовалось достаточным разнообразием и в значительной степени различалось по районам в следующей последовательности от максимума к минимуму: Тасеевский, Дзержинский, Казачинский, Большемуртинский, Бирюльский и Абанский районы. На высоте пня линии располагались близко друг к другу, при этом степень различия не превышала 0,2 см (Большемуртинский – Казачинский районы).

Достаточно низкая адекватность моделей не позволила получить нормативы с малой величиной ошибок. Поэтому были составлены вспомо-

гательные таблицы, которые передают общие средние тенденции в изменении выходной переменной (табл. 2, 3).

Таблица 1
Статистики абсолютных и относительных параметров толщины коры

Абсолютная толщина коры						Относительная толщина коры, %					
на высоте груди			на высоте пня			на высоте груди			на высоте пня		
X, см	V, %	P, %	X, см	V, %	P, %	X, %	V, %	P, %	X, %	V, %	P, %
Красноярский край (Бирюсинский район)											
1,2 ± 0,08	42,7	6,5	1,8 ± 0,09	32,3	4,9	4,8 ± 0,30	41,1	6,3	5,2 ± 0,23	29,0	4,4
Красноярский край (Дзержинский район)											
1,4 ± 0,03	23,8	2,2	1,6 ± 0,07	45,5	4,2	5,9 ± 0,13	23,2	2,2	5,7 ± 0,22	42,4	3,9
1,4 ± 0,09	32,2	6,7	1,7 ± 0,10	29,5	6,1	5,1 ± 0,29	27,9	5,8	4,8 ± 0,28	27,5	5,7
Красноярский край (Большемуртинский район)											
1,5 ± 0,15	49,0	10,0	2,1 ± 0,18	40,2	8,6	6,0 ± 0,50	41,3	8,4	6,5 ± 0,47	33,5	7,2
1,0 ± 0,05	32,0	5,1	1,5 ± 0,07	31,2	4,9	4,2 ± 0,21	31,8	5,0	4,7 ± 0,19	25,3	4,0
1,1 ± 0,05	29,7	4,7	1,8 ± 0,07	26,5	4,2	4,8 ± 0,27	36,3	5,7	5,6 ± 0,29	33,4	5,3
1,5 ± 0,12	35,0	7,8	2,4 ± 0,15	28,3	6,3	6,1 ± 0,48	35,4	7,9	5,9 ± 0,27	20,6	4,6
1,5 ± 0,18	70,6	11,9	1,7 ± 0,11	37,3	6,3	6,5 ± 0,55	50,6	8,6	5,2 ± 0,37	41,6	7,0
1,0 ± 0,04	23,5	3,7	1,3 ± 0,08	38,6	6,1	5,8 ± 0,32	34,2	5,4	5,8 ± 0,31	32,8	5,3
1,1 ± 0,07	41,0	6,5	2,1 ± 0,11	35,1	5,5	4,2 ± 0,17	25,6	4,0	5,9 ± 0,18	18,9	3,0
1,2 ± 0,07	34,8	5,5	1,7 ± 0,09	33,7	5,3	6,7 ± 0,32	30,6	4,8	7,3 ± 0,37	31,9	5,0
1,3 ± 0,05	25,8	4,1	1,8 ± 0,08	27,1	4,3	7,0 ± 0,24	21,6	3,4	7,7 ± 0,28	23,2	3,7
Красноярский край (Казачинский район)											
1,1 ± 0,05	34,7	4,3	1,5 ± 0,10	52,1	6,5	6,3 ± 0,26	33,0	4,1	5,8 ± 0,30	40,7	5,1
1,1 ± 0,06	32,2	5,7	1,6 ± 0,08	27,2	4,9	5,2 ± 0,20	21,1	3,7	5,5 ± 0,24	24,3	4,4
1,1 ± 0,05	27,0	4,3	1,5 ± 0,08	32,5	5,2	6,2 ± 0,24	23,9	3,8	5,7 ± 0,23	25,6	4,1
Красноярский край (Абанский район)											
1,2 ± 0,05	23,6	3,9	1,5 ± 0,09	24,0	6,0	6,2 ± 0,46	44,6	7,4	5,6 ± 0,33	23,3	5,8
1,9 ± 0,09	23,6	4,5	2,2 ± 0,10	17,0	4,4	6,1 ± 0,32	27,7	5,3	4,8 ± 0,25	20,2	5,2
1,6 ± 0,08	30,3	5,2	2,0 ± 0,17	40,6	8,7	7,3 ± 0,34	27,1	4,7	5,6 ± 0,46	38,5	8,2
1,4 ± 0,14	29,0	9,7	—	—	—	5,7 ± 0,73	38,6	12,9	5,2 ± 0,35	20,2	6,7
Красноярский край (Тасеевский район)											
1,6 ± 0,12	35,1	7,7	2,0 ± 0,26	31,6	12,9	6,5 ± 0,51	36,0	7,9	5,5 ± 0,78	34,4	14,1
1,5 ± 0,10	32,2	6,4	2,0 ± 0,21	53,1	10,6	7,3 ± 0,60	41,1	8,2	7,9 ± 1,14	72,3	14,5
1,5 ± 0,04	25,7	2,4	1,8 ± 0,07	39,5	3,7	6,2 ± 0,13	22,5	2,1	5,7 ± 0,19	34,4	3,3
1,6 ± 0,04	26,0	2,8	2,0 ± 0,06	29,4	3,2	6,9 ± 0,21	28,3	3,0	6,2 ± 0,16	24,2	2,6

Таблица 2

Вспомогательная таблица для определения двойной абсолютной толщины коры нижней части стволов деревьев ели сибирской различного возраста в условиях таежной зоны Средней Сибири

Возраст, лет	Абсолютная толщина коры на высоте груди, см						Абсолютная толщина коры на высоте пня, см					
	БР	ДР	БМР	КР	АР	ТР	БР	ДР	БМР	КР	АР	ТР
40	—	—	—	0,7	—	—	—	—	—	—	—	—
60	—	—	1,1	0,8	1,2	1,2	—	—	1,7	0,8	1,4	1,5
80	—	1,3	1,1	1,0	1,3	1,3	—	1,8	1,7	1,2	1,6	1,6
100	0,9	1,4	1,2	1,1	1,4	1,4	1,4	1,8	1,7	1,4	1,7	1,7
120	1,0	1,4	1,2	1,2	1,5	1,5	1,5	1,7	1,7	1,6	1,8	1,9
140	1,1	1,4	1,2	1,3	1,6	1,6	1,7	1,7	1,8	1,9	2,0	2,0
160	1,2	1,4	1,2	—	1,7	1,7	1,8	1,7	1,8	—	2,1	2,1
180	1,3	1,4	1,2	—	1,8	1,8	2,0	1,6	1,8	—	2,3	2,3
200	1,4	—	1,2	—	1,9	1,9	2,2	—	1,9	—	2,4	2,4
220	1,4	—	1,3	—	2,0	2,0	2,3	—	1,9	—	2,5	2,5
240	1,5	—	1,3	—	—	—	2,5	—	1,9	—	—	—
250	1,6	—	1,3	—	—	—	2,6	—	1,9	—	—	—

Примечание. БР – Бирюсинский район; ДР – Дзержинский район; БМР – Большемуртинский район; КР – Казачинский район; АР – Абанский район; ТР – Тасеевский район.

Таблица 3

Вспомогательная таблица для определения двойной толщины коры на высоте груди и пня деревьев ели сибирской по ступеням толщины в условиях таежной зоны Средней Сибири

Ступени толщины, см	Толщина коры на высоте груди, см						Толщина коры на высоте пня, см					
	БР	ДР	БМР	КР	АР	ТР	БР	ДР	БМР	КР	АР	ТР
8	—	—	0,8	—	—	—	—	—	1,0	—	—	—
10	0,8	0,9	0,9	0,8	1,2	1,1	—	—	1,1	0,9	—	—
12	0,8	1,0	0,9	0,9	1,2	1,2	1,0	—	1,1	1,0	1,2	1,2
16	0,9	1,1	1,0	1,0	1,3	1,3	1,2	1,2	1,3	1,1	1,4	1,1
20	1,0	1,2	1,1	1,1	1,4	1,4	1,3	1,3	1,4	1,2	1,5	1,5
24	1,1	1,3	1,2	1,2	1,5	1,5	1,4	1,4	1,5	1,3	1,6	1,6
28	1,2	1,5	1,3	1,3	1,6	1,6	1,5	1,5	1,7	1,5	1,7	1,7
32	1,3	1,6	1,4	1,5	1,7	1,7	1,6	1,6	1,8	1,6	1,8	1,8
36	1,4	1,7	1,5	1,6	1,8	1,9	1,8	1,7	1,9	1,7	2,0	1,9
40	1,5	—	1,6	1,7	1,9	2,0	1,9	1,9	2,0	1,8	2,1	2,0
44	1,6	—	1,7	1,8	2,0	2,1	2,0	2,0	2,2	1,9	2,2	2,1
48	1,7	—	1,8	—	—	2,2	2,1	2,1	2,3	2,1	2,3	2,2
52	—	—	—	—	—	—	2,2	—	2,4	2,2	2,4	2,3
56	—	—	—	—	—	—	2,4	—	2,6	2,3	2,5	2,4
60	—	—	—	—	—	—	2,5	—	2,7	2,4	2,6	—
64	—	—	—	—	—	—	2,6	—	2,8	2,5	2,7	—
68	—	—	—	—	—	—	2,7	—	2,9	2,7	2,8	—

ВЫВОДЫ

В результате можно сделать следующие выводы.

- Высокая изменчивость показателей толщины коры указывает на невозможность создания единого норматива для определения этой величины как в целом, так и по отдельным лесным районам.
- Ель сибирская (*Picea sibirica*) относится к тонкокорым древесным породам, средняя абсолютная двойная толщина коры варьировалась от 0,2 до 3,0 см на высоте груди и от 0,2 до 6,4 см на высоте пня.
- Максимальной толщиной коры деревьев ели на высоте груди и на высоте пня характеризовались деревья Тасеевского и Абанского

районов, минимальными размерами – Бирийлюсского и Казачинского районов.

- Толщина коры на высоте груди в большей степени отражает разнообразие условий местоизрастания и может быть использована для изучения общих закономерностей; размер коры на высоте пня темнохвойных пород не отличается большим разнообразием, прежде всего из-за отсутствия лесных пожаров.

Вспомогательные таблицы передают тенденцию изменения средних показателей двойной толщины коры в нижней части стволов деревьев ели и могут быть использованы для вычисления объема коры самой ценной бессучковой зоны дерева, для мониторинга диаметров деревьев на постоянных пробных площадях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гончарук В. В. Фактор коры в определении текущего прироста запаса наличного древостоя // Лесная таксация и лесоустройство: Межвуз. сб. науч. тр. Красноярск: КПИ, 1980. С. 85–90.
- Гусев И. И. Толщина и объем коры древесных стволов ели // Лесная таксация и лесоустройство: Межвуз. сб. науч. тр. Красноярск: СТИ, 1981. С. 24–30.
- Евстахьев В. Н. Закономерности формирования коры лиственницы сибирской в условиях Приангарского района: Автореф. дис.... канд. с.-х. наук. Красноярск, 2007. 23 с.
- Лебков В. Ф., Каплина Н. Ф. Влияние параметров древесной коры на формирование стволов деревьев соны обыкновенной // Актуальные проблемы лесного комплекса: Сб. науч. тр. Вып. 9. Брянск: БГИТА, 2004. С. 26–29.
- Нахабцев И. А. Содержание коры в древостоях лесного фонда СССР // Лесная таксация и лесоустройство: Межвуз. сб. науч. тр. Красноярск: СТИ, 1989. С. 98–105.
- Об утверждении перечня лесорастительных зон и лесных районов Российской Федерации // Пр. МПР РФ от 28 марта 2007 г., № 68.
- Орлов М. М. Лесная таксация. 3-е изд. Л.: Лесн. хоз-во и лесн. пром-сть, 1929. 532 с.
- Третьяков Н. В., Горский П. В., Самойлович Г. Г. Справочник таксатора. Л.: Гослесбумиздат, 1952. 853 с.
- Чебых М. М. Содержание коры в хлыстах по геометрическому объему для Бурятской АССР // Лесная таксация и лесоустройство: Межвуз. сб. науч. тр. Красноярск: КПИ, 1990. С. 88–94.
- Шевелев С. Л., Бутенко В. М. Закономерности формирования коры у деревьев пихты белокорой // Лесная таксация и лесоустройство: Межвуз. сб. науч. тр. Красноярск: СТИ, 1981. С. 126–130.

АНДРЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ ОРЛОВ

младший научный сотрудник НИИ историко-теоретических проблем народного зодчества, Петрозаводский государственный университет
niinaz@karelia.ru

МАРГАРИТА ВАСИЛЬЕВНА КИСТЕРНАЯ

кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела учета и хранения недвижимых памятников, Государственный историко-архитектурный и этнографический музей-заповедник «Кижи»
kisternaya@kizhi.karelia.ru

ВАЛЕРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ КОЗЛОВ

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории лесоведения и лесоводства Института леса, Карельский научный центр РАН
vkozlov@krc.karelia.ru

КОМПЛЕКСНАЯ ХРОНОЛОГИЧЕСКАЯ АТРИБУЦИЯ ЧАСОВНИ СПАСА НЕРУКОТВОРНОГО ИЗ ЗАОНЕЖСКОЙ ДЕРЕВНИ ВИГОВО

В статье рассматривается комплексный метод определения датировок строительных этапов традиционных деревянных культовых построек на примере часовни из заонежской деревни Вигово. Описаны строительная история памятника, выявленная на основании его натуры обследований в 2009 году, датировки строительных этапов по архитектурно-археологической шкале с уточнением по результатам дендрохронологического анализа.

Ключевые слова: традиционное деревянное зодчество, часовни, хронологическая атрибуция, строительные периоды, архитектурно-археологическая шкала, дендрохронология, сосна обыкновенная

Заонежье – полуостров в северной части бассейна Онежского озера, известный своими многочисленными часовнями – безалтарными храмами, предназначенными для упрощенного богослужения (без литургии). В Олонецкой губернии Заонежье являлось центром распространения новых решений в области храмового строительства, своего рода законодателем архитектурной моды. Так, воздействие архитектуры заонежских часовен на безалтарные храмы другого субрегиона Карелии – Сямозерья – описывает В. П. Орфинский. Он отмечает, что Заонежье как центр новаций в культовом зодчестве Карелии оказывало влияние на формообразование сямозерских часовен, но, как правило, с запозданием и главным образом на уровне общих тенденций развития [11; 396]. Одним из авторов представленной статьи проводилось исследование влияния архитектуры часовен Заонежья на храмы Кенозерья. Оно показало, что архитектурный импульс развития архаичных кенозерских часовен исходил из Заонежья. Особенно ярко это отразилось в принадлежавшей ранее Пудожскому уезду Олонецкой губернии северной части Кенозерья, где были популярны аналогичные заонежским реконструкции храмов, связанные с увеличением камерности и надстройкой колоколен [9].

Часовни Заонежья достигли высокого уровня развития и выдающихся художественных качеств. Они привлекали внимание многих исследователей

[7], [8], [15], но в целом изучены недостаточно. Одним из насущных вопросов исследования часовен остается определение их строительной истории. Дело в том, что подавляющее большинство часовен за время своего существования подвергалось многократным реконструкциям, которые изменяли первоначальный облик памятника. Не всегда имеются сведения о проводимых реконструкциях. Кроме того, разные источники могут давать разную информацию как о характере вносимых изменений, так и о времени их появления.

Для восстановления строительной истории храма необходимо определить дату каждого строительного этапа. На проблему датировки часовен одним из первых обратил внимание Ларс Петтерссон. Исследуя памятники Заонежья, он определял время строительства и время проведения реконструкций на основании подписей на иконах, характера живописи и записей в приходских книгах [19]. Другой подход был предложен В. П. Орфинским: в рамках своей диссертационной работы [10; табл. 82] он сконструировал архитектурно-археологическую шкалу для датировки часовен Карелии (см. также: [12], [13]). Шкала незаменима для оперативной визуальной хронологической атрибуции. Она включает признаки с выявленными хронологическими ареалами и позволяет путем сопоставления с нею приемов, форм и деталей обследуемых объектов фиксировать возможные диапазоны их датировок и опре-

делять по совокупности признаков наиболее вероятное время строительства.

А. Т. Яскеляйнен усовершенствовал приемы датирования традиционных деревянных построек. В своих трудах он разрабатывал методику комплексной хронологической атрибуции памятников, в которой датировка с помощью шкалы совмещалась с результатами дендрохронологических исследований, а также провел ряд комплексных исследований памятников [12], [13], [15], [16].

В настоящее время датирование по годичным кольцам (дендрохронология) признано наиболее точным и, что немаловажно, неразрушающим методом изучения памятников истории и культуры [17], [21]. По дендрохронологическим графикам (региональным шкалам), характеризующим радиальный прирост деревьев в данном регионе, определяется год, когда образовалось последнее годичное кольцо, после чего до начала следующего вегетационного периода дерево было срублено. Лимитирующими факторами при применении дендрохронологии являются многочисленные замены материала при реконструкциях и реставрациях, что затрудняет отбор представительных образцов для анализа, и отсутствие региональных шкал, наиболее точно отражающих особенности годичного прироста деревьев в конкретных регионах.

В рамках комплексной хронологической атрибуции предварительное датирование по шкале позволяет минимизировать число отбираемых для исследования образцов древесины памятника. В свою очередь, установление даты рубки дерева с точностью ± 2 года, которую позволяет определить дендрохронологический анализ, дает возможность уточнять и развивать архитектурно-археологическую шкалу, являющуюся не только инструментом, но и наглядным способом представления результатов этноархитектурного исследования храмовых построек.

Основой настоящей статьи стала проведенная в 2009 году комплексная хронологическая атрибуция часовен музея-заповедника «Кижи». В ходе проводимых работ обследовались три часовни: Спаса Нерукотворного из деревни Вигово, Знамения Богородицы в деревне Корба и Параскевы Пятницы и Варлаама Хутынского в деревне Подъельники. Целью проводимой комплексной хронологической атрибуции храмов являлось дополнение научных паспортов памятников. Настоящая статья посвящена часовне Спаса Нерукотворного, оказавшейся наиболее сложной для визуального датирования (рис. 1). Храм вследствие перевозки на остров Кижи из деревни Вигово мог понести серьезные утраты, усложняющие определение строительной истории памятника, который и до переноса на остров претерпел ряд изменений.

В 1968 году памятник в деревне Вигово обследовал А. В. Ополовников, он выполнил обмерные чертежи храма [5]. На момент обследования от первоначального храма хорошо сохранились только срубы: сеней с восьмериком коло-

кольни, притвора и молитвенного помещения (кафоликона) с 16-частным расписанным потолком-«небом» (рис. 2). В том же году часовню перевезли из деревни Вигово на Нарину гору острова Кижи, после чего в 1968–1969 годах она была отреставрирована по проекту А. В. Ополовникова [6]. При реставрации заменили шатер на колокольне, все главки и кровлю, восстановили крыльцо и выпиленную во время предыдущих реконструкций стену между притвором и кафоликоном. В качестве аналогов восстанавливаемых элементов послужили детали часовни из деревни Еглово [6]. Потолок-«небо» в перевезенной и отреставрированной часовне не установили.



Рис. 1. Часовня из деревни Вигово в музее-заповеднике «Кижи». Фото А. В. Орлова, 2009 год



Рис. 2. Часовня в деревне Вигово. Фото А. В. Ополовникова, 1960-е годы

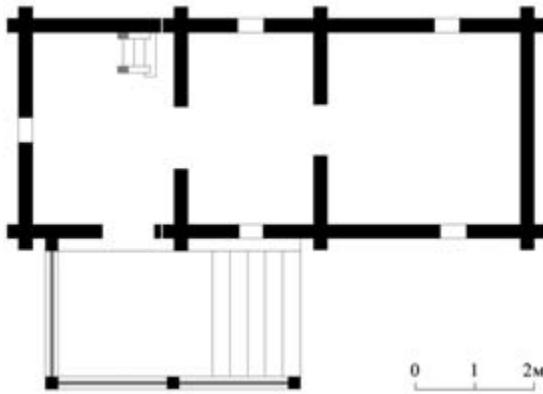


Рис. 3. План часовни
(по обмеру Т. И. Вахрамеевой, 1998 год)

Нарына гора для установки часовни была выбрана неслучайно: это выразительная ландшафтная форма, самая высокая точка острова. Безалтарный храм из деревни Вигово заменил на Нарынной горе утраченную часовню, для восстановления которой не имелось достоверных данных. Выбор часовни Спаса Нерукотворного для восполнения утраты закономерен: эта часовня является типичной для небольших деревень с культовой постройкой, простота и традиционность архитектуры которой делают ее достойным экспонатом музея-заповедника «Кижи». При переносе часовни изменился характер ее постановки. Если в деревне Вигово храм стоял на берегу озера перед порядком домов, то на Нарынной горе, вдали от застройки, образ часовни получил новое звучание.

В настоящее время часовня представляет собой трехкамерную равновысокую клетскую постройку с надстроенной колокольней. Она состоит из квадратного в плане кафоликона, поперечно-прямоугольного притвора и сеней, являющихся нижней частью основания колокольни. Стены кафоликона, гладко отесанные изнутри со скруглением углов, имеют небольшой двухвенцовый повал. Стены притвора отесаны без скругления углов (судя по имеющимся следам, первоначально они были отесаны со скруглением углов, а в прямой угол стесаны позднее), бесповальные. Молитвенное помещение и притвор с юга и севера освещаются трехкосящыми окнами, в кафоликоне – смещенными к восточной стене (рис. 3).

Пристроенная колокольня – «восьмерик на четверике» с восьмистолбным ярусом звона. Бревна трехстенного сруба («четверика») ее основания соединены с бревнами притвора в паз и гребень, на северном фасаде срубы скреплены замковым бруском. Четверик отесан изнутри со скруглением углов. Восьмерик имеет трехвенцовый повал. Одинарные угловые столбы яруса звона круглого сечения без резьбы, объединены двухвенцовой верхней обвязкой, рубленной с остатком. Колокольню завершает шатровое покрытие с луковичной главкой на барабане, покрытыми городковым лемехом.

Нижняя часть основания колокольни освещается западным трехкосящим окном. На южной

стене сеней располагается входная дверь, к которой ведет одновходное срубное крыльцо, направленное лестничным маршем на восток, с двускатной симметричной крышей на пяти столбах. Декоративная обработка столбов представляет собой порезку однонаправленными «кувшинчиками».

Храм перекрывает единая гвоздевая кровля из прямообразного теса с шеломом на коньке. Выносы кровли украшены причелинами с многоярусной резьбой. Полицы шатра и звонницы с красным тесом, имеющим концы пикообразной формы.

Предшествующими исследователями часовня датирована следующим образом. Финский архитектор Ларс Петтерссон, познакомившийся с часовней в годы Второй мировой войны, основываясь на росписи икон, относит время строительства храма ко второй половине XVII века [19]. А. В. Ополовников, обследовавший часовню еще до ее перевозки на остров Кижи в 1968 году, не аргументируя, датирует строительство часовни рубежом XVII и XVIII веков [6]. С. В. Куликов и С. В. Воробьев, авторы паспорта памятника, на основании анализа архитектурно-конструктивных особенностей относят часовню ко второй половине XVII века [4].

Анализ документов и визуальный осмотр памятника, проведенные нами, позволили выявить, что первоначально была срублена двухкамерная равноширокая и разновысокая клетская часовня с повышенным молитвенным помещением и более низким притвором (на это указывают следы от куриц безгвоздевой кровли на боковых стенах позднее наращенного по высоте притвора). Подобные решения имели наиболее вероятное распространение со второй половины XVII века до первой половины XVIII века (табл. 1, п. 2.1).

Кафоликон имеет план в виде квадрата, период его наиболее вероятного распространения также относится ко второй половине XVII – первой половине XVIII века (табл. 1, п. 6.1). Молитвенное помещение перекрывало 16-польное «небо», наиболее часто устраивавшееся во второй половине XVII – первой половине XVIII века (табл. 1, п. 17.5.1).

Намеченному периоду строительства часовни не противоречит конструкция крыши со слегами, рубленными в каждую пару самцов, наиболее распространенная в первой половине XVIII века (табл. 1, п. 18.3). Помимо этого, наличие криволинейного повала у стен кафоликона позволяет предположительно датировать храм второй половиной XVII – первой половиной XVIII века (табл. 1, п. 10.2).

Важную роль при определении итоговой датировки играют решения оконных и дверных колод. Окна в кафоликоне имеют косяки с гребнем и заплечиками с внутренней стороны, сопрягающими «в ус» между собой и с подоконным бревном. Период вероятного распространения данного конструктивного приема – вторая половина XVII – первая половина XVIII века (табл. 1, п. 21.4). Первоначальные дверные колоды не сохранились.

Таблица 1

Первый строительный период – строительство храма (составлена с использованием архитектурно-археологической шкалы для датировки часовен и церквей Карелии [13; 223–229])

№ признака	Наименование признаков, имеющих выявленные хронологические ареалы	XVII	XVIII		XIX		XX
		2-я пол.	1-я пол.	2-я пол.	1-я пол.	2-я пол.	1-я пол.
2.1	Двухкамерная разновысотая и равноширокая часовня						
6.1	Кафоликон, близкий к квадрату						
10.2	Стены в кафоликоне с повалами						
10.5	Стены в кафоликоне полностью отесаны со скруглением углов						
11.1	Стены в притворе бесповальных						
17.5.1	Шестнадцатипольные «небеса»						
18.3	Кафоликон со слегами, врубленными в каждую пару самцов						
21.1.4	Окно типа Г/2						

— период наиболее вероятного распространения
 — период вероятного распространения
 — период маловероятного распространения

Таблица 2

Результаты дендрохронологического анализа образцов с кафоликона и притвора

№ керна	Количество годичных слоев	Средняя ширина годичного кольца, см	Первый год	Последний год	Коэффиц. корреляции с локальной шкалой
11	115	0,98	1597	1711	0,60
12	108	1,11	1606	1713	0,55
13	110	1,06	1601	1710	0,72
14	102	1,22	1611	1712	0,68
15	Не использовалась для анализа из-за сильной деформации годичных слоев				
16					

Совокупность указанных датирующих признаков с учетом их весомости позволяет отнести время строительства часовни ко второй половине XVII – первой половине XVIII века (табл. 1).

Для дендрохронологического анализа с бревен кафоликона и притвора были отобраны 6 образцов-кернов (табл. 2). Их обработка и анализ проводились по стандартной методике, достаточно подробно описанной в литературе [14], [17], [20], [21].

При выполнении дендрохронологического анализа неоднократно перестраивавшейся часовни важно было не только найти бревна с сохранившимся лубом, но и исключить из рассмотрения элементы, введенные в постройку при ремонтно-реставрационных работах.

Невозможность отбора поперечных спилов бревен при исследовании памятника не позволила учесть искажения структуры годичных колец за счет сплющенности ствола, различных физических нарушений его первоначального облика. Именно поэтому продатированные образцы-керны имеют разбег по дате рубки. Наиболее вероятный год сооружения сруба («строительная дата»), отраженный в совокупности датировок стволов с сохранившимися внешними кольцами, определяется по самой поздней дате.

Достаточно часто в постройке встречаются бревна, порубочная дата которых значительно отличается от основной выборки образцов. В этом случае деревья, срубленные раньше, чаще всего заимствованы из какой-то более ранней постройки. Элементы из древесины более поздней заготовки расцениваются как привнесенные при ремонтах и перестройках основного сооружения.

Абсолютная датировка образцов проводилась с помощью локальной шкалы для сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), разработанной специально для прибрежной зоны Онежского озера ($61^{\circ}30' - 62^{\circ}30' N$, $33^{\circ} - 34^{\circ} E$) и охватывающей временной интервал 1550–2000 годы [18].

Достаточно высокие коэффициенты корреляции позволяют достоверно определить время рубки древесины для молитвенного помещения и притвора: 1713 ± 2 года (см. табл. 2). Эти данные в совокупности с приведенным выше анализом конструктивных признаков позволяют окончательно датировать храм 1710-ми годами.

Через некоторое время после возведения храм реконструировали – к основному срубу пристроили колокольню с двухъярусным основанием в виде восьмерика на четверике, полностью рубленным «в обло». Пристойка колокольни датирована только в одном из предшествующих исследований: авторы паспорта памятника относят эту реконструкцию к XVIII веку [4].

Проведенная реконструкция ориентировалась на традиционные образцы трехчастных (изначально или достроенных) равновысотых культовых построек с общим двускатным покрытием и надстроенной над сенями колокольней с одинарными столбами яруса звона. Оба приема получили наиболее вероятное распространение во второй половине XIX века, но первый из них был вероятен и во второй половине XVIII – первой половине XIX века (табл. 3, п. 3.2, 5.3). Однако такому предположению о времени реконструкции противоречат особенности трехстенной пристройки сеней, которая служит четвериком колокольни. Сени, судя

Таблица 3

Второй строительный период – пристройка колокольни (составлена с использованием архитектурно-археологической шкалы для датировки часовен и церквей Карелии [13; 223–229])

№ признака	Наименование признаков, имеющих выявленные хронологические ареалы	XVII	XVIII		XIX		XX
		2-я пол.	1-я пол.	2-я пол.	1-я пол.	2-я пол.	1-я пол.
3.2	Равновысокая и равноширокая трехкамерная часовня						
5.3	Одинарные угловые столбы яруса звона						
8.2	Крыльцо на срубе						
12.1	Колокольня рублена «в обло»						
12.3	Стены колокольни с повалами						
12.5	Стены колокольни не отесаны						
20.1.6	Дверь типа Д/1						
21.1.7	Окно типа Д/2						

— период наиболее вероятного распространения
— период вероятного распространения
— период маловероятного распространения

Таблица 4

Результаты дендрохронологического анализа образцов с бревен сеней и восьмерика

№ керна	Количество годичных слоев	Средняя ширина годичного кольца, см	Первый год	Последний год	Коэффициент корреляции с локальной шкалой
Сени					
6	139	0,72	1610	1748	0,71
7	82	1,24	1633	1714	0,51
8	56	2,68	1687	1742	0,72
9	233	0,56	1476	1708	0,49
10	64	1,25	1675	1738	0,69
Восьмерик					
4	146	0,79	1615	1760	0,65
4а	135	0,81	1626	1760	0,71
4б	126	0,85	1633	1758	0,69
(1-3)*	77	1,19	1634	1710	0,59

* Среднее значение для 3 образцов с зарубками.

по южным входным дверям и окну, с наибольшей вероятностью можно датировать второй половиной XVIII – первой половиной XIX века (табл. 3, п. 20.1.6, 21.1.7). Трехвенцовый криволинейный повал восьмерика также позволяет с наибольшей вероятностью отнести колокольню ко второй половине XVIII – первой половине XIX века, но в третьей четверти XIX века такой повал тоже был вполне вероятен (табл. 3, п. 12.3).

Анализ конструктивных признаков по архитектурно-археологической шкале дает возможность датировать реконструкцию храма в широких временных пределах – со второй половины XVIII века до второй половины XIX века включительно.

Этот период можно сузить до второй половины XVIII – первой половины XIX века, если исключить из анализа явно выпадающее из намечающегося хронологического интервала время наиболее вероятного распространения одинарных

столбов яруса звона колокольни (вторая половина XIX – начало XX века). Действительно, такие столбы могли появиться и в результате реконструкции 1910 года, когда, по данным Ларса Петтерссона, часовню изнутри и снаружи обшили тесом, заменили шатер на звоннице, главкам на шатре и над кафоликоном придали новую форму [19; 64]. Возможно, тогда же в пределах интерьера была выпилена стена между кафоликоном и притвором, в результате чего между помещениями образовался новый широкий арочный проем. Точно ответить на этот вопрос не представляется возможным, так как, к сожалению, при последних реставрационных работах элементы были заменены полностью и для выполнения дендрохронологического анализа не было материала.

Возвращаясь к определению времени пристройки сеней и колокольни, отметим, что весомость датирующих признаков в пределах второй половины XVIII – первой половины XIX века с небольшим преимуществом дает возможность отнести рассматриваемую реконструкцию ко второй половине XVIII века. Для дендрохронологического анализа с целью уточнения этой датировки были отобраны 5 образцов с элементов сеней и 6 образцов с элементов восьмерика (табл. 4).

Исходя из полученных результатов, древесина для сеней заготовлена не позднее 1748 ± 2 года. Керны № 7 и 9 выпадают из общей картины датировки конструкций сеней. В отличие от остальных образцов, с достаточной степенью достоверности датируемых серединой XVIII века, они, по всей вероятности, были вторично использованы в постройке, о чем свидетельствуют следы многочисленных врубок на 5-м бревне под дверью, с которого был отобран керн № 9, и значительная степень эрозии нижнего венца южной стены (керн № 7).

Образцы № 1–3, отобранные с элементов восьмерика с однотипными маркировочными метками (зарубками), характеризовались малым

количеством годичных колец, поэтому для более достоверного анализа они были объединены в плавающую хронологию, усредненные данные для которой приведены в табл. 4. Образцы датируются началом XVIII века, что указывает на вторичное использование материала из другой постройки.

Керны, отобранные с элементов восьмерика без меток на восточной и северо-восточной панелях (№ 4, 4а, 4б), качественно отличаются от остальных: их древесина более зрелая (количество годичных колец – более 100) и узкослойная. Образцы с достаточно высокой достоверностью датируются 1760 годом, поэтому с высокой степенью вероятности за дату возведения восьмерика можно принять 1760 ± 2 года.

Наиболее вероятно, что пристройка трехстенных сеней выполнена в середине XVIII века, а устройство колокольни – в третьей четверти XVIII века. Хотя возможно и другое предположение, согласно которому устройство сеней и колокольни произведено единовременно в третьей четверти XVIII века, при этом использовалась вторичная древесина с двух различных построек (одна из которых была срублена в середине XVIII века, а другая – в начале XVIII века). Использование вторичной древесины начала XVIII века на восьмерике колокольни не вызывает сомнений, а о возможном использовании бывших в употреблении бревен середины XVIII века для трехстенка сеней говорят продольный паз в нижнем бревне южной стены сеней и следы на фронтоне восточной стены трехстенка, свидетельствующие о первоначальном применении бревен в другой конструкции.

Обобщая все вышесказанное, можно сделать следующий вывод. Наиболее вероятно, что часовня Спаса Нерукотворного в своей истории имела два главных строительных периода. Это возведение двухкамерного храма в 1710-х годах и пристройка колокольни в 1740–80-х годах. Вопрос о разновременности или одновременности пристройки сеней и надстройки над ними колокольни, как мы показали, пока остается открытым.

В результате проведенного исследования удалось существенно уточнить называемые ранее датировки возведения храма и его реконструкции. При этом часовня была несколько омоложена: вся история ее формирования проходила в XVIII веке. Вместе с тем часовню можно отнести к постройкам, на которых проходила отработка блокировки безалтарного храма с колокольней – нового для народного зодчества приема, наиболее вероятный период распространения которого относится к более позднему времени – к XIX веку [13; 223]. Примечательно, что в нашем случае такой ранний пример новаторства зафиксирован в деревне Вигово, в зоне влияния Кижского погоста.

Следует также отметить, что проведенный дендрохронологический анализ древесины часовни подтвердил корректность разработанной ранее архитектурно-археологической шкалы в части использованных при предварительном датировании храма признаков.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность музею-заповеднику «Кижи» за финансовую поддержку данного научного исследования.

ИСТОЧНИКИ

1. Научный архив музея-заповедника «Кижи». Арх. № 3110. Часовня Спаса Нерукотворного из деревни Вигово. Обследования и реставрационные предложения. Петрозаводск: ЗАО «ЛАД», 1998.
2. Фотоматериалы из фондов музея-заповедника «Кижи». Арх. № 98. Часовня Спаса Нерукотворного из деревни Вигово. 1968–69 гг.
3. Фотоматериалы из фондов музея-заповедника «Кижи». Арх. № 13867–55. Часовня Спаса Нерукотворного из деревни Вигово.
4. Архив Республиканского центра по государственной охране объектов культурного наследия МР РК. Часовня Спаса Нерукотворного из деревни Вигово. Паспорт № 1103 от 2.07.1988. Составители С. В. Куликов, С. В. Воробьева.
5. Архив ЗАО «ЛАД». Обмерные чертежи часовни из д. Вигово. Фотофиксация. Автор А. В. Ополовников. М., 1968.
6. Архив ЗАО «ЛАД». Пояснительная записка к проекту реставрации часовни из д. Вигово. Автор А. В. Ополовников. М., 1968.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

7. Вахрамеев Е. В. Эволюция архитектурных форм часовни Михаила Архангела // Архитектурное наследие и реставрация: Сб. науч. тр. М., 1986. С. 218–230.
8. Кутькова Г. А. Культовые постройки деревни Вороний Остров в Заонежье // Народное зодчество: Межвуз. сб. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1998. С. 159–165.
9. Орлов А. В. Типологические исследования часовен: Кенозерье и Заонежье // Кенозерские чтения: Материалы науч.-практ. конф. Архангельск, 2010 (в печати).
10. Орфинский В. П. Деревянное зодчество Карелии (Генезис, эволюция, национальные особенности): Дисс. ... д-ра архитектуры. Т. I. М., 1975.
11. Орфинский В. П. Народное храмостроительство // История и культура Сямозерья: Сб. науч. тр. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. С. 377–418.
12. Орфинский В. П., Яскеляйнен А. Т. Хронологическая атрибуция сооружений деревянного культового зодчества Карелии // Народное зодчество: Межвуз. сб. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1999. С. 147–160.
13. Орфинский В. П., Яскеляйнен А. Т. Хронологическая атрибуция сооружений народного деревянного культового зодчества // Орфинский В. П., Гришина И. Е. Типология деревянного культового зодчества Русского Севера. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2004. С. 220–230.

14. Шиятов С. Г., Ваганов Е. А., Кирдянов А. В. и др. Методы дендрохронологии. Ч. 1. Красноярск: Издательский центр КГУ, 2000. 82 с.
15. Яскеляйнен А. Т. К вопросу датировке и эволюции часовни Петра и Павла на Волкострове // Проблемы исследования, реставрации и использования архитектурного наследия Российского Севера: Межвуз. сб. Петрозаводск, 1991. С. 124–131.
16. Яскеляйнен А. Т. Оптимизация хронологической атрибуции сооружений деревянного зодчества: Автореф. дисс. ... канд. архитектуры. Петрозаводск, 1998.
17. Fritts H. C. Tree-rings and climate. London; N. Y.; San Francisco: Acad. Press, 1976. 567 p.
18. Kozlov V., Kisternaya M. Architectural wooden monuments as a source of information for past environmental changes in North Russia // Paleogeography, paleoclimatology, paleoecology. 2004. № 209. P. 103–111.
19. Pettersson L. Äänisniemen kirkollinen puuarkkitehtuuri. Helsinki, 1950.
20. Pilcher J. R. Sample preparation, cross-dating and measurement // Methods of dendrochronology. Application in the Environmental Sciences / Eds. E. R. Cook, L. A. Kairiukstis. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. P. 40–51.
21. Thun T. Dendrochronology and building construction // Dendrochronology and the Investigation of Buildings: Proc. of Int. Seminar at the Academy of Science and Letters, Oslo, 1st-2nd November 1991 / Eds. O. Storsletten, T. Thun. Riksantikvaren rep. № 22. Oslo, 1993. P. 49–51.

ВАДИМ МИХАЙЛОВИЧ КОСТЮКЕВИЧ

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет
vadkos@psu.karelia.ru

ВЕНИАМИН НИКОЛАЕВИЧ ШИЛОВСКИЙ

доктор технических наук, профессор кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет
tmir@psu.karelia.ru

ОЦЕНКА ОПТИМАЛЬНОГО УРОВНЯ СЕРВИСА ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В статье предлагается алгоритм оценки оптимального уровня запасных частей на складе компании, снабжающей лесозаготовительные предприятия запасными частями. Рассмотрен конкретный пример расчета в среде MathCAD. Обосновывается практическая значимость предложенного алгоритма.

Ключевые слова: снабжение, запасы, сервис, запасные части

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Эффективность работы лесозаготовительных предприятий напрямую зависит от своевременности технического обслуживания лесозаготовительной и лесотранспортной техники и оперативности выполнения ремонтно-восстановительных работ [3]. Очевидно, что время ремонтных работ и работ по техническому обслуживанию будет минимальным, если на складе компании, занимающейся снабжением лесозаготовительных предприятий, будет постоянно находиться весь возможный ассортимент запасных частей (100 % уровень сервиса). Но 100 % покрытие спроса ведет к дополнительным расходам компании на содержание и обслуживание запасных частей, часть которых, вполне возможно, вообще не будет вос требована. Из такой постановки вопроса вытекает задача разработки алгоритма определения оптимального уровня запасов запасных частей на складе компании.

Сначала рассмотрим задачу определения оптимального уровня сервиса для компании – поставщика запасных частей лесозаготовительным предприятиям. Требуется отметить, что если снабжением запасными частями лесозаготовительного предприятия занимается одно из его подразделений, то в этом случае при определении оптимального уровня запасных частей на складе лесозаготовительного предприятия необходимо уже рассматривать логистическую систему, состоящую как минимум из двух взаимодействующих элементов: лесозаготовка – снабжение запасными частями, имеющими разные интересы. Лесозаготовители заинтересованы в наличии максимальных запасов на складе с целью уменьшения времени простоя на выполнение ремонтных и обслуживающих работ. Склад же заинтересован в минимизации

запасов для уменьшения расходов на содержание и обслуживание запасных частей [1]. При определении оптимального уровня запасных частей для лесозаготовительного предприятия необходимо учитывать потери от простоев лесозаготовительной и лесотранспортной техники в связи с отсутствием запасных частей на складе.

ОБЩИЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ

Для решения поставленной задачи необходимо иметь данные по затратам на содержание и обслуживание запасных частей. Требуется знать стоимость среднего складского остатка («замороженные» деньги), затраты на складские работы и содержание склада. За критерий эффективности работы компании поставщика целесообразно принять ее прибыль за рассматриваемый промежуток времени.

Расчет необходимого уровня запасов, обеспечивающих снабжающей компании максимальную прибыль от реализации запасных частей, в нашем случае будет опираться на статистические данные по спросу на запасные части для лесной техники за прошлый период времени с учетом ввода некоторых корректирующих данных на прогнозный период времени (уравнение регрессии), если требуется.

Таким образом, первый этап – это сбор и обработка статистических данных по спросу за определенный промежуток времени с получением на выходе законов распределений спроса на определенный ассортимент запасных частей, пользующихся устойчивым спросом (правило 80/20). На втором этапе с использованием метода статистического моделирования производится реализация динамики спроса для заданного промежутка времени. На третьем этапе для раз

личных уровней запасов рассчитывается прибыль и выбирается оптимальный для снабжающей компании уровень сервиса.

ПРИМЕР

Рассмотрим пример оценки оптимального уровня сервиса для компании, занимающейся снабжением лесозаготовительных предприятий запасными частями лесных машин. Алгоритм решения задачи покажем для одной позиции запасных частей, так как для других позиций он аналогичен.

Снабжающая компания раз в неделю обновляет ассортимент запасных частей, находящихся на своем складе. Примем рассматриваемый период за один год. Данные по спросу за указанный промежуток времени с разбиением по неделям для рассматриваемой позиции запасных частей известны и сведены в табл. 1.

В первом приближении сезонные колебания спроса не учитываются. Данная коррекция может быть проведена на втором уточненном этапе расчетов, что позволит отследить динамику спроса по сезонам.

Как видно из табл. 1, недельный спрос по выбранной позиции запасных частей имеет значительное рассеивание от 98 до 258 единиц.

1. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ

1.1. Расчет числовых характеристик интервального вариационного ряда

Предварительная обработка опытных данных заключается в построении интервального вариационного ряда. Количество интервалов определяется по формуле [2]

$$Z = 1 + 3,2 \cdot \lg N, \quad (1.1)$$

где Z – количество интервалов вариационного ряда, N – объем выборки.

Количество интервалов округляется до ближайшего большего целого.

По формуле (1.1) $Z = 1 + 3,2 \cdot \lg 52 = 6,491$. Принимаем количество интервалов $Z = 7$.

Ширина интервала определяется по формуле

$$R = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{Z}, \quad (1.2)$$

где R – ширина интервала, L_{\max} – варианта с максимальным значением, L_{\min} – варианта с минимальным значением.

Ширина интервала округляется до ближайшего большего целого.

В соответствии с формулой (1.2) при $L_{\max} = 258$ шт. и $L_{\min} = 98$ шт. имеем

$$R = \frac{258 - 98}{7} = 22,857.$$

Принимаем ширину интервала $R = 23$.

Определим нижнюю, верхнюю границы и середину первого интервала по формулам:

$$L_{1H} = \frac{L_{\max} + L_{\min} - Z \cdot R}{2}; \quad (1.3)$$

$$L_{1B} = L_{1H} + R; \quad (1.4)$$

$$L_1 = L_{1H} + \frac{R}{2}. \quad (1.5)$$

В соответствии с выражениями (1.3), (1.4) и (1.5) определяем

$$L_{1H} = \frac{258 + 98 - 7 \cdot 23}{2} = 97,5;$$

$$L_{1B} = 97,5 + 23 = 120,5;$$

$$L_1 = 97,5 + \frac{23}{2} = 109.$$

Затем определяются соответствующие величины каждого последующего интервала по формуле

$$L_i = L_1 + (i-1) \cdot R. \quad (1.6)$$

В формуле (1.6) и далее i принимает значения от 1 до Z ($i = 1, 2, 3, \dots, Z$).

По формуле (1.6) рассчитываем верхнюю, нижнюю границы и середину всех интервалов. Значения середины интервалов заносим в первую графу табл. 2 распределов характеристик вариационного ряда. Определяем опытные частоты интервалов m_i и заносим их во вторую графу табл. 2.

Таблица 1

Динамика спроса на запасные части												
188	185	242	234	239	219	178	229	205	120	210	186	154
193	141	179	216	214	243	229	168	163	235	209	181	159
180	254	124	209	235	104	129	160	98	205	210	191	230
125	200	159	200	221	212	180	176	156	137	152	209	146

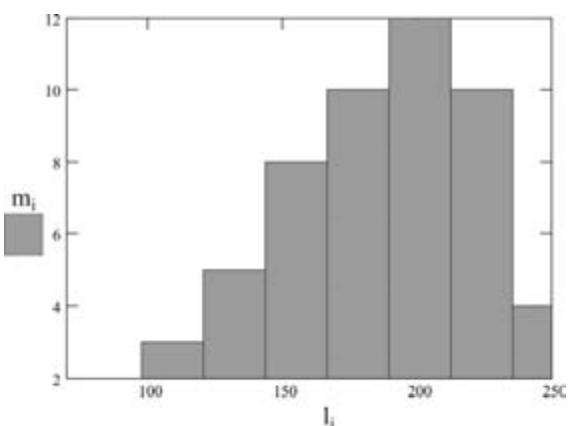


Рис. 1. Эмпирический закон распределения спроса

По полученным данным строим эмпирический закон распределения спроса на определенную группу запасных частей в виде гистограммы (рис. 1).

По графическому изображению данных о спросе можно выдвинуть гипотезу о принадлежности этих данных к закону распределения Вейбулла.

1.2. Проверка правдоподобия гипотезы о принадлежности опытных данных к распределению Вейбулла

При проверке правдоподобия гипотезы о принадлежности опытных данных к распределению Вейбулла теоретическая частота интервала определяется по формуле

$$\hat{m}_i = \frac{N \cdot R}{a} \cdot a \cdot f(L_i), \quad (1.7)$$

где a – параметр масштаба, $f(L_i)$ – плотность распределения Вейбулла, соответствующая наработке L_i .

Оценка параметра масштаба a определяется по выражению

$$a = \frac{L_{cp,B}}{K_v}, \quad (1.8)$$

где K_v – коэффициент распределения Вейбулла, $L_{cp,B}$ – взвешенная средняя арифметическая (точечная взвешенная оценка математического ожидания).

$$L_{cp,B} = \frac{1}{N} \cdot \sum L_i \cdot m_i,$$

где L_i – середина i -го интервала, $L_{cp,B} = 185.519$.

Плотность распределения Вейбулла рассчитывается по формуле

$$f(L_i) = \frac{b}{a} \cdot \left(\frac{L_i}{a}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{L_i}{a}\right)^b}, \quad (1.9)$$

где b – параметр формы распределения Вейбулла.

Коэффициент распределения K_v и параметр формы b выбираются по табл. 3 [2] в зависимости от значения оценки коэффициента вариации.

$$V = \frac{\sigma}{L_{cp}}; \quad \sigma = \sqrt{D};$$

$$D = \frac{1}{N-1} \cdot \sum L_i^2 \cdot m_i - L_{cp}^2,$$

где L_i – текущее значение спроса на запасные части, L_{cp} – среднее значение спроса за неделю.

После вычислений имеем:

$$D = 2100; \quad \sigma = 45.831; \quad V = 0.247; \\ K_v = 0.906; \quad b = 4.$$

По формуле (1.26) определяем оценку параметра масштаба. Получаем

$$a = \frac{185,519}{0,906} = 204,767.$$

Промежуточные расчетные данные, необходимые для определения опытного значения критерия ХИ-квадрат при распределении Вейбулла, сведены в табл. 3. Параметр формы $b = 4$.

На рис. 2 показаны эмпирические частоты m_i спроса и теоретическая кривая $f(l)$ распределения Вейбулла.

Таблица 2
Характеристики интервального вариационного ряда

L_i	$L_{1H} - L_{1B}$	m_i
109	97,5–120,5	3
132	120,5–143,5	5
155	143,5–166,5	8
178	166,5–189,5	10
201	189,5–212,5	12
224	212,5–235,5	10
247	235,5–258,5	4
Σ		52

Таблица 3
Расчет опытного значения критерия ХИ-квадрат при распределении Вейбулла

L_i	m_i	$\hat{m}_i = N \cdot R \cdot f(L_i)$	$\frac{(m_i - \hat{m}_i)^2}{\hat{m}_i}$
103	3	3,959	0,232
131	5	6,411	0,31
159	8	8,884	0,088
187	10	10,555	0,029
215	12	10,631	0,176
243	10	8,892	0,138
271	4	6,009	0,072

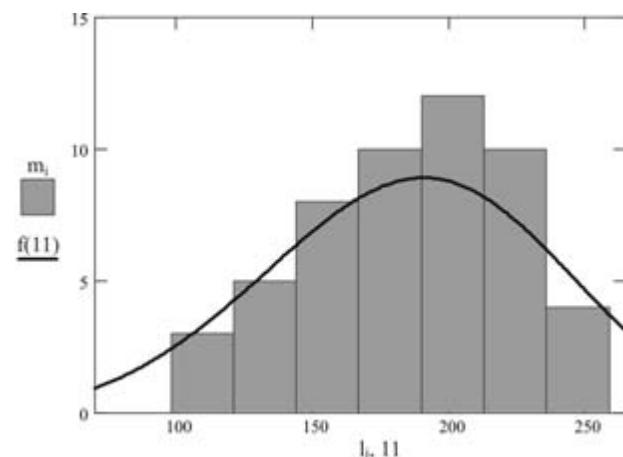


Рис. 2. Проверка правдоподобия гипотезы о принадлежности опытных данных спроса к распределению Вейбулла

Плотность распределения Вейбулла рассчитывалась по формуле (1.9). Промежуточные расчетные величины внесены в графы 3, 4 и 5. Суммируя значения графы 4, получаем $\chi^2 = 1,646$.

Для выбора табличного значения критерия ХИ-квадрат назначаем уровень значимости $a = 0,2$ и определяем число степеней свободы K . Количество наложенных связей $S = 2 + 1 = 3$. Тогда имеем $K = 7 - 3 = 4$.

По табл. 1 [1], при уровне значимости $a = 0,2$ и числе степеней свободы $K = 4$ выбираем $\chi^2_T = 5,9$. Имея $\chi^2_T > \chi^2$ ($5,9 > 1,646$), делаем заключение, что гипотеза о принадлежности количества заявок к закону Вейбулла правдоподобна.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

На основании имеющихся данных по спросу за отчетный период устанавливаем следующие граничные уровни сервиса: 100 % ($N_{100\%}$) – количество запасных частей равно максимальному значению спроса за наблюдаемый период – 258, 50 % ($N_{50\%}$) – количество запасных частей равно средневзвешенному значению спроса – 186.

При моделировании рассмотрим все промежуточные значения уровня сервиса и выберем оптимальный.

2.1. Алгоритм

Задаемся определенным уровнем сервиса S . Например, $S_{80\%}$ означает, что к началу первой недели на складе находится

$$N_{80\%} = N_{100\%} - 2 \cdot \frac{(N_{100\%} - N_{50\%})}{5}$$

запасных частей.

Такой уровень сервиса мы будем поддерживать на протяжении всего текущего года. Это означает, что к началу каждой следующей недели на складе находится

$$N_{80\%} = 258 - \frac{(258 - 186) \cdot 2}{5} = 229 \text{ запасных частей.}$$

Далее с использованием имитационного моделирования разыгрывается случайно распределенная по закону Вейбулла величина спроса за определенный промежуток времени (в нашем случае он равен неделе). Если эта величина спроса превышает количество запасных частей на складе, считаем, что часть потребителей обращается к другому поставщику, и для себя констатируем упущенную прибыль. Если предложение превышает спрос, то мы несем издержки на хранение невостребованных запасных частей.

2.2. Реализация модели

В ППП MathCAD моделируем случайную величину спроса на начало каждой недели, распределенную по закону Вейбулла с найденными параметрами.

$$Nw = rweibull(m, b) \cdot L_{cp.B},$$

где m – числовой вектор количества случайных значений вектора Nw . В рассматриваемом случае $m = 52$.

Если величина спроса Nw меньше количества запасных частей, находящихся в это время на складе $N_{80\%}$, то для компании мы считаем прибыль $p \cdot Nw$ от реализации Nw запасных частей, где p – норма дохода. Фиксируем затраты на хранение и обслуживание $k = N_{80\%} - Nw$ оставшихся на складе запасных частей в течение расчетной недели. Полученный результат запоминаем и переходим к рассмотрению следующей недели.

Для реализации числовых значений зададимся:

- стоимостью запасной части $S = 1000$ руб.,
- нормой дохода от продаж (в долях единицы от стоимости запасной части) $p = 0,035$,
- расходами на хранение и обслуживание (в долях единицы от стоимости запасной части) $k = 0,01$.

Например, в первую неделю величина спроса Nw равна 220 единицам. Доход от продажи 220 единиц запасных частей составит

$$D = Nw \cdot S \cdot p = 220 \cdot 1000 \cdot 0,035 = 7700p.$$

Затраты на хранение невостребованных 9 единиц запасных частей в течение расчетного периода

$$Zt = (N_{80\%} - Nw) \cdot S \cdot k = (229 - 220) \cdot 1000 \cdot 0,01 = 90p.$$

Таким образом, прибыль компании за расчетный период можно оценить $Pr = D - Zt = 7700 - 90 = 7610p$.

К началу следующей недели компания пополнила уровень количества запасных частей до расчетного значения $N_{80\%}$. Далее снова моделируем величину спроса. Допустим, в этом случае величина спроса Nw больше количества запасных частей, находящихся в это время на складе $N_{80\%}$. В данном случае прибыль компании будет равна $p \cdot Nw$. Суммируем прибыль с прибылью предыдущего периода и перейдем к рассмотрению следующего расчетного периода.

Таким образом, используя имитационное моделирование, рассматриваем работу компании в течение года с разбиением на 52 расчетных периода, фиксируя на каждом этапе прибыль от продажи n -го количества запасных частей и затраты на хранение k -го количества запасных частей. Данный алгоритм достаточно просто может быть реализован в MathCAD, используя программирование

$$Nw := rweibull(52, b) \cdot lsrg \quad N8 := 229$$

```
N5(n) := | Ch <- 0
           | Ch1 <- 0
           | for j <- 0..n
           |   | Ch <- Nw_j * S * p1 - (N8 - Nw_j) * S * p2 + Ch if N8 > Nw_j
           |   | Ch1 <- N8 * S * p1 + Ch1 otherwise
           |   | Ch <- Ch + Ch1
```

$$N5(51) = 2.914 \times 10^5.$$

Представленный выше расчет выполнен для 80 % уровня сервиса. Аналогичные расчеты можно провести для любого уровня сервиса и выбрать оптимальный уровень сервиса, обеспечивающий максимальную прибыль компании. В нашем случае подобные расчеты реализованы в MathCAD для всех возможных значений количества запасных частей на складе – от 100 до 258 единиц с шагом 1 единица, что соответствует уровню сервиса от 30 до 100 %.

$$k := 0..158 \quad N8_k := 100 + k \quad M_{j,k} := N8_k - N_j$$

```
N6(n,k) := | Ch <= 0
             | Ch1 <= 0
             | for j <= 0..n
               |   Ch <- N_j · S · p1 - M_{j,k} · S · p2 + Ch if N8_k > N_j
               |   Ch1 <- N8_k · S · p1 + Ch1 otherwise
             | Ch <- Ch + Ch1
             | Ch
```

Рис. 3 иллюстрирует результаты расчета для различных значений уровня сервиса суммарного дохода предприятия от продаж запасных частей, затрат на хранение невостребованных запасных частей и прибыли, определяемой как разница между доходом от продаж и затратами на хранение.

Как видно из рис. 3 и данных расчета, максимальная прибыль для заданных начальных условий имеет место при величине еженедельного запаса в 214 единиц запасных частей, что соответствует 70 % уровню обслуживания.

ПРЕДПОЛАГАЕМЫЙ РЕЗУЛЬТАТ

С помощью предложенного алгоритма для любой номенклатуры запасных частей можно

определить оптимальный уровень сервиса, обеспечивающий наилучшее соотношение между спросом и количеством запасных частей на складе. При использовании данной методики оценки необходимого количества запасных частей на складе более эффективной становится работа компании с точки зрения использования складских площадей, управления оборотными средствами; уменьшается вероятность образования неликвидных запасов. Как уже говорилось, данную методику целесообразно использовать для обоснования количества запасных частей на складе по ключевым позициям, имеющим стабильный спрос. При условии учета спроса за предыдущие промежутки времени процесс оценки количества запасных частей на складе может быть легко автоматизирован и не потребует практически никаких затрат при внедрении.

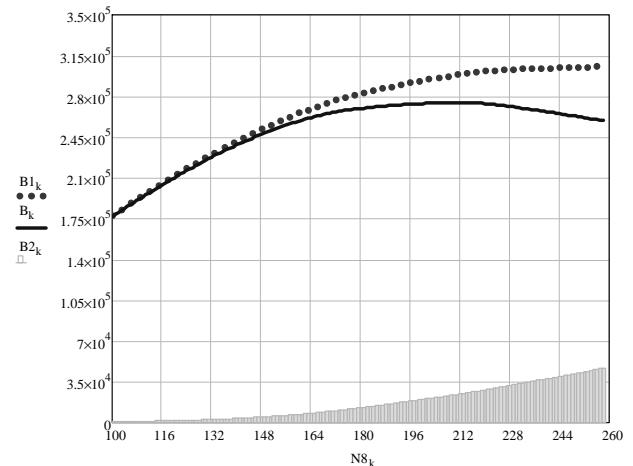


Рис. 3. Графики суммарного дохода от продаж B_{1k} , прибыли B_k , затрат на хранение B_{2k}

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Герасимов Ю. Ю., Костюкевич В. М. Логистика в лесном комплексе: управление снабжением, транспортом и запасами: Учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2001. 108 с.
- Питухин А. В., Шиловский В. Н., Серебрянский Н. И. Применение вероятностно-статистических методов для решения задач по надежности и ремонту машин и оборудования: Учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1999. 148 с.
- 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.

ФЕЛИКС ВЛАДИМИРОВИЧ ПОШАРНИКОВ

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и оборудования лесопромышленного производства лесоинженерного факультета, Воронежская государственная лесотехническая академия

tolp@vglta.vrn.ru

АЛЕКСЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ УСИКОВ

аспирант кафедры технологии и оборудования лесопромышленного производства лесоинженерного факультета, Воронежская государственная лесотехническая академия

leschik36@mail.ru

СНИЖЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ В ПОДШИПНИКАХ СКОЛЬЖЕНИЯ С ПОЛИМЕРНЫМИ АНТИФРИКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

В статье рассматривается подшипник скольжения с обратной парой трения, где в качестве антифрикционного материала используется полимер с металлическими включениями.

Ключевые слова: композиционный материал, полимер, подшипник скольжения, поверхность трения, температура, теплопроводность

Невращающиеся втулки из полимерных материалов в условиях сухого и граничного трения быстро теряют свою работоспособность вследствие локализации напряжений, температуры и износа на небольшой части их поверхности трения.

Поиск различных способов улучшения работы металлополимерных пар привел к созданию принципиально новых видов трущихся сопряжений – «обратных пар» трения. В такой паре трения подшипник скольжения жестко закреплен на валу по своей внутренней поверхности, а его внешняя поверхность участвует в работе трения по опорной поверхности корпуса. В этом случае температура по всей внешней поверхности подшипника будет одинакова, так как она вся участвует в трении. При таком виде трения получаем осесимметричное температурное поле относительно оси вращения [6].

При рассмотрении конструкций узлов трения лесообрабатывающего оборудования было выявлено, что при использовании полимерного антифрикционного материала в обратной паре трения затрудняется отвод тепла с поверхности корпуса подшипника и поэтому потребуется искусственная вентиляция или отвод тепла через вал. Применение полимерной композиции с металлическим наполнителем позволит снизить температурное напряжение полимерной втулки в зоне трения [5].

Проанализируем стационарное плоское температурное поле подшипника скольжения из композиционного материала на основе полимера при внешнем радиусе цилиндрической стенки r_2 и внутреннем r_1 , с температурой поверхностей t_{II} и t_I соответственно. Принимаем, что для каждого заданного r_X температура цилиндрической стенки не зависит от координаты z вдоль оси и угла ϕ и является функцией только радиуса стенки r_X .

Рассмотрим конструкцию подшипника скольжения, когда антифрикционная втулка жестко закреплена на валу, а зона скольжения осуществляется между внешним диаметром втулки и корпусом подшипника (рис. 1). Из рисунка видно, что исследуемый антифрикционный материал на основе пластика с металлическим наполнителем длиной l ограничен снаружи цилиндрической поверхностью диаметром $d_2 = 2r_2$, а внутри – цилиндрической поверхностью вала диаметром $d_1 = 2r_1$ [2].

Для того чтобы определить температуру произвольно выбранной точки антифрикционного полимерного материала, определим ее как функцию расстояния $r_X = d_X / 2$ от оси цилиндра. В качестве антифрикционного материала используется полимерный материал на основе полиамида с металлическим наполнителем в виде мелкой стружки низкоуглеродистой стали (Ст.0), которая обрабатывается магнитным полем в момент изготовления втулки для улучшения теплопроводности. Толщина стенки композиционной втулки составляет 3...5 мм. Коэффициент теплопроводности λ_2 Вт/(м °C) полимерного материала с металлическим наполнителем рассчитывается в зависимости от объема металлического наполнителя и с учетом того, что теплоотдаче с торцов втулки можно пренебречь.

Зависимость теплопроводности полимерного вкладыша от степени наполнения металлической стружкой определяется по формуле для двухфазной системы [1], [4]:

$$\lambda_2 = \lambda_a + \frac{q_e}{\frac{1 - q_e}{3} + \frac{\lambda_a}{\lambda_e - \lambda_a}}, \quad (1)$$

где q_a и λ_a – объемная доля непрерывной фазы и обобщенная теплопроводность компонента А (полимера); q_b и λ_b – объемная доля компонента В (наполнителя) и его теплопроводность.

Теплопроводность стали $\lambda_s = 40 \dots 50 \text{ Вт}/(\text{м} \text{ }^\circ\text{C})$, а теплопроводность полимера находится в пределах $\lambda_a = 0,29 \text{ Вт}/(\text{м} \text{ }^\circ\text{C})$. Принимая во внимание, что содержание металлического наполнителя не превышает 20 %, теплопроводность композиционного материала составит $\lambda_2 = 0,4 \dots 0,7 \text{ Вт}/(\text{м} \text{ }^\circ\text{C})$.

Для получения уравнения температурного поля в цилиндрической стенке воспользуемся уравнением Фурье, представленным в цилиндрических координатах [7]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

где α – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; t – температура, $^\circ\text{C}$; τ – время, с ; r , φ , z – координаты рассматриваемой точки по радиусу r , углу φ и вдоль оси z .

Так как рассматриваемый процесс является стационарным, а $t = f(r)$, производные t по τ , φ и z в уравнении (2) будут равны нулю. Учитывая, что t является функцией только r , вместо уравнения в частных производных (2) будем иметь обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dt}{dr} = 0. \quad (3)$$

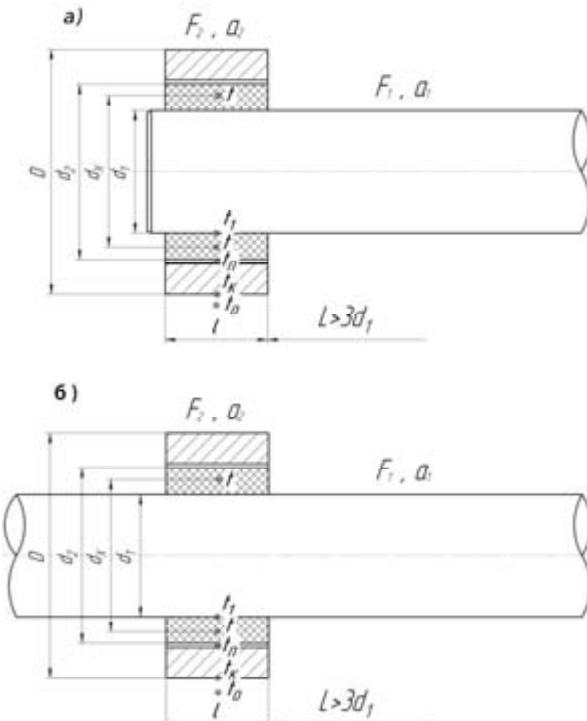


Рис. 1. Схема подшипникового узла (обратная пара): а – концевой подшипник; б – срединный подшипник

Введем дополнительное обозначение

$$\frac{dt}{dr} = U .$$

Тогда получим:

$$\frac{dU}{dr} + \frac{1}{r} U = 0 . \quad (4)$$

После разделения переменных и интегрирования получим:

$$\ln U + \ln r = \ln C_1 \text{ или } Ur = C_1 . \quad (5)$$

Подставляя в равенство введенную ранее замену U , получим:

$$\frac{dt}{dr} r = C_1 ; \text{ откуда } dt = C_1 \frac{dr}{r} . \quad (6)$$

После интегрирования имеем:

$$t = C_1 \ln r + C_2 . \quad (7)$$

Для дальнейшего решения введем относительную координату $p = r/r_2$ в уравнение (7) и получим:

$$t = C_1 \ln p + C_2 . \quad (8)$$

Для определения произвольных постоянных C_1 и C_2 воспользуемся граничными условиями первого рода, то есть когда на поверхностях цилиндра заданы температуры:

$$\begin{aligned} \text{при } p = p_1: tr &= r_1 \left(p_1 = \frac{r_1}{r_2} \right); \\ \text{при } p = 1: tr &= r_2 \left(p_2 = \frac{r_2}{r_2} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

На основании условий (9) и решения (8) получим:

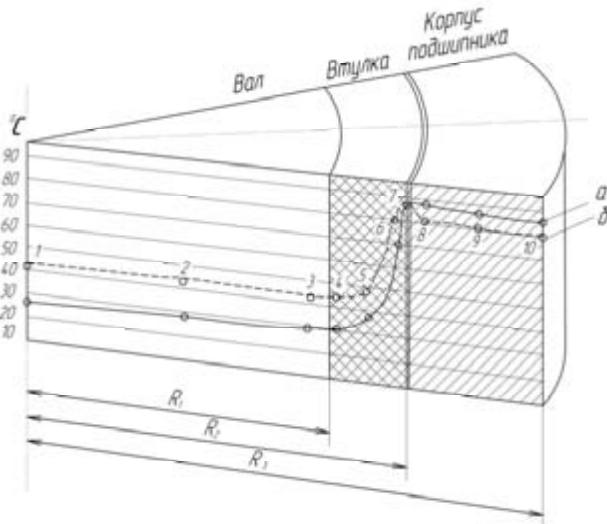
$$t_{II} = C_1 \ln 1 + C_2 ; \text{ откуда } C_2 = t_{II} ; \quad (10)$$

$$t_1 = C_1 \ln p_1 + C_2 \text{ или } t_1 = C_1 \ln p_1 + t_{II} . \quad (11)$$

Из последнего равенства (11) определим C_1 :

$$C_1 = \frac{t_1 - t_{II}}{\ln p_1} . \quad (12)$$

После подстановки значений C_1 (12) и C_2 (10) в уравнение (8) получим следующее выражение для плоского осесимметричного температурного поля в подшипнике скольжения из композиционного материала на основе полимера.



а – полимер без металлического наполнителя (полиамид А6);
б – полимер с металлическим наполнителем, обработанным магнитным полем (полиамид А6)

$$t = t_{II} + (t_1 - t_{II}) \frac{\ln p}{\ln p_1}. \quad (13)$$

Для того чтобы найти t_1 – температуру на границе вала и слоя неметаллического антифрикционного материала при стационарном тепловом режиме – воспользуемся равенством теплового баланса [2]:

$$Q_2 = Q_e, \quad (14)$$

где Q_2 – количество тепла, прошедшее через слой полимерной втулки с металлическим наполнителем, Вт; Q_e – количество тепла, отданное с поверхности вращающегося вала, Вт.

Количество тепла, прошедшее через слой полимерной втулки с металлическим наполнителем, находится как [3], [7]:

$$Q_2 = \frac{2\pi\lambda_2 l}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \cdot (t_{II} - t_1). \quad (15)$$

Количество тепла, отданное с поверхности вращающегося вала, определяется следующим образом [2], [5]:

$$Q_e = \frac{\pi d_1}{2} \sqrt{\alpha_1 d_1 \lambda_1} (t_1 - t_0), \quad (16)$$

$$Q_e = \pi d_1 \sqrt{\alpha_1 d_1 \lambda_1} (t_1 - t_0), \quad (16.1)$$

где t_0 – температура окружающего воздуха, °С; α_1 – коэффициент теплоотдачи с вращающимся вала в окружающую среду, Вт/м °С. Численное значение α_1 принимается по экспериментально найденному уравнению $\alpha_1 = 15.6 \cdot V^{0.36}$ [1], [2].

Уравнение (16) используется для концевых подшипников, а уравнения (16.1) – для срединных, когда вылет вала в обе стороны от подшипника больше $3d_1$.

Подставляя выражения (15) и (16) в равенство (14), получим для срединного подшипника температуру на границе вала и слоя полимерного антифрикционного материала:

$$t_1 = \frac{2\lambda_2 l \cdot t_{II} + d_1 \sqrt{\alpha_1 d_1 \lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} \cdot t_0}{2\lambda_2 l + d_1 \sqrt{\alpha_1 d_1 \lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1}}. \quad (17)$$

Определив температуру в зоне контакта вала и втулки, далее определяем количество тепла, прошедшее через слой композиционной полимерной втулки с металлическим наполнителем, а затем количество тепла, отданное с поверхности вращающегося вала (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что полимер с металлическим наполнителем способствует интенсивному отводу тепла из зоны трения за счет наполнителя, частицы которого выстраиваются в виде цепочек, по которым происходит дополнительный отвод тепла на вал подшипника скольжения.

Рассчитав температуру полимерного антифрикционного материала, можно сделать вывод об эффективности его применения в узлах трения лесообрабатывающего оборудования с особым режимом работы. Несомненно, обратная пара трения имеет больше преимуществ по сравнению с прямой парой, что в дальнейшем приведет к увеличению срока эксплуатации подшипника скольжения при снижении температурной напряженности в зоне контакта трущихся пар.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альшиц И. Я., Анисимов Н. Ф., Благов Б. Н. Проектирование деталей из пластмасс: Справочник. М.: Машиностроение, 1969. 243 с.
- Баскаков А. П., Берг Б. В., Витт О. К. Теплотехник: Учебник. М.: Энергоиздат, 1982. 264 с.
- Бегиджанова А. П., Крейдлин Л. М. Применение пластмасс в тракторном машиностроении [Трение]: Учебник. М.: Машиностроение, 1970. 213 с.
- Машков Ю. К., Овчаров З. Н., Байбарацкая М. Ю., Мамаев О. А. Полимерные композиционные материалы в триботехнике: Учеб. пособие. М.: Недра-Бизнесцентр, 2004. 262 с.
- Платонов В. Ф. Подшипники из полиамидов. М.: Машгиз, 1961. 111 с.
- Чичинадзе А. В., Браун Э. Д., Бушев Н. А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник. 2-изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. А. В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. 778 с.
- Шорин С. Н. Теплопередача: Учебник. М.: Высш. шк., 1964. 484 с.

ИЛЬЯ РОМАНОВИЧ ШЕГЕЛЬМАН

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и оборудования лесного комплекса лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет

shegelman@onego.ru

АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ КУЗНЕЦОВ

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет

kuzalex@psu.karelia.ru

ВЯЧЕСЛАВ НИКОЛАЕВИЧ БАКЛАГИН

аспирант кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет

slava.baklagin@mail.ru

ПАВЕЛ ВЛАДИМИРОВИЧ БУДНИК

аспирант кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет

pavelbudnik@sampo.ru

ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ СКРЫПНИК

заведующий лабораторией технологии лесосечных работ и транспорта леса КарНИИЛПК, Петрозаводский государственный университет

karniilp@onego.ru

ПОДГОТОВКА И ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЩЕПЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ (БИОТОПЛИВА)

Сегодня биоэнергетика во многих странах – это быстрорастущий энергетический сектор промышленности. Одним из основных ресурсов для производства биотоплива в лесных регионах является дополнительное сырье в виде сучьев, вершинок и т. д. В статье рассматривается полный технологический цикл производства топливной щепы с учетом технологических и технических решений, позволяющих параллельно с производством основной лесозаготовительной продукции эффективно использовать древесную биомассу.

Ключевые слова: дополнительное сырье, биотопливо, топливная щепа, валочно-трелевочно-процессорная машина, мобильная рубительная машина

В настоящее время уделяется значительное внимание развитию альтернативной энергетики с использованием местных видов топлива, в том числе отходов лесозаготовок (лесосечных отходов). В России, и в частности в Республике Карелия, в связи с переходом на сортиментную технологию на лесозаготовках используют технологические процессы, которые не обеспечивают комплексного использования древесины, так как большая часть биомассы древесины (сучья, ветви, вершины и т. д.) остается на лесосеке в рассредоточенном виде, что осложняет ее дальнейшее использование. Поэтому остро стоит вопрос разработки новых решений, позволяющих вместе с производством основной лесозаготовительной продукции эффективно использовать древесную биомассу.

Для разработки технических и технологических решений проблем подготовки энергетиче-

ского сырья к переработке нами был использован хорошо себя зарекомендовавший в области лесозаготовок функционально-технологический анализ (ФТА) [3]. В процессе ФТА рассматривались 62 технологические схемы заготовки сортиментов и топливной щепы как системы, состоящие из элементов. Элементами системы являлись машины, которые, в свою очередь, состояли из подсистем. Абстрактно были выделены следующие 9 подсистем элементов: валки, обрезки сучьев, раскряжевки, удержания объекта, измельчения, перемещения, погрузки, разгрузки и доставки. На аналитико-синтетической стадии ФТА была рассмотрена возможность переноса выявленных подсистем элементов во времени и в пространстве. Для обобщения альтернативных вариантов получаемых систем заготовки сортиментов и топливной щепы применялся морфологический анализ [2].



Рис. 1. Схема валочно-трелевочно-процессорной машины:
1 – базовая машина, 2 – харвестерная головка,
3 – манипулятор, 4 – зажимной коник

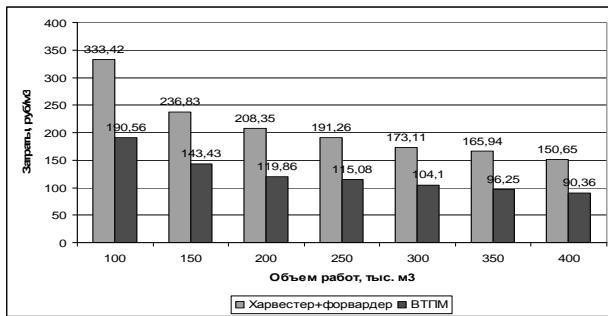


Рис. 2. Эксплуатационные затраты по технологиям

Оценка степени влияния факторных признаков на результативный признак

Факторный признак	Коэффициент парной корреляции	Критическое значение коэффициента Стьюдента	Расчетное значение коэффициента Стьюдента
Объем пачки, $V_{пачк}$	0,8590	1,9623	54,0450
Количество стволов в пачке, N	0,2393	1,9623	19,64231
Среднеквадратическое отклонение диаметров стволов в пачке, $S_{откл}$	0,5205	1,9623	7,9420

По результатам экспертной оценки была выбрана система, состоящая из валочно-трелевочно-процессорной машины (ВТПМ), мобильной рубительной машины, автопоезда с манипулятором и щеповоза.

Валочно-трелевочная машина имеет следующие основные элементы: базовую машину, манипулятор, харвестерную головку и зажимной коник. Схема ВТПМ на базе валочно-трелевочной машины ТЛК6-02 представлена на рис. 1. Машину рекомендуется выполнить на базе трактора мощностью 114–160 кВт со следующими параметрами: вылет манипулятора – 8,8–8,9 м; площадь коника – 1,1–2,2 м².

Технология работы этой машины основана на технологии работы валочно-трелевочной машины [4] и заключается в следующем. При разработке каждой пасеки машина задним ходом заходит

вглубь лесосек и разрабатывает волок (технологический коридор), укладывая деревья по краям и освобождая проезд. Двигаясь в обратном направлении, машина подбирает и укладывает в коник деревья, находящиеся в пределах доступности с обеих ее сторон. После набора пачки деревьев она трелится на погрузочную площадку, на которой производит обрезку сучьев, раскряжевку деревьев, штабелевку сортиментов.

К основным преимуществам предложенной системы можно отнести следующие:

1. Лесосечные отходы и дровяная древесина концентрируются на погрузочной площадке, что делает их переработку более эффективной, чем при традиционных технологиях, когда для сбора лесосечных отходов необходимо содержать дополнительную технику.
2. Проведенные нами расчеты показали, что при равных природно-производственных условиях себестоимость заготовки сортиментов с использованием ВТПМ в среднем меньше до 41 %, чем с использованием комплекса машин харвестер – форвардер (рис. 2).

При решении проблем повышения эффективности переработки древесного сырья в щепу энергетического назначения были проведены экспериментальные исследования передвижной рубительной машины УРП-600. Были сделаны замеры времени измельчения пачек дровяных стволов и лесосечных отходов, а также замеры параметров пачек, таких как количество дровяных стволов в пачке, диаметры стволов, рассчитаны объемы и среднеквадратические отклонения от среднего каждого пачки.

На основе экспериментальных исследований измельчения дровяных стволов передвижной рубительной машиной сделана оценка степени влияния различных факторных признаков на результативный признак (время измельчения пачки $T_{руб}$). Значимость влияния каждого признака подтверждает критерий Стьюдента (критическое значение меньше расчетного). Результаты приведены в таблице.

Анализ показал, что на процесс измельчения наиболее сильное влияние оказывает объем формируемой пачки. Связь между результативным и факторным признаками характеризуется как прямая и сильная. Помимо этого, среднеквадратическое отклонение диаметров стволов в пачке $S_{откл}$ оказывает существенное влияние на время измельчения пачки дровяных стволов; связь характеризуется как прямая и средняя по тесноте, что нельзя не учитывать в производственном процессе выработки щепы энергетического назначения.

Для каждой из групп экспериментальных данных методом наименьших квадратов было выведено регрессионное уравнение (зависимости времени измельчения пачки от объема пачки и от среднеквадратического отклонения диаметров стволов пачки), система уравнений представляет собой математическую модель измельчения дровяных стволов в рубительном модуле:

$$T_{pyb} = (1 \quad V_{nach} \quad V_{nach}^2 \quad S_{omkl} \quad S_{omkl}^2) \times \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ F \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где

$$\begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,3958 & 3,1262 & -7,0269 & 16,9468 \\ 3,0087 & -22,0983 & 48,5056 & 30,3962 \\ -2,7547 & 20,5425 & -43,9115 & 47,2974 \\ -0,1335 & 0,8856 & -1,6577 & 0,9056 \\ 0,0086 & -0,0639 & 0,1865 & -0,1313 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} N^3 \\ N^2 \\ N \\ 1 \end{pmatrix}$$

при $N \in \{1, 2, 3, 4\}$; A, B, C, D, F – коэффициенты при переменных регрессионных уравнениях

$$\begin{pmatrix} -0,3958 & 3,1262 & -7,0269 & 16,9468 \\ 3,0087 & -22,0983 & 48,5056 & 30,3962 \\ -2,7547 & 20,5425 & -43,9115 & 47,2974 \\ -0,1335 & 0,8856 & -1,6577 & 0,9056 \\ 0,0086 & -0,0639 & 0,1865 & -0,1313 \end{pmatrix} -$$

матрица коэффициентов регрессии, полученных в результате регрессионного анализа экспериментальных данных.

Оптимизацию данной модели можно осуществить по критерию наименьших потерь времени при совместной работе двух рабочих органов рубительной машины – манипулятора и рубильного модуля. При таком режиме у передвижной рубительной машины нет простоев в работе, и все рабочие органы машины работают с оптимальной загрузкой.

Оптимизацию можно осуществить и по критерию максимальной часовой производительности. При этом рубительный модуль машины работает максимально эффективно. В обоих случаях варьируемым параметром является объем пачки.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Pi_{nach} = \frac{3600 \cdot \sqrt{\frac{A + DS + FS^2}{C}} \cdot f_1}{2A + B \sqrt{\frac{A + DS + FS^2}{C}} + 2DS + 2FS^2}, \quad \text{при } B \sqrt{\frac{A + DS + FS^2}{C}} + 2(A + DS + FS^2) > \sum T_{oper.man} \\ \Pi_{nach} = \frac{3600 \cdot \sqrt{B^2 - 4C \cdot (A + DS + FS^2 - \sum T_{oper.man})} - B}{2C} \cdot f_1, \quad \text{при } B \sqrt{\frac{A + DS + FS^2}{C}} + 2(A + DS + FS^2) < \sum T_{oper.man} \end{array} \right.$$

Часовая производительность при оптимальном объеме пачки 0,33–0,44, вычисленная по формуле (5), составляет 66–69 м³/час, что на 25 % больше наблюдаемой нами при хронометражных замерах, при работе передвижной рубительной машины с объемами пачек 0,17–0,55.

Оптимальный объем пачки в первом случае (минимизация потерь времени при совместной работе двух рабочих органов рубительной машины) с учетом математической модели (1) определяется из равенства времени измельчения пачки и суммарного времени всех операций манипулятора $T_{pyb} = \sum T_{oper.man}$ и после решения квадратного уравнения имеет вид:

$$V_{nach} = \frac{\sqrt{B^2 - 4C \cdot (A + DS + FS^2 - \sum T_{oper.man})} - B}{2C}. \quad (2)$$

Часовая производительность передвижной рубительной машины с учетом [4] будет определяться как

$$\Pi_{nach} = \frac{3600 \cdot \sqrt{B^2 - 4C \cdot (A + DS + FS^2 - \sum T_{oper.man})} - B}{2C} \cdot f_1, \quad (3)$$

где f_1 – коэффициент использования рабочего времени; k – коэффициент, учитывающий удлинения производственного цикла работы манипулятора передвижной рубительной машины.

Оптимальный объем пачки во втором случае (достижение максимальной часовой производительности) определяется из уравнения

$$\frac{d\Pi_{nach}}{dV_{nach}} = \left(\frac{3600 \cdot V_{nach}}{kT_{цикл}(V_{nach})} \right)' = 0.$$

После математических преобразований получаем:

$$V_{nach} = \sqrt{\frac{A + DS_{omkl} + FS_{omkl}^2}{C}}. \quad (4)$$

При среднеквадратическом отклонении диаметров дровяных стволов в пачке от среднего, равном 1–10 см, оптимальный объем пачки, вычисленный по формуле (4), составляет 0,33–0,4 м³.

Максимальная часовая производительность определяется формулой:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Pi_{nach} = \frac{3600 \cdot \sqrt{\frac{A + DS + FS^2}{C}} \cdot f_1}{2A + B \sqrt{\frac{A + DS + FS^2}{C}} + 2DS + 2FS^2}, \quad \text{при } B \sqrt{\frac{A + DS + FS^2}{C}} + 2(A + DS + FS^2) > \sum T_{oper.man} \\ \Pi_{nach} = \frac{3600 \cdot \sqrt{B^2 - 4C \cdot (A + DS + FS^2 - \sum T_{oper.man})} - B}{2C} \cdot f_1, \quad \text{при } B \sqrt{\frac{A + DS + FS^2}{C}} + 2(A + DS + FS^2) < \sum T_{oper.man} \end{array} \right.$$

Проведенные исследования показали, что при технологическом процессе с использованием ВТПМ лесосечные отходы и дровяная древесина концентрируются на погрузочной площадке, что позволяет повысить эффективность переработки вторичного сырья в сравнении с тради-

ционными технологиями, когда для сбора лесосечных отходов необходимо содержать дополнительную технику.

ВЫВОДЫ

- На основании функционально-технологического анализа была выбрана система, состоящая из ВТПМ, мобильной рубительной машины, автопоезда с манипулятором и щеповоза для заготовки сортиментов с одновременной подготовкой дровяного древесного сырья для выработки щепы энергетического назначения (биотоплива).
- Проведенные нами расчеты показали, что при равных природно-производственных условиях себестоимость заготовки сортиментов при использовании ВТПМ в среднем меньше до 41 %, чем при использовании комплекса машин харвестер – форвардер (рис. 2).
- Для повышения производительности передвижной рубительной машины на 20–25 % необходимо учитывать рекомендуемый объем пачки, который описывается полученными зависимостями (4), (5). Наиболее опти-

мальной пачкой дровяных стволов для рубительной машины УРП-600 будет та, объем которой равен 0,33–0,40 м³ (в зависимости от других ее параметров).

- Получена математическая модель (1), описывающая зависимость времени рубки от основных параметров пачки – ее объема, количества дровяных стволов в пачке, а также среднеквадратического отклонения диаметров стволов в пачке от среднего.
- Полученная математическая модель (1) позволяет планировать работу передвижных рубительных машин с целью создания технологических цепочек.
- Для повышения производительности мобильной рубительной машины необходимо выполнить предварительную подсорттировку штабеля дровяных стволов, поскольку степень влияния среднеквадратического отклонения диаметров дровяных стволов от среднего в пачке на время измельчения этой пачки значительна.

Результаты экспериментальных наблюдений показали, что сортировка штабеля на две размерные группы с диаметрами 8–29 и 30–50 см дает увеличение производительности на 7–8 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Карпачев С. П., Щербаков Е. Н., Слинченков А. Н. Биоэнергетика начинается на лесосеке: рубительные машины и энергетическое оборудование // Лесопромышленник. 2007. № 43. С. 3.
- Одрин В. М., Карташов С. С. Морфологический анализ систем. Построение морфологических таблиц. Киев: Наукова думка, 1977. 148 с.
- Шегельман И. Р. Функционально-технологический анализ: Методология и приложения. М.: ИПИ, 2000. 96 с.
- Шегельман И. Р., Скрыпник В. И., Галактионов О. Н. Техника и технология лесосечных работ: Учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2004. 228 с.

АЛЕКСЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ ВАРФОЛОМЕЕВ

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет
avarf@psu.karelia.ru

ПАВЕЛ ВЛАДИМИРОВИЧ КИРИКОВ

преподаватель кафедры теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет
lispad@gmail.com

АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ РОГОВ

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

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К СРАВНЕНИЮ РАССТОЯНИЙ МЕЖДУ ПОДМНОЖЕСТВАМИ КОНЕЧНОГО МНОЖЕСТВА

В статье рассматривается вероятностный подход к сравнению расстояний между подмножествами одного множества, основанный на ряде классических метрик. Получены функции распределения для каждого из приведенных расстояний, приведена таблица квантилей распределений.

Ключевые слова: расстояния между подмножествами, вероятностный подход, сравнение расстояний, бинарные вектора

1. ВВЕДЕНИЕ

В приложениях часто возникают задачи, связанные с вычислением степени различия двух подмножеств одного конечного множества. Типичная ситуация – попарные сравнения кластеров, полученных в результате двух процедур автоматической классификации некоторого множества объектов [12], [16]. Сравнение строк или столбцов матрицы значений дихотомических признаков для объектов, то есть бинарных векторов одинаковой размерности, также можно рассматривать как сравнение двух подмножеств одного множества. Кроме того, на оценке степени различия множеств основаны многие алгоритмы сравнения более сложных объектов, таких как деревья и графы [10], [15].

В качестве степени различия двух подмножеств часто используют расстояние, то есть чистовую функцию $\rho = \rho(X, Y)$, заданную на множестве пар подмножеств и обладающую свойствами метрики. Значения расстояния могут расти неограниченно, но часто они ограничены сверху единицей. Это характерно, например, для расстояний, которые получаются из некоторых мер близости [4], [6], [8] $S(X, Y)$ с помощью операции дополнения $\rho(X, Y) = 1 - S(X, Y)$.

Независимо от того, каким интервалом ограничены возможные значения расстояния, возникает проблема определения, какие значения можно считать большими, а какие – малыми. Решение данной проблемы могло бы помочь ответить на вопрос о том, является ли отличие ме-

жду множествами существенным или нет. В данной статье предлагается подход, основанный на вероятностной модели генерации подмножеств. При этом если значение расстояния оказывается таким, что значения не меньше данного встречаются в рамках модели редко, оно считается «большим», а если такие значения встречаются часто, то «малым». В работе предлагается способ построения количественных оценок для понятий «редко» и «часто» на основе вероятностного распределения значений расстояния.

Определим случайный эксперимент, порождающий пару подмножеств, и введем вероятностную меру на множестве исходов эксперимента. На этой основе можно получить вероятностное распределение значений расстояния и провести градуировку интервала возможных значений с помощью квантилей функции распределения расстояния. Пусть λ_α – квантиль уровня α для функции распределения $F_\rho(t) = P(\rho < t)$. Тогда, если расстояние ρ оказывается не меньше, чем λ_α , можно сделать вывод, что не менее чем $\alpha \cdot 100\%$ случайно выбранных пар подмножеств имеют между собой расстояние меньше, чем ρ .

В статье рассмотрена одна из возможных моделей генерации подмножеств. Основное внимание уделяется случаю равновероятных подмножеств, который рассмотрен для четырех расстояний – Хэмминга, Роджерса – Танимото, Жаккара и Сокала – Снита. В каждом из этих случаев получена функция распределения расстояния. В заключительном разделе приведена таблица, позволяющая сравнивать значения

рассмотренных расстояний для различных множеств.

2. ВЕРОЯТНОСТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЯ – ОБЩИЙ СЛУЧАЙ

Пусть $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ – конечное множество из n элементов, X и Y – два его подмножества. Представим подмножества X и Y в виде бинарных векторов x и y размерности n , построенных по принципу: $x_i = 1$ тогда и только тогда, когда $u_i \in X$, в противном случае $x_i = 0$ (аналогично для y и Y). Обозначим через $p_i, i = 1, \dots, n$ вероятность появления элемента u_i в подмножестве. Тогда можно рассмотреть случайный эксперимент, состоящий из n независимых испытаний, в каждом из которых элемент u_i может как появиться, так и не появиться в подмножествах. Тогда в каждом испытании возможны исходы четырех видов $A_{uv}^i = \{x_i = u, y_i = v\}$, где $u, v \in \{0, 1\}$, i – номер испытания. Пусть $I(A)$ – индикатор события A ,

$$\begin{aligned} I(A_{11}^i) + I(A_{10}^i) + I(A_{01}^i) + I(A_{00}^i) &= 1, \\ a = \sum_{i=1}^n I(A_{11}^i), b = \sum_{i=1}^n I(A_{10}^i), c = \sum_{i=1}^n I(A_{01}^i), \\ d = \sum_{i=1}^n I(A_{00}^i). \end{aligned}$$

Тогда $a + b + c + d = n$.

Введем множество событий

$$B = \left\{ (A_{11}^1, A_{10}^1, \dots, A_{00}^n) : \sum_{i=1}^n I(A_{11}^i) = a, \sum_{i=1}^n I(A_{10}^i) = b, \sum_{i=1}^n I(A_{01}^i) = c, \sum_{i=1}^n I(A_{00}^i) = d \right\}.$$

Во многих работах (см., например, [8], [16]) разные коэффициенты различия между множествами описываются как функции от чисел a, b, c, d , то есть $\rho(X, Y) = h(a, b, c, d)$. В данной работе мы ограничиваемся этим же случаем. Тогда функцию распределения случайной величины $\rho(X, Y)$ можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} F_\rho(t) &= P(\rho(X, Y) < t) = \\ &= \sum_{(a,b,c,d) \in C} \sum_{(A_{11}^1, \dots, A_{00}^n) \in B} \prod_{i=1}^n p_i^{2I(A_{11}^i)} \times \\ &\quad \times (1 - p_i)^{2I(A_{00}^i)} (p_i (1 - p_i))^{I(A_{01}^i) + I(A_{10}^i)}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} C = \{(a, b, c, d) \in Z^4 : a, b, c, d \geq 0, a + b + c + d = \\ = n, h(a, b, c, d) < t\}. \end{aligned}$$

Рассмотрим важный частный случай. Предположим, что $p_i = 0.5, i = 1, \dots, n$, тогда каждое подмножество множества U может появиться в ролях X и Y с одинаковой вероятностью. Согласно мультиномиальному (полиномиальному) распределению [9],

$$\begin{aligned} F_\rho(t) &= P(\rho(X, Y) < t) = \\ &= \sum_{(a,b,c,d) \in C} \frac{n!}{a!b!c!d!} \cdot \frac{1}{4^a} \cdot \frac{1}{4^b} \cdot \frac{1}{4^c} \cdot \frac{1}{4^d}. \end{aligned} \quad (1)$$

Для конкретных расстояний формула (1) может упрощаться. Рассмотрим несколько расстояний между подмножествами, принимающих значения от 0 до 1. В дальнейшем изложении символ $|X|$ означает мощность множества X . Нам также потребуются две функции вещественного аргумента: $\lfloor t \rfloor = \max\{k \in Z \mid k \leq t\}$, $\lceil t \rceil = \min\{k \in Z \mid k \geq t\}$.

3. РАССТОЯНИЕ ХЭММИНГА

В книге [6] в качестве простейшего коэффициента различия между множествами, обладающего свойствами метрики, предлагается мощность симметрической разности: $|X \Delta Y| = |(X \setminus Y) \cup (Y \setminus X)|$. Если разделить это число на n , то получим расстояние Хэмминга [4] между бинарными векторами, принимающее значения от 0 до 1:

$$\rho^H(X, Y) = \frac{|X \Delta Y|}{n} = \frac{m}{n}, \quad (2)$$

где $m = b + c$.

Легко понять, что случайная величина m имеет биномиальное распределение, так как мощность симметрической разности равна числу исходов $A_{01} \cup A_{10}$ в n испытаниях (вероятность такого исхода в одном испытании равна 1/2). Тогда

$$\begin{aligned} F_\rho^H(t) &= P(\rho^H(X, Y) < t) = \\ &= \frac{1}{2^n} \sum_{m: m < t} C_n^m = \frac{1}{2^n} \sum_{m=0}^{\lceil t \rceil - 1} C_n^m. \end{aligned} \quad (3)$$

Для нахождения квантилей функции распределения случайной величины $\rho^H(X, Y)$ можно воспользоваться таблицами квантилей биномиального распределения, находящимися, например, в [5]. При $n > 36$ в [1] рекомендуют использовать нормальную аппроксимацию, которая в нашем случае будет иметь вид

$$\begin{aligned} F_\rho^H(t) &= P(\rho^H(X, Y) < t) = P(n\rho^H(X, Y) < nt) \approx \\ &\approx \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{2nt + 1 - n}{\sqrt{n}}\right), \end{aligned}$$

где $\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-(\tau^2/2)} d\tau$ – функция Лапласа.

Максимальная абсолютная ошибка приближенного равенства меньше $0,28/\sqrt{n}$ [1].

4. РАССТОЯНИЕ РОДЖЕРСА – ТАНИМОТО

Одним из часто используемых коэффициентов различия между бинарными векторами является расстояние Роджерса – Танимото, получаемое из одноименной меры близости [13] и равное

$$\rho^{RT}(X, Y) = 1 - \frac{a+d}{a+d+2(b+c)} = \frac{2(b+c)}{n+b+c} = \frac{2m}{n+m},$$

где m – количество исходов $A_{01} \cup A_{10}$ в n испытаниях, то есть $m = b + c$.

Очевидно, что

$$\rho^{RT} = \frac{2\rho^H}{\rho^H + 1}.$$

Поскольку функция $g(t) = \frac{2t}{t+1} : [0,1] \rightarrow [0,1]$ монотонно возрастающая и вогнутая, $\rho^{RT}(X, Y)$ обладает свойствами метрики [2], поэтому имеет право называться расстоянием.

Случайная величина m имеет такое же распределение, что и в п. 1. Следовательно,

$$F_{\rho}^{RT}(t) = P(\rho^{RT}(X, Y) < t) = \\ = \frac{1}{2^n} \sum_{\substack{m=2m \\ m+n-m=t}} C_n^m = \frac{1}{2^n} \sum_{m=0}^{\lceil \frac{m}{2-t} \rceil - 1} C_n^m = P\left(m < \frac{tn}{2-t}\right).$$

Для нахождения квантиля функции распределения можно воспользоваться рекомендациями, приведенными в п. 1. При больших n можно использовать нормальную аппроксимацию

$$F_{\rho}^{RT}(t) \approx \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{3tn + 2 - t - 2n}{(2-t)\sqrt{n}}\right).$$

В этом случае максимальная абсолютная ошибка приближенного равенства меньше $0,28/\sqrt{n}$ [1].

5. РАССТОЯНИЕ ЖАККАРА

Во многих публикациях также рассматривается расстояние между множествами в виде отношения мощности симметрической разности к мощности их объединения. Свойства метрики для него доказаны, например, в [7]. Расстояние получается

из коэффициента близости П. Жаккара [11], предложенного в 1901 году для сравнения двух географических областей по населяющим их биологическим видам. Аналогичная мера предложена в [15] для измерения расстояния между графами. Итак,

$$\rho^J(X, Y) = \frac{|X \Delta Y|}{|X \cup Y|} = 1 - \frac{|X \cap Y|}{|X| + |Y| - |X \cap Y|} = \frac{b+c}{b+c+a},$$

если $X \cap Y \neq \emptyset$; $\rho^J(\emptyset, \emptyset) = 1$.

Пусть по-прежнему $m = b + c$. Тогда

$$\rho^j(X, Y) = \frac{m}{m+a}.$$

Согласно полиномиальному распределению:

$$F_{\rho}^J(t) = P(\rho^J(X, Y) < t) = \\ = \sum_{(a,m) \in B} C_n(a, m) \cdot \frac{1}{4^a} \cdot \frac{1}{2^m} \cdot \frac{1}{4^{n-a-m}} = \\ = \sum_{(a,m) \in B} \frac{n! 2^m}{a! m! (n-a-m)! 4^n},$$

где

$$B = \left\{(a, m) \in Z^2 : a, m \geq 0, \frac{m}{a+m} < t, 0 < a+m \leq n\right\}.$$

Заметим, что двойная сумма (5) может быть записана как повторяющаяся:

$$F_{\rho}^J(t) = \sum_{m=0}^n \sum_{a=\left\lfloor \frac{m(1-t)}{t} \right\rfloor + 1}^{n-m} C_n(a, m) \cdot \frac{1}{4^a} \cdot \frac{1}{2^m} \cdot \frac{1}{4^{n-a-m}} = \\ = \sum_{m=0}^n C_n^m \frac{2^m}{4^n} \sum_{a=\left\lfloor \frac{m(1-t)}{t} \right\rfloor + 1}^{n-m} C_{n-m}^a.$$

Функция распределения $F_{\rho}^J(t) = P(\rho^J(X, Y) < t)$ случайной величины $\rho^j(X, Y)$ не протабулирована в справочниках по математической статистике. Поэтому в статье приводится краткая таблица некоторых значений квантилей этой функции (табл. 1).

В случае большого n для вычисления слагаемых в формуле (5) можно воспользоваться локальной теоремой Муавра – Лапласа для полиномиального распределения [3]. В нашем случае равенство примет вид:

$$\frac{n!}{m! a! (n-m-a)!} \frac{2^m}{4^n} \approx \frac{2\sqrt{2}}{\pi n} e^{-\frac{3x^2+4xy+4y^2}{n}},$$

$$\text{где } x = m - \frac{n}{2}, y = a - \frac{n}{4}.$$

Таблица 1
Таблица квантилей функции распределения расстояния Жаккара

n\alpha	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,99
1	0,001	0,001	0,001	0,001	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
2	0,001	0,001	0,001	0,501	0,501	0,501	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
3	0,001	0,001	0,001	0,334	0,501	0,667	0,667	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
4	0,001	0,001	0,334	0,501	0,501	0,667	0,667	0,751	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
5	0,001	0,251	0,334	0,501	0,501	0,601	0,667	0,751	0,801	1,000	1,000	1,000	1,000
6	0,001	0,251	0,334	0,501	0,501	0,601	0,667	0,751	0,801	0,834	1,000	1,000	1,000
7	0,167	0,334	0,401	0,501	0,572	0,601	0,667	0,751	0,801	0,834	1,000	1,000	1,000
8	0,167	0,334	0,401	0,501	0,572	0,626	0,667	0,715	0,801	0,834	1,000	1,000	1,000
9	0,201	0,334	0,429	0,501	0,572	0,626	0,667	0,715	0,751	0,834	0,876	1,000	1,000
10	0,251	0,376	0,429	0,501	0,572	0,626	0,667	0,715	0,751	0,834	0,876	1,000	1,000
11	0,251	0,376	0,445	0,501	0,572	0,626	0,667	0,715	0,751	0,801	0,876	0,901	1,000
12	0,273	0,401	0,445	0,546	0,601	0,626	0,667	0,715	0,751	0,801	0,876	0,901	1,000
13	0,286	0,401	0,455	0,546	0,601	0,637	0,667	0,701	0,751	0,801	0,876	0,901	1,000
14	0,301	0,417	0,462	0,546	0,601	0,637	0,667	0,701	0,751	0,801	0,847	0,901	1,000
15	0,308	0,417	0,501	0,546	0,601	0,637	0,667	0,701	0,751	0,801	0,847	0,901	1,000
16	0,334	0,429	0,501	0,546	0,601	0,637	0,667	0,701	0,751	0,786	0,834	0,901	1,000
17	0,334	0,445	0,501	0,546	0,601	0,637	0,667	0,701	0,751	0,786	0,834	0,876	0,934
18	0,358	0,455	0,501	0,563	0,601	0,643	0,667	0,701	0,734	0,778	0,834	0,867	0,934
19	0,358	0,462	0,501	0,563	0,601	0,643	0,667	0,706	0,734	0,770	0,824	0,867	0,934
20	0,364	0,462	0,501	0,563	0,601	0,643	0,667	0,706	0,734	0,770	0,824	0,867	0,934
21	0,376	0,467	0,501	0,563	0,601	0,643	0,667	0,706	0,734	0,770	0,819	0,858	0,934
22	0,385	0,467	0,501	0,563	0,612	0,643	0,667	0,706	0,734	0,765	0,813	0,858	0,929
23	0,389	0,471	0,527	0,572	0,612	0,643	0,667	0,701	0,734	0,765	0,813	0,847	0,924
24	0,392	0,474	0,527	0,572	0,612	0,648	0,667	0,701	0,728	0,765	0,810	0,843	0,905
25	0,401	0,477	0,527	0,579	0,612	0,648	0,667	0,701	0,728	0,762	0,801	0,843	0,901
26	0,410	0,479	0,527	0,579	0,612	0,648	0,667	0,701	0,723	0,762	0,801	0,843	0,901
27	0,412	0,501	0,527	0,579	0,612	0,648	0,667	0,701	0,723	0,761	0,801	0,834	0,901
28	0,417	0,501	0,527	0,579	0,612	0,643	0,667	0,696	0,723	0,751	0,801	0,834	0,895
29	0,422	0,501	0,530	0,584	0,616	0,641	0,667	0,696	0,723	0,751	0,801	0,827	0,895
30	0,424	0,501	0,542	0,584	0,616	0,641	0,667	0,696	0,721	0,751	0,792	0,827	0,885
31	0,429	0,501	0,542	0,584	0,616	0,641	0,667	0,696	0,721	0,751	0,792	0,827	0,881
32	0,435	0,501	0,542	0,584	0,616	0,643	0,667	0,696	0,721	0,751	0,792	0,822	0,881
33	0,435	0,501	0,542	0,587	0,620	0,643	0,667	0,693	0,721	0,751	0,786	0,819	0,876
34	0,441	0,501	0,542	0,587	0,620	0,643	0,667	0,693	0,721	0,751	0,786	0,819	0,876
35	0,445	0,518	0,546	0,591	0,621	0,643	0,667	0,693	0,715	0,751	0,786	0,815	0,871
36	0,445	0,518	0,549	0,593	0,621	0,643	0,667	0,693	0,715	0,742	0,783	0,815	0,870
37	0,449	0,518	0,552	0,593	0,621	0,643	0,667	0,693	0,715	0,742	0,782	0,813	0,864
38	0,452	0,518	0,552	0,593	0,621	0,646	0,667	0,690	0,715	0,742	0,778	0,808	0,863
39	0,455	0,518	0,552	0,593	0,621	0,646	0,667	0,690	0,715	0,742	0,778	0,808	0,863
40	0,460	0,519	0,552	0,594	0,621	0,646	0,667	0,690	0,715	0,741	0,778	0,807	0,858

6. РАССТОЯНИЕ СОКАЛА – СНИТА

В монографии [14] были введены несколько коэффициентов близости бинарных векторов, один из которых имеет вид

$$\frac{a}{a + 2(b+c)}.$$

Если применить к этому коэффициенту операцию дополнения, описанную в п. 1, то получится коэффициент различия

$$\rho^{ss}(X, Y) = \frac{2(b+c)}{a + 2(b+c)}.$$

Нетрудно показать, что $\rho^{ss} = g(\rho^J)$, где $g(t)$ – функция, определенная в п. 4. Следовательно, $\rho^{ss}(X, Y)$ – расстояние на множестве подмножеств фиксированного множества. Функция распределения $F_{\rho^{ss}}(t) = P(\rho^{ss}(X, Y) < t)$ определяется по формуле (5) с той только разницей, что множество B имеет несколько иной вид:

$$B = \left\{ (a, m) \in Z^2 : a, m \geq 0, \frac{2m}{a + 2m} < t, 0 < a + m \leq n \right\}.$$

Аналогично предыдущему пункту для облегчения вычислений можно использовать ап-

проксимацию (6), а также запись функции распределения через повторную сумму:

$$\begin{aligned} F_{\rho}^{SS}(t) &= \sum_{m=0}^n \sum_{a=\left\lfloor \frac{m(2-t)}{t} \right\rfloor + 1}^{n-m} C_n(a, m) \cdot \frac{1}{4^a} \cdot \frac{1}{2^m} \cdot \frac{1}{4^{n-a-m}} = \\ &= \sum_{m=0}^n C_n^m \frac{2^m}{4^n} \sum_{a=\left\lfloor \frac{m(2-t)}{t} \right\rfloor + 1}^{n-m} C_n^a. \end{aligned}$$

Для получения квантилей для функции распределения расстояния Сокала – Снита можно также воспользоваться табл. 1. Действительно, если λ_{α} – квантиль уровня α для случайной величины ξ , а $\hat{\lambda}_{\alpha}$ – квантиль того же уровня для случайной величины $\zeta = \varphi(\xi)$, где $\varphi(t)$ – монотонная функция вещественного аргумента, то указанные квантили связаны соотношением $\hat{\lambda}_{\alpha} = \varphi(\lambda_{\alpha})$. Поэтому квантиль λ_{α}^{SS} может быть найден как $g(\lambda_{\alpha}^J)$, где $g(t)$ – функция, определенная в п. 4.

7. СРАВНЕНИЕ РАССТОЯНИЙ

Предложенная во введении идея сравнения расстояний позволяет сравнивать значения рас-

стояния, полученные на разных множествах и с помощью разных метрик. Такая задача возникает, например, при кластеризации одного набора объектов с разным набором признаков.

Для двух разных расстояний ρ^1 и ρ^2 , двух подмножеств X_1, Y_1 одного множества и двух подмножеств X_2, Y_2 другого множества будем считать значения расстояний $\rho^1(X_1, Y_1)$ и $\rho^2(X_2, Y_2)$ одинаковыми, если они равны квантилям функций распределения расстояний одного и того же уровня α . Если же уровни α_1 и α_2 различны, но отличаются друг от друга на величину, не превосходящую ε , то будем называть такие значения расстояний близкими с точностью ε .

Найдем вероятность того, что значения функций распределений расстояний $\rho^1(X_1, Y_1)$ и $\rho^2(X_2, Y_2)$ друг от друга отличаются на ε . Она будет равна

$$\begin{aligned} P(|F_{\rho^1}(\rho^1(X_1, Y_1)) - F_{\rho^2}(\rho^2(X_2, Y_2))| < \varepsilon) &= \\ &= P(F_{\rho^1}(\rho^1(X_1, Y_1)) - \varepsilon < F_{\rho^2}(\rho^2(X_2, Y_2)) < \\ &\quad < F_{\rho^1}(\rho^1(X_1, Y_1)) + \varepsilon) = 2\varepsilon \end{aligned}$$

при условии, что $F_{\rho^1}(\rho^1(X_1, Y_1)) - \varepsilon > 0$ и $F_{\rho^1}(\rho^1(X_1, Y_1)) + \varepsilon < 1$.

Таблица 2

Сравнительная таблица квантилей функций распределения четырех расстояний

$\alpha \setminus n$	5		7		10		15		20		30		40		
0.01	0.001	0.001	0.143	0.251	0.101	0.182	0.201	0.334	0.251	0.401	0.301	0.462	0.326	0.491	
	0.001	0.001	0.167	0.286	0.251	0.401	0.308	0.471	0.364	0.534	0.424	0.595	0.46	0.63	
0.05	0.201	0.334	0.143	0.251	0.201	0.334	0.267	0.422	0.301	0.462	0.367	0.537	0.376	0.546	
	0.251	0.401	0.334	0.501	0.376	0.546	0.417	0.589	0.462	0.632	0.501	0.667	0.519	0.683	
0.1	0.201	0.334	0.286	0.445	0.301	0.462	0.334	0.501	0.351	0.519	0.367	0.537	0.401	0.572	
	0.334	0.501	0.401	0.572	0.429	0.601	0.501	0.667	0.501	0.667	0.542	0.703	0.552	0.712	
0.2	0.401	0.572	0.286	0.445	0.401	0.572	0.401	0.572	0.401	0.572	0.434	0.605	0.426	0.597	
	0.501	0.667	0.501	0.667	0.501	0.667	0.546	0.706	0.563	0.721	0.584	0.737	0.594	0.746	
0.3	0.401	0.572	0.429	0.6	0.401	0.572	0.401	0.572	0.451	0.621	0.467	0.637	0.451	0.621	
	0.501	0.667	0.572	0.728	0.572	0.728	0.601	0.751	0.601	0.751	0.616	0.762	0.621	0.766	
0.4	0.401	0.572	0.429	0.6	0.501	0.667	0.467	0.637	0.451	0.621	0.467	0.637	0.476	0.645	
	0.601	0.751	0.601	0.751	0.626	0.77	0.637	0.778	0.643	0.783	0.641	0.781	0.646	0.785	
0.5	0.401	0.572	0.429	0.6	0.501	0.667	0.467	0.637	0.501	0.667	0.501	0.667	0.501	0.667	
	0.667	0.801	0.667	0.801	0.667	0.801	0.667	0.801	0.667	0.801	0.667	0.801	0.667	0.801	
0.6	0.601	0.751	0.572	0.728	0.501	0.667	0.534	0.696	0.551	0.71	0.534	0.696	0.526	0.689	
	0.751	0.858	0.751	0.858	0.715	0.834	0.701	0.824	0.706	0.828	0.696	0.821	0.69	0.817	
0.7	0.601	0.751	0.572	0.728	0.601	0.751	0.601	0.751	0.551	0.71	0.534	0.696	0.526	0.689	
	0.801	0.889	0.801	0.889	0.751	0.858	0.751	0.858	0.734	0.847	0.721	0.838	0.715	0.834	
0.8	0.601	0.751	0.715	0.834	0.601	0.751	0.601	0.751	0.601	0.751	0.567	0.724	0.576	0.731	
	1	1	0.834	0.91	0.834	0.91	0.801	0.889	0.77	0.87	0.751	0.858	0.741	0.852	
0.9	0.801	0.889	0.715	0.834	0.701	0.824	0.667	0.801	0.651	0.788	0.634	0.776	0.601	0.751	
	1	1	1	1	0.876	0.934	0.847	0.917	0.824	0.904	0.792	0.884	0.778	0.876	
0.95	0.801	0.889	0.858	0.924	0.801	0.889	0.734	0.847	0.701	0.824	0.634	0.776	0.626	0.77	
	1	1	1	1	1	1	0.901	0.948	0.901	0.948	0.867	0.929	0.827	0.905	0.807
0.99	1	1	0.858	0.924	0.901	0.948	0.801	0.889	0.751	0.858	0.701	0.824	0.676	0.806	
	1	1	1	1	1	1	1	1	0.934	0.966	0.885	0.939	0.858	0.924	

Полученное утверждение можно использовать для построения статистического критерия близости значений расстояний.

Продемонстрируем предложенный нами метод сравнения расстояний с помощью табл. 2, содержащей в себе квантили уровня α для четырех рассмотренных в статье расстояний, рассчитанные при различных n . Для каждой пары α и n в табл. 2 представлены 4 квантиля, расположенные в виде мини-таблицы 2×2 следующим образом: в первой строке слева – квантиль для расстояния Хэмминга,

справа – для расстояния Роджерса – Танимoto, во второй строке слева – квантиль для расстояния Жаккара, справа – для расстояния Сокала – Снита. Интерпретация табл. 2 такова: значения соответствующих расстояний для одного и того же α мы предлагаем считать одинаковыми (например, значение 0,429 для расстояния Жаккара при $n = 10$ и значение 0,537 для расстояния Роджерса – Танимото при $n = 30$ одинаковы), значения же расстояний при разных α – близкими с точностью, равной модулю разности значений α .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вадзинский Р. Н. Справочник по вероятностным распределениям. СПб.: Наука, 2001. 295 с.
2. Деза М., Лоран М. Геометрия разрезов и метрик. М.: МЦНМО, 2001. 736 с.
3. Калинин В. М. Специальные функции и предельные свойства вероятностных распределений. II // Записки научных семинаров ЛОМИ. 1972. Т. 26. С. 5–87.
4. Мандель И. Д. Кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1988. 176 с.
5. Мюллер П., Нойман Н., Шторм Р. Таблицы по математической статистике. М.: Финансы и статистика, 1988. 272 с.
6. Орлов А. И. Нечисловая статистика. М.: МЗ-Пресс, 2004. 513 с.
7. Петровский А. Б. Пространства множеств и мульти множеств. М., 2003. 248 с.
8. Раушенбаух Г. В. Меры близости и сходства // Анализ нечисловой информации в социологических исследованиях. М.: Наука, 1985. С. 169–203.
9. Ширяев А. Н. Вероятность. М.: Наука, 1980. 576 с.
10. Bunke H., Shearer K. A graph distance metric based on the maximal common subgraph // Pattern Recognition Letters. 1998. Vol. 19. P. 255–259.
11. Jaccard P. The distribution of the flora in the Alpine zone // New Phytologist. 1912. Vol. 11. Issue 2. P. 37–50.
12. Meila M. Comparing Clusterings by the Variation of Information // Learning Theory and Kernel Machines. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 2777. Springer. 2003. P. 173–187.
13. Rogers D., Tanimoto T. A computer program for classifying plants // Science. 1960. Vol. 132, № 3434. P. 1115–1118.
14. Sokal R. R., Sneath P. H. Principles of numerical taxonomy. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1963.
15. Wallis W. D., Shoubridge P., Kraetzl M., Ray D. Graph distances using graph union // Pattern Recognition Letters. 2001. Vol. 22. P. 701–704.
16. Warrens M. J. Similarity Coefficients for Binary Data: Dissertation. Leiden, 2008.

ЮЛИЯ СЕРГЕЕВНА ТОКАРЕВА

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры фундаментальной и прикладной математики, теории и методики обучения математике физико-математического факультета, Забайкальский государственный гуманитарно-педагогический университет им. Н. Г. Чернышевского (г. Чита)
jtokareva2@mail.ru

МОДИФИЦИРОВАННАЯ АРБИТРАЖНАЯ ПРОЦЕДУРА ПО ПОСЛЕДНЕМУ ПРЕДЛОЖЕНИЮ С КОМИТЕТОМ

В работе исследуется модель переговоров двух лиц с участием арбитражного комитета. Игроки вносят предложения, а решение каждого из арбитров моделируется случайными величинами. Предполагается, что члены комитета используют правила арбитража по последнему предложению. Окончательное решение осуществляется по правилу простого большинства. Найдено равновесие по Нэшу в модифицированной арбитражной игре.

Ключевые слова: арбитраж по последнему предложению, равновесие, оптимальные стратегии

ВВЕДЕНИЕ

Теоретико-игровые модели переговоров активно используются в экономике (задача «продавец – покупатель»), юриспруденции (задача «истец – ответчик»), страховых моделях и др. Если для организации переговоров помимо участников привлекается еще одна независимая сторона – арбитр или несколько арбитров, то такие схемы называются арбитражными процедурами. В настоящее время они актуальны в связи с возникновением в глобальной сети Интернет виртуальных предприятий, в которых для решения различных практических вопросов могут использоваться многоагентные системы. Агенты могут решать как задачи распределения некоторого ресурса, так и проведения конкурсов, составления расписаний, очередности решения задач и др.

Существуют различные модели арбитражных процедур. Наиболее популярна арбитражная процедура по последнему предложению (FOA) [2], [4], [5], [6]. Кроме нее используется схема согласительного арбитража [5], арбитражные процедуры с наказанием [3] и различные комбинированные процедуры [1], [7], [8]. Заметим, что решение в арбитражных процедурах сильно зависит от вида распределения решения арбитра. Большинство работ в этой области касаются моделей с непрерывным распределением решения арбитра. В этом случае равновесие лежит среди чистых стратегий. В работах [1], [7] для дискретного распределения, сосредоточенного в нечетном числе точек, было показано, что равновесие достигается в смешанных стратегиях. При этом не накладывалось никаких ограничений на множество предложений игроков. В работе [8] было найдено равновесие в арбитражной процедуре, где стратегии игроков выбирались из заданных множеств X и Y . В работе [9]

были исследованы арбитражные процедуры, в которых решение принималось не одним арбитром, а арбитражным комитетом. В данной работе мы исследуем арбитражную игру, в которой решение осуществляется комитетом, состоящим из нескольких членов. Используется арбитражная процедура по последнему предложению, точнее, ее модификация. Решение каждого из арбитров моделируется независимыми случайными величинами с одинаковым распределением. Мы будем искать равновесие в таких арбитражных играх в терминах задачи о зарплате, однако этот подход может быть применен и для других задач распределения ресурсов с участием арбитра.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается игра с нулевой суммой, в которой игроки I и II, именуемые соответственно как работник и работодатель, ведут переговоры об установлении заработной платы. Игрок I делает предложение x , а игрок II – предложение y . Мы будем предполагать, что x и y выбираются из заданных множеств X и Y на числовой оси. Если $x \leq y$, то конфликта нет и игроки соглашаются на выплату жалованья, равного

$$\frac{x+y}{2}.$$

Если же $x > y$, стороны апеллируют к арбитражному комитету.

Арбитражный комитет состоит из нескольких членов. Для простоты предположим, что их число нечетно и равно $2n+1$. Каждый из арбитров называет свое решение, а затем сравнивает его с предложениями игроков. В соответствии с арбитражной процедурой по последнему предложению будем считать, что член комитета голосует за того игрока, предложение которого ока-

залось ближе к его мнению. Решение принимается в соответствии с правилом большинства. Другими словами, в качестве решения принимается то предложение игрока, за которое проголосовали $n+1$ арбитров.

Предположим, что решения арбитров представлены независимыми случайными величинами $a_1, a_2, \dots, a_{2n+1}$ с непрерывными функциями распределения $F_1(a), F_2(a), \dots, F_{2n+1}(a)$. Тогда, если $x > y$, при процедуре арбитража по последнему предложению комитет выбирает предложение y , если решения по крайней мере $n+1$ арбитров

$$a_i < \frac{x+y}{2}, \quad i = i_1, i_2, \dots, i_k, \quad k \geq n+1,$$

в противном случае комитет выбирает x .

Равновесие в процедуре с комитетом было найдено в [8] для случая, когда все распределения $F_i(a)$ имеют одинаковую медиану.

Мы исследуем модифицированную процедуру с арбитражным комитетом. Согласно данной процедуре для арбитров, мнения которых попали в интервал предложений $[x, y]$, действуют правила арбитража по последнему предложению (FOA). Если же выбор члена комитета лежит вне данного промежутка, то в качестве решения полагаем

$$\frac{x+y}{2}.$$

Вначале мы исследуем модель с одним игроком, с тремя игроками, а затем рассмотрим общий случай.

МОДЕЛЬ С ОДНИМ АРБИТРОМ

Рассмотрим модифицированную арбитражную процедуру с одним арбитром. Следуя правилам процедуры, если решение арбитра принадлежит интервалу

$$\left[y, \frac{x+y}{2} \right),$$

то результатом процедуры будет y . Если же решение принадлежит интервалу

$$\left[\frac{x+y}{2}, x \right],$$

то x . В остальных случаях в качестве решения принимается полусумма предложений

$$\frac{x+y}{2}.$$

Тогда функция в игре принимает вид

$$\begin{aligned} H(x, y) = & y \left(F\left(\frac{x+y}{2}\right) - F(y) \right) + \\ & + x \left(F(x) - F\left(\frac{x+y}{2}\right) \right) + \frac{x+y}{2} (F(y) + 1 - F(x)). \end{aligned}$$

Из системы

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{x-y}{2} \left(f(x) - f\left(\frac{x+y}{2}\right) \right) + \frac{F(x)+F(y)}{2} - F\left(\frac{x+y}{2}\right) + \frac{1}{2} = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial y} = \frac{x-y}{2} \left(f(x) - f\left(\frac{x+y}{2}\right) \right) + \frac{F(x)+F(y)}{2} + F\left(\frac{x+y}{2}\right) + \frac{1}{2} = 0 \end{cases}$$

можно найти равновесие.

Пример 1. Если a имеет стандартное нормальное распределение, то из симметрии задачи следует $x = -y$ и система уравнений превращается в условие

$$x \left(1 - e^{-\frac{x^2}{2}} \right) = \sqrt{\frac{\pi}{2}}.$$

Отсюда находим точки $y^* \approx -1.667$, $x^* \approx 1.667$. Нетрудно проверить, что это равновесие в данной процедуре. Заметим, что в обычной FOA процедуре равновесием является

$$y^* = -\sqrt{\frac{\pi}{2}} \approx -1.253, \quad x^* = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \approx 1.253.$$

Таким образом, модифицированная процедура рекомендует игрокам делать большие предложения, чем ранее.

МОДЕЛЬ С ТРЕМЯ АРБИТРАМИ

Рассмотрим арбитражную процедуру с комитетом, состоящим из трех членов. Пусть $x < y$. Обозначим интервалы

$$\begin{aligned} L &= \left[y, \frac{x+y}{2} \right), R = \left[\frac{x+y}{2}, x \right] \text{ и} \\ u &= F\left(\frac{x+y}{2}\right) - F(y), \quad v = F(x) - F\left(\frac{x+y}{2}\right). \end{aligned}$$

Тогда решение комитета будет y , если решения всех трех арбитров попали в интервал L , вероятность этого u^3 . Или если решения двух из трех попали в L , а третьего нет, вероятность этого $C_3^2 u^2 (1-u)$. Или решение одного из трех лежит в L , а двух других не попали ни в L , ни в R , вероятность этого $C_3^1 u (1-u-v)^2$.

Итак, вероятность y есть

$$p_1 = u^3 + 3u^2(1-u) + 3u(1-u-v)^2.$$

Аналогично решение комитета будет x с вероятностью

$$p_2 = v^3 + 3v^2(1-v) + 3v(1-u-v)^2.$$

В остальных случаях примем решение равным

$$\frac{x+y}{2}.$$

Это произойдет с вероятностью $(1-p_1-p_2)$. Итак, функция выигрыша равна

$$H(x, y) = yp_1 + xp_2 + \frac{x+y}{2}(1-p_1 - p_2) = \frac{x+y}{2} + \frac{x-y}{2}\left(v^3 - u^3 + 3[v^2(1-v) - u^2(1-u)] + 3(v-u)(1-u-v)^2\right).$$

Равновесие может быть найдено из условий

$$\frac{\partial H(x, y)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial H(x, y)}{\partial y} = 0.$$

Для функции распределения симметричной формы относительно точки 0 в равновесии должно выполняться условие $x = -y$ и $u(x, y) = v(x, y)$. Нетрудно показать, что оптимальное решение x удовлетворяет уравнению

$$\frac{1}{2} + x(6v^2 - 6v + 3)(f(x) - f(0)) = 0,$$

где $v(x) = F(x) - F(0)$, $f(x) = F'(x)$.

Пример 2. Пусть $F(x)$ – функция стандартного нормального распределения. Тогда из уравнения находим $x^* \approx 1.352$. Отсюда равновесие здесь имеет вид $y^* \approx -1.352$, $x^* \approx 1.352$.

МОДЕЛЬ С $2n+1$ АРБИТРОМ

Теперь представим, что комитет состоит из $2n+1$ арбитра. Тогда окончательное решение комитета будет у в следующих случаях:

- если решения всех $2n+1$ арбитров попали в интервал L , вероятность этого u^{2n+1} ;
- если $2n$ решений попали в L , а одно нет, вероятность этого $C_{2n+1}^{2n}u^{2n}(1-u)$;
- если $2n-1$ решений попали в L , а два других не попали в L , вероятность этого $C_{2n+1}^{2n-1}u^{2n-1}(1-u)^2$;
- и так далее...
- ...
- если $n+1$ попали в L , а другие n не попали в L , вероятность этого $C_{2n+1}^{n+1}u^{n+1}(1-u)^n$.

Кроме того, решение будет у в следующих случаях:

- если решения n арбитров попали в L (вероятность этого события равна $C_{2n+1}^n u^n$), из других $n+1$ ровно j попали в R , а оставшиеся $n+1-j$ не попали ни в L , ни в R , где $j = 0, \dots, n-1$. Вероятность этого события равна $(1-u-v)^{n+1} + C_{n+1}^1 v(1-u-v)^n + \dots + C_{n+1}^{n-1} v^{n-1}(1-u-v)^2$;
- если $n-1$ решений попали в L (вероятность этого события равна $C_{2n+1}^{n-1}u^{n-1}$), из других $n+2$ решений ровно j попали в R , а оставшиеся $n+2-j$ не попали ни в L , ни в R , где $j = 0, \dots, n-2$. Вероятность этого события равна $(1-u-v)^{n+2} + C_{n+2}^1 v(1-u-v)^{n+1} + \dots + C_{n+2}^{n-2} v^{n-2}(1-u-v)^4$;
- и так далее...
- ...

- если решение одного из арбитров попало в L (с вероятностью $C_{2n+1}^1 u$), а другие $2n$ решения не попали ни в L , ни в R , вероятность этого $(1-u-v)^{2n}$.
- Следовательно, вероятность выбора у равна

$$p_1 = \sum_{i=1}^{n+1} C_{2n+1}^{n+i} u^{n+i} (1-u)^{n-i+1} + \sum_{i=1}^n C_{2n+1}^i u^i \sum_{j=0}^{i-1} C_{2n+1-i}^j v^j (1-u-v)^{2n+1-i-j}.$$

Аналогично, вероятность выбора x равна

$$p_2 = \sum_{i=1}^{n+1} C_{2n+1}^{n+i} v^{n+i} (1-u)^{n-i+1} + \sum_{i=1}^n C_{2n+1}^i v^i \sum_{j=0}^{i-1} C_{2n+1-i}^j u^j (1-u-v)^{2n+1-i-j}.$$

В остальных случаях будет

$$\frac{x+y}{2}.$$

Таким образом, функция выигрыша в данной игре имеет вид

$$H(x, y) = \frac{x+y}{2} + \frac{x-y}{2} \left[\sum_{i=1}^{n+1} C_{2n+1}^{n+i} \left(v^{n+i} (1-v)^{n-i+1} - u^{n+i} (1-u)^{n-i+1} \right) + \sum_{i=1}^n C_{2n+1}^i \sum_{j=0}^{i-1} C_{2n+1-i}^j (1-u-v)^{2n+1-i-j} (v^i u^j - v^j u^i) \right]. \quad (1)$$

Обозначим выражение в квадратных скобках равенства (1) как $S(v, u)$. Легко видеть, что $S(v, u)$ антисимметрична, то есть $S(v, u) = -S(u, v)$. Тогда для $v = u$ имеем $S(u, u) = 0$.

Чтобы найти равновесие, продифференцируем (1) по x и y . Получим

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} S(v, u) + \frac{x-y}{2} \left[\frac{\partial S}{\partial v} \left(f(x) - \frac{1}{2} f\left(\frac{x+y}{2}\right) \right) + \frac{1}{2} \frac{\partial S}{\partial u} f\left(\frac{x+y}{2}\right) \right]$$

и

$$\frac{\partial H}{\partial y} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} S(v, u) - \frac{x-y}{2} \left[\frac{1}{2} \frac{\partial S}{\partial v} f\left(\frac{x+y}{2}\right) + \frac{\partial S}{\partial u} \left(f(y) - \frac{1}{2} f\left(\frac{x+y}{2}\right) \right) \right].$$

Ограничимся рассмотрением симметричного случая, когда распределение $F(x)$ имеет симмет-

ричный вид относительно нуля. Тогда из симметрии следует, что в равновесии $x = -y$ и $u = v$. Тогда из системы

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial y} = 0 \end{cases}$$

находим условие для равновесия. Заметим, что поскольку $S(v, u) = -S(u, v)$, то

$$\frac{\partial S(v, u)}{\partial v} = -\frac{\partial S(u, v)}{\partial u}.$$

Отсюда при $u = v$ и $x = -y$ вытекает

$$\frac{1}{2} + x(f(x) - f(0)) \frac{\partial S(v, v)}{\partial v} = 0. \quad (2)$$

Из (1) находим

$$\begin{aligned} \frac{\partial S(v, v)}{\partial v} &= \sum_{i=1}^n C_{2n+1}^i \sum_{j=0}^{i-1} C_{2n+1-i}^j (1-2v)^{2n+1-i-j} (i-j) v^{i+j-1} + \\ &+ \sum_{i=1}^{n+1} C_{2n+1}^{n+i} v^{i+j-1} (1-v)^{n-i} ((n+i)(1-v) - (n-i+1)v). \end{aligned} \quad (3)$$

Равенства (2)–(3) могут быть использованы для вычисления численных значений оптимальных стратегий в данной игре.

В таблице приведены вычисленные оптимальные стратегии для различных n . Можно заметить, что при увеличении числа арбитров оптимальные стратегии сходятся.

Данная работа выполнена при финансировании Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 1.8.10) и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-01-90709-моб_ст).

Оптимальные стратегии игроков в зависимости от числа арбитров

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x^*	1.667	1.352	1.203	1.111	1.047	1.000	0.962	0.932	0.906	0.884	0.864
y^*	-1.667	-1.352	-1.203	-1.111	-1.047	-1.000	-0.962	-0.932	-0.906	-0.884	-0.864

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Мазалов В. В., Менчер А. Э., Токарева Ю. С. О равновесии в модели переговоров с арбитром // Известия РАН. Теория и системы управления. 2009. № 5. С. 69–75.
- Chatterjee K. Comparison of arbitration procedures: Models with complete and incomplete information // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1981. Vol. 11. № 2. P. 101–109.
- Dao-Zhi Zeng. An amendment to final-offer arbitration // Working paper. Kagawa: Kagawa University, 2006.
- Farber H. An analysis of final-offer arbitration // Journal of conflict resolution. 1980. Vol. 24. № 4. P. 683–705.
- Gibbons R. A. Primer in game theory // Prentice Hall. N. Y., 1992. 273 p.
- Kilgour D. M. Game-theoretic properties of final-offer arbitration // Group Decision and Negot. 1994. № 3. P. 285–301.
- Mazalov V. V., Mentcher A. E., Tokareva J. S. Equilibrium in a discrete arbitration procedure // Scientiae Mathematicae Japonicae. 2006. № 63(3). P. 283–288.
- Mazalov V. V., Tokareva J. S. Equilibrium in combined arbitration procedure // Proc. II International Conf. in Game Theory and Applications. Qingdao, China. Sept. 17–19 (2007). P. 186–188.
- Mazalov V. V., Tokareva J. S. Bargaining model on the plane // Algorithmic and Computational Theory in Algebra and Languages (RIMS Kokyuroky 1604). Kyoto: Kyoto University, 2008. P. 42–49.

ЛЮДМИЛА ВЛАДИМИРОВНА ЩЕГОЛЕВА

кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет
schegoleva@psu.karelia.ru

ЗАДАЧА ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКА РАБОТЫ НЕСКОЛЬКИХ ПЕРЕДВИЖНЫХ УСТАНОВОК

В статье рассматривается модификация задачи маршрутизации с временными окнами, включающая дополнительные ограничения на пребывания в пунктах и технико-экономические характеристики передвижных установок. Предлагаются две модели, описывающие различные постановки задачи, и соответствующие алгоритмы их решения.

Ключевые слова: задача маршрутизации с временными окнами, математическая модель, алгоритм

Рассмотрим задачу построения графика работы нескольких передвижных установок, обслуживающих территориально распределенные пункты. Под графиком работы подразумевается время прибытия установки в пункт и продолжительность работы установки в пункте. Передвижение установок осуществляется по транспортной сети, в которой для каждой пары пунктов известно расстояние. Маршрут каждой установки должен начинаться и заканчиваться в заданном пункте, который будем называть базой. В каждый пункт установка должна попасть не позднее заданного времени, опоздания не допускаются. Особенность этой задачи заключается в том, что, прибыв в пункт, установка должна выполнить работу, на которую затрачивается определенное время, причем установки обладают разной производительностью, то есть затрачивают разное время на выполнение одной и той же работы, а также разной стоимостью работы в пункте и стоимостью перемещения из пункта в пункт. Ограничение на выполнение работы отличает рассматриваемую задачу от задачи маршрутизации нескольких коммивояжеров с центральной базой и с временными окнами [1].

Приложением такой задачи является задача определения графика перемещений между несколькими удаленными котельными передвижных рубильных машин для производства щепы энергетического назначения. Известны запасы щепы на начало периода планирования и количество щепы, которое необходимо произвести для обеспечения ежедневных потребностей котельных [3].

В приложении задачи для рубильных машин ничего не говорится о том, сколько раз необходимо посетить каждый пункт. Самый простой вариант предполагает единственное посещение каждого пункта. Построим модель такой задачи.

Пусть M – множество пунктов, тогда $m = |M|$ – количество пунктов; N – множество установок, $n = |N|$ – их количество; T – период планирования; V_k – скорость перемещения установки k ; P_k – производительность установки k ; C_k –

затраты на выполнение единицы работы установкой k ; D_k – затраты на перемещение установки k на единицу расстояния; A_{0i} или A_{i0} – расстояние от пункта i до базы; A_{ij} – расстояние от пункта i до пункта j ; T_i – самое позднее время прибытия установки в пункт i ; W_i – объем работы, который необходимо выполнить в пункте i .

Для решения задачи требуется разбить множество пунктов на непересекающиеся подмножества, каждое из которых будет обслуживать одна установка. Кроме этого, необходимо определить маршрут движения каждой установки, который представляет собой упорядоченную последовательность пунктов. Обозначим через H_{sk} подмножество пунктов в разбиении s , обслуживаемых установкой с номером k .

Тогда

$$\begin{aligned} \bigcup_{k=1}^n H_{sk} &= M \text{ и } H_{sk} \cap H_{sr} = \emptyset \text{ для} \\ k \neq r, m_{sk} &= |H_{sk}|, k = \overline{1, n}, \sum_{k=1}^n m_{sk} = m. \end{aligned} \quad (1)$$

Обозначим через $z^{sk} = (i_1^{sk}, i_2^{sk}, \dots, i_{m_{sk}}^{sk})$ (2) перестановку элементов множества H_{sk} .

Введем переменную t_j – момент прибытия установки в пункт j .

Задача заключается в определении такого разбиения $\{H_{sk}\}$, перестановок $\{z^{sk}\}$ для каждого подмножества в разбиении и значений времени прибытия установок в каждый пункт перестановки $\{z^{sk}\}$, чтобы выполнялись следующие условия.

- Прибытие в пункт должно быть не позднее момента T_j :

$$t_j \leq T_j, j = 1..m. \quad (3)$$

- Прибытие в первый пункт маршрута должно быть равно времени на перемещение установки от базы до первого пункта маршрута:

$$t_{i_1^{sk}} \geq \frac{A_{0i_1^{sk}}}{V_k} \text{ для } m_{sk} > 0, k = 1..n. \quad (4)$$

- Прибытие установки в следующий пункт маршрута должно быть позднее момента времени, когда установка выполнит необходимую работу, плюс время на перемещение установки из текущего пункта в следующий пункт:

$$t_{i_j^{sk}} + \frac{W_{i_j^{sk}}}{P_k} + \frac{A_{i_j^{sk} i_{j+1}^{sk}}}{V_k} \leq t_{i_{j+1}^{sk}} \text{ для } m_{sk} > 0, k = 1..n. \quad (5)$$

- Прибытие в последний пункт маршрута должно быть не позднее момента времени, когда до окончания периода планирования установка успеет выполнить работу в пункте и вернуться на базу:

$$t_{i_{m_{sk}}^{sk}} + \frac{W_{i_{m_{sk}}^{sk}}}{P_k} + \frac{A_{i_{m_{sk}}^{sk} 0}}{V_k} \leq T \text{ для } m_{sk} > 0, k = 1..n. \quad (6)$$

- Значения t_j должны быть целыми и неотрицательными. (7)

Целевая функция минимизирует суммарные по всем установкам затраты на перемещение установки из пункта в пункт согласно маршруту: из последнего пункта маршрута установки к базе, от базы к первому пункту маршрута установки, а также затраты на выполнение работы в каждом пункте:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n A_{0 i_1^{sk}} \cdot D_k + \sum_{k=1}^n A_{i_{m_{sk}}^{sk} 0} \cdot D_k + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^{m_{sk}-1} A_{i_j^{sk} i_{j+1}^{sk}} \cdot D_k + \\ + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^{m_{sk}} W_{i_j^{sk}} \cdot C_k \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (8)$$

Точный алгоритм решения задачи (1)–(8) заключается в переборе всех возможных разбиений множества пунктов и переборе всех возможных перестановок пунктов, входящих в сформированное подмножество $H_{sk} - \{ z^{sk} \}$, расчете для них значений переменных $t_{i_j^{sk}}$ на основе ограничений (4), (5) и проверки выполнения условий (3), (6). Блок-схема алгоритма решения задачи (1)–(8) (Алгоритм 1) представлена на рис. 1.

Предложенный алгоритм, обеспечивающий точное решение задачи, имеет высокую вычислительную сложность. Программная реализация алгоритма при небольших размерностях задачи: количестве пунктов менее 13 и количестве установок менее 5, имеет приемлемое время вычисления.

Для большего количества пунктов можно применить модификации эвристических алгоритмов решения задачи коммивояжера, такие как алгоритмы перехода в ближайшую точку, локальной оптимизации, генетические алгоритмы и др. [2], [4].

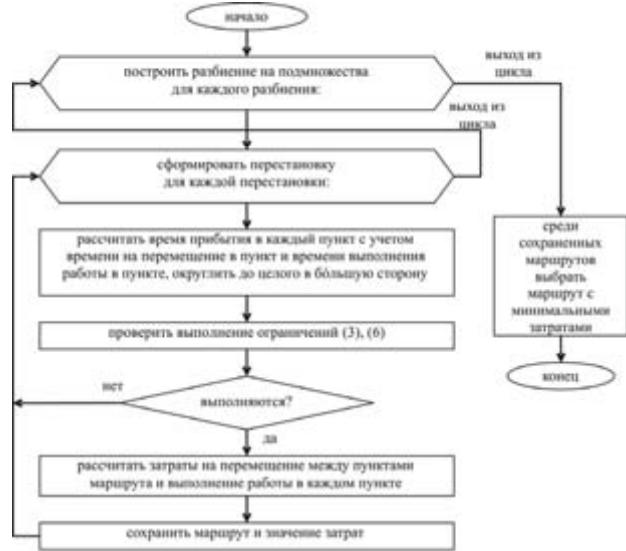


Рис. 1. Блок-схема алгоритма решения задачи без повторных посещений (Алгоритм 1)

Рассмотрим применение алгоритма перехода в ближайшую точку для построенной модели задачи. Суть алгоритма для решения задачи коммивояжера заключается в выборе начального пункта, а затем в последовательном поиске ближайшего пункта по отношению к выбранному на предыдущем шаге. Так как построенная модель отличается от задачи коммивояжера дополнительными условиями, связанными со временем прибытия установки в каждый пункт, под «ближайшим» пунктом будем понимать тот, у которого время наиболее позднего прибытия в него установки является наиболее близким ко времени наиболее позднего прибытия установки в рассматриваемый пункт.

Если рассмотреть задачу, в которой один из пунктов посещается одной и той же установкой дважды, то есть работа в этом пункте выполняется в два этапа, то разумно предположить, что повторный приезд не повлечет за собой дополнительных затрат на выполнение работы, так ее объем не меняется, но может повлечь дополнительные затраты на перемещение установки, кроме случая, когда несколько пунктов связывают одна дорога и перемещение установки в следующий пункт маршрута происходит через ранее уже посещенные пункты, и тогда затраты будут равными. Обоснуем это предположение.

Утверждение. Затраты на перемещение установки при повторном посещении одного из пунктов будут не меньше, чем затраты на перемещение установки без повторного посещения пунктов.

Доказательство. Пусть установка выезжает из пункта 1 и должна возвратиться в пункт 1. Установка должна посетить три пункта: 2, 3, 4. Для каждой пары пунктов определены расстояния между ними, равные a_{ij} ; и матрица расстояний симметричная. Затраты на перемещение пропор-

циональны расстоянию. Иногда между двумя пунктами проходит через третий пункт, в этом случае будем считать, что третий пункт не посещается второй раз, а расстояние между пунктами равно сумме расстояний от каждого из этих пунктов до третьего (например, $a_{12} + a_{23} = a_{13}$).

Итак, пусть, не снижая общности, оптимальный по длине маршрут без повторных посещений соответствует перестановке пунктов (1, 2, 3, 4, 1). Опять же не снижая общности, предположим, что в пункт 2 установка заезжает дважды, тогда возможны четыре варианта оптимального маршрута задачи с повторным посещением.

1. Маршрут в целом совпадает с оптимальным маршрутом без повторного посещения, но между какими-то двумя пунктами вклинивается пункт, посещаемый дважды, например (1, 2, 3, 2, 4, 1).
2. Маршрут в целом совпадает с оптимальным маршрутом без повторного посещения, а повторно посещаемый пункт посещается сразу, например (1, 2, 2, 3, 4, 1).
3. Маршрут полностью меняется, повторно посещаемый пункт посещается сразу, например (1, 3, 2, 4, 2, 1).
4. Маршрут полностью меняется, повторно посещаемый пункт посещается сразу, например (1, 3, 2, 2, 4, 1).

Для случая 1 расстояние $a_{12} + a_{23} + a_{32} + a_{24} + a_{41}$ будет больше или равно расстоянию $a_{12} + a_{23} + a_{34} + a_{41}$ по правилу треугольника $a_{32} + a_{24} \geq a_{34}$. Следовательно, затраты с повторно посещаемым пунктом будут не меньше.

Для случая 2, так как $a_{22} = 0$, затраты будут такими же, то есть не меньше.

Для случая 3 рассмотрим расстояние $a_{13} + a_{32} + a_{24} + a_{42} + a_{21} \geq a_{13} + a_{32} + a_{24} + a_{41}$ по правилу треугольника $a_{42} + a_{21} \geq a_{41}$. Далее $a_{13} + a_{32} + a_{24} + a_{41} \geq a_{12} + a_{23} + a_{34} + a_{41}$, так как маршрут (1, 2, 3, 4, 1) является оптимальным, то есть имеющим минимальную длину. Следовательно, $a_{13} + a_{32} + a_{24} + a_{42} + a_{21} \geq a_{12} + a_{23} + a_{34} + a_{41}$, тогда затраты с повторно посещаемым пунктом будут не меньше.

Для случая 4 рассмотрим расстояние $a_{13} + a_{32} + a_{22} + a_{24} + a_{41} = a_{13} + a_{32} + a_{24} + a_{41}$, так как $a_{22} = 0$. Далее $a_{13} + a_{32} + a_{24} + a_{41} \geq a_{12} + a_{23} + a_{34} + a_{41}$, так как маршрут (1, 2, 3, 4, 1) является оптимальным, то есть имеющим минимальную длину. Следовательно, $a_{13} + a_{32} + a_{22} + a_{24} + a_{41} \geq a_{12} + a_{23} + a_{34} + a_{41}$, тогда затраты с повторно посещаемым пунктом будут не меньше. \square

Для случая работы двух установок с различными затратами на перемещение, различными затратами на выполнение работы и различной производительностью в силу ограничений на время прибытия установки в пункт суммарные затраты на перемещение и выполнение работы могут оказаться и меньше при повторном посещении, чем затраты без повторного посещения. В целом же разумно предположить, что затраты

начнут возрастать с ростом количества повторно посещаемых пунктов. Однако это предположение требует дальнейшего исследования.

Рассмотрим пример, когда суммарные затраты на перемещение и производство будут меньше в случае с одним повторным посещением, чем затраты без повторных посещений.

Исходные данные задачи включают три пункта и две установки с равными скоростями перемещения и стоимостями перемещения, с равными производительностями, но разными стоимостями работы. Пусть период планирования Т составляет всего 14 часов.

Тогда $m = 3$; $n = 2$; $V_1 = V_2 = 1$ км/час; $P_1 = P_2 = 1$ руб./час; $D_1 = D_2 = 1$ руб./км; $C_1 = 1$ руб.; $C_2 = 0,9$ руб.

Поскольку установки обладают равными производительностями, продолжительности работы в каждом пункте для обеих установок совпадают.

Графическое расположение пунктов представлено на рис. 2.

Рассмотрим решение задачи для случая посещения каждого пункта только один раз. В этом случае количество всех возможных разбиений будет равно 8.

Из таблицы видно, что минимальное значение целевой функции составляет 20,3 руб. Ему соответствует оптимальное решение, включающее два маршрута: маршрут для первой установки – База → Пункт 3 → База, маршрут для второй установки – База → Пункт 1 → Пункт 2 → База.

Рассмотрим решение задачи для случая посещения одного из пунктов повторно. Не будем приводить полный список допустимых решений, приведем два допустимых решения, значения целевой функции на которых будут меньше оптимального значения целевой функции для задачи без повторных посещений.

Матрица расстояний между пунктами и каждым пунктом и базой

	0 – база	Пункт 1	Пункт 2	Пункт 3
0 – база	0	1 км	2 км	3 км
Пункт 1	1 км	0	1 км	2 км
Пункт 2	2 км	1 км	0	1 км
Пункт 3	3 км	2 км	1 км	0

Время прибытия и объем работы

Пункт	Объем работы	Самое позднее время прибытия
1	$W_1 = 2$	$T_1 = 1$
2	$W_2 = 5$	$T_2 = 5$
3	$W_3 = 4$	$T_3 = 7$

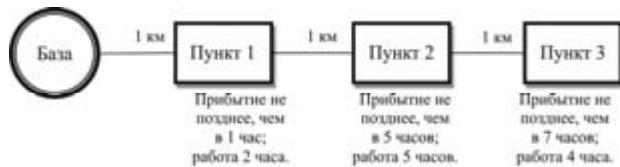


Рис. 2. Графическое представление расположения пунктов

Решение 1. Первая установка следует по маршруту: База → Пункт 1 → Пункт 2 → База. В Пункте 2 установка работает только 1 час. Затраты составят: $1 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 2 \cdot 1 = 7$ руб. Вторая установка следует по маршруту: База → Пункт 2 → Пункт 3 → База. В Пункте 2 установка работает только 4 часа, чтобы не опоздать в Пункт 3. Затраты составят: $2 \cdot 1 + 4 \times 0,9 + 1 \cdot 1 + 4 \cdot 0,9 + 3 \cdot 1 = 13,2$ руб.

Суммарные затраты составят: $7 + 13,2 = 20,2$ руб., что на 0,1 руб. меньше, чем оптимальное значение целевой функции для задачи без повторных посещений.

Решение 2. Первая установка следует по маршруту: База → Пункт 2 → База. В Пункте 2 уста-

новка работает только 3 часа. Затраты составят: $2 \cdot 1 + 3 \cdot 1 + 2 \cdot 1 = 7$ руб. Вторая установка следует по маршруту: База → Пункт 1 → Пункт 2 → Пункт 3 → База. В Пункте 2 установка работает только 2 часа, чтобы не опоздать в Пункт 3. Затраты составят: $1 \cdot 1 + 2 \cdot 0,9 + 1 \cdot 1 + 2 \cdot 0,9 + 1 \cdot 1 + 4 \cdot 0,9 + 3 \cdot 1 = 13,2$ руб.

Суммарные затраты составят: $7 + 13,2 = 20,2$ руб., что на 0,1 руб. меньше, чем оптимальное значение целевой функции для задачи без повторных посещений.

Таким образом, суммарные затраты на перемещение и производство в задаче с одним повторным посещением могут быть меньше, чем суммарные затраты в задаче без повторного посещения.

Допустимые решения задачи без повторных посещений

№ разбиения	Разбиение		Значение целевой функции
	Установка 1	Установка 2	
1	{1, 2, 3} Установка не успеет вовремя прийти во все пункты	{ }	Нет решения
2	{1, 2} Маршрут 0→1→2→0: затраты = $1 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 5 \cdot 1 + 2 \cdot 1 = 11$; маршрут 0→2→1→0: опоздание в пункт 1	{3} Маршрут 0→3→0: затраты = $3 \cdot 1 + 4 \cdot 0,9 + 3 \cdot 1 = 9,6$	Суммарные затраты: $11 + 9,6 = 20,6$ руб.
3	{1, 3} Маршрут 0→1→3→0: затраты = $1 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 4 \cdot 1 + 3 \cdot 1 = 12$; маршрут 0→3→1→0: опоздание в пункт 1	{2} Маршрут 0→2→0: затраты = $2 \cdot 1 + 5 \cdot 0,9 + 2 \cdot 1 = 8,5$	Суммарные затраты: $12 + 8,5 = 20,5$ руб.
4	{2, 3} Маршрут 0→2→3→0: опоздание в пункт 3; маршрут 0→3→2→0: опоздание в пункт 2	{1} Маршрут 0→1→0: затраты = $1 \cdot 1 + 2 \cdot 0,9 + 1 \cdot 1 = 3,8$	Нет решения
5	{ }	Установка не успеет вовремя прийти во все пункты	Нет решения
6	{1} Маршрут 0→1→0: затраты = $1 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 1 \cdot 1 = 4$	{2, 3} Маршрут 0→2→3→0: опоздание в пункт 3; маршрут 0→3→2→0: опоздание в пункт 2	Нет решения
7	{2} Маршрут 0→2→0: затраты = $2 \cdot 1 + 5 \cdot 1 + 2 \cdot 1 = 9$	{1, 3} Маршрут 0→1→3→0: затраты = $1 \cdot 1 + 2 \cdot 0,9 + 2 \cdot 1 + 4 \cdot 0,9 + 3 \cdot 1 = 11,4$;	Суммарные затраты: $9 + 11,4 = 20,4$ руб.
8	{3} Маршрут 0→3→0: затраты = $3 \cdot 1 + 4 \cdot 1 + 3 \cdot 1 = 10$	{1, 2} Маршрут 0→1→2→0: затраты = $1 \cdot 1 + 2 \cdot 0,9 + 1 \cdot 1 + 5 \cdot 0,9 + 2 \cdot 1 = 10,3$;	Суммарные затраты: $10 + 10,3 = 20,3$ руб.

Построим математическую модель для задачи, когда дважды посещается только один пункт, причем заранее неизвестно, какой именно. Первое посещение этого пункта должно быть не позднее момента времени T_j . Продолжительность первого пребывания в пункте зависит от момента времени второго посещения и должно быть таким, чтобы результатов работы установки при первом посещении хватило до второго посещения, время которого заранее неизвестно и зависит от стоимости работы и стоимости перемещения установки.

Тогда, если H_{sk} – подмножество пунктов в разбиении s , обслуживаемых установкой с номером k , для разбиения s должны выполняться условия:

$$\bigcup_{k=1}^n H_{sk} = M . \quad (9)$$

Существует единственный пункт $j \in M$, для которого есть два подмножества H_{sk} и H_{sr} , такие, что $H_{sk} \cap H_{sr} = \{j\}$, для остальных подмножеств выполняется условие:

$$H_{sk} \cap H_{sr} = \emptyset \text{ для } k \neq r, \quad (10)$$

$$\text{если } m_{sk} = |H_{sk}|, \quad k = \overline{1, n}, \quad \sum_{k=1}^n m_{sk} = m + 1. \quad (11)$$

Решение задачи (2)–(11) попытаемся свести к решению задачи (1)–(8). Рассмотрим пункт, который посещается дважды, пусть его номер равен j , как два разных пункта (j) и $(m + 1)$, тем самым увеличится размерность задачи. Расстояния от дополнительного пункта $(m + 1)$ до всех остальных пунктов совпадают с расстояниями от пункта (j) до всех остальных пунктов. Расстояние от пункта (j) до пункта $(m + 1)$ равно нулю.

При фиксированном дополнительном пункте $(m + 1)$ задача (2)–(11) почти сводится к задаче (1)–(8) с увеличенным на единицу количеством пунктов.

В процессе решения задачи для построенных разбиения и последовательности обхода пунктов (перестановки) необходимо произвести дополнительные расчеты для пунктов (j) и $(m + 1)$ следующих значений: продолжительность пребывания в пункте, объем работы. Эти значения носят динамический характер, так как зависят от технических и экономических характеристик установки и времени прибытия в пункт, поэтому они должны рассчитываться в процессе решения задачи.

Пусть сначала по времени установка приезжает в пункт (j), а затем в пункт $(m + 1)$.

Для приложения задачи к рубильным машинам продолжительность пребывания машины в пункте (j) должна быть такой, чтобы произведенной щепы хватило для работы котельной до следующего посещения, а не на весь период планирования. Продолжительность пребывания

в пункте $(m + 1)$ должна быть такой, чтобы хватило щепы до конца периода планирования, плюс требуемый исходный для пункта (j) объем щепы на конец периода планирования, а также не на весь период планирования.

Кроме этого, на продолжительность пребывания в пункте влияет то, какая установка в нем работает. Выгоднее, чтобы дольше работала та установка, стоимость работы которой меньше. Если в пункте (j) работает более дорогая установка, то продолжительность работы в этом пункте должна соответствовать наиболее раннему прибытию более дешевой установки в пункт $(m + 1)$. Если, наоборот, в пункте (j) работает более дешевая установка, то продолжительность работы в этом пункте должна быть максимальной, то есть необходимо определить резерв по времени прибытия для пунктов, следующих за посещением пункта (j), и минимальный из них добавить ко времени пребывания установки в пункте (j).

Если сначала по времени установка приезжает в пункт $(m + 1)$, а затем в пункт (j), то все рассуждения сохраняются, только пункты в них меняются местами.

В общем случае может получиться так, что две установки будут какое-то время работать в одном пункте одновременно. Если такое невозможно в силу технических особенностей пункта, то придется наложить еще одно ограничение на время прибытия установки в пункт.

Теперь осталось перебрать все пункты, каждый из которых поочередно сделать дополнительным, и решить задачу, выбрав наилучший с точки зрения критерия оптимальности (8) вариант.

Блок-схема алгоритма решения задачи (2)–(11) (Алгоритм 2) представлена на рис. 3.

Вычислительная сложность Алгоритма 2 еще выше, чем Алгоритма 1. Добавление еще одного пункта в алгоритме перебора всех разбиений и всех последовательностей обхода приводит к сокращению количества исходных рассматриваемых пунктов, иначе время работы программы, реализующей алгоритм, становится непреодолимым.

При некоторых значениях исходных данных оптимальное решение задачи (1)–(8) может полностью совпадать с оптимальным решением задачи (2)–(11). В этом случае в оптимальном решении задачи (2)–(11) будет подмножество пунктов, в котором пункт, посещаемый дважды, будет стоять в перестановке на соседних позициях. Это означает, что установка не будет покидать данный пункт, а отработает в нем весь требуемый промежуток времени, а это и есть решение задачи (1)–(8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели две модели задачи построения графика работы нескольких передвижных установок, обслуживающих территориально удаленные пункты: с единственным посещением

каждого пункта (1)–(8) и одним дважды посещаемым пунктом (2)–(11). Эти задачи являются расширениями задачи маршрутизации с временными окнами. Расширение заключается в дополнительном ограничении на выполнение ра-

боты в каждом пункте, продолжительность выполнения которой зависит от технических характеристик установок, и учете в целевой функции затрат не только на перемещение установок между пунктами, но и на выполнение работы.

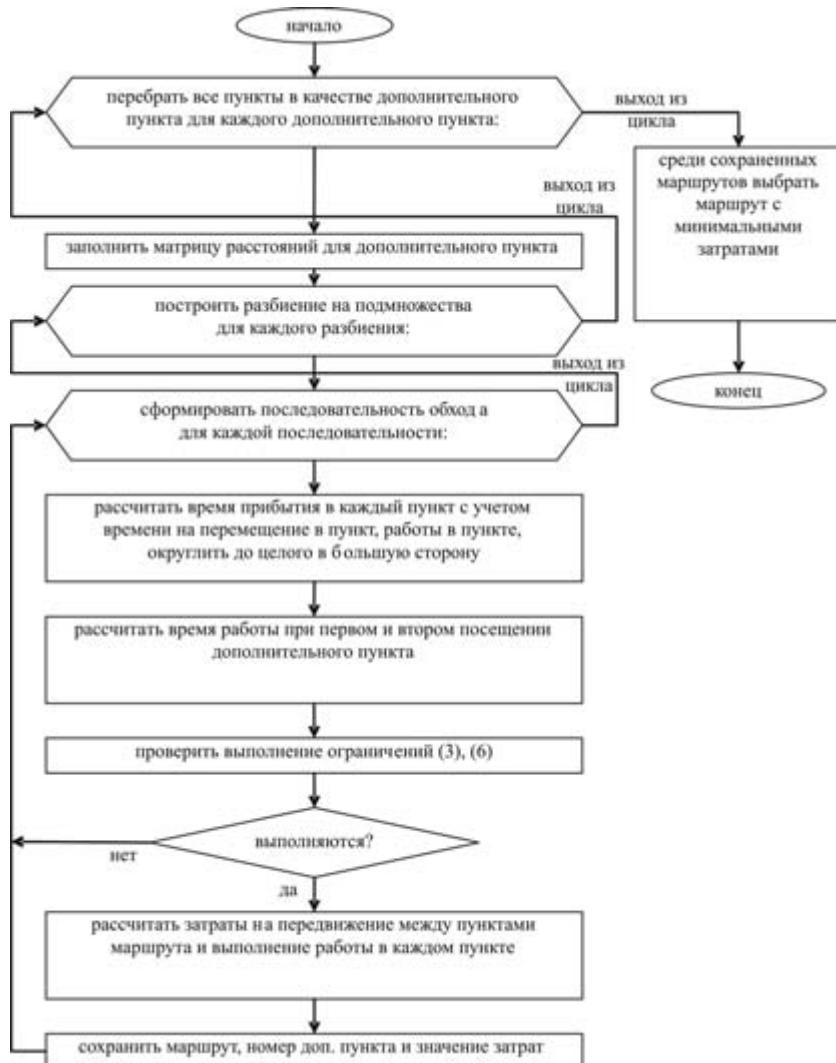


Рис. 3. Блок-схема алгоритма решения задачи с одним дважды посещаемым пунктом (Алгоритм 2)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меламед И. И., Сергеев С. И., Сигал И. Х. Задача коммивояжера. Вопросы теории // Автоматика и телемеханика. 1989. № 9. С. 3–33.
2. Меламед И. И., Сергеев С. И., Сигал И. Х. Задача коммивояжера. Приближенные алгоритмы // Автоматика и телемеханика. 1989. № 11. С. 3–26.
3. Полежаев К. В., Щеголева Л. В. Задача оптимизации функционирования передвижной рубительной машины для производства щепы в топливно-энергетическом комплексе Республики Карелия // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2006. Вып. 178. С. 120–125.
4. Сигал И. Х., Иванова А. П. Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные алгоритмы: Учеб. пособие. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 240 с.

ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ЛОГИНОВ

аспирант кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет

logindm@mail.ru

ЛЮДМИЛА АЛЕКСАНДРОВНА АЛЕШИНА

кандидат физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет

aleshina@psu.karelia.ru

АНАТОЛИЙ ДМИТРИЕВИЧ ФОФАНОВ

доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет

afofanov@psu.karelia.ru

МОДЕЛИ СТРОЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ КОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ АНТРАЦИТА, СТЕКЛОУГЛЕРОДА И ШУНГИТА

Проведены рентгенографические исследования и рассчитаны методом Финбака радиусы координационных сфер и координационные числа для образцов антрацита, стеклоуглерода и шунгита. Построены компьютерные модели, характеризующие расположение атомов в области ближнего упорядочения. Показано, что модельные кластеры для разных веществ имеют свою структуру.

Ключевые слова: углерод, антрацит, стеклоуглерод, шунгит, рентгеноструктурный анализ

Углеродные материалы находят широкое применение в современных высоких технологиях, в различных отраслях машиностроения и электротехники, атомной и космической промышленности [4]. В настоящее время принято считать, что аморфный углерод в различных природных и синтетических формах по своей структуре приближается к графиту в разной степени [7]. Поэтому для более полной характеристики строения углеродных материалов необходимо проводить рентгенодифракционные исследования их структуры [4].

В работе исследовались образцы природных углеродных материалов (антрацита и шунгита) и синтетического происхождения (стеклоуглерода). Из антрацита и шунгита были получены порошки, из которых были изготовлены плоскопараллельные пластинки. Образец стеклоуглерода представлял собой плоскопараллельную пластинку стеклографита марки СУ-2000. Изотропию объектов исследования доказывало совпадение исправленных на поглощение кривых распределения, полученных в геометриях Лаэ и Брэгга.

Интенсивность рассеяния регистрировалась на дифрактометре ДРОН-6 в MoK_α излучении монохроматизированном кристаллом пиролитического графита, установленным в первичных лучах. В экспериментальные кривые, усредненные по 10 съемкам, вводились поправки на рассеяние воздухом, поляризацию и поглощение.

$$D(r) = \sum_{i=1}^M \frac{N_i}{r_i} P_i(r) = \sum_{i=1}^M \frac{N_i}{r_i} \int_0^{S_{\max}} \frac{f^2(S)}{g^2(S)} \exp(-\alpha^2 S^2) \exp(-\sigma_i^2 S^2) \sin(S r_i) \sin(S r) dS. \quad (1)$$

Коэффициент перевода в электронные единицы на атом рассчитывался по методу Уоррена [1], [8].

Из нормированных кривых распределения интенсивности $I(S)$ рассчитывалась S -взвешенная интерференционная функция: $H(S) = S i(S) \exp(-\alpha^2 S^2) g^2(S)$. Здесь $S = 4\pi \sin \theta / \lambda$ – длина дифракционного вектора, θ – угол скольжения рентгеновских лучей, λ – длина волны излучения, $g^2(S)$ – фактор обострения, повышающий контрастность интерференционной функции рассеяния $i(S) = I(S) - f_C(S)$ при больших значениях S ; $\exp(-\alpha^2 S^2)$ – фактор затухания, вводимый для уменьшения влияния ошибок эксперимента при больших значениях S .

Функция $H(S)$ является подынтегральной для расчета кривой распределения парных функций

$$D(r) : D(r) = 2 \cdot 2r \cdot eZC + \int_0^{S_{\max}} H(S) \sin(Sr) \cdot dS.$$

Коэффициент затухания α был выбран равным 0,1, а фактор обострения рассчитывался как эффективная функция рассеяния на электрон [1], [8].

Верхний предел интегрирования S_{\max} составлял $16,85 \text{ \AA}^{-1}$. При работе методом Финбака [1], [8] рассчитанная из $H(s)$ кривая $D(r)$ представляется в виде суммы парных функций $P_{ij}(r)$ [1], [8]. Для случая однокомпонентного материала выражение для $D(r)$ имеет вид:

Координационные числа N_i из системы уравнений (1) находились методом наименьших квадратов с использованием метода сингулярного разложения (SVD) матрицы. Радиусы координационных сфер в первом приближении задавались как средневесовые значения r_i^{kp} , рассчитанные для графита по методике, изложенной в [3]. Затем радиусы координационных сфер r_i и их размытия σ_i подбирались методом проб и ошибок [8].

Распределения интенсивности рассеяния $I(S)$ (рис. 1а) и соответствующие им кривые распределения S -звешенной интерференционной функции $H(S)$ (рис. 1б) различаются для всех трех исследованных объектов в первую очередь интенсивностью максимумов. Кроме того, первый максимум, характеризующий рассеяние пакетом графеновых сеток и имеющий индекса интерференции (002), на кривой рассеяния шунгитом заметно смещен в сторону больших углов рассеяния (рис. 1а).

Из полученных кривых $H(s)$ были рассчитаны кривые распределения парных функций $D(r)$ (рис. 2).

В таблице приведены результаты расчета характеристик ближнего порядка для исследуемых образцов. Степень несоответствия экспериментальной кривой ($D_{\text{эксп}}(r)$) и кривой $D_{\text{подб}}(r)$, рассчитанной по найденным значениям координационных чисел N_i и подобранным значениям радиусов r_i и размытий σ_i координационных сфер (см. таблицу), составила для антрацита 4,6 %, для стеклоуглерода 2,7 % и для шунгита 4,9 %.

Здесь r_i^{kp} и N_i^{kp} – средневесовые значения радиусов координационных сфер и суммарные координационные числа для гексагонального графита. Первые три радиуса координационных сфер характеризуют углеродное кольцо графеновой сетки. Значение кратчайшего расстояния между атомами углерода выше, чем в графите: на 14 % для шунгита и антрацита и на 20 % для стеклоуглерода. Радиус первой координационной сферы для антрацита, а также координационное число согласуются с данными, приведенными в работе [5]. Уменьшение первого координационного числа по сравнению с графитом может быть обусловлено конечным размером графеновых сеток. Наиболее высокие значения радиуса второй координационной сферы и второго координационного числа наблюдаются у стеклоуглерода.

Следующее межатомное расстояние в кольце (третья координационная сфера) завышено по сравнению с таковым для графита на 21, 14 и 7 % у антрацита, стеклоуглерода и шунгита соответственно. Координационное число на этой сфере у антрацита и стеклоуглерода на 10 % выше, чем у графита и шунгита. Завышенные значения координационных чисел на первых двух сферах для шунгита свидетельствуют о том, что графеновые сетки шунгита по строению в среднем близки к сеткам в графите, но в них есть вакансии.

Сетки антрацита и стеклоуглерода, по-видимому, искажены.

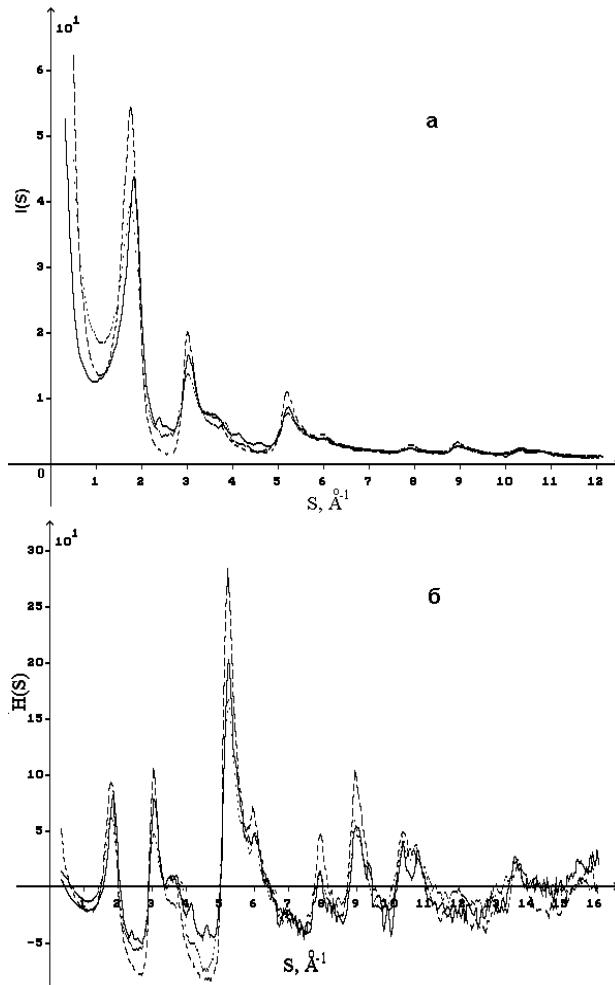


Рис. 1. Кривые распределения интенсивности рассеяния (а) и $H(S)$ (б):

.... антрацит, ---- стеклоуглерод, — шунгит

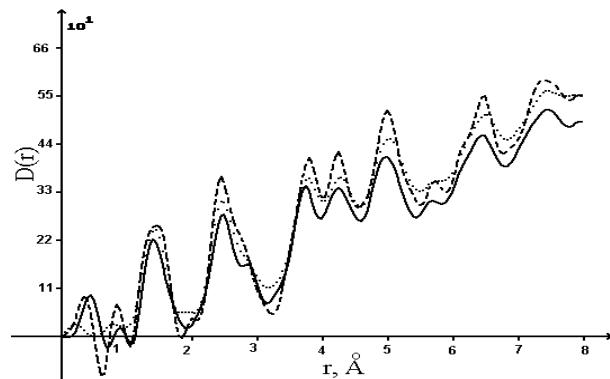


Рис. 2. Кривые распределения парных функций $D(r)$:

.... антрацит, ---- стеклоуглерод, — шунгит

Радиус четвертой координационной сферы соответствует кратчайшему межсеточному расстоянию, оно у стеклоуглерода и антрацита занижено. Координационные числа на этой сфере у антрацита и шунгита завышены по сравнению с графитом и стеклоуглеродом. Радиус пятой координационной сферы для графита (3,68 Å) был рассчитан как

средневесовое значение двух межатомных расстояний: 3,635 и 3,752 Å (координационные числа 9 и 6 соответственно), из которых первое соответствует межсеточным расстояниям, а второе – расстояниям между атомами в сетке. Экспериментальное значение радиуса 3,73 Å ближе по величине к внутрисеточному расстоянию, а координационное число на данной сфере у всех исследованных образцов занижено по сравнению со значением суммарного координационного числа для графита (15), причем у шунгита почти вдвое. Такое изменение координационных чисел на четвертой и пятой сферах, вероятнее всего, связано с разориентацией ближайших соседних сеток, то есть разворотом их относительно друг друга вокруг нормали к сеткам. Данный результат согласуется с турбостратной моделью Уоррена [5].

На остальных координационных сферах (6–15) отличие значений радиусов для стеклоуглерода и шунгита от таковых для графита лежит в пределах $\pm 0,03$ Å, за исключением 10-й сферы для стеклоуглерода, значение радиуса которой на 0,04 Å выше, чем для графита. Радиусы сфер 6–15 для антрацита отличаются от радиусов сфер графита в основном в сторону увеличения, и максимальное различие наблюдается для 10-й сферы (+0,09 Å). Координационные числа на 6–15-й сферах у антрацита и стеклоуглерода коррелируют между собой и отличаются от соответствующих значений для графита то в меньшую, то в большую сторону. Координационные числа для шунгита на всех указанных сферах, кроме 8-й, 9-й и 14-й, ниже, чем для графита.

Таким образом, области ближнего упорядочения в исследуемых образцах по своей организации отличаются от соответствующих областей гексагонального графита и друг от друга распределением атомов по координационным сферам при сохранении радиусов.

Сущность турбостратной модели Уоррена [5] в том, что основная часть углей представлена

углеродным веществом, находящимся как в виде одиночных сеток, так и в виде пакетов из нескольких сеток. Пакеты могут состоять из полностью параллельных сеток или из сеток, параллельных лишь своими нормальными, а в остальном произвольно ориентированных.

Цель дальнейших расчетов – поиск модели взаимного расположения атомов в области ближнего упорядочения исследуемых объектов путем построения конфигураций атомов, состоящих из углеродных сеток, расчет для них кривых $H(s)$ и сравнение последних с экспериментом. Формировались кластеры из случайно развернутых слоев – как плоских, так и изогнутых. Основными варьируемыми параметрами для построения углеродных сеток были: число атомов в сетке, дисперсии случайных смещений атомов из положения равновесия, углы и дисперсии углов разворота сеток, радиусы изгиба сеток. Кроме того, нарушить структуру сетки можно было путем введения вакансий. Для каждого сформированного кластера проводился расчет интенсивности рассеяния $I(s)$ и интерференционной функции рассеяния $H(s)$ (расчетные формулы приведены в [2]), которые сравнивались с соответствующими экспериментальными кривыми.

Как указывалось в [6], при случайном смещении атомов из положения равновесия (аналогичного тепловому движению) происходит уменьшение интенсивности максимумов (рис. 1б) на кривой $H(s)$ для модели. При этом появляется дополнительное фоновое рассеяние между максимумами, аналогичное ТДР. Увеличение числа сеток в пакете приводит к увеличению интенсивности первого и третьего максимумов на $H(s)$. Изогнутость сеток влияет на ширину и форму максимумов. Было установлено, что кривая $H(s)$, рассчитанная для модельного кластера, состоящего из четырех изогнутых слоев радиусами 40 Å и 60 Å, хорошо описывает экспериментальную кривую $H(s)$ для антрацита (рис. 3).

Значения радиусов и размытий координационных сфер и координационные числа. $\Delta r_i = \pm 0,01$, $\Delta \sigma_i = 0,02$ Å

№ сф.	Гр. гекс. $A = 2,456\text{Å}$		Антрацит			Стеклоуглерод			Шунгит		
	r_i^{kp} , Å	N_i^{kp} , ат.	r_i , Å	σ_i , Å	$N_i \pm \Delta N_i$, ат.	r_i , Å	σ_i , Å	$N_i \pm \Delta N_i$, ат.	r_i , Å	σ_i , Å	$N_i \pm \Delta N_i$, ат.
1	1,42	3	1,44	0,15	$2,8 \pm 0,1$	1,45	0,14	$3,0 \pm 0,1$	1,44	0,10	$2,3 \pm 0,1$
2	2,45	6	2,46	0,16	$6,2 \pm 0,1$	2,47	0,15	$6,8 \pm 0,2$	2,45	0,18	$5,7 \pm 0,2$
3	2,83	3	2,9	0,12	$3,3 \pm 0,1$	2,88	0,07	$3,2 \pm 0,1$	2,85	0,14	$3,0 \pm 0,1$
4	3,34	1	3,28	0,00	$1,6 \pm 0,2$	3,25	0,00	$0,3 \pm 0,2$	3,35	0,00	$2,2 \pm 0,2$
5	3,68	15	3,73	0,22	$11,1 \pm 0,3$	3,73	0,22	$12,0 \pm 0,5$	3,73	0,10	$7,9 \pm 0,3$
6	4,26	21	4,28	0,29	$16,0 \pm 1,0$	4,28	0,24	$17,2 \pm 0,4$	4,26	0,30	$16,2 \pm 0,3$
7	5,01	30	5,01	0,35	$27,0 \pm 0,8$	4,99	0,28	$26,0 \pm 0,6$	4,97	0,28	$20,3 \pm 0,7$
8	5,41	6	5,41	0,24	$6,6 \pm 0,4$	5,41	0,21	$7,2 \pm 0,7$	5,44	0,30	$10,3 \pm 0,4$
9	5,67	3	5,7	0,15	$6,8 \pm 0,2$	5,68	0,12	$5,0 \pm 0,6$	5,69	0,12	$3,9 \pm 0,5$
10	6,07	30	6,16	0,4	$31,8 \pm 0,2$	6,11	0,42	$31,0 \pm 1,0$	6,07	0,32	$20,4 \pm 0,8$
11	6,57	26	6,6	0,26	$19,0 \pm 2,0$	6,55	0,24	$20,0 \pm 2,0$	6,54	0,28	$25,8 \pm 1,3$
12	7,05	36	7,12	0,4	$28,0 \pm 1,0$	7,06	0,41	$29,0 \pm 2,0$	7,06	0,29	$20,0 \pm 2$
13	7,31	24	7,26	0,35	$17,0 \pm 2,0$	7,31	0,26	$16,0 \pm 1,0$	7,31	0,30	$14,0 \pm 2$
14	7,55	12	7,55	0,2	$15,0 \pm 2,0$	7,55	0,27	$19,8 \pm 2,0$	7,55	0,30	$14,0 \pm 2$
15	7,86	39	7,92	0,23	$35,0 \pm 1,0$	7,86	0,24	$26,8 \pm 2,0$	7,86	0,38	$36, \pm 3$

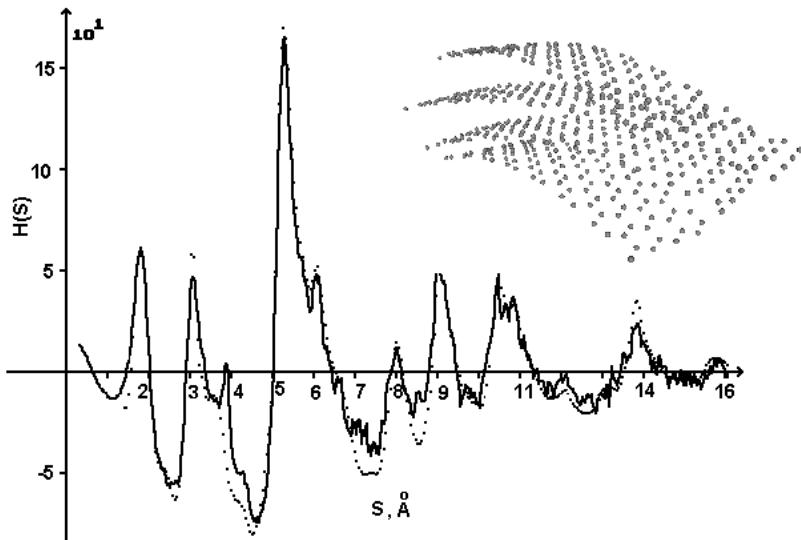


Рис. 3. Сравнение интерференционной функции распределения для модели и эксперимента для антрацита (в верхнем правом углу представлена модель, для которой рассчитана $H(s)$)

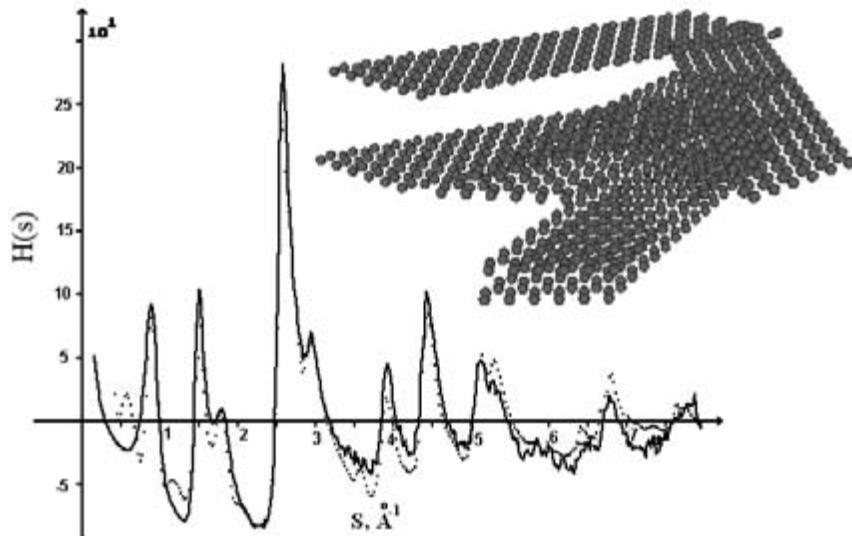


Рис. 4. Сравнение интерференционной функции распределения для модели и эксперимента для стеклоуглерода (в верхнем правом углу представлена модель, для которой рассчитана $H(s)$)

Указанный модельный кластер (рис. 3) состоит из 512 атомов углерода. Межсеточное расстояние – 3,5 Å. Средний угол разворота вокруг нормали к графиновым сеткам второго и третьего слоя относительно первого составил 20° с дисперсией $\pm 10^\circ$, а средний угол разворота четвертого углеродного слоя относительно первого был равен $5 \pm 10^\circ$.

Смещение в плоскости графенового слоя второго и третьего слоя относительно первого составило 1,42 Å.

Наилучшего варианта описания структуры стеклоуглерода и шунгита удалось достичь путем построения пакетов из плоских сеток.

В случае стеклоуглерода пакет сеток состоял из 6 графеновых слоев и содержал 1296 атомов. Размер одного углеродного слоя – 50×13 Å, а размер кластера – $60 \times 57 \times 20$ Å. Межсеточное расстояние

для данного пакета изменялось следующим образом: расстояние между первым и вторым слоем составляло 3,43 Å; далее межсеточное расстояние постепенно возрастало до 3,54 Å, то есть пакет сеток получился как бы разреженным, дисперсии межслоевых расстояний были равны $\pm 0,01$ Å.

Все сетки в пакете были повернуты относительно первого слоя. Средний угол поворота 2–6-го слоев варьировался в приделах дисперсий $\pm 10^\circ \dots \pm 30^\circ$. Кроме того, варьировался параметр, отвечающий за смещение углеродных слоев относительно друг друга. Смещение второго и четвертого слоя относительного первого в плоскости графеновых слоев составил 1,42 Å.

На рис. 4 представлен вид модельного кластера, полученного для стеклоуглерода, и интерференционные функции распределения для модели и эксперимента.

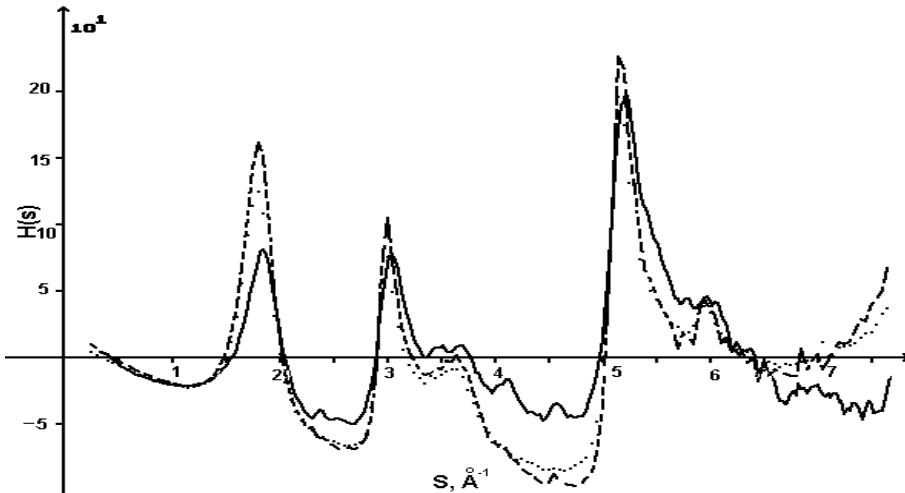


Рис. 5. Интерференционная функция рассеяния исследуемого образца (—), шунгита месторождения Шуньга (---) и месторождения Максово (....)

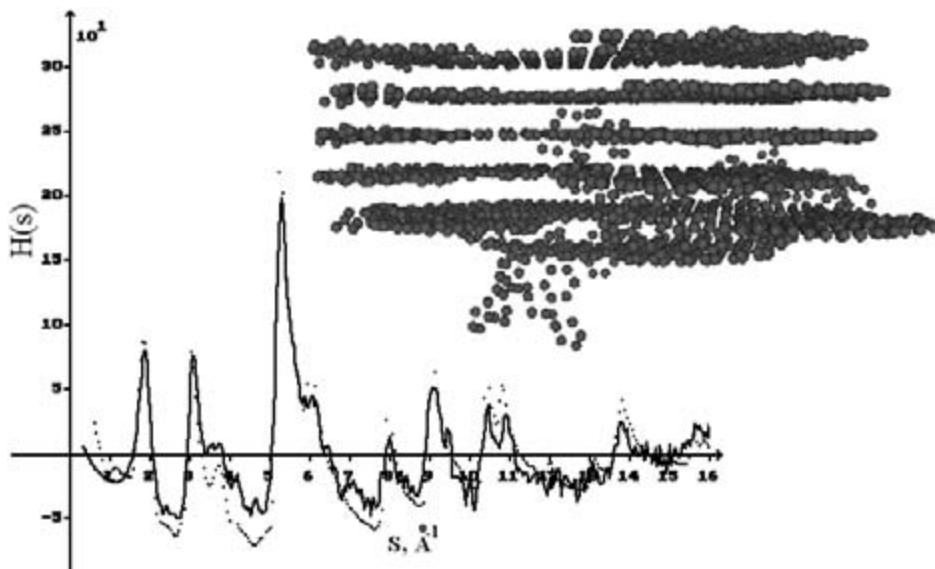


Рис. 6. Сравнение интерференционной функции распределения для модели и эксперимента для шунгита (в верхнем правом углу представлена модель, для которой рассчитана $H(s)$)

В работе [6] были построены модели пространственного расположения атомов для углеродной составляющей образцов шунгита различных месторождений (Шуньга и Максово). Известно, что шунгиты различных месторождений имеют разную степень содержания углерода, она может колебаться от 1 до 99 %. Остальная часть шунгита представлена различными химическими примесями. Образец, исследованный в данной работе, был очищен от примесей электрохимическим способом. Рентгенограммы шунгитов различных месторождений и рассчитанные из них интерференционные функции отличаются друг от друга (рис. 5). Следовательно, и модели строения областей ближнего упорядочения будут различны.

В [6] было установлено, что для шунгита из месторождения Максово кластер состоял из шести углеродных сеток. Пять слоев кластера

были плоскими с числом атомов 500 в каждом, а один – изогнутый с таким же числом атомов. Межсеточное расстояние задавалось $d = 3,45 \text{ \AA}$, а дисперсия угла случайных разворотов сеток – 10° . Также было задано смещение атомов из положения равновесия на $0,1 \text{ \AA}$ и введены ваканции (удалены 70 атомов).

Для шунгита месторождения Шуньга были предложены две модели: оба пакета состоят из шести графеновых слоев, три плоские сетки, состоящие из 500 атомов, три плоские сетки по 300 атомов в каждой. Межсеточное расстояние составило $3,45 \text{ \AA}$, а дисперсия случайного разворота угла – 10° ; другой кластер был сформирован из шести сеток, где три плоские сетки содержат по 500 атомов, две плоские сетки – по 300 атомов, одна изогнутая сетка состоит из 400 атомов.

Для исследованного в данной работе образца шунгита экспериментальные кривые интерференционной функции рассеяния наилучшим образом соответствуют таковым для пакетов из плоскопараллельных сеток со смещением атомов из положения равновесия на величину 0,1 Å. Прямоугольная область, куда помещается кластер, составляет $(54 \times 54 \times 17)$ Å. Кластер состоит из шести слоев, пять из них плоские размером 45×50 Å, а шестой изогнутый слой имел размер 40×40 Å. Смещение атомов позволило достичь хорошего совпадения теоретической и экспериментальной кривых H(s) (рис. 6).

Межсеточное расстояние между первой и второй сетками составило 3,44 Å, а между вто-

рой, третьей и последующими – 3,50 Å. Помимо этого, вторая и четвертая сетка были развернуты на $65 \pm 10^\circ$ относительно первого слоя. Разворот всех остальных сеток был случайным в пределах дисперсии 20°, и конечный угол разворота составил у третьего слоя 12,0°, у пятого и шестого – 7 и 4° соответственно. За счет смещения пятой сетки относительного первой на 1,48 Å удалось понизить максимум на кривой H(s) в области $3,7 \text{ \AA}^{-1}$.

Таким образом, анализ интерференционной функции рассеяния H(s) позволил построить модели, характеризующие расположение атомов в области ближнего упорядочения аморфных углеродных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алешина Л. А., Сидорова О. В., Осауленко Р. Н., Фофанов А. Д., Калинкин А. М. Рентгенографические исследования влияния размоля на структурные характеристики образцов псевдоволластонита // Исследовано в России. 2009. № 30. С. 297–306 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2009/030.pdf>.
- Алешина Л. А., Фофанов А. Д., Осауленко Р. Н., Луговская Л. А. Анализ диффузного фона на рентгенограмме фуллерита C₆₀ // Кристаллография. 2005. Т. 50. № 3. С. 436–441.
- Букалов С. С., Михалицын Л. А., Зубавичус Я. В., Лейтес Л. А., Новиков Ю. Н. Исследование строения графитов и некоторых других сп2 углеродных материалов методами микроскопии КР и рентгеновской дифрактометрии // Российский химический журнал. 2006. Т. 1. № 1. С. 83–91.
- Булат А. Ф., Скипичка С. И., Кучева Н. А. О некоторых особенностях атомной структуры ископаемых углей // Техническая механика: Межведомственный сб. науч. тр. Вып. 61. Днепропетровск, 2005. С. 3–11.
- Кучер Е. В. Фофанов А. Д., Никитина Е. А. Компьютерное моделирование атомной структуры углеродной составляющей шунгита различных месторождений // Исследовано в России. 2002. № 102. С. 1113–1121 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/102.pdf>.
- Хайман Р. Б., Евсюков С. Е. Аллотропия углерода // Природа. 2003. № 8. С. 66–73.
- Химическая энциклопедия: В 5 т. Т. 1. М.: Сов. энциклопедия, 1988. С. 357–358.
- Aleshina L. A., Malinenko V. P., Phouphanon A. D., Jakovleva N. M. The short-range order of anodic amorphous oxide films of Ta and Nb // Journal of Non-Crystalline Solids. 1986. Vol. 87. P. 350–360.

АЛЕКСАНДР ФРИДРИХОВИЧ ПАЛЬ

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник НИИ ядерной физики им. Д. В. Скobel'цына, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
apal@mics.msu.su

АЛЕКСАНДР ГРИГОРЬЕВИЧ РУДАВЕЦ

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник НИИ ядерной физики им. Д. В. Скobel'цына, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
arudav@mail.ru

АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ РЯБИНКИН

младший научный сотрудник НИИ ядерной физики им. Д. В. Скobel'цына, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
f0r-alex@yandex.ru

АЛЕКСАНДР ОЛЕГОВИЧ СЕРОВ

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник НИИ ядерной физики им. Д. В. Скobel'цына, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
aserov@mics.msu.su

ОСАЖДЕНИЕ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК НА ПОВЕРХНОСТЬ МИКРОЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ МАГНЕТРОННОГО ВЧ-РАЗРЯДА

Представлен экспериментальный метод нанесения пленок распыленными атомами на поверхности сферических микрочастиц, захваченных в плазменной ловушке, с использованием единственного ВЧ-разряда. Развита теория замедления распыленных атомов в ван-дер-ваальсовских столкновениях с атомами буферного газа. Покрытие со скоростью 10–1 нм/с и шероховатостью несколько нанометров наносили на частицы, находившиеся на границе области баллистической бомбардировки атомами Cu, Ag.

Ключевые слова: пылевая плазма, магнетронное распыление, покрытие, порошок, термализация атомов, ван-дер-ваальсовское взаимодействие

Получение тонких металлических пленок на микрочастицах диаметром порядка 5 мкм может быть использовано для модификации электрической проводимости [14], [19], усиления оптического отклика [9], изменения их механических свойств [25]. С помощью этих пленок может быть получено гигантское рамановское рассеяние, увеличена добротность оптических мод, в частности шепчущей галереи на поверхности микросфер [23], [24], для задач молекулярной спектроскопии, для разработки сверхчувствительных химических сенсоров. Квантово-размерные эффекты пленок заметно усиливают туннелирование электронов в полупроводниках. Все эти эффекты могут найти применение в устройствах плазмонной электроники, для обработки сигналов, для фотоэнергетики [16], [17]. Рассеяние плазмонов на дефектах металлической пленки приводит к нежелательному уширению плазмонных резонансов. Качество покрытий является критичным для функционирования атомных чипов [1], где шероховатости поверхности приводят к флуктуациям электрических и магнитных полей и потерям атомов Бозе-конденсаторов.

Традиционным методом нанесения пленок является магнетронное осаждение, основанное

на распылении электродов-мишеней в плазме [12], [22]. Этот метод может быть также использован для нанесения покрытий на поверхность микрочастиц. В этом случае получается меньшая шероховатость поверхности, чем при использовании химического метода [2].

При плазменно-пылевом способе осаждения покрытие наносится на частицы, удерживающиеся в особых областях плазмы – плазменно-пылевых ловушках. Частицы в плазме приобретают большие отрицательные заряды, благодаря которым может быть подавлена их нежелательная агломерация. Впервые такой способ нанесения был предложен и реализован в [8]. Здесь частицы захватывались в ловушку в ВЧ-плазме над плоским электродом, а покрытие наносилось потоком атомов, создаваемым магнетронным распылителем на постоянном токе. Схема [6] позволяла обрабатывать большие количества порошка, но она не годится для хрупких частиц.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Схема экспериментальной установки для нанесения металлических покрытий на поверхность хрупких сферических частиц представлена на

рис. 1. Частицы удерживались в плазме емкостного ВЧ-разряда магнетронного типа в ловушке кольцеобразной формы; при помощи того же разряда распылялся электрод-мишень. Под заземленным электродом располагалась магнитная система, создававшая арочное магнитное поле в области ВЧ-разряда. Полюса магнитной системы собирались из постоянных магнитов, расположенных на плоском железном магнитопроводе; ее сечение показано на рис. 1. Электроны плазмы движутся вдоль силовых линий магнитного поля в область более слабого магнитного поля. В этой области плотность плазмы увеличивается и ионный ток на электрод возрастает. Локальная толщина приэлектродного слоя уменьшается, создавая радиальные градиенты электрического поля, формирующие ловушку для частиц. Прямо под этой областью ионы бомбардируют электрод наиболее эффективно. Здесь поверхность электрода распыляется и возникает пучок атомов, формирующий покрытие на частицах в ловушке.

ВЧ-разряд частотой 5 МГц и размахом напряжения до 240 В поддерживался в аргоне при давлении 6,5–13 Па и потоке 2 ссм (стандартных кубических сантиметра в минуту). Положительное самосмещение нагруженного электрода (имевшего большую площадь, чем ненагруженный) составляло до 60 В. Использовался медный или серебряный распыляемый электрод. Разрядная плазма сверху выглядела как продолговатое светящееся кольцо и находилась вблизи заземленного электрода (на расстоянии менее чем в 3 мм от его поверхности). После включения разряда под плазмой возникала кольцеобразная область распыления с осями 23 и 185 мм (рис. 1). Для инъекции частиц в плазму вблизи одного из концов области распыления в заземленный электрод был введен дополнительный маленький цилиндрический электрод, который располагался с внешней стороны зоны распыления на длинной ее оси. Порошок помещался на ВЧ-электрод тонким слоем вблизи дополнительного электрода. После включения ВЧ-разряда на дополнительный электрод подавалось положительное постоянное напряжение 150 В в течение 1 с, частицы взлетали и попадали в ловушку. Причины взлета частиц могут быть связаны с их электростатической зарядкой [3]. Сбор обработанных частиц осуществлялся на специальную подложку, которая помещалась вблизи противоположного конца распыляемой области. Центр подложки находился на расстоянии 210 мм от дополнительного электрода. Перемещение магнитной системы и наклон камеры позволяли перемещать ловушку и частицы в ней в область над подложкой. До начала процесса сбора частиц собирающая подложка была закрыта от распыленных атомов подвижным экраном.

Использовались порошки, состоящие из стеклоуглеродных шаров (Hochtemperatur-Werkstoffe GmbH) с диаметрами в диапазонах 0,4–12, 8–26 и 15–32 мкм или из монодисперсных час-

тиц окиси кремния диаметром 5,35 мкм (microParticles GmbH).

Обрабатываемые частицы левитировали очень близко к электроду-мишени (1–3 мм в зависимости от массы частиц, величины магнитной индукции в области плазмы, давления газа и величины разрядной мощности). В конце процесса осаждения, после перемещения ловушки с частицами в область над подложкой, ВЧ-напряжение выключалось и частицы падали на собирающую подложку.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На подложку осаждалось не менее 10^5 шаров в конце каждого опыта. Применявшийся способ диспергирования, как показал анализ изображений частиц, осажденных на подложку, обеспечивает практически полное их отделение друг от друга, не повреждая их. Условия эксперимента были таковы, что вязкое трение [11], [27] значительно уменьшало скорости хаотического движения частиц. Их агломерация, идущая с преодолением потенциала электростатического отталкивания [5], оказывалась подавлена.

Изображения частиц окиси кремния – исходной и с серебряным покрытием – показаны на рис. 2; почти все исследованные частицы имели такое сплошное покрытие. Шероховатость покрытий, полученных на большинстве шаров окиси кремния в экспериментах с медным распыляемым электродом, меньше, чем у покрытий на рис. 2, их изображения почти неотличимы от изображения исходных частиц и здесь не приводятся.

Частицы в ловушке движутся по связанным траекториям вдоль контура ловушки [13] в направлении кольцевого электронного тока магнетрона [18]. Это движение обеспечивает одинаковые условия напыления и, соответственно, одинаковые параметры покрытий на всех частицах.

Согласно СЭМ-наблюдениям, исходные частицы стеклоуглерода с диаметрами менее 10 мкм и все исходные частицы окиси кремния имели гладкую поверхность. На мелких частицах с изначально бездефектной поверхностью отслоения покрытий не наблюдалось. Напротив, на больших частицах стеклоуглерода иногда наблюдались отслоения, по-видимому, происходящие из-за дефектов их исходной поверхности. По разрывам пленки на поверхности мы оценили ее толщину и среднюю скорость роста, последняя имела порядок 10^{-1} нм/с.

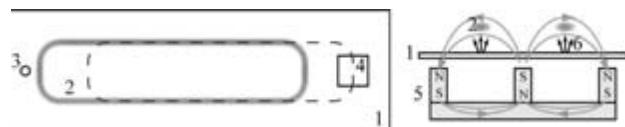


Рис. 1. Схема эксперимента:
 1 – ВЧ-электрод, 2 – область плазменно-пылевой ловушки,
 3 – дополнительный электрод для диспергирования порошка,
 4 – подложка для сбора частиц из ловушки, 5 – магнитная система,
 6 – пучок распыленных атомов

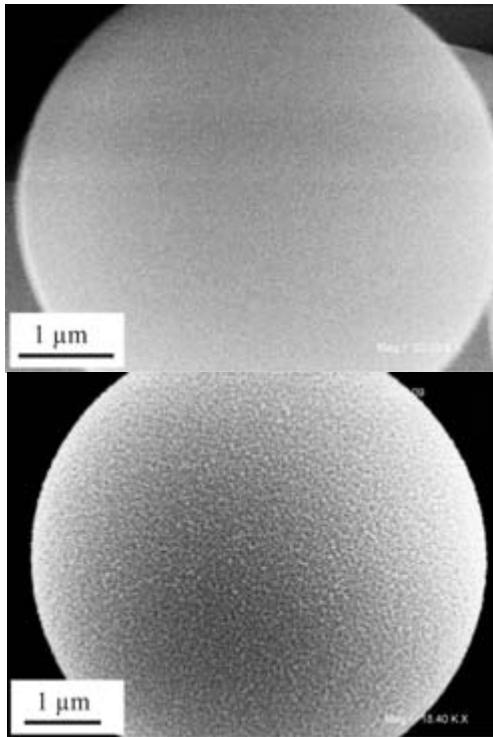


Рис. 2. Исходная частица оксида кремния и частица с серебряным покрытием

**Относительные концентрации элементов
на частицах оксида кремния
с серебряным покрытием, ат. %**

	Частицы оксида кремния		Кремниевая подложка после процесса
	обработанные	исходные	
C	9,31	4,50	12,89
O	60,14	61,77	1,1
Ag	1,99	0	0
Si	28,56	33,73	86,01

Относительные концентрации элементов на частицах и на подложке, полученные с помощью локального рентгеноспектрального анализа (ЛРСА), приведены в таблице.

Известно, что структура пленки обусловлена энергетическими потоками на поверхность подложки (потоком излучения, потоком заряженных и нейтральных атомов, теплотой конденсации, рекомбинацией на поверхности и т. д.) [4]. Шероховатость пленки зависит от энергии атомов, осаждающихся на покрытии [15]. Распыленные атомы, перед тем как достигнуть поверхности частицы, испытывают упругие столкновения с атомами газа, теряя энергию. Расстояние, на котором энергия атома сравняется с энергией атомов газа, называют длиной термализации.

Длина термализации, как и длина свободного пробега, зависит от плотности газа и сечения столкновений. При высоких энергиях столкновений справедлива модель столкновений твер-

дых сфер: $\sigma_{HS} = \pi(r_1 + r_2)^2$, где r_1 , r_2 – эффективные радиусы атомов, которые получаются из квантовых расчетов отталкивающего кора. Энергия распыленных атомов при магнетронном распылении обычно не превышает 50 эВ [26]. Длина свободного пробега, рассчитанная по модели твердых сфер в газокинетической теории с использованием квантовых радиусов, в случае столкновения атомов меди и аргона при давлении 6 Па оценивается величиной порядка 0,5 см. Тогда можно было бы ожидать, что на подложку, расположенную на расстояниях порядка длины свободного пробега от магнетронного распылителя, будут осаждаться нетермализованные атомы распыляемого вещества.

Однако при типичных энергиях распыленных атомов сечение столкновений определяется дальнодействующим потенциалом Ван-дер-Ваальса. При этом длина свободного пробега оказывается на порядки меньше, чем в модели твердых сфер. Прямое экспериментальное измерение абсолютных сечений столкновений атомов при низких энергиях по распаду флуоресценции возбужденных атомов стало возможным с появлением магнито-оптических ловушек [10]. Величины полученных сечений на порядки превышают величины сечений модели твердых сфер и совпадают с сечениями вандерваальсовых столкновений.

В нашем эксперименте энергия ионов, бомбардирующих поверхность мишени, составляет величину порядка 150 эВ. Соответственно, энергия распыленных атомов, оцененная на основе данных распыления меди ионами [26], оказывается порядка 10 эВ. Для потенциала взаимодействия

$$V(R) = -\frac{C_n}{R^n}$$

(C_n – константа, не зависящая от расстояния между частицами R) интегральное сечение рассечения может быть записано в виде [21]:

$$\sigma_{LL}(v) = \gamma_{LL} \left(\frac{C_n}{\hbar v} \right)^{\frac{2}{n-1}},$$

где v – относительная скорость движения частиц, \hbar – постоянная Планка.

$$\gamma_{LL} = 2 \cdot \pi^{\frac{n}{n-1}} \sin \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{n-3}{n-1} \right) \right] \left(\frac{\Gamma \left(\frac{n-1}{2} \right)}{\Gamma \left(\frac{n}{2} \right)} \right)^{\frac{2}{n-1}}.$$

В случае потенциала Ван-дер-Ваальса ($n = 6$) $\gamma_{LL} \approx 8$.

$$C_6 = \frac{3}{2} \overline{\alpha_1^A \alpha_1^B} \frac{I_1^A I_1^B}{I_1^A + I_1^B} [7],$$

где $\overline{\alpha_1^A}$, $\overline{\alpha_1^B}$ – средние дипольные статические поляризуемости атомов A и B , I_1^A , I_1^B – их потенциалы ионизации.

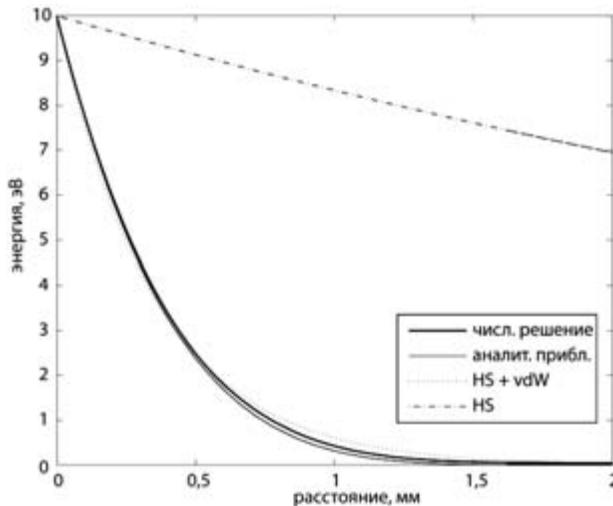


Рис. 3. Изменение энергии распыленного атома меди, движущегося в аргоне при давлении 6 Па: толстая линия – точное численное решение, тонкая линия – приближенное аналитическое решение, пунктир – газокинетическое приближение с сечением Ван-дер-Ваальса σ_{LL} , взятым для среднеарифметического значения начальной и конечной энергии (HS + vdW), штрих-пунктир – газокинетическое приближение с сечением модели твердых сфер σ_{HS} (HS)

При рассеянии атомов меди с энергией 10 эВ на атомах аргона полное сечение Ван-дер-Ваальса равно:

$$\sigma_{LL} = 1.79 \times 10^{-14} \text{ см}^2 (\alpha_1^{Ar} = 11.08 a_0^3,$$

$\alpha_1^{Cu} = 45.214 a_0^3$ [20], где $a_0 = 0.53 \cdot 10^{-8}$ см – боровский радиус, $I_1^{Ar} = 15.76$ эВ, $I_1^{Cu} = 7.73$ эВ).

Для сравнения, соответствующее сечение модели твердых сфер оказывается на порядок меньше:

$$\sigma_{HS} = 1.33 \times 10^{-15} \text{ см}^2 (r_{Ar} = 71 \text{ пм}, r_{Cu} = 135 \text{ пм}).$$

Сечения вандерваальсовых столкновений атомов при низких энергиях дают более точное описание процессов, чем экспериментальная подгонка в приближении модели твердых сфер, которые принципиально не учитывают зависимости сечений от относительной скорости сталкивающихся атомов (для вандерваальсовых столкновений $\sigma_{LL} \sim v^{-2/5}$).

Потери энергии частицы с энергией E_1 , взаимодействующей с атомами газа, имеющими энергию E_2 на расстоянии dx , можно описать уравнением:

$$\frac{dE_1}{dx} = \int_0^\infty T(E_1, E_2) \sigma_{LL}(E_1, E_2) n(E_2) dE_2, \quad (1)$$

где $T(E_1, E_2)$ – изменение энергии E_1 в одном столкновении с частицей с энергией E_2 , точное выражение которой можно получить из законов сохранения энергии и импульса в бинарном столкновении,

$$\int_0^\infty n(E_2) dE_2 = n,$$

n – концентрация атомов газа, $n(E_2)$ – функция распределения Максвелла.

Приближенное решение уравнения (1), полученное в предположении $E_1 \gg E_2$, для термализации атома с начальной энергией E_0 имеет вид:

$$E_1(x) = \left(E_0^{\frac{1}{5}} - const \times x \right)^5, \\ const = 1.4\gamma n \left(C_6^2 m_1 \right)^{\frac{1}{5}}, \text{ где } \gamma = \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2},$$

m_1, m_2 – массы распыленного атома и атома газа соответственно.

На рис. 3 изображены кривые термализации, полученные с помощью приближенного аналитического и численного решения уравнения потерь энергии атома в газе. Для сравнения на том же рисунке приводятся соответствующие кривые столкновительной термализации в модели твердых сфер с сечениями σ_{HS} и σ_{LL} . Вандерваальсово сечение σ_{LL} взято для среднеарифметического значения начальной и конечной энергии. Это сечение обеспечивает хорошее совпадение кривой термализации в газокинетическом приближении с точным расчетом.

Полная термализация достигается на расстоянии порядка 2 мм. Таким образом, в наших экспериментах частицы в ловушке находились на границе зоны баллистической бомбардировки частиц.

ВЫВОДЫ

Разработан метод нанесения покрытий на поверхность микрочастиц, удерживаемых в ловушках в плазме ВЧ магнетронного разряда на границе зоны баллистической бомбардировки атомами, распыленными при помощи этого же разряда. Покрытия равномерно наносились по всей поверхности частиц со скоростью роста пленки порядка 10^{-1} нм/с. Полученное покрытие имеет низкую шероховатость.

Осуществлен неразрушающий способ диспергирования частиц, обеспечивающий практически полное отделение шарообразных частиц порошка друг от друга.

Дана теоретическая оценка роли ван-дер-ваальсовых столкновений и проведен численный расчет термализации распыленных атомов в газе. Получена приближенная аналитическая формула, которая дает результаты, практически совпадающие с численным расчетом. Доминирующий характер вандерваальсового механизма релаксации приводит к быстрой термализации распыленных атомов, осаждающих покрытие.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 07-02-00504.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. David T. et al. Magnetic interactions of cold atoms with anisotropic conductors // The European Physical Journal D: Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics. 2008. Vol. 48(3). P. 321–332.
2. Chujiang C. et al. A comparison of two methods for metallizing fly-ash cenosphere particles: electroless plating and magnetron sputtering // Journal of Physics D: Applied Physics. 2007. Vol. 40. P. 6026–6023.
3. Flanagan T. M., Goree J. Dust release from surfaces exposed to plasma // Physics of Plasmas. 2006. Vol. 13. P. 123504-1–123504-11.
4. Han J. G. Recent progress in thin film processing by magnetron sputtering with plasma diagnostics // Journal of Physics D: Applied Physics. 2009. Vol. 42(4). P. 043001-1–043001-16.
5. Huang F. Y., Wang H. H., Kushner M. J. A model for transport and agglomeration of particles in reactive ion etching plasma reactors // Journal of Vacuum Science & Technology A. 1996. Vol. 14(2). P. 562–566.
6. Ivanov A. et al. DCM Production in a Dusty-Plasma Trap // Plasma Processes and Polymers / R. d'Agostino et al., Editors. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, 2005. P. 455–464.
7. Kaplan I. G. Intermolecular Interactions: Physical Picture, Computational Methods and Model Potentials. John Wiley & Sons, Ltd., 2006. 380 p.
8. Kersten H. et al. Examples for application and diagnostics in plasma-powder interaction // New Journal of Physics. 2003. Vol. 5. P. 93.1–93.15.
9. Larsson M., Dinyari K. N., Wang H. Composite Optical Microcavity of Diamond Nanopillar and Silica Microsphere // Nano Letters. 2009. Vol. 9(4). P. 1447–1450.
10. Matherson K. J. et al. Measurement of low-energy total absolute atomic collision cross sections with the metastable 3P2 state of neon using a magneto-optical trap // Physical Review A. 2008. Vol. 78. P. 042712-1–042712-5.
11. Nitte T. Levitation of dust in rf and dc glow discharges // Plasma Sources Science & Technology. 1996. Vol. 5(1). P. 93–111.
12. Ohring M. Materials Science of Thin Films: Deposition and Structure. Academic Press Inc., 2001. 794 p.
13. Pal A. F. et al. Rotation of Dusty Structures in RF Magnetron Discharge // 18th Europhysics Conference on the Atomic and Molecular Physics of Ionized GasesLecce, Italy, 2006. P. 203–204.
14. Park H.-G., et al. Electrically Driven Single-Cell Photonic Crystal Laser // Science. 2004. Vol. 305(5689). P. 1444–1447.
15. Paul A., Wingbermuehle J. Surface morphology for ion-beam sputtered Al layer with varying sputtering conditions // Applied surface science. 2006. Vol. 252(23). P. 8151–8155.
16. Pillai S. et al. Surface plasmon enhanced silicon solar cells // Journal of Applied Physics. 2007. Vol. 101(9). P. 093105-1–093105-8.
17. Prodan E. et al. A Hybridization Model for the Plasmon Response of Complex Nanostructures // Science. 2003. Vol. 302(5644). P. 419–422.
18. Rossnagel S. M., Kaufman H. R. Induced drift currents in circular planar magnetrons // Journal of Vacuum Science & Technology A. 1987. Vol. 5(1). P. 88–91.
19. Rossnagel S. M., Kuan T. S. Alteration of Cu conductivity in the size effect regime // Journal of Vacuum Science & Technology B. 2004. Vol. 22(1). P. 240–247.
20. Shen Y., BelBruno J. J. Studies of Neutral and Ionic CuAr and CuKr van der Waals Complexes // Journal of Physical Chemistry A. 2005. Vol. 109(44). P. 10077–10083.
21. Springer Handbooks of Atomic, Molecular, and Optical Physics / Ed. G. W. F. Drake. Springer Science+Business Media, 2006. 1506 p.
22. Swann S. Magnetron sputtering // Physics in Technology. 1988. Vol. 19. P. 67–75.
23. Thieme G. et al. Whispering Gallery Mode Spectroscopy as a Diagnostic for Dusty Plasmas // AIP Conference Proceedings. 2008. Vol. 1041. P. 281–282.
24. Vernooy D. W. et al. Cavity QED with high-Q whispering gallery modes // Physical Review A. 1998. Vol. 57(4). P. R2293.
25. Vieira M. T. et al. Surface modification of stainless steel powders for microfabrication // Journal of Materials Processing Technology. 2008. Vol. 201(1–3). P. 651–656.
26. Wasa K., Kitabatake M., Adachi H. Thin film materials technology: sputtering of compound materials. William Andrew, Inc. and Springer-Verlag GmbH & Co. KG, 2004. 518 p.
27. Watanabe Y. Formation and behaviour of nano/micro-particles in low pressure plasmas // Journal of Physics D: Applied Physics. 2006. Vol. 39(19). P. R329–361.

АНТОН ВЛАДИМИРОВИЧ САСИН

аспирант кафедры общей и экспериментальной физики
физико-математического факультета, Карельская государственная педагогическая академия

sasin@kspu.karelia.ru

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК В РАЗРЯДЕ В СКРЕЩЕННЫХ ПОЛЯХ

Исследован процесс образования углеродных пленок в разряде в скрещенных полях в неоне и аргоне с цилиндрической геометрией электродов. Интерферометрическим способом измерено радиальное распределение толщины пленки на торцевой подложке. Предложена диффузионная модель образования пленок. Учтены процессы перезарядки ионов инертного газа и нагрев газа. Проведено сравнение экспериментальных данных с модельными расчетами.

Ключевые слова: плазма, скрещенные поля, тонкие пленки

Тонкие пленки из различных материалов широко используются в технике [7]. В частности, представляют интерес пленки, создаваемые из графита. При некоторых условиях структура этих пленок имеет алмазоподобный характер [2], [5]. Одним из методов их получения является разряд в скрещенных полях. Этот тип разряда обладает высокой степенью ионизации газа и стабильностью, что обеспечивает достаточную скорость роста пленок и их однородность. В известных нам работах, связанных с получением тонких углеродных пленок, отсутствует четкое количественное сравнение результатов эксперимента и теории. Целью данной работы является создание простой модели образования пленок и сравнение расчетов, основанных на ней, с экспериментальными данными.

Для получения пленок использовался макет с системой коаксиальных электродов, представленный на рис. 1. Пленки формировались путем распыления внешнего электрода – катода. С целью исключения загрязнения пленок оба электрода были выполнены из графита. Подложкой служила стеклянная или кремниевая пластинка, установленная на шлифе. Такая конфигурация позволяла помещать в разрядный промежуток различные участки подложки. Пленки формировались в режиме постоянного тока. Макет устанавливался в соленоиде таким образом, чтобы разрядный промежуток находился в его центре, в области однородного магнитного поля, величина которого составляла 15 мТл.

В основу модели были положены следующие предположения:

1. Атомы углерода появляются в разрядном промежутке вследствие эрозии катода под действием бомбардировки положительными ионами [1] и быстрыми атомами газа, образовавшимися в результате процесса перезарядки [6];
2. Осаждение углерода на подложку происходит в результате диффузии атомов в газе; атомы углерода оседают на аноде и на подложке;
3. Коэффициент прилипания атомов углерода к аноду равен единице;

4. Имеет место неоднородный нагрев газа [4], [8].

Так как катод и анод обладают цилиндрической симметрией, уравнение диффузии и граничные условия записываем в цилиндрических координатах. На рис. 2 приведены система координат и обозначения основных параметров разрядного промежутка.

Коэффициент диффузии углеродных атомов зависит от температуры, поэтому для построения диффузионной модели необходимо учесть разогрев катода. Рассмотрим два случая. Первый случай: градиент температуры между анодом и катодом постоянен – $T(r)$. Второй случай: градиент температуры между катодом и анодом зависит от времени $T(r, t)$. Кроме того, во втором случае задача не будет стационарной, то есть интегральный поток атомов с поверхности катода по времени непостоянен

$$\left(\frac{\partial c}{\partial t} \neq 0 \right).$$

На рис. 3 приведено расчетное распределение толщины пленок по радиусу для 3 случаев. Зависимость температуры от времени в первом приближении выразим следующим образом:

$$T(t) = T_a + (1 - e^{-\alpha t}) \cdot (T_k - T_a),$$

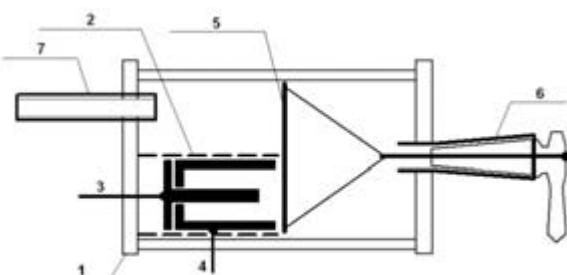


Рис. 1. Макет:

1 – стеклянный баллон, 2 – экран из стекла, 3 – анод, 4 – катод, 5 – подложка, 6 – шлифт для поворота подложки, 7 – откачка

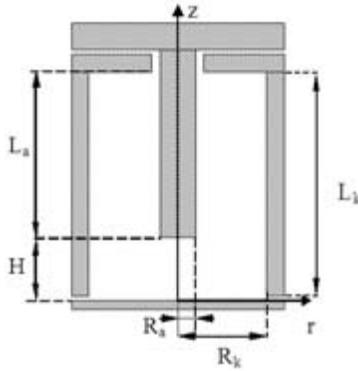


Рис. 2. Разрядный промежуток:

L_a , R_a – длина и радиус анода; L_k , R_k – длина и внутренний радиус катода; H – расстояние от торца анода до подложки. $L_k = 54$ мм, $R_k = 9,5$ мм, $L_a = 45$ мм, $R_a = 2,5$ мм, $H = 10$ мм

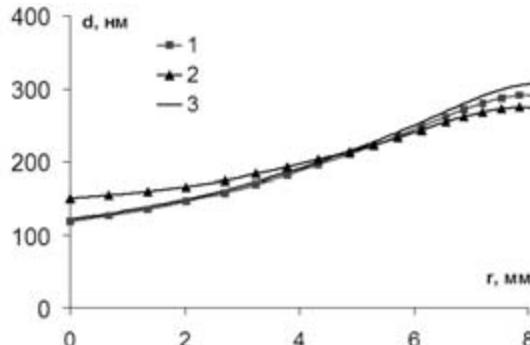


Рис. 3. Расчетное распределение толщины пленок по радиусу для пропущенного заряда $q = 30$ Кл, коэффициента распыления 0,5:

1 – интегральный поток атомов зависит от времени, температура изменяется по радиусу линейно, $T(r)$ не зависит от времени; 2 – интегральный поток атомов зависит от времени, температура изменяется по радиусу линейно, $T(r, t)$ зависит от времени; 3 – стационарная задача, интегральный поток атомов постоянен, температура $T(r)$ по радиусу изменяется линейно

где T_a – температура анода, T_k – температура катода, t – время, α – коэффициент насыщения температуры, который подбирался таким образом, чтобы к концу времени формирования пленок температура была максимальна.

На рис. 4 (а, б) приведена зависимость интегрального потока атомов углерода с поверхности катода от времени. Время установления потока в обоих случаях составляет порядка 10^{-3} с, рис. 4а. Из рис. 4б видно, что в случае, когда температура не зависит от времени, поток с течением времени остается постоянным, а когда температура изменяется со временем, поток атомов углерода с катода растет постепенно, но при этом изменяется в пределах малой величины, порядка

$$P = 6 \cdot 10^{14} \frac{am}{c}$$

Таким образом, учет зависимости градиента температуры по времени не вносит существенных изменений в расчеты толщины пленок, об этом свидетельствует рис. 3. Поэтому распределение

температуры по радиусу $T(r)$ будем считать линейным. При этом имеем стационарную задачу.

Уравнение диффузии, соответственно, имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(D(T(r)) \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} D(T(r)) \frac{\partial c}{\partial r} + D(T(r)) \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = 0,$$

где $c(r, z)$ и $D(T)$ – концентрация и коэффициент диффузии атомов углерода в газе. Коэффициент диффузии бинарных смесей рассчитывался в соответствии с кинетической теорией [3]. Температуру газа непосредственно у поверхности анода считаем равной комнатной температуре. Температура у поверхности катода была измерена термопарой. Ее значение при условиях получения пленок составило 100 °C. Эта величина использовалась в расчетах. Учет зависимости температуры от z (по высоте катода) за счет нагрева торцевой части катода приводит лишь к несущественным изменениям (в пределах нескольких процентов). Поэтому температуру по высоте электродов считаем постоянной.

На оси цилиндра – условие симметрии:

$$\frac{\partial c}{\partial r}(0, z) = 0, \quad z \in [0, H].$$

На распыляемой поверхности (катоде) задаем плотность потока:

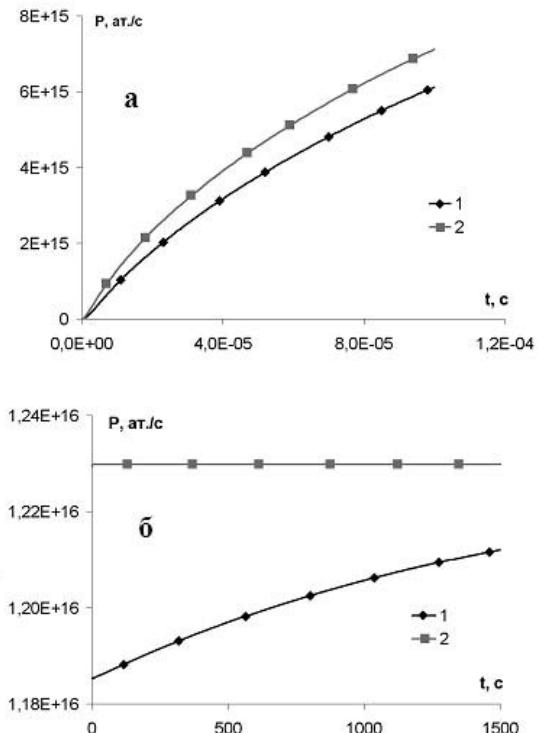


Рис. 4. Зависимость интегрального потока атомов углерода с поверхности катода от времени:

а – интервал установления потока 10^{-4} с; б – время формирования пленки; 1 – температура изменяется по радиусу линейно, $T(r, t)$, зависит от времени; 2 – температура изменяется по радиусу линейно, $T(r)$, не зависит от времени

$$D(T(r)) \frac{dc}{dr}(r, L_k) = D(T(R_k)) \frac{dc}{dr} = \frac{(1+\delta) \cdot \gamma \cdot j}{e},$$

$$r \in [R_a, R_k], z \in [0, L_k],$$

здесь j – плотность разрядного тока, γ – коэффициент распыления (отношение числа выбиваемых атомов углерода к числу падающих ионов и атомов газа), δ – коэффициент перезарядки иона в собственном газе (отношение числа быстрых атомов газа, достигших катода после перезарядки, к числу ионов), e – заряд иона. Оценка показывает, что длина свободного пробега иона газа, соответствующая процессу перезарядки [1], в несколько раз меньше толщины катодного слоя; таким образом, большая часть ионов в пределах катодного слоя испытывает перезарядку. Поэтому коэффициент δ примем равным единице. При этом пренебрегаем эмиссией электронов под действием ионов, последние считаем атомарными и однозарядными. Для анода и подложки, где распыленное вещество оседает, примем условия:

$$c(R_a, z) = c(r, 0) = 0, z \in [H, L_k], r \in [0, R_k],$$

то есть оседает все вещество. Решение этой краевой задачи позволяет определить поток на подложку, вычислить толщину пленки как функцию времени и распределение толщины пленки по радиусу.

Толщина пленки рассчитывалась в предположении плотной упаковки (простая кубическая кладка).

Для определения толщины пленки использовалась интерференционная картина, получаемая в отраженном свете при длине волны 546 нм. Она имела четкую круговую симметрию и содержала от 2 до 20 интерференционных колец в зависимости от пропущенного заряда. На рис. 5 приведена интерференционная картина для двух пленок, полученных при одинаковой величине прошедшего заряда и различных токах в неоне. Эксперимент показал, что основным фактором, определяющим распыление, является заряд, пропущенный через разрядный промежуток; при этом зависимость от тока незначительна (рис. 6).

На рис. 7 экспериментальные кривые распределения толщины пленки по радиусу, полученные при различных давлениях и одинаковом пропущенном заряде и токе в аргоне, сравниваются с расчетными, полученными при различных значениях коэффициента распыления γ . Кривая для большего давления соответствует меньшему эффективному коэффициенту распыления γ . Возможной причиной изменения эффективного γ является обратный возврат атомов углерода на поверхность катода. При большем давлении этот эффект должен проявляться сильнее.

На рис. 8 сопоставлен радиальный ход толщины пленки для двух газов. Опыт показывает, что при сравнимых давлениях и пропущенных зарядах эффективность распыления поверхности катода в неоне значительно больше.

Предложенная модель образования углеродных пленок с цилиндрической геометрией электродов охватывает основные аспекты процессов образования пленок и в достаточной мере согласуется с экспериментальными данными.



Рис. 5. Интерференционная картина пленок на кремниевой подложке: неон, $\lambda = 546$ нм, $q = 30$ Кл, ток 20 мА (слева), $q = 30$ Кл, ток 5 мА

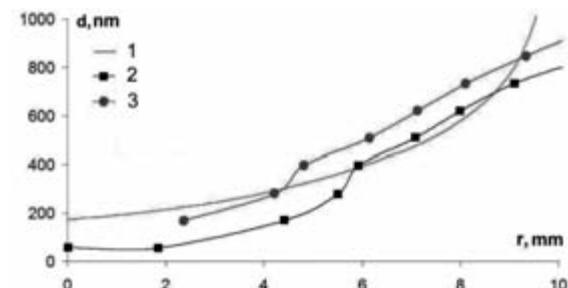


Рис. 6. Распределение толщины пленки по радиусу в неоне: 1 – модель, $\gamma = 0,7$, $q = 30$ Кл; 2 – $I = 20$ мА, $q = 30$ Кл, $p = 0,2$ Торр; 3 – $I = 5$ мА, $q = 30$ Кл, $p = 0,2$ Торр

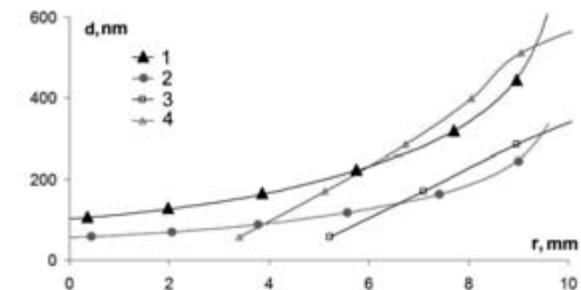


Рис. 7. Распределение толщины пленки по радиусу в аргоне при различных давлениях: 1 – модель, $\gamma = 0,3$, $q = 48$ Кл; 2 – модель, $\gamma = 0,15$, $q = 48$ Кл; 3 – $I = 20$ мА, $q = 48$ Кл, $p = 0,16$ Торр; 4 – $I = 20$ мА, $q = 48$ Кл, $p = 0,04$ Торр

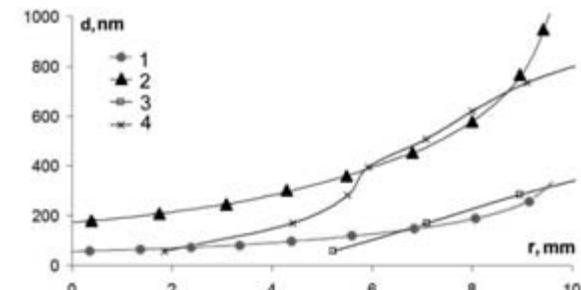


Рис. 8. Распределение толщины пленки по радиусу для двух газов (неон и аргон): 1 – модель, $\gamma = 0,15$, $q = 48$ Кл; 2 – модель, $\gamma = 0,7$, $q = 30$ Кл; 3 – аргон, $I = 20$ мА, $q = 48$ Кл, $p = 0,16$ Торр; 4 – неон, $I = 20$ мА, $q = 30$ Кл, $p = 0,02$ Торр

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурманский И. Ю., Рогов А. В. Влияние резонансной перезарядки ионов аргона на эффективную скорость распыления в аргоне // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 1. С. 120–122.
2. Вагнер С. Д., Игнатьев Б. К., Калининская Т. В., Платонов А. А., Ковалевский В. В. Формирование алмазоподобных пленок в разряде в скрещенных полях: Материалы Всероссийской науч. конф. по физике низкотемпературной плазмы ФНТП-2004. Петр заводск: Изд-во ПетрГУ, 2004. Т. 1. С. 186–191.
3. Гиршфельдер Дж., Кертис Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: Иностранный литература, 1961. 931 с.
4. Знаменский А. Г., Марченко В. А Магнетронное напыление при повышенных давлениях: процессы в газовой среде // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 7. С. 24–32.
5. Плесков Ю. В. Электрохимия алмаза / Российская академия наук, Ин-т электрохимии им. А. М. Фрумкина. М.: Едиториал УРСС, 2003. 101 с.
6. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.
7. Серов И. Н., Бельская Г. Н., Кощеев С. В., Марголин В. И., Мошников В. А., Чеснокова Д. Б. Исследование возможности получения наноразмерных структурированных пленок // Сб. докл. 15-го Междунар. симпозиума «Тонкие пленки в оптике и электронике». Харьков: НИЦ ХФТИ «Константа», 2003. С. 14–18.
8. Stephen M. Rossnagel Sputtered Atom Transport Processes // IEEE Transactions on plasma science. 1990. Vol. 18. № 6. P. 878–882.



15 ноября 2010 года исполнилось 75 лет доктору биологических наук, профессору, члену-корреспонденту РАН, декану эколого-биологического факультета Петрозаводского государственного университета, заместителю главного редактора нашего журнала Эрнесту Викторовичу Ивантеру.

ЭРНЕСТ ВИКТОРОВИЧ ИВАНТЕР К 75-летию со дня рождения

Эрнест Викторович Ивантер родился в Москве. В 1958 году с отличием закончил Московскую сельскохозяйственную академию и по распределению приехал в Карелию в заповедник «Кивач». С 1960 года он младший научный сотрудник лаборатории зоологии Института биологии КФАН СССР (ныне КарНЦ РАН), затем полтора года обучения в аспирантуре в Москве на кафедре зоологии ТСХА. В 1965 году им была успешно защищена кандидатская диссертация «Фауна охотничьих животных Карелии, пути ее обогащения и рационального использования». Учителями на первых этапах становления, а затем коллегами были выдающиеся ученые России: профессора Б. А. Кузнецова, В. Ф. Ларионова, Г. А. Новикова, академик С. С. Шварц.

В 1965 году Э. В. Ивантер принят на работу ассистентом кафедры зоологии и дарвинизма Петрозаводского университета, с 1967 года – доцент, а с 1976-го – профессор. В 1975 году Эрнест Викторович защищает докторскую диссертацию по монографии «Популяционная экология мелких млекопитающих таежного Северо-Запада России», которая была признана крупным достижением отечественной экологии. С 1986 года Э. В. Ивантер – заведующий кафедрой зоологии и экологии, с 1987-го – декан биологического, а с 1991-го – эколого-биологического факультета ПетрГУ.

Под руководством Э. В. Ивантера подготовлено и успешно защищено более 30 кандидатских и 6 докторских диссертаций. Он организовал и возглавил первый в Карелии докторский диссертационный совет по ботанике, зоологии, ихтиологии и экологии; является членом ряда головных и проблемных советов и комиссий по зоологии, экологии, охране природы, заповедному делу, высшему биологическому образованию; входит в состав редколлегий «Зоологического журнала» и журнала «Экология», является вице-президентом Териологического общества РАН. Эрнест Викторович поддерживает тесные связи с научными центрами США, Канады, Финляндии, Швеции, Дании, Германии, Норвегии и других стран, участвует в международных проектах, симпозиумах, конгрессах и конференциях, является почетным членом Финского общества териологов, Зоологического общества США, Экологического общества Польши.

Классик экологии, Э. В. Ивантер широко известен выдающимися трудами в области общей биологии, зоологии позвоночных, эволюционной и популяционной экологии животных, биоценологии и зоогеографии, которые внесли значительный вклад в развитие этих перспективных отраслей науки.

Им опубликовано более 330 работ, в том числе 12 монографий, ряд учебно-методических пособий и более десятка научно-популярных книг о природе и животном мире Русского Севера.

Обладая активной жизненной позицией, Э. В. Ивантер принимает деятельное участие

в общественной жизни республики: в 1986–2010 годах был внештатным советником главы РК по проблемам образования, экологии и национального природопользования. Эрнест Викторович награжден почетными грамотами Всероссийского общества охраны природы, МО РФ, МО РК, нарядным знаком «Почетный работник высшего профессионального образования России». Ему присвоены почетные звания «Заслуженный деятель науки РК» и «Заслуженный деятель науки РФ». В 2006 году награжден орденом Почета.

В 2004 году в России вышла книга Г. С. Розенберга «Лики экологии», в ней Эрнест Викторович представлен в рубрике «Выдающиеся современники» с эпиграфом «Нужны все виды, чтобы составить мир...».

Мы желаем уважаемому декану, коллеге, учителю, незаурядному человеку крепкого здоровья, новых научных идей и регулярного повторения Болдинской осени, когда хочется писать и когда это получается.

ИЗБРАННЫЕ ПЕЧАТНЫЕ ТРУДЫ Э. В. ИВАНТЕРА

1. Ивантер Э. В. Популяционная экология мелких млекопитающих таежного Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1975. 247 с.
2. Ивантер Э. В., Ивантер Т. В., Туманов И. Л. Адаптивные особенности мелких млекопитающих. Экологоморфологические и физиологические аспекты. Л.: Наука, 1985. 318 с.
3. Ивантер Э. В. Млекопитающие. Мир животных. 3-е изд. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2001. 208 с.
4. Ивантер Э. В., Макаров А. М. ТERRITORIАЛЬНАЯ ЭКОЛОГИЯ ЗЕМЛЕРОЕК-БУРОЗУБОК (*Insectivora, Sorex*). Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2001. 272 с.
5. Зимин В. Б., Ивантер Э. В. Птицы. 3-е изд. Петрозаводск, 2002. 288 с.
6. Ивантер Э. В., Коросов А. В. Введение в количественную биологию. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2004. 303 с.
7. Ивантер Э. В., Коросов А. В. Элементарная биометрия. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2005. 104 с.
8. Курхинен Ю. П., Данилов П. И., Ивантер Э. В. Млекопитающие Восточной Фенноскандии в условиях антропогенных воздействий. М.: Наука, 2005. 287 с.
9. Ивантер Э. В. Очерк теории вида и видеообразования. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2006. 48 с.
10. Яковлев Е. Б., Ивантер Э. В., Лобкова М. П. Насекомые. Мир животных. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2006. 288 с.
11. Ивантер Э. В., Медведев Н. В. Экологическая токсикология природных популяций птиц и млекопитающих Севера. М.: Наука, 2007. 229 с.
12. Красная Книга Карелии / Под ред. Э. В. Ивантера. Петрозаводск: Карелия, 2007.
13. Ивантер Э. В. Периферические популяции – эволюционные форпосты вида // Современные проблемы биологической эволюции. М., 2007. С. 83–87.
14. Ивантер Э. В., Моисеева В. П., Моисеева Е. А. Экологический мониторинг сточных вод сульфат-целлюлозного производства. Опыт водно-токсикологического биотестирования. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. 270 с.
15. Ивантер Э. В. Млекопитающие Карелии. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. 293 с.
16. Ивантер Э. В. К популяционной организации политипического вида (на примере рыжей полевки) // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». Петрозаводск, 2008. № 1. С. 39–60.
17. Ивантер Э. В., Кухарева А. В. К экологии лесной мышовки на северном пределе ареала // Зоологический журнал. 2009. Т. 87. № 4. С. 476–493.
18. Ивантер Э. В., Кухарева А. В. Особенности размножения и структуры популяции лесной мышовки (*Sicista betulina* Pall.) на северном пределе ареала // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. № 6. С. 8–13.



ВЕНИАМИН НИКОЛАЕВИЧ ШИЛОВСКИЙ К 65-летию со дня рождения

Вениамин Николаевич Шиловский родился в д. Урицкое Никольского района Вологодской области. С 1959 по 1963 год учился в Тотемском лесотехническом техникуме. Работал сучкорубом, штабелевщиком, сменным механиком нижнего склада. В 1965–1970 годах учился на лесоинженерном факультете Петрозаводского университета. После окончания был принят старшим лаборантом в Карельский НИИ лесной промышленности (КарНИИЛП). С 1981 года стал заведующим лабораторией надежности, ремонта и испытания машин КарНИИЛПа. В 1980 году защитил кандидатскую диссертацию в Ленинградской лесотехнической академии им. С. М. Кирова. В 1992 году был принят в ПетрГУ старшим преподавателем кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета. В 2002 году в Санкт-Петербургской лесотехнической академии защитил докторскую диссертацию. В 2008 году Вениамина Николаевичу было присвоено ученое звание профессора по кафедре технологии металлов и ремонта. В. Н. Шиловский является заместителем декана лесоинженерного факультета по научной работе.

В сферу научных интересов Вениамина Николаевича входит повышение уровня надежности и технической эксплуатации лесных машин и оборудования. Он является научным руководителем трех защищенных кандидатских диссертаций. Принимает активное участие в научно-исследовательской работе кафедры, в том числе по гранту Федерального агентства по образованию для поддержки научно-исследовательской работы по направлению «Технические науки – Лесной комплекс». Им опубликовано 197 печатных трудов, из них 19 учебно-методических разработок, 9 изобретений. Принимает активное участие в научных конференциях, в том числе международных и всероссийских. Является ответственным исполнителем по организации ежегодных Республикальских научно-технических конференций молодых ученых, аспирантов на базе лесоинженерного факультета ПетрГУ.

В. Н. Шиловский награжден Почетной грамотой МО РФ, ему присвоено звание «Заслуженный деятель науки Республики Карелия».

Поздравляем Вениамина Николаевича с юбилеем, желаем ему успехов и научных достижений, здоровья и всех благ!

CONTENTS

BIOLOGY

Borovichev E. A., Shalygin S. S., Davydov D. A.

ADDITION TO LIVERWORT AND CYANOPROKARYOTA FLORA OF LAPLAND STATE NATURAL RESERVE (MURMANSK REGION)

Summary: Nine species of liverworts and ten species of cyanoprokaryotes were revealed on the Lapland State Natural Reserve territory for the first time. *Radula lindbergiana* and *Mannia pilosa* were found in Murmansk region for the second time, six species are red-listed in Murmansk region. All species of cyanoprokaryotes except for *Gloeocapsopsis pleurocapsoides* are new to Murmansk Region.

Key words: Murmansk region, Lapland State Natural Reserve, liverworts, cyanoprokaryota, new and rare species, distribution 7

Genikova N. V., Gnatuk E. P., Kryshen A. M., Leibonen E. E.

DIVERSITY OF VASCULAR PLANTS IN FOREST COMMUNITIES ON AUTOMORPHIC SANDY SOILS

Summary: A list of vascular plant species inhabiting forests on sandy automorphic soils in Karelia (81 species in total), within the range of the identified types of forest growth conditions, is provided: *Pinus sylvestris* – *Cladonia* (13 spp.), *Pinus sylvestris* – *Vaccinium vitis-idaea* (32 spp.), *Pinus sylvestris* – *Vaccinium myrtillus* (77 spp.). A correlation between the species' composition on the one hand and the type of forest growth conditions and the forest community development stage on the other hand is shown.

Key words: Species' diversity, vascular plants, pine forests, Karelia 11

Parshukov A. N., Sidorova N. A.

BACTERIAL SELF-PURIFICATION OF FISH-FARMING LAKES

Summary: On the example of two fish farms, operating in the water area of Karelian lakes Hedo and Muj, dynamics of the water self-purification processes during the period of autumn 2008 till autumn 2009 is studied. It is shown that the processes of self-purification actively occurred in autumn of 2008 at water temperature of 11,7 °C under recent commissioning of the fish farms. In autumn of 2009 on lake Muj, due to mass development of fungi and bacteria, the basic participants of the water self-purification processes were superseded. By the autumn of 2009, a disruption of the self-purification rate on lake Hedo resulted from the domination of the allochthonous bacterial flora over autochthonous flora.

Key words: Self-purification, water ecosystem, organic matter, heterotrophic bacterium, fungi 14

Sergienko L. A., Kishchenko I. T.

MORPHOLOGICAL VARIABILITY IN GENUS COCHLEARIA L., FAM. BRASSICACEAE

Summary: The species in the genus *Cochlearia* L. are in the process of active speciation due to unstable conditions on the coastal zone. Based on the study of the seeds' surface ultrastructure a new interpretation of the range of coastal species is given.

Key words: Coastal zone, halophyte, seeds' surface ultrastructure, speciation 18

Khokhlova T. Yu.

BLACKBIRD *TURDUS MERULA* L. IN NORTHEASTERN BORDER AREA OF KARELIA: POSTJUVENILE MOULT

Summary: The sequence and characteristic features (the amount, timing and others) of the blackbirds' postjuvenile moult in Karelia are described based on the data of the young birds' catch in 1978–2007 (n = 1034). It was established that postjuvenile moult begins in different birds on 22.07 through 16.09 at the age of 45–70 days and continues for 56–70 days, on the average 65 days. Because of the late moult, most of the birds combine it partially with autumn migration. The tendency in slow shift to earlier terms is detected. This tendency can be viewed as an evidence of the species' gradual adaptation to the northern conditions.

Key words: Blackbird, *Turdus merula*, postjuvenile moult, northeastern border area, adaptation 21

GEOSCIENCE

Kuleshevich L. V.

GOLD MINERALIZATION IN PRE-CAMBRIAN EARTH CRUSTS (GEODYNAMIC POSITION, CLASSIFICATION AND UNDERLYING PRINCIPLES OF RESEARCH)

Summary: The largest gold deposits of the earth were formed in the early Pre-Cambrian period of the earth crust development. Ideas of the leading scientists of the Pre-Cambrian period about geodynamic position, magmatism, conditions of localizations, deposits' genesis and ore composition are instrumental in classification and metallogenetic research of the Pre-Cambrian metamorphized deposits in Karelia.

Key words: Pre-Cambrian earth crusts, green-stone belts, gold deposits, genetic and mineragenic types of ore 29

MEDICINE*Karashurova E. S., Spector E. N., Raznatovskiy K. I.***ON MIXED INFECTIONS IN FEMALE PATIENTS WITH GENITAL WARTS**

Summary: Applying correspondence analysis to the structure of the source data we formulated and solved the problem of studying concurrence of various sexually transmitted infections in female patients with genital warts. The age of the female patients was taken into account.

Key words: Genital warts, correspondence analysis 42

*Polskaya I. I., Marusenko I. M., Vezikova N. N.***PROBLEM OF COMBINING METABOLIC SYNDROME AND GOUT**

Summary: The authors of the article assess the frequency of occurrence and characteristic features of metabolic syndrome (MS) in patients with gout. The impact of MS on the course of the joint syndrome, as well as the total risk of the cardiovascular disease are estimated. These results indicate high frequency of MS occurrence in gout, negative impact on the course of the joint syndrome and on the quality of life in patients with gout.

Key words: Gout, metabolic syndrome, hyperuricemia, abdominal obesity, cardiovascular risk 45

*Sokolov A. L., Zaripova Yu. R., Meigal A. Yu.***NEUROMUSCULAR STATUS IN HEALTHY CHILDREN OF THE FIRST YEAR OF LIFE: SURFACE EMG STUDY**

Summary: Neuromuscular status of healthy children in their first year of life was studied with the help of the surface electromyography (EMG). It was established that during the first year of life the motor system passes profound modification associated with maturing of antigravitation reactions. The data obtained could be used for further comparison with children suffering from motor disorders.

Key words: Electromyography, motor units, childhood 49

AGRICULTURAL SCIENCE*Evseeva G. V., Iakovleva K. E., Golubeva O. A.***PRODUCTIVITY OF GRAZING LEGUME-GRASS AGRO-PHYTOCENOSIS IN CONDITIONS OF KARELIA**

Summary: The productivity of grazing legume-grass agro-phytocenosis including new varieties of meadow clover and white clover, as well as intergeneric hybrid (*Festulolium*) are studied. The botanical composition, productivity, exchange energy and nutritive value of grazing grass stands during the three years of usage are determined.

Key words: Perennial grasses, grazing legume-grass agro-phytocenosis, productivity, botanical composition, exchange energy, nutritive value 54

*Berdnikov I. A., Ananyev V. A.***GROWTH AND QUALITY STUDY OF SCOTCH PINE PLANTATION CROPS ON DRAINED MIRES**

Summary: The analysis of Scotch pine plantation growth with different initial density on drained mires was made. The efficiency of fertilization and herbicides' treatment was established. The optimal parameters of the pine plantation growth on drained mires in conditions of southern Karelia were defined.

Key words: Drainage, plantation crops, commodity composition, thinning 57

*Vays A. A.***CORTEX THICKNESS OF SIBERIAN SPRUCE (*Picea sibirica*) LOWER PART IN CONDITIONS OF CENTRAL SIBERIA**

Summary: Thickness of the tree cortex is an important evaluation criterion. Based on the measurement data of the model trees of Siberian spruce (*Picea sibirica*) auxiliary tables for the determination of the absolute and double thickness of the lower stem cortex were built. The age and diameter of the trees as well as growing conditions in Central Siberia were factored in.

Key words: Cortex, Siberian spruce, model, standard, timber region, lower part of the stem 60

ENGINEERING SCIENCE*Orlov A. V., Kisternaya M. V., Kozlov V. A.***COMPLEX CHRONONLOGICAL ATTRIBUTION OF VERONICA'S VEIL CHAPEL IN ZAONEZHYE VILLAGE VIGOVO**

Summary: The complex approach allowing the determination of construction stages of historic wooden structures is presented. The chapel from Zaonezhje village Vigovo is considered as an example. The construction history of the monument is described based on the field examinations carried out in 2009. Construction stages were dated with the use of the architectural-archeological scale and re-dated more accurately with the help of dendrochronological analysis..

Key words: Traditional wooden architecture, chapels, chronological dating, construction stages, architectural-archeological scale, dendrochronology, Scots pine 64

Kostyukovich V. M., Shilovskiy V. N.

ESTIMATION OF OPTIMAL SUPPLY LEVEL FOR LOGGING ENTERPRISES

Summary: The estimation algorithm for the optimal level of spare parts supply in the warehouses of the company providing logging enterprises with spare parts is offered. The actual example of calculation in MathCAD is considered. The practical importance of the offered algorithm is proven.

Key words: Supply, stocks, service, spare parts 71

Posharnikov F. V., Usikov A. V.

DECREASE IN TEMPERATURE INTENSITY IN SLIDER BEARINGS WITH POLYMERIC ANTI-FRICTIONAL MATERIALS

Summary: The article considers the slider bearing properties with return pair of friction. Polymer with metal inclusions is used as antifrictional material.

Key words: Composite material, polymer, the slider bearing, friction surface, temperature, heat conductivity 76

Shegelman I. R., Kuznetsov A. V., Baklagin V. N., Budnik P. V., Skripnik V. I.

PRODUCTION AND PROCESSING OF RAW WOOD MATERIAL FOR ENERGETIC PURPOSES (BIOFUEL)

Summary: Today, bio-energy in many countries is a rapidly developing sector of power industry. The main raw materials for biofuel production are the additional materials in the form of twigs, tree apexes, etc. The article deals with the full technological cycle of the fuel chips' production in the light of technological and technical solutions, which enables parallel production of primary forest products and effective use of wood biomass.

Key words: Additional raw materials, biofuels, fuel chips, skidding-processor machine, a mobile chipper 79

PHYSICS AND MATHEMATICS

Varfolomeev A. A., Kirikov P. V., Rogov A. A.

PROBABILISTIC APPROACH TO DISTANCE COMPASSION BETWEEN SUBSETS OF FINITE SET

Summary: The article describes probabilistic approach to comparing the distances between subsets of one set based on a number of classical metrics. The paper presents distribution functions for each of the distances and a table of the quantile distributions.

Key words: Distance between subsets, the probabilistic approach, comparing the distances, binary vectors 83

Tokareva J. S.

MODIFIED FINAL-OFFER ARBITRATION PROCEDURE WITH COMMITTEE

Summary: We consider a two-person bargaining model with the participation of the arbitration committee. The players make the offers, and the proposals of the arbitrators are modeled by random variables. We suppose that the members of the committee follow the final offer arbitration rules. The final decision is determined via a majority vote. The Nash equilibrium in the modified arbitration game is found.

Key words: Final offer arbitration, equilibrium, optimal strategies 89

Shchegoleva L. V.

THE PROBLEM OF SEVERAL MOBILE UNITS ROUTE SCHEDULING

Summary: The modification of the vehicle routing problem with time windows, including additional restrictions on the technical and economic characteristics of the mobile units, is considered. Two models of the problem definition and corresponding algorithms for their solution are presented.

Key words: Routing problem with time windows, mathematical model, algorithm 93

Loginov D. V., Aleshina L. A., Fofanov A. D.

MODELS STRUCTURE OF LOCAL ATOMIC ORDER ANTHRACITE, GLASS CARBON AND SCHUNGITE

Summary: X-ray studies and calculation of coordination sphere of the radius and coordination numbers for samples of anthracite, glass carbon and schungite are accomplished. By means of computer simulation, models spacing in short range order were developed. It is shown that model clusters for different substances have various structures.

Key words: Carbon, anthracite, glass carbon, shungite, X-Ray analysis 99

All-Russian seminar for young scientists "Problems and applications of the electrocharged processing in the industry of nanomaterials and nanosystems"

Pal A. F., Rudavets A. G., Rabinkin A. N., Serov A. O.

DEPOSITION OF THIN METAL FILMS ON MICROPARTICLES SURFACE IN RF-MAGNETRON DISCHARGE PLASMA

Summary: The technique of film deposition on spherical microparticles, confined in a plasma trap, is presented. The RF magnetron discharge was used both for particle trapping and for deposition. The coating roughness was about a few nm. The theory of sputtered atoms slowing-down process due to the van der Waals collisions with working gas atoms was

developed, and the calculation of the process was carried out. It showed that the particles during the deposition experiment were close to the border region of ballistic bombardment.

Key words: Dusty plasma, magnetron sputtering, coating, powder, atom thermalization, van der Waals interaction **105**

Sasin A. V.

FORMATION OF THIN CARBON FILMS IN CROSSED FIELD DISCHARGE

Summary: Formation of the carbon films in the crossed field discharge in Neon and Argon with cylindrical geometry of the electrodes is studied. The radial distribution of the films' thickness on the butt substrate was measured by the interferometric method. The diffusion model of the film formation is constructed. Recharging of the inert gas ions and gas heating are taken into account. The experimental data are compared with model curves.

Key words: Plasma, thin films, crossed field **110**

JUBILATION

To the 75th Anniversary of E. V. Ivanter **114**
To the 65th Anniversary of V. N. Shilovskiy **116**