
Федеральное агентство по образованию

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

№ 6 (111). Сентябрь, 2010

Серия: Естественные и технические науки

Главный редактор

А. В. Воронин, доктор технических наук, профессор

Зам. главного редактора

Н. В. Доршакова, доктор медицинских наук, профессор

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

Н. В. 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.petrso.ru

Редакционный совет

- | | |
|---|---|
| В. Н. БОЛЬШАКОВ
доктор биологических наук,
профессор, академик РАН (Екатеринбург) | ПААВО ПЕЛКОНЕН
доктор технических наук,
профессор (г. Йюенсуу, Финляндия) |
| И. П. ДУДАНОВ
доктор медицинских наук, профессор,
член-корреспондент РАМН (Петрозаводск) | И. В. РОМАНОВСКИЙ
доктор физико-математических наук,
профессор (Санкт-Петербург) |
| В. Н. ЗАХАРОВ
доктор филологических наук,
профессор (Москва) | Е. С. СЕНЯВСКАЯ
доктор исторических наук, профессор (Москва) |
| А. С. ИСАЕВ
доктор биологических наук,
профессор, академик РАН (Москва) | СУЛКАЛА ВУОККО ХЕЛЕНА
доктор философии, профессор (г. Оулу, Финляндия) |
| Н. Н. МЕЛЬНИКОВ
доктор технических наук,
профессор, академик РАН (Апатиты) | Л. Н. ТИМОФЕЕВА
доктор политических наук, профессор (Москва) |
| И. И. МУЛЛОНЕН
доктор филологических наук,
профессор (Петрозаводск) | А. Ф. ТИТОВ
доктор биологических наук, профессор,
член-корреспондент РАН (Петрозаводск) |
| В. П. ОРФИНСКИЙ
доктор архитектуры, профессор,
действительный член Российской академии
архитектуры и строительных наук (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)

№ 6 (111). September, 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.petrSU.ru

Editorial Council

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

Editorial Board of the Series “Natural & Engineering Sciences”

- | | |
|---|--|
| <p>A. BOLGOV
Doctor of Agricultural Sciences,
Professor (Petrozavodsk)</p> <p>N. NEMOVA
Doctor of Biological Sciences,
the RAS Corresponding Member,
Professor (Petrozavodsk)</p> <p>V. PATYAKIN
Doctor of Technical Sciences,
Professor (St. Petersburg)</p> <p>E. RATKOVA
Series Executive Secretary (Petrozavodsk)</p> | <p>V. SISUN
Doctor of Physical-Mathematical Sciences,
Professor (Petrozavodsk)</p> <p>V. SYUNEV
Doctor of Physical-Mathematical Sciences,
Professor (Petrozavodsk)</p> <p>B. SHIROKOV
Candidate of Physical-Mathematical Sciences,
Docent (Petrozavodsk)</p> <p>V. SCHIPTSOV
Doctor of Geological-Mineralogical Sciences,
Professor (Petrozavodsk)</p> |
|---|--|

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЯ

Ивантер Э. В., Кухарева А. В.

Особенности размножения и структуры популяции лесной мышовки (*Sicista betulina* Pall.) на северном пределе ареала 8

Болотникова О. И., Михайлова Н. П.,

Гинак А. И., Немова Н. Н.

Влияние аэрации на образование продуктов биотрансформации D-ксилозы дрожжами *Pachysolen tannophilus* 14

Борвинская Е. В., Смирнов Л. П.

Некоторые методические аспекты определения активности глутатион S-трансферазы в тканях рыб 19

Рыжков Л. П., Курицын А. Е.

Сиги (*Coregonus Lavaretus* L. (Linnaeus, 1758)) некоторых водоемов Средней Карелии 22

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

Варламова Т. В., Доршакова Н. В., Карапетян Т. А.

Региональные особенности развития сахарного диабета 1-го типа у детского населения Республики Карелия 27

Маркелов Ю. М., Вязовая А. А.,

Журавлев В. Ю., Марьяндышев А. О.

Генотипическая характеристика микобактерий туберкулеза с множественной лекарственной устойчивостью в Карелии 31

Симакова М. А., Трофимов В. И., Миронова Ж. А.,

Янчина Е. Д., Дубина М. В.

Ассоциация полиморфизма C3435T гена MDR1 со степенью тяжести бронхиальной астмы 34

Юрьян А. О., Мельцер Р. И.

Особенности лечения чрезвертельных переломов бедренной кости у пациентов старших возрастных групп 38

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

Царев А. П.

Мировой опыт плантационного лесовыращивания 42

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Аюкаев Р. И., Графова Е. О.

Инженерные решения экологической безопасности при реконструкции автодорог Северо-Запада в границах водоохранных зон 49

Алешина Л. А., Люханова И. В.

Рентгенографические исследования взаимодействия технических целлюлоз с водой 55

Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Лепилин Д. В., Жукова А. И.

Моделирование уплотнения почвогрунта в боковых полосах трелевочного волока с учетом изменчивости трассы движения 61

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Клюкина Е. А., Дзюбук И. М.

Математико-статистический анализ данных по результатам морфофизиологического исследования ерша Лахтинской губы Онежского озера 65

Березина О. Я., Казакова Е. Л.,

Пергамент А. Л., Сергеева О. В.

Модификация электрических и оптических свойств тонких слоев гидратированного оксида ванадия при легировании водородом и вольфрамом 77

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

Белашев Б. З.

Нанометрология 86

Бородулин В. В., Усов А. Ф.

Вопросы разработки электротехнического оборудования для электроимпульсных дезинтеграционных установок 90

Жариков Н. Е., Пискунов А. А., Подрядчиков С. Ф.,

Семенов А. В., Хахаев А. Д., Щербина А. И.

Модификация свойств плазменно-пылевых структур и микрочастиц в комплексной плазме 99

РЕЦЕНЗИИ

Гриппа С. П., Потахин С. Б.

Рец. на кн.: Низовцев В. А., Постников А. В., Снытко В. А., Фролова Н. Л., Чеснов В. М., Широков Р. С., Широкова В. А. Исторические водные пути Севера России (XVII–XX вв.) и их роль в изменении экологической обстановки. Экспедиционные исследования: состояние, итоги, перспективы 109

Научная информация 111

Юбилей

К 60-летию со дня рождения
Е. Г. Гуменюк 113

Информация для авторов 114

Contents 115

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 24.09.2010. Формат 60х90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
10 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. (1-й завод – 140 экз.) Изд. № 198.

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



**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
ЖУРНАЛА**

Профессор,
доктор технических наук
А. В. Воронин

ДОРОГИЕ АВТОРЫ И ЧИТАТЕЛИ НАШЕГО ЖУРНАЛА!

10 июля 1940 года Совет Народных Комиссаров СССР принял постановление «Об открытии Карело-Финского государственного университета», который был создан на базе Карельского государственного педагогического института с сохранением в его составе четырех факультетов: историко-филологического, физико-математического, биологического и геолого-гидрогеографического. 2 сентября 1940 года 711 студентов приступили к занятиям. 7 сентября состоялось торжественное открытие университета.

Сегодня Петрозаводский государственный университет является крупнейшим вузом на Европейском Севере России. В 2009 году университет вошел в двадцатку лучших классических университетов Национального рейтинга российских вузов и занял 1-е место по критерию «Интернационализация», 6-е место в номинации «Бренд». За 70 лет в стенах университета подготовлено более 60 000 специалистов высшей квалификации. В настоящее время в состав университета входят 85 кафедр, 17 факультетов, среди них: агротехнический, горно-геологический, лесотехнический, математический, медицинский, строительный, физико-технический, эколого-биологический. Ежегодно выполняется более 300 научных проектов, проводится около 80 конференций и семинаров разного уровня, издаются десятки научных монографий, учебников и учебных пособий. ПетрГУ является одним из лидеров в области информационных технологий среди университетов России. В 2006 году Региональный центр новых информационных технологий (РЦНИТ) ПетрГУ, с которого началась история внедрения вычислительной техники в Карелии, отметил 45-летие успешной деятельности. В число прикладных разработок ПетрГУ входят информационные системы, системы поддержки принятия решений, информационно-аналитическая система управления вузом, системы автоматизации, автоматизированные системы управления производством, геоинформационные системы, Web-приложения и Интернет-порталы, системы дистанционного обучения, информационно-измерительные системы, разработки в области низкотемпературной плазмы и микроэлектроники, передовые технологии в строительстве, очистке воды, сельском хозяйстве, биологии и экологии, рыбном хозяйстве, медицине, лесопромышленном комплексе и другие. В университете активно ведутся работы по развитию информационно-образовательной среды вуза и материально-технической базы для внедрения информационно-коммуникационных технологий в образование и научные исследования, по развитию системы дистанционного обучения и формированию электронных ресурсов не только для университета, но и для всей региональной системы образования, здравоохранения и культуры на Европейском Севере России. Активно развивается IT-парк. Развитие и приумножение интеллектуального потенциала общества через подготовку специалистов, обладающих высокими гражданскими и нравственными качествами, было и остается главной целью ПетрГУ.

От всей души поздравляю с юбилеем университета и желаю новых научных достижений!

УДК 599.323.3:591.5

ЭРНЕСТ ВИКТОРОВИЧ ИВАНТЕР

доктор биологических наук, член-корреспондент РАН,
профессор, декан эколого-биологического факультета,
Петрозаводский государственный университет
ivanter@petrsu.ru

АННА ВЯЧЕСЛАВОВНА КУХАРЕВА

кандидат биологических наук, Карельский филиал ФГУ
«Всероссийский центр карантина растений»
annakuhareva@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ РАЗМНОЖЕНИЯ И СТРУКТУРЫ ПОПУЛЯЦИИ ЛЕСНОЙ МЫШОВКИ (*SICISTA BETULINA* PALL.) НА СЕВЕРНОМ ПРЕДЕЛЕ АРЕАЛА

На основе многолетних исследований (1958–2009 годы) характеризуются особенности размножения и экологической структуры популяции лесной мышовки (*Sicista betulina* Pall.) в Карелии, вблизи северной границы ареала. В этих условиях у данного вида размножаются только взрослые особи, с июня по начало августа, принося за это время 1 выводок из 3–11, в среднем 5,1 детеныша. Сеголетки составляют около трети популяции, зверьки в возрасте одного года – 53 %, двух лет – 11 %, трех – 2 %, четырех и старше – 1 %.

Ключевые слова: мышовка, популяция, репродукция, плодовитость, структура популяции

Будучи единственным представителем надсемейства тушканчиковобразных, обитающим преимущественно в таежной зоне и, в отличие от всех других мелких млекопитающих этого региона, впадающим в зимнюю спячку, лесная мышовка, тем более в условиях северной границы ареала, представляет для исследователей особый интерес. В основу настоящей статьи, посвященной особенностям размножения и экологической структуры популяции этого вида на северном пределе распространения, положены материалы, собранные в 1958–2009 годах в процессе многолетних стационарных (заповедник «Кивач», Приладожский стационар Карку, окрестности Кончезерской биостанции) и экспедиционных исследований, охвативших всю территорию южной половины Карелии.

Для изучения размножения лесных мышовок популяцию этих зверьков мы подразделяли на возрастные группы. Для их выделения послужил основанный на рекомендациях Г. А. Клевезаль [8] метод возрастной диагностики мышовок [4], [5], заключающийся в подсчете годовых слоев (линий склеивания) на окрашенных гематоксилином Эрлиха поперечных срезах нижней челюсти в периостальной зоне кости (рис. 1).

Точное определение возраста зверьков и анализ состояния их половой системы показывают, что в условиях таежного Северо-Запада России лесные мышовки впервые начинают размножаться в возрасте около года, после первой зимовки. Никаких изменений в гонадах сеголеток, указывающих на возможность их созревания и участия в размножении в год своего рождения, не обнаружено. Размеры семенников не превышают у них 5,0 × 3,3 мм, а вес – 57 мг (табл. 1). Инфантильная матка имеет рога до 17, влагалище – до 10,5 мм.

У взрослых мышовок размеры половых органов в несколько раз больше. Вес двух семенников – 33–250 мг, длина семенника – 3,2–12,1 мм, длина рогов матки – 9,0–32, влагалище – 2,5–18,7 мм. Семенные пузырьки выражены только у зимовавших особей. О позднем половом созревании лесных мышовок (отсутствии размножения молодых, созревающих лишь на следующий год после рождения) сообщают и другие исследователи [13], [15], [21], [1], [11], [3], [20].

О сроках и интенсивности размножения лесной мышовки в Карелии можно судить по результатам специального гистологического исследования половых циклов самцов и самок. В начале июня, когда у этого вида начинается сезон репродукции, функциональное состояние половых органов самцов характеризуется активным сперматогенезом. Внешне это выражается в значительном увеличении веса семенников (к июлю – до 177 мг) и их размеров (до 7,2–7,9 мм к концу июня), а также в развитии придаточных желез. В семенных канальцах (средний диаметр – 192 мкм) присутствуют все клеточные элементы от клеток Сертоли и сперматогониев до зрелых сперматозоидов, собирающихся в просветах канальцев.

Гистологическая картина сперматогенеза и сезонные изменения размеров гонад (рис. 2 и 3) показывают его стабильную активность в период с начала – середины июня и до конца июля, то есть в течение большей части периода бодрствования, отсутствие каких-либо подъемов и спадов, соответствующих периодам спаривания и паузам между ними. Постепенное затухание сперматогенеза и дегенерация зародышевого эпителия до однорядного слоя сперматогониев и клеток Сертоли начинаются в августе, но в массе происходят, очевидно, только в сентябре, перед впадением в спячку.

У молодых самцов гонады находятся в состоянии полного покоя, генеративный эпителий содержит лишь клетки Сертоли и сперматогонии (рис. 3).

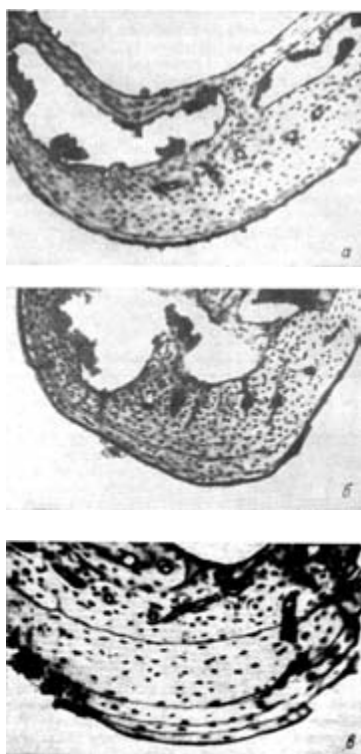


Рис. 1. Поперечные срезы нижней челюсти мышовок разного возраста: а – в возрасте 1 года; б – 2 лет; в – 4 лет. Окраска гематоксилином Эрлиха, $\times 60$

Таблица 1

Характеристика половой системы лесной мышовки

Показатели	Зимовавшие			Прибылые, август
	июнь	июль	август	
Самцы				
число исследованных зверьков	208	89	21	55
длина семенника, мм	6,7 (5,0–11,0)	6,4 (4,8–12,1)	4,8 (3,2–6,0)	3,9 (3,0–5,0)
число исследованных зверьков	202	85	19	7
длина семенных пу- зырьков, мм	8,4 (3,5–11,7)	7,8 (4,5–11,0)	3,0 (2,5–4,5)	2,5 (1,0–3,6)
число исследованных зверьков	78	61	17	21
вес двух семенников, мг	176 (114–250)	150 (69–205)	68 (33–130)	36,1 (22–57)
Самки				
число исследованных зверьков	38	33	14	28
длина рогов матки, мм	18,2 (11,0–27,6)	19,4 (9,0–32,0)	17,8 (12,3–23,6)	11,2 (6,0–17,0)
число исследованных зверьков	19	26	14	19
длина влагалища, мм	5,4 (2,7–11,2)	8,8 (3,8–17,4)	8,9 (2,5–18,7)	4,0 (1,0–10,5)

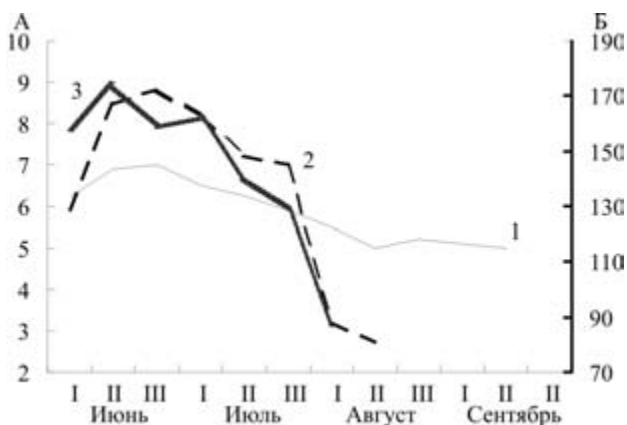


Рис. 2. Средняя длина семенника (1), семенных пузырьков (2) и средний вес двух семенников (3) у лесных мышовок по декадам. По оси абсцисс – декады (римские цифры); по оси ординат А – длина, мм; по оси ординат Б – вес, мг

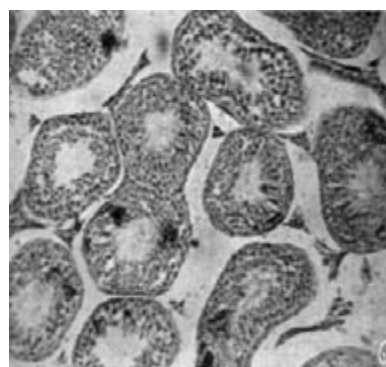
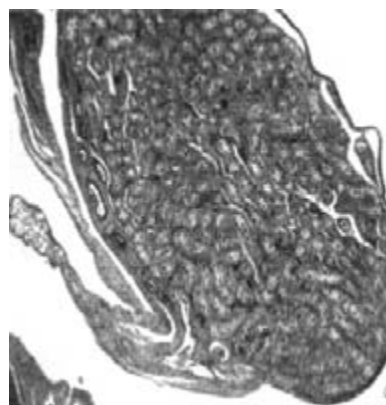


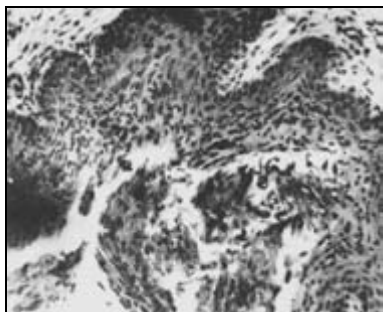
Рис. 3. Поперечные срезы извитых канальцев семенника молодого самца лесной мышовки на стадии покоя (а) и взрослого в период сперматогенеза (б). Микрофото, $\times 400$

Изучение эстрального цикла самок (рис. 4) показало, что лесная мышовка – моноциклический вид, лишь однажды за лето приходящий в состояние эструса, причем по времени эструсы самок соответствуют активному сперматогенезу самцов. В июне половые органы самок увеличены, а в июле достигают максимальных размеров (табл. 2). Особенно резко возрастает вес яичников (до 10–12 мг). В яичниках много фолликулов

на разных стадиях развития, от примордиальных до графовых пузырьков, диаметром от 130 до 300 мкм. Ткань яичника богата кровеносными сосудами. Некоторые полостные фолликулы близки к разрыву. Эпителий слизистой влагалища многорядный, в верхних слоях хорошо заметно ороговение клеток, происходит их усиленная дисквамация. У беременных самок (в июне – июле) яичник содержит желтые тела беременности (их максимальный диаметр – 258 мкм) и атрезии. Матка гиперемирована и на поперечном разрезе имеет звездчатую форму, в просвете – секрет маточных желез. После родов рост фолликулов замедляется, прекращается он на стадии образования многослойного зачаткового эпителия; одновременно увеличивается число атрезирующих фолликулов.



а



б

Рис. 4. Срезы половых органов взрослой самки лесной мышовки: а – яичник в период интенсивной фолликулярной деятельности; б – влагалище во время эструса

Общий ход и интенсивность размножения самок лесной мышовки по декадам представлены в табл. 2. Согласно этим данным, во второй декаде июня (до этого времени взрослые самки нам не попадались) около трети взрослых самок были беременны, остальные или еще не размножались (64 %), или уже завершили кормление недавно появившегося выводка (7 %). К концу июня число беременных (42 %), лактирующих (5 %) и рожающих (26 %) самок значительно возрастает, а без следов размножения, напротив, сокращается (26 %). В первой декаде июля более 90 % особей принимают участие в размножении, при этом процент беременных достигает максимума (60 %), затем их доля по-

степенно снижается. К концу месяца большинство самок уже обзаводятся потомством (78 %) и либо приступают к лактации (43 %), либо уже откормили выводок (36 %). В августе отлавливались только кормящие самки (32 %), остальные уже закончили размножение. Все это говорит о том, что в условиях Карелии лесные полевки приносят за лето только один выводок (об этом говорит и одновершинный характер кривой уловов молодых), причем массовое рождение детенышей приходится на первую половину июля.

Если учесть, что беременность длится у этого вида 25–30 дней [22], то общая картина размножения лесной мышовки в Карелии представляется следующим образом. Массовый гон и спаривание происходят в первой половине июня, рождение детенышей – в первой-второй декадах июля, а их массовое расселение (переход к самостоятельной жизни и выход из гнезд) – в августе, то есть через 30–40 дней после рождения. Это соответствует продолжительности гнездового развития (35–37 дней), установленной в результате прямых наблюдений за жизнью новорожденных [1], [17].

Характерные сезонные изменения численности мышовок [4], [6], [7] свидетельствуют о сравнительно позднем их размножении в Карелии. Вследствие этого здесь наблюдаются и более поздние выход и расселение молодых (не ранее последней декады июля), тогда как в более южных районах их начинают ловить почти на месяц раньше [23], [13], [10], [19]. Лишь в средней Сибири размножение этого вида проходит в близкие с Карелией сроки [14], [3], [11].

Таблица 2

Интенсивность размножения взрослых самок лесной мышовки

Месяц и дека- да	Общее чис- ло исследо- ванных самок	Относительное количество самок (% от общего числа)			
		беремен- ных	кормя- щих	рожав- ших	без следов размноже- ния
Июнь					
II	14	28,6	–	7,1	64,3
III	19	42,1	5,3	26,3	26,3
II–III	33	36,4	3,0	18,2	42,4
Июль					
I	25	60	4	28	8
II	28	39,3	17,9	14,3	58,6
III	14	7,1	42,9	35,7	14,3
I–III	67	40,3	17,9	23,9	17,9
Август					
I	9	–	55,6	33,3	11,1
II	8	–	25	50	25
III	5	–	–	–	100
I–III	22	–	31,8	31,8	36,4
Сен- тябрь (I–III)	8	–	–	–	100

Таблица 3

Вариации величины выводка у лесной мышовки в Карелии

Месяц	Общее число беременных самок	Количество самок (экз.) с числом эм- брионов									Среднее число эмбрионов на самку
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	
По всему материалу											
Июнь	12	2	3	5	—	1	—	—	1	5,1 (2,2 + 2,9)	
Июль	35	2	13	7	9	3	—	1	—	5,1 (2,6 + 2,5)	
Август	6	—	1	3	2	—	—	—	—	5,2 (2,8 + 2,4)	
Всего	53	8	21	20	11	4	—	1	—	5,1 (2,6 + 2,5)	
Из них: самки в возрасте 1 года											
Июль	21	1	4	8	6	1	—	1	—	5,3 (2,9 + 2,4)	
самки в возрасте 2 лет и старше											
Июль	8	2	5	—	1	—	—	—	—	4,0 (2,0 + 2,0)	

Примечание. В скобках указано число эмбрионов в правом и левом рогах матки.

Сроки размножения лесной мышовки меняются по годам в зависимости от метеорологической обстановки, и прежде всего от хода весны. При раннем наступлении весенних явлений, теплой и сухой погоде в мае – июне размножение зверьков начинается раньше и проходит в более сжатые сроки. Напротив, в годы с поздней, затяжной и холодной весной размножение сильно задерживается и растягивается. Наиболее раннее начало размножения лесной мышовки наблюдалось в Карелии в 1959 году, когда переход среднесуточной температуры через 0 и 5° был отмечен соответственно 13 и 26 апреля. Гон у мышовок проходил в тот год в начале июня, первые беременные самки встречены 7 и 9 июня, а первые молодые – в конце июля (26.07). Почти на полмесяца позднее началось размножение в 1951 и 1958 годах. Переход среднесуточной температуры через 0 и 5° в 1951 году произошел 25 апреля и 19 мая, в 1958 году – 28 апреля и 22 мая. В связи с этим задержалось и размножение. Первые беременные самки были добыты в самом конце июня (27.07.1951 и 25.07.1958), первые молодые – во второй декаде августа (12.08.1951, 18.08.1958).

Гораздо стабильнее интенсивность размножения. Доля участвующих в нем перезимовавших самок почти не меняется по годам и составляет 98–100 %. Несущественны различия и в величине разовой плодовитости. Таким образом, в отличие от ряда других видов мелких млекопитающих Карелии, годовые изменения численности лесной мышовки обусловлены в основном экзогенными факторами. Размножение этого вида характеризуется невысоким темпом (размножаются только взрослые особи, и к тому же всего 1 раз в год), и поэтому не может служить эффективным регулятором его численности.

С другой стороны, популяция мышовок в Карелии отличается общей невысокой плотностью и даже в годы пиков численности не достигает критической величины. В этих условиях вряд ли есть необходимость в выработке внутривидовой

механизмов автоконтроля. Их отсутствие является следствием общей невысокой численности вида у северной границы ареала и одновременно причиной резких колебаний его плотности на этом фоне. Не исключено, что в отдельных участках ареала с оптимальными условиями, где средний многолетний уровень численности вида в несколько раз выше, чем на Северо-Западе России, механизмы эндогенной саморегуляции все же имеют место. Иначе трудно объяснить стабильность численности популяции при высоком уровне ее плотности и отсутствие этой стабильности при низкой плотности популяции. В первом случае численность может регулироваться за счет изменения числа участвующих в размножении взрослых самок (в Татарии и Кировской области в некоторые годы отмечалось до 10 и даже до 70 % яловых самок) [13], [10], а во втором – с этой задачей вполне справляются внешние факторы (например, климатические условия), и интенсивность размножения не меняется по годам.

Средний размер выводка у лесных мышовок Карелии на основании подсчета эмбрионов у 53 беременных самок составил $5,1 \pm 0,2$ с колебаниями от 3 до 11 (табл. 3). Это несколько ниже, чем в Кировской области, Республике Коми и Татарии, где средний показатель плодовитости равнялся соответственно 5,5, 5,9 и 5,5 (в Волжско-Камском заповеднике, по данным И. В. Назаровой и В. В. Мовчаренко [13], эта величина составила 6,4), но выше, чем в предгорьях Алтая (4,3 эмбриона на самку), долине р. Верхняя Ангара (3,7) и Ивановской области (4,0) [13], [10], [11], [3], [18].

Среднее число эмбрионов, приходящихся на 1 самку, в течение репродуктивного периода практически не меняется. Наибольшей плодовитостью отличаются первородящие годовалые самки, с возрастом она снижается (табл. 3). Различий между средним числом эмбрионов и плацентарных пятен, на что указывал для Татарии В. А. Попов [13], на нашем материале не обнаружено: на 1 беременную самку приходится в среднем $5,11 \pm 0,30$ эмбриона, а на 1 рожавшую – $5,16 \pm 0,32$ плацентарных пятна. Разница статистически недостоверна ($p < 0,01$). Это не значит, что в наших условиях у мышовок вообще нет рассасывания эмбрионов. Просто автолиз может проходить на более ранних этапах эмбриогенеза и данным методом не фиксироваться. Кроме того, мы имеем и прямое подтверждение существования у них автолиза: у одной из беременных самок обнаружен явно отстающий в росте и рассасывающийся эмбрион. Но одно бесспорно: масштабы эмбриональной гибели у мышовок Карелии незначительны, во всяком случае, в последние 2–3 недели беременности. Что же касается распределения эмбрионов по рогам матки, то оно практически равномерное (различия в пределах ошибки).

Обращает внимание весьма значительная асимметричность кривой распределения самок по числу эмбрионов в выводке (показатель «косо-сти» A равен $+1,5$; $m = 0,39$; $t = 4,4$). Это указыва-

ет на существование в популяции лесных мышовок Карелии отчетливой тенденции к увеличению разовой плодовитости и свидетельствует о том, что процесс эволюционного отбора на повышенную плодовитость (призванную компенсировать повышенную смертность) еще не завершен: уровень плодовитости еще не достиг оптимального для данных условий уровня. Мышовка проникла на север сравнительно недавно, и адаптация ее к местным условиям, по-видимому, еще продолжается.

Половой состав отловленных взрослых мышовок отражает изменение активности зверьков разного пола в связи с размножением (табл. 4, рис. 3 и 4). В первой декаде июня ловятся исключительно самцы, во второй половине месяца они составляют около 90 %, а затем, обычно ко второй половине июля, по мере снижения половой активности самцов и освобождения самок от забот о выводке, соотношение полов выравнивается. В августе оно снова уклоняется от 1:1, но уже в пользу самок (70,6 %). К этому времени они уже откормили выводок и активность их, а вместе с ней и отлов, увеличивается.

Общая доля самцов в уловах взрослых зверьков составила по всему материалу 74,1 %, причем сопоставление полученных величин хи-квадрат с критической (3,84) говорит о большой статистической достоверности отмеченной диспропорции. Приблизительно такая же картина наблюдается и в других частях ареала [16], [23], [13], [12], [3].

В уловах молодых мышовок с июля по сентябрь также преобладали самцы, но их количественное доминирование не столь существенно (табл. 5). Тем не менее высказанное нами ранее [4], [6], [7] предположение о том, что это связано не с большей их активностью, а с количественным преобладанием в популяции вследствие более частого рождения особей мужского пола, остается в силе. К близкому выводу приходят и другие исследователи [13], [15], [11]. Это позволяет отнести лесную мышовку к видам со стойким численным преобладанием самцов [9], [2].

Возрастной состав популяции мышовок меняется по сезонам (табл. 5, рис. 5 и 6). До конца июля в ловушки и канавки попадают почти исключительно взрослые перезимовавшие особи, а начиная с первой декады августа все больший удельный вес в уловах занимают молодые зверьки. В начале месяца их не более 40 %, в середине и конце месяца – 84 %, а в сентябре – 90–100 %. Ко второй декаде сентября взрослые мышовки почти полностью исчезают и ловятся только прибылые зверьки, родившиеся в текущем году. При этом сокращается не только относительная (доля в уловах), но и абсолютная численность взрослых животных. Такое резкое изменение возрастной структуры популяции мышовок в конце лета связано как с процессами естественной смертности взрослых особей, так и с более ранним уходом их на зимовку. Последнее характерно, по-видимому, и для

зверьков других популяций [10], [17]. Сроки появления молодых мышовок в отловах варьируют в разных частях ареала. В долине р. Верхняя Ангара они попадают с конца июля, в тайге Сосвинского Приобья – несколько позже (в начале августа), причем особенно резкое увеличение их количества в отловах произошло в третьей декаде этого месяца [11]. В южных же частях ареала (Татария, Оренбургская область, предгорья Алтая) прибылые зверьки начинают встречаться почти на месяц раньше, с первых чисел июля [13], [10], [19].

Большой интерес представляет анализ возрастного состава взрослой части популяции (табл. 5). Благодаря применению специальной методики определения возраста мышовок (по слоистым структурам кости нижней челюсти) удалось установить, что основу группы зимовавших зверьков составляют особи, родившиеся в прошлом году (80 %), далее следуют мышовки, пережившие две зимы (16 %), и совсем редки особи трех лет и старше (4 %). В августе – сентябре, перед уходом на зимовку, популяция имеет следующую структуру: прибылые составляют около 80 %, годовики – 16,4, двухлетки – 2,7, трехлетние и более старые – 0,9 %. Таким образом, численность каждой следующей возрастной группы сокращается по сравнению с предыдущей в 5–6 раз, или в среднем на 80 %. Эти 80 % и составляют величину годовой смертности населения мышовок, причем, судя по тому, что количественное соотношение между соседними возрастными группами довольно стойко сохраняется, темп смертности у них приблизительно одинаков.

Таблица 4

Возрастной и половой состав популяции лесной мышовки в Карелии (по данным отлова)

Месяц	Число зимовавших			Число прибылых			Общее число зверьков	
	абс.	из них самцы, %	χ^2	абс.	из них самцы, %	χ^2		
Июнь	275	88,4	162,0	–	–	–	275	100
Июль	171	58,5	4,9	12	58,3	0,3	183	93,4
Август	33	36,4	2,5	145	53,1	0,6	178	18,5
Сентябрь	3	66,6	0,3	30	63,3	2,1	33	9,1
Всего	482	74,1	111,7	187	55,1	1,9	669	72,0

Таблица 5

Возрастная структура популяции лесной мышовки (по исследованию черепов)

Возрастные группы	По слоистым структурам		По стертости зубов	
	n	%	n	%
Сеголетки	49	32,9	76	45,5
Годовики	80	53,0	66	39,5
Двухлетки	16	10,7	24	14,4
Трехлетки	3	2,0	1	0,6
Четыре года и старше	1	0,7	0	0
Всего	149	100	167	100

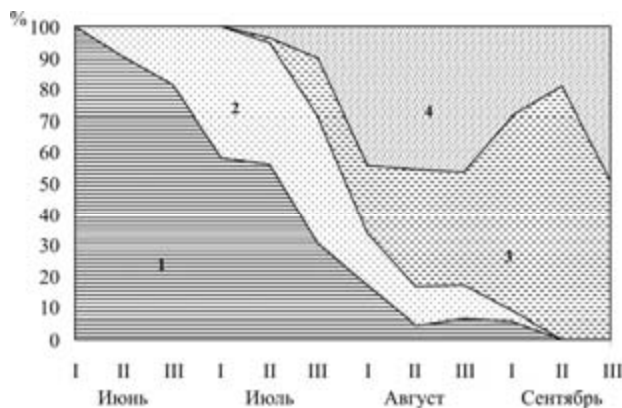


Рис. 5. Изменения половой и возрастной структуры популяции лесной мышовки по данным отлова:
1 – зимовавшие самцы; 2 – зимовавшие самки; 3 – прибылые самцы; 4 – прибылые самки. По оси абсцисс – декады; по оси ординат – доля улова, %

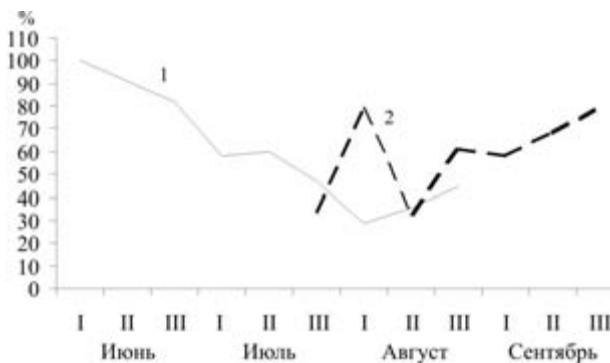


Рис. 6. Изменение доли (%) самцов у взрослых (1) и молодых (2) лесных мышовок по декадам

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айрапетьянц А. Э. К биологии лесной мышовки в Ленинградской области // Вопросы экологии и биоценологии. Вып. 9. Л.: ЛГУ, 1969. С. 117–124.
2. Большаков В. Н., Кубанцев Б. С. Половая структура популяций млекопитающих и ее динамика. М.: Наука, 1984. 232 с.
3. Буйдалина Ф. Р. Лесная мышовка (*Sicista betulina* Pall.) в тайге Сосьвинского Приобья // Фауна, таксономия, экология млекопитающих и птиц. Новосибирск: Наука. СО АН СССР, 1987. С. 41–43.
4. Ивантер Э. В. К экологии лесной мышовки (*Sicista betulina* Pall.) // Aquilo. Ser. Zool. 13: 1972. С. 103–108.
5. Ивантер Э. В. Методика определения возраста лесной мышовки, *Sicista betulina* (Rodentia, Dipodidae) // Зоол. журн. 1973. Т. 52. № 2. С. 255–257.
6. Ивантер Э. В. Популяционная экология мелких млекопитающих таежного Северо-Запада СССР. Л.: Наука. ЛО, 1975. 246 с.
7. Ивантер Э. В. К экологии лесной мышовки (*Sicista betulina* Pall.) // Зоол. журн. 2007. Т. 86. С. 476–493.
8. Клевезаль Г. А. Регистрирующие структуры млекопитающих в зоологических исследованиях. М.: Наука, 1988. 286 с.
9. Кубанцев Б. С. О половом составе популяций у млекопитающих // Журн. общ. биол. 1972. Т. 33. № 2.
10. Кулик И. Л., Тупикова Н. В., Никитина Н. А., Карасева Е. В., Суворова Л. Г. Материалы по экологии лесной мышовки (*Sicista betulina* Pall.) // Сб. тр. зоол. музея МГУ. Вып. 10. М.: МГУ, 1968. С. 146–160.
11. Лямкин В. Ф., Малышев Ю. С., Пузанов В. М. К экологии лесной мышовки на Северо-Восточной оконечности ареала // Грызуны: Материалы VI Всесоюзного совещ. Л.: Наука, 1983. С. 328–329.
12. Плешак Т. В., Козловский И. С. К экологии лесной мышовки // Биология и промысел охотничьих животных. Пермь, 1983. С. 57–61.
13. Попов В. А. Млекопитающие Волжско-Камского края. Казань: Казанский филиал АН СССР, 1960. 467 с.
14. Реймерс Н. Ф. Птицы и млекопитающие южной тайги Средней Сибири. М.; Л.: Наука, 1966. 420 с.
15. Реймерс Н. Ф., Воронов Г. А. Насекомоядные и грызуны Верхней Лены. Иркутск: Иркутское книжн. изд-во, 1963. 191 с.
16. Снигиревская Е. М. Грызуны Башкирского заповедника // Тр. Башк. гос. заповедника. Вып. 1. Уфа, 1947. С. 5–16.
17. Фокин И. М. Тушканчики. Л.: ЛГУ, 1978. 181 с.
18. Хелевина С. А., Окулова Н. М. Экология и морфология лесной мышовки (*Sicista betulina* Pall.) Ивановской области // Тушканчики фауны СССР: Тез. Всесоюзного совещ. Ташкент: ФАН, 1988. С. 116–119.
19. Цветкова А. А. Особенности размножения степной и лесной мышовок на Южном Урале // Экология. 1978. № 3. С. 90–92.
20. Шенброт Г. И., Соколов В. Е., Гептнер В. Г., Ковальская Ю. М. Тушканчикиообразные. Млекопитающие России и сопредельных регионов. М.: Наука, 1995. 573 с.
21. Штильмарк Ф. Р. Основные черты экологии мышевидных грызунов в кедровых лесах Западного Саяна // Фауна кедровых лесов Сибири и ее использование. М.: Наука, 1965. С. 5–52.
22. Godfrey G. K. Observation on the nature of the decline in numbers of two *Microtus* populations // J. Mammal. 1955. Vol. 36. № 2.
23. Kubik J. Badania nad morfologia i biologia smuzki (*Sicista betulina* Pall.) Bialowieskiego Parku Narodowego // Ann. Univ. M. Curie-Sklod. 1952. С. 7.1.

УДК 582.282.23.017.6

ОЛЬГА ИВАНОВНА БОЛОТНИКОВА

кандидат биологических наук, доцент кафедры молекулярной биологии, биологической и органической химии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет
bolot@onego.ru

НАТАЛЬЯ ПАВЛОВНА МИХАЙЛОВА

доктор биологических наук, старший научный сотрудник кафедры молекулярной биотехнологии факультета тонкого и микробиологического синтеза, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
m_natalia2@rambler.ru

АНАТОЛИЙ ИОСИФОВИЧ ГИНАК

доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой молекулярной биотехнологии факультета тонкого и микробиологического синтеза, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
wb@ctinet.ru

НИНА НИКОЛАЕВНА НЕМОВА

доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией экологической биохимии, директор Института биологии, Карельский научный центр РАН, заведующий кафедрой молекулярной биологии, биологической и органической химии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет
nemova@krc.karelia.ru

ВЛИЯНИЕ АЭРАЦИИ НА ОБРАЗОВАНИЕ ПРОДУКТОВ БИОТРАНСФОРМАЦИИ D-КСИЛОЗЫ ДРОЖЖАМИ *PACHYSOLEN TANNOPHILUS*

Исследовано влияние скорости поступления кислорода в ферментационную среду (OTR, мМоль/л · ч) на образование дрожжами *P. tannophilus* Y-1532 продуктов неполного окисления D-ксилозы. Максимальные экономические коэффициенты образования ксилита и этанола (Yp/s) были зарегистрированы при 2,0–5,0 мМоль/л · ч и 5,0–8,0 мМоль/л · ч соответственно. Обсуждается роль кислорода в формировании дисбаланса НАДН/НАДФ+, а также его значение для продукции ксилита и этилового спирта дрожжами.

Ключевые слова: аэрация, дрожжи *P. tannophilus*, D-ксилоза, ксилит, этанол

ВВЕДЕНИЕ

Гидролиз растительной гемицеллюлозы приводит к появлению D-ксилозы, которая может быть подвергнута биоконверсии с помощью ксилоассимилирующих микроорганизмов. Дрожжи, относящиеся к виду *P. tannophilus*, обладают уникальной способностью восстанавливать этот сахар в ксилит и при неполном его окислении образовывать этанол [6]. Многочисленные исследования показывают, что эффективность накопления ксилита и этанола при ферментации D-ксилозы в значительной мере определяется внешними факторами, главным из которых считают кислород. Интенсивность аэрации непосредственно регулирует синтез D-ксилоулозы из ксилита в присутствии ксилоредуктазы [7].

Накопление ксилита часто является следствием кислородного голодания клеток. Напротив, увеличение концентрации растворенного кислорода в среде обеспечивает прирост дрожжевой биомассы, так как гликолитическому окислению D-ксилоулозы предшествует ее метаболизм в глицеральдегид-3-фосфат и фруктозо-6-фосфат – интермедиаты пентозофосфатного цикла [11]. И наконец, являясь акцептором электронов и протонов дыхательной цепи митохондрий, кислород оказывает влияние на спиртообразующую активность дрожжей [8], [11]. Тем не менее до сих пор не определены параметры аэрации, которые обеспечивают переключение внутриклеточного метаболизма *P. tannophilus* и накопление того или иного промежуточного продукта ферментации D-ксилозы. Поэтому анализ влия-

ния условий аэрации на образование дрожжами *P. tannophilus* ксилита и этилового спирта из D-ксилозы являлся целью настоящей работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовали дрожжи *P. tannophilus* Y-1532 (ВКПМ, ВНИИГенетика, Москва). Среда для ферментаций имела состав (г/л): D-ксилоза-20, пептон-20, дрожжевой экстракт-5 [6]. Посевной материал выращивали на среде с 2 % D-глюкозой в соответствии с [4]. Скорости поступления кислорода в среду (OTR, мМоль/л·ч) оценивали сульфитным методом [2]. Необходимые режимы аэрирования создавали путем варьирования степени заполнения колб и ферментера питательной средой, а также числа оборотов круговой качалки (мешалки ферментера). Параметры культивирования дрожжей приведены в табл. 1. При скоростях поступления кислорода от 0,0 мМоль/л·ч до 8,0 мМоль/л·ч ферментации проводили в колбах Эрленмейера объемами 100 мл и 250 мл согласно [7]. Значения OTR в пределах 5,8–140,0 мМоль/л·ч поддерживали в лабораторной ферментационной установке Biostat M (Braun, Германия) емкостью 2 л (коэффициент заполнения – 0,75), снабженной турбинной мешалкой и барботером, компрессором с регулируемой подачей стерильного воздуха, редуктором для варьирования скорости вращения мешалки, датчиками для измерения pH и pO_2 . Поддержание значения pH достигалось автоматической подачей раствора едкого натра, пеногашение – разовыми порциями олеиновой кислоты. Концентрацию растворенного кислорода в среде определяли с использованием кислородного электрода (Ingold, Германия) согласно [13]. Калибровку кислородного электрода проводили непосредственно перед каждым экспериментом: за 100 % шкалы pO_2 принимали содержание кислорода в среде при интенсивной аэрации (1,8 объема воздуха / 1 объем среды и скорости перемешивания 800 об/мин в течение часа), за нулевой уровень – содержание кислорода в среде, насыщенной раствором сульфита натрия. Величина pH среды и температура культивирования соответствовали указанным в [4], [6]. Раннее истощение питательной среды и быстрое наступление субстратного лимитирования предотвращали внесением низких концентраций посевного материала [5].

В качестве контроля использовали условия без принудительной аэрации (анаэробные) и не лимитирующие рост (аэробные) [7]. Пробы для исследования отбирали через каждые 2 часа ферментации. По окончании ферментации дрожжевую биомассу отделяли на лабораторной центрифуге ПК-6 (СССР) в течение 5–10 мин при 5000 об/мин. Анализ концентраций этилового спирта, ксилита и остаточной D-ксилозы в культуральной жидкости проводили методами газо-жидкостной хроматографии на приборе Vis-

ta 600 («Varian», США) в соответствии с условиями, описанными в [6]. Биомассу определяли по поглощению суспензии клеток при 620 нм на спектрофотометре СФ-46 (СССР). Статистическую обработку результатов осуществляли согласно [1].

Таблица 1

Параметры ферментации D-ксилозы дрожжами *P. tannophilus* при различных скоростях растворения кислорода в среде

Условия	с п о с о б	Объем колбы или ферментера, мл	Кол-во сред, мл	Кол-во посеваемого материала, г а.с.в./л	Интенсивность аэрации		Скорость растворения кислорода (OTR), мМоль/л·ч
					скорость вращения, об/мин ⁻¹	об.возд./об. среды, мин	
анаэробные*	к о л б ы ф е р м е н т е р а	100	100	10,0	нет	–	0
микро-аэробные	л б	250	200	1,0	100	–	2,0
	ф		100	1,0	100	–	5,0
	е		50	6,0	100	0,1	8,0
	р		1500	3,0	200	0,3	5,8
	м		1400	1,0	300	0,5	8,0
	е		1300			1,0	13,0
аэробные	е	2000					36,0
	н		900	0,9	600	1,4	140,0
	т						
	е						
	р						

Примечание. * – условия без принудительной аэрации, при которых ферментационная среда была полностью насыщена раствором сульфита натрия.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Среди известных методов оценки степени аэрирования культуральной среды наиболее удобным является сульфитный, характеризующий скорость растворения кислорода (OTR, мМоль/л·ч) и одновременно с этим позволяющий определить его количество, необходимое для достижения максимального экономического коэффициента образования того или иного продукта. Поскольку режим ограниченного снабжения дрожжей кислородом благоприятствует накоплению в ферментационной среде не только ксилита, но и этанола [6], [7], [10], особое внимание было уделено микроаэробной ферментации D-ксилозы.

ФЕРМЕНТАЦИЯ D-КСИЛОЗЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ АЭРАЦИИ

Образование ксилита, этанола и биомассы дрожжами *P. tannophilus* при различных скоростях поступления кислорода в ферментационную среду иллюстрируют табл. 2 и рисунок. Показано, что увеличение интенсивности аэрации приводило к сокращению времени ассимиляции

D-ксилозы. При $OTR = 0$ мМоль/л · ч (условия, названные нами анаэробными) потребление сахара было менее 5 % и накопления продуктов биоконверсии не наблюдалось. Однако при режиме аэрации 2,0 мМоль/л · ч к концу ферментации утилизировалось до 87 % D-ксилозы со скоростью 0,20 г/л · ч. В этом случае основным продуктом микроаэробной ферментации был ксилит (с максимальной концентрацией 4,60 г/л и величиной экономического коэффициента образования 0,23 г/г). Тем не менее наибольшую объемную (0,08 г/л · ч) и удельную (0,04 ч⁻¹) продуктивности пятиатомного спирта зарегистрировали при OTR 5,0 мМоль/л · ч, когда потребление D-ксилозы уже достигло 99 %. Более того, данный режим аэрации обеспечивал максимальные значения концентрации и экономического выхода этанола (5,00 г/л и 0,25 г/г соответственно). В то же время наибольшие показатели объемной и удельной продуктивности спирта (0,14 г/л · ч и 0,10 ч⁻¹) были выявлены при OTR 8,0 мМоль/л · ч (табл. 2). Таким образом, незначительный сдвиг интенсивности аэрации ферментационной среды в сторону увеличения, необходимый для достижения максимальных продуктивностей, является общей тенденцией, ха-

рактерной как для ксилита, так и для этилового спирта.

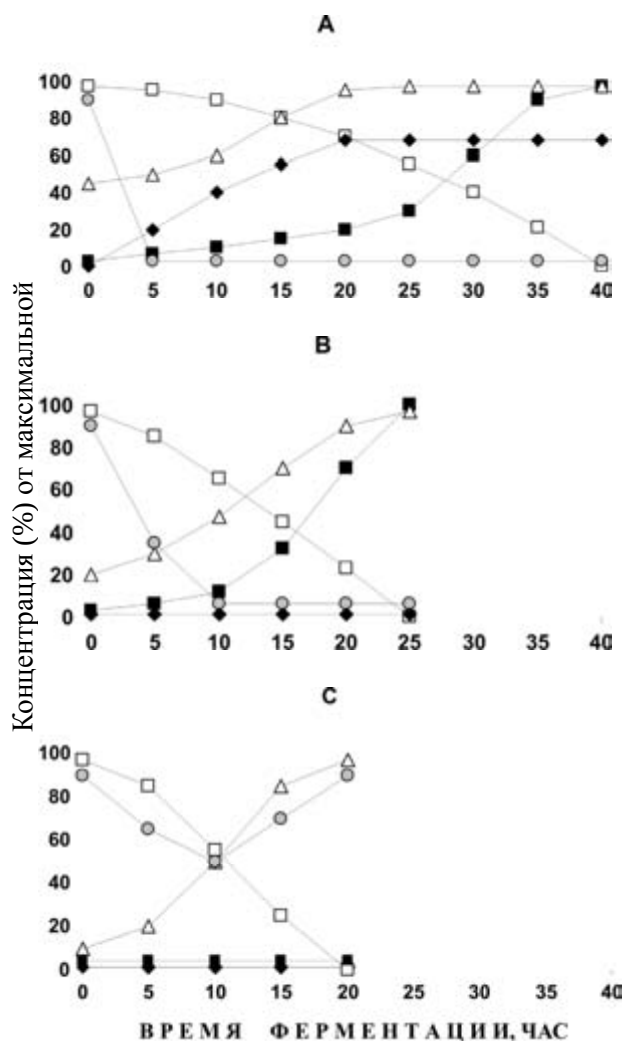
Использование лабораторной ферментационной установки позволило рассчитать с помощью кислородного электрода значения pO_2 . Быстрое снижение этого параметра до нуля при скоростях растворения кислорода от 5,8 до 36,0 мМоль/л · ч указывало на лимитирование биосинтетической активности дрожжей за счет создания микроаэробных условий культивирования (см. рисунок А, В). Резкое (уже к 5-му часу ферментации) падение pO_2 при OTR 5,8–13,0 мМоль/л · ч свидетельствовало о значительном дефиците кислорода в среде. Динамика образования ксилита, этанола и дрожжевой биомассы в этом случае характеризовалась рядом общих черт (см. рисунок А). Так, ксилит появлялся в среде уже с первых часов ферментации, и при 40 % исчерпании D-ксилозы его концентрация достигала максимального значения. Только после этого активизировался синтез этанола, который продолжался вплоть до окончания процесса биоконверсии сахара. Удельная скорость роста дрожжей и накопление биомассы в данном режиме аэрации были незначительными: 0,05–0,14 ч⁻¹ и 0,08–0,25 г/г соответственно (табл. 2).

Таблица 2

Ферментация D-ксилозы дрожжами *Y-1532 P. tannophilus* в различных режимах принудительной аэрации

Способ ферментации		колбы				ферментер		
Объемная скорость растворения кислорода (OTR), мМоль/л · ч		0	2,0	5,0	8,0	13,0	36,0	140,0
D-ксилоза	Скорость утилизации, г/л · ч	≤0,01	0,20	0,46	0,50	0,64	0,76	0,91
	Степень потребления, %	≤5	87	≥99				
Конечная концентрация, г/л	ксилит	≤0,01	4,60	3,20	2,40	1,00	≤0,01	≤0,01
	этанол	≤0,01	3,40	5,00	4,60	3,20	1,80	≤0,01
	биомасса	1,01	1,60	2,40	2,80	6,00	7,80	10,40
Экономический коэффициент, г/г	ксилит	≤0,01	0,23	0,16	0,12	0,05	≤0,01	≤0,01
	этанол	≤0,01	0,17	0,25	0,23	0,16	0,09	≤0,01
	биомасса	≤0,01	0,03	0,08	0,09	0,25	0,34	0,41
Объемная продуктивность, г/л · ч	ксилит	≤0,01	0,04	0,08	0,06	0,03	≤0,01	≤0,01
	этанол	≤0,01	0,03	0,13	0,14	0,07	0,04	≤0,01
	биомасса	≤0,01	0,01	0,05	0,07	0,11	0,42	0,53
Удельная продуктивность, ч ⁻¹	ксилит	≤0,01	0,02	0,04	0,03	0,01	≤0,01	≤0,01
	этанол	≤0,01	≤0,01	0,08	0,10	0,03	0,01	≤0,01
Удельная скорость роста, ч ⁻¹		≤0,01	0,02	0,05	0,07	0,14	0,18	0,23
Время ферментации, ч		96		44	40	36	26	22

Примечание. Начальные концентрации: биомасса – $1,00 \pm 0,05$ г а.с.в/л, D-ксилоза – $20,0 \pm 3,00$ г/л. Максимальная ошибка в каждой экспериментальной точке не превышала 5,0 %.



А (5,8–13,0 мМоль/л · ч) и В (36,0 мМоль/л · ч) – микроаэробные ферментации D-ксилозы; С (140,0 мМоль/л · ч) – аэробная ферментация D-ксилозы. В скобках приведены соответствующие значения OTR

Условные обозначения:

- ◆ – ксилит
- – pO₂
- – этанол
- △ – биомасса
- – D-ксилоза

Более высокая скорость растворения кислорода в среде (36,0 мМоль/л · ч) несколько замедляла падение величины pO₂, которая достигала нуля к 10-му часу ферментации (рисунок В). Тем не менее в этом случае дрожжи образовывали этанол с экономическим коэффициентом 0,09 г/г и продуктивностями 0,04 г/л · ч и 0,01 ч⁻¹ на фоне полного отсутствия ксилита (табл. 2). Основным продуктом такой ферментации D-ксилозы становилась дрожжевая биомасса (динамику прироста которой характеризовала более продолжительная экспоненциальная фаза). Согласно выполненным расчетам, при аэробной ферментации (OTR 140,0 мМоль/л · ч) величина pO₂ достигала 90 %, что обеспечивало практически

полное насыщение среды кислородом, а также способствовало активному росту дрожжевой культуры и накоплению биомассы (см. рисунок С). В этих условиях скорость утилизации D-ксилозы была максимальной (0,91 г/л · ч), тогда как время ферментации сокращалось до 22 часов (табл. 2).

Таким образом, режим снабжения ферментационной среды кислородом в значительной степени определял динамику биоконверсии D-ксилозы у *P. tannophilus* и количественное соотношение промежуточных продуктов ее распада. Накопление ксилита и этилового спирта происходило лишь при условиях ограниченной аэрации, лимитирующих рост дрожжевой культуры. Причем узкий диапазон концентраций растворенного кислорода около 2,0–5,0 мМоль/л · ч способствовал активному образованию ксилита, в то время как незначительное увеличение интенсивности принудительной аэрации до величины OTR 8,0 мМоль/л · ч повышало эффективность спиртообразования.

ОБСУЖДЕНИЕ

Активное функционирование дыхательной системы ксилитоассимилирующих дрожжей параллельно с реакциями брожения сегодня подтверждено экспериментальными исследованиями [10], [11], [12]. Поэтому режим аэрации будет в значительной мере определять эффективность бродильного и окислительного звеньев катаболизма D-ксилозы, что в конечном итоге влияет на образование промежуточных продуктов ферментации дрожжевой клетки [6]. Технически поддержание низких скоростей поступления кислорода в ферментационную среду осложнено прежде всего невысокой чувствительностью кислородных электродов. Проведение микроаэробной ферментации D-ксилозы в колбах Эрленмейера и лабораторном аппарате при перекрывающихся режимах снабжения дрожжей *P. tannophilus* кислородом способствовало выявлению узких интервалов значений OTR, в которых наблюдались максимальные экономические коэффициенты образования ксилита (2,0–5,0 мМоль/л · ч) и этилового спирта (5,0–8,0 мМоль/л · ч). Накопление обоих спиртов возможно лишь в условиях, значительно ограничивающих рост дрожжевой культуры, что хорошо согласуется с литературными данными [9], [14].

Сравнительный анализ полученных в эксперименте максимальных выходов ксилита и этанола с теоретически рассчитанными величинами (0,91 г/г [12] и 0,51 г/г [3] соответственно) позволяет рассматривать указанный пятиатомный спирт в качестве побочного продукта микроаэробной ферментации D-ксилозы у *P. tannophilus*. Распространено мнение, что накопление ксилита в значительной мере является следствием дисбаланса, возникающего при регенерации кофакторов, участвующих в превращении D-ксилозы в D-ксилулозу [8], [11], [12], [14].

Степень этого дисбаланса определяется специфичностью ксилоредуктазы и ксилитдегидрогеназы дрожжей [7]. Однако кислород также участвует в данном процессе, выполняя роль акцептора электронов при окислении НАДН [8]. Тогда образование не только ксилита, но и этанола можно объяснить двойной НАД⁺/НАДФ⁺ коферментной зависимостью ксилоредуктазы *P. tannophilus* [7]. Напротив, преимущественная НАДН – специфичность этого фермента, характерная для *Candida shehatae* и *Pichia stipitis* [7], [10], будет обеспечивать при условиях аэрации, ограничивающих рост дрожжевой культуры, внутриклеточное образование этилового спирта. И наконец, НАДФН – зависимость ксилоредуктазы

дуктазы *Debaromyces hansenii* и *Kluveromyces marxianus* [7], [12] вследствие увеличения внутриклеточного пула НАДН по отношению к НАД⁺ приведет к замедлению или полному блокированию катаболизма D-ксилозы на этапе появления ксилита. Таким образом, фактические выходы ксилита и этанола даже при микроаэробной биоконверсии D-ксилозы будут определяться биохимическими особенностями штаммов-продуцентов.

Работа выполнена при поддержке грантов Программы Президента РФ «Ведущие научные школы» (НШ-4310.2006.4, НШ-306.2008.4 и НШ-3731.2010.4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глотов Н. В., Животовский Н. В., Хованов В. Г., Хромов-Борисов Н. Н. Биометрия Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 244 с.
2. Егоров Н. С. Практикум по микробиологии. М.: Из-во МГУ, 1976. 276 с.
3. Квасников Е. И., Щелокова И. Ф. Дрожжи: биология, пути использования. Киев: Наукова думка, 1991. 326 с.
4. Огородникова Т. Е., Михайлова Н. П., Борохова О. Э., Яблочкова Е. Н., Андреевский В. В., Шаповалов О. И. Количественные показатели роста ксилоусваивающих дрожжей *Pachysolen tannophilus* и *Candida shehatae* // Микробиология. 1995. Т. 64. № 1. С. 13–17.
5. Перт С. Д. Основы культивирования микроорганизмов и клеток: Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 331 с.
6. Яблочкова Е. Н., Болотникова О. И., Михайлова Н. П., Немова Н. Н., Гинак А. И. Особенности ферментации D-ксилозы и D-глюкозы ксилоассимилирующими дрожжами // Прикладная биохимия и микробиология. 2003. Т. 39. № 3. С. 303–306.
7. Яблочкова Е. Н., Болотникова О. И., Михайлова Н. П., Немова Н. Н., Гинак А. И. Активность ключевых ферментов ксилоассимилирующих дрожжей при различной скорости поступления кислорода в ферментационную среду // Микробиология. 2004. Т. 73. № 2. С. 163–168.
8. Bruinenberg P. M. The NAD(P)H redox couple in yeast metabolism // Antonie van Leeuwenhoek J. Microbiol. Serol. 1986. Vol. 52. P. 411–417.
9. Converti A., Prego P., Dominguez J. M., Silva S. S. Effect of temperature on the microaerophilic metabolism of *Pachysolen tannophilus* // Enzyme Microbiol. Technol. 2001. № 28. P. 339–345.
10. Jeffries T. W., Jin Y.-S. Metabolic engineering for improved fermentation of pentoses by yeast // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2004. Vol. 63. P. 495–509.
11. Jeppson M., Johansson B., Barbel Hahn-Hagerdal B. Reduced oxidative pentose phosphate pathway flux in recombinant xylose-utilizing *Saccharomyces cerevisiae* strains improves the ethanol yield from xylose // Appl. Environ. Microbiol. 2002. Vol. 68. № 4. P. 1604–1609.
12. Ojamo H. Yeast xylose metabolism and xylitol production // VTT Biotech. Food Research, Finland. 1994. № 176. 91 p.
13. Slininger P. J., Petroski R. J., Bothasts P. J. et al. Measurement of oxygen solubility in fermentation media: a colorimetric method // Biotech. Bioeng. 1989. Vol. 33. № 5. P. 578–583.
14. Walther T., Hensirisak P., Agblevor F. A. The influence of aeration and hemicellulosic sugars on xylitol productivity by *Candida tropicalis* // Bioresour. Technol. 2000. Vol. 76. № 3. P. 213–220.

УДК 577.152.2:597.2

ЕКАТЕРИНА ВИТАЛЬЕВНА БОРВИНСКАЯ

аспирант Института биологии, Карельский научный центр РАН
katsu@inbox.ru

ЛЕВ ПАВЛОВИЧ СМЕРНОВ

доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник
лаборатории экологической биохимии Института биологии,
Карельский научный центр РАН
levps@rambler.ru

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКТИВНОСТИ ГЛУТАТИОН S-ТРАНСФЕРАЗЫ В ТКАНЯХ РЫБ

В статье показано, что для получения достоверных результатов при спектрофотометрическом определении активности глутатион S-трансферазы в различных тканях рыб требуется разбавление белковых экстрактов, степень которого зависит от вида рыбы и типа ткани.

Ключевые слова: глутатион S-трансфераза, определение активности, разбавление

Глутатион S-трансфераза (GST, EC 2.5.1.18) – ключевое звено фазы II системы биотрансформации ксенобиотиков, которую организмы приобрели в ходе эволюции для защиты внутренней среды от вредоносного действия экзо- и эндогенных метаболитов. Реакция, катализируемая глутатион S-трансферазой, заключается в нуклеофильном присоединении молекул восстановленного глутатиона к гидрофобным субстратам, предварительно окисленным ферментами I фазы системы биотрансформации ксенобиотиков [3], [9]. В результате реакции образуются водорастворимые соединения, которые впоследствии легко удаляются из организма.

Благодаря широкой субстратной специфичности глутатион S-трансфераза принимает участие в обезвреживании широкого круга всевозможных ксенобиотиков, в том числе хлорированных углеводородов, антибиотиков, гербицидов, инсектицидов, лекарств и др. Помимо этого, глутатион S-трансфераза катализирует инактивацию наиболее опасных продуктов свободнорадикальных реакций, что обуславливает роль фермента в защите клетки от последствий окислительного стресса [8]. Исходя из этого, уровень активности глутатион S-трансферазы может применяться как дополнительный биомаркер в эколого-токсикологических тестах, как один из показателей экологического благополучия организмов [5], [7], [10]. Определение активности GST в различных органах рыб может иметь свои особенности, связанные с количеством энзима в той или иной ткани, которое определяется биологическим и физиологическим предназначением органа. Необходимо учитывать и другие факторы, которые могут повлиять на оценку активности фермента, в частности систематическую принадлежность исследуемых организмов. Кроме того, определенную ошибку в измерении может вносить и тип используемого спектрофотометра. Например, измерения активности GST од-

ного и того же образца, проведенные на спектрофотометре СФ-2000 и спектрофлуориметре СМ 2203, переключенном в режим спектрофотометрии, как правило, различаются.

Целью настоящей работы являлась модификация стандартного метода определения GST [6], заключающаяся в поиске оптимальных разбавлений белковых экстрактов из различных тканей и видов рыб для получения корректных результатов при определении активности GST.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для экспериментов были использованы печень, мускулатура, почки, жабры и гонады трех видов рыб – плотвы (*Rutilus rutilus*), сига (*Coregonus lavaretus*) и щуки (*Esox lucius*).

Образец ткани измельчали ножницами, добавляли 0,125 М калий-фосфатный буферный раствор (PBS) (pH = 6,5) в соотношении 1:10 (вес:объем) и гомогенизировали в гомогенизаторе Поттера – Эльвейма с тефлоновым пестиком в течение 30 секунд. Гомогенат подвергали центрифугированию (110000 g в течение часа при 4 °C) на ультрацентрифуге Optima 80L (Beckman, USA).

Для определения активности использовали заранее приготовленные растворы – 0,1 М раствор 1-хлор-2,4-динитробензола (CDNB) в 96 % этаноле (сохранность при -20 °C не более месяца, выдерживает 5-кратное замораживание-оттаивание) и 0,1 М раствор восстановленного глутатиона (GSH) в бидистиллированной воде, который после приготовления разливали по пробиркам Эппендорфа и замораживали до анализа. Один миллилитр рабочей смеси, которую готовили непосредственно перед анализом, содержал 0,98 мл PBS, 0,01 мл раствора CDNB и 0,01 мл раствора GSH. В кювету вносили 1,44 мл смеси и 0,16 мл разбавленного супернатанта. Активность фермента оценивали по возрастанию оптической плотности

(D_{340}), которую измеряли в кварцевой кювете (толщина – 1 см) в течение 3 минут при 20 °С на спектрофлуориметре СМ 2203 (Белоруссия). То, что измерения проводили при температуре 20 °С, обусловлено необходимостью получения результатов, сравнимых с полученными в аналогичных условиях на рыбах другими авторами [7]. Для определения уровня неферментативного связывания CDNB и GSH в контрольную пробу к 1,44 мл смеси добавляли 0,16 мл PBS. Прирост оптической плотности (ΔD) в контроле обычно не превышал 0,002 $E_{340}/\text{мин}$.

Для дальнейших расчетов на графике выбирали отрезок, наиболее близкий к линейному, по которому определяли прирост оптической плотности за 1 минуту ($\Delta D_{340}/\text{мин}$). Линейность получаемого графика зависимости D от времени определяли в программе Excel по коэффициенту аппроксимации R^2 , рассчитанному для линейного тренда. Подбор разбавления осуществлялся для каждого органа отдельно.

Активность GST (A) рассчитывали по формуле:

$$A_{\text{GST}} = \frac{\Delta D_{340}/\text{мин} \cdot V_1 \cdot N}{\varepsilon_{\text{GSH-CDNB}} \cdot V_2 \cdot P}, \quad (1)$$

где $\Delta D_{340}/\text{мин}$ – прирост оптической плотности за минуту; V_1 – общий объем пробы; V_2 – объем образца; N – разбавление гомогената; P – общее количество растворимого белка, мг; $\varepsilon_{\text{GSH-CDNB}}$ – молярный коэффициент поглощения комплекса GSH-CDNB (составляет $9600 \text{ M}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$), который для оценки активности в микромолях преобразован в $0,0096 \mu\text{M}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

Если учесть, что применяемое нами соотношение V_1/V_2 равно 10, то окончательный вид формулы будет таким:

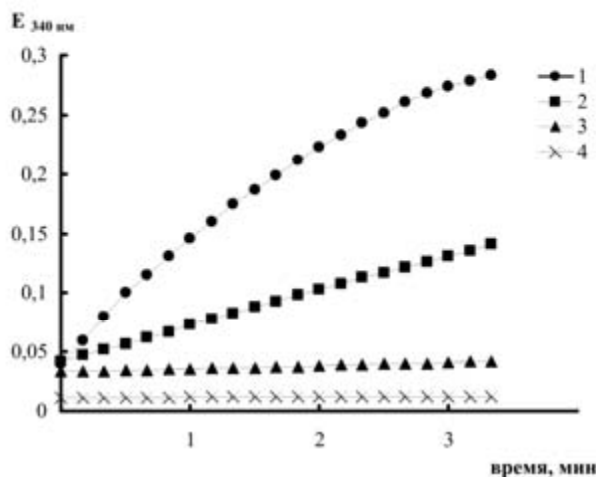
$$\text{AGST} = \frac{\Delta D_{340}/\text{мин} \cdot 10N}{\varepsilon_{\text{GSH-CDNB}} \cdot P}. \quad (2)$$

За единицу активности нами принято изменение оптической плотности, соответствующее образованию 1 μM комплекса GSH-CDNB за минуту в пересчете на 1 мг белка. В литературе на этот счет существуют определенные разночтения. Так, в ряде исследований [1], [2], [7] за единицу активности принят 1 $\text{nM}/\text{мин}/\text{мг}$ белка, при этом авторы ссылаются на базисную работу Хабига с соавторами [6], в которой за единицу активности принят 1 $\mu\text{M}/\text{мин}/\text{мг}$ белка, то есть разница достигает тысячи раз. В методиках определения активности GST в крови, подготовленных для медицинских учреждений, рекомендовано представлять результаты в микромолях [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для того чтобы правильно определить активность GST, необходимо подбирать такое разбавление белкового экстракта, при котором из-

менение оптической плотности продуктов ферментативной реакции будет иметь линейную зависимость. На рисунке приведены данные изменения оптической плотности экстракта из печени сига при разных разбавлениях. Из результатов следует, что при 30-кратном разбавлении линия графика имеет форму параболы, следовательно, в данных условиях нарастание оптической плотности является нелинейным. При разбавлении в 300 раз наклон линии прироста оптической плотности линейен, но по показаниям приближается к контрольным значениям. Разница между контролем и опытом становится несущественной, и использование получаемых данных в таком виде нежелательно из-за большой, как и в предыдущем варианте, ошибки вычисления, связанной с оперированием малыми значениями D . Этот факт необходимо всегда учитывать при оценке результатов измерений не только при работе на данном спектрофлуориметре, но и на любом другом фотометрическом оборудовании. При 100-кратном разбавлении линия прироста оптической плотности прямолинейна и данные существенно отличаются от контрольных показателей. Именно это разбавление белкового экстракта из печени сига было использовано нами при изучении воздействия различных факторов среды на GST печени сига.



Прирост оптической плотности при образовании комплекса GSH-CDNB в результате реакции, катализируемой GST из печени сига при разных разбавлениях белкового экстракта: 1 – разбавление в 30 раз; 2 – в 100 раз; 3 – в 300 раз; 4 – контроль

Поиск приемлемых разбавлений мы провели и на других тканях сига, а также плотвы и щуки (см. таблицу). Из таблицы видно, что для получения корректных данных по активности фермента необходимо подбирать разбавления не только для каждой ткани, но и для каждого вида рыб. Было обнаружено, что для белковых экстрактов из печени рыб требуется большее разбавление, чем для других тканей. Это объясняется тем, что на печень как орган детоксикации ложится максимальная нагрузка по осуществле-

нию фазы II биотрансформации в организме, поэтому в ней синтезируется наибольшее количество энзима. Следует отметить, что определение активности GST в гонадах рыб проводилось на стадиях зрелости 2,6 у щук, 2,3 у сегов и 2,4,5 у плотвы. Вполне вероятно, что на других стадиях зрелости потребуются иные разбавления.

Разбавление экстрактов из различных тканей некоторых видов рыб для определения активности GST

Ткань	Плотва	Сег	Щука
Печень	50	100	900
Мышцы	20	30	50
Почки	20	30	100
Жабры	30	30	500
Гонады	15	30	500

Было обнаружено, что разбавление белковых экстрактов, необходимое для определения активности GST в тканях каждого из исследованных нами видов рыб, неодинаково. Так, белковые экстракты из печени плотвы нужно разбавлять в 2 раза меньше, чем таковые сига, и в 18 раз меньше, чем щуки. То же самое можно отметить и по другим тканям. Интересно, что белковые экстракты из тканей щуки требуют существенно большего разбавления, чем соответствующие ткани сига и плотвы. Так, значения относительной активности глутатион S-трансферазы в печени рыб, выловленных из оз. Каменное и хвостохранилища Костомукшского ГОКа, колебались в пределах

46–157 для сегов, 40–132 для плотвы и 680–1250 μM GSH-CDNB/мин/мг белка для щук. Причина этого явления пока неясна, но можно предполагать наличие взаимосвязи между уровнем фермента в тканях и экологией вида. Как известно, щука – хищник, а плотва и сигу свойственен смешанный тип питания.

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что для получения достоверных результатов при спектрофотометрическом определении активности глутатион S-трансферазы необходимо подбирать разбавления клеточных экстрактов по каждому виду рыб и типу ткани. В особенности это касается тех случаев, когда визуальный контроль хода реакции невозможен из-за отсутствия непрерывного вывода данных на экран монитора, как в спектрофлуориметре СМ 2203, а именно тех фотометров, у которых отсутствует компьютерное управление, но имеется возможность измерения D при 340 нм. На наш взгляд, полученные результаты могут быть применены при использовании спектрофотометров любого типа для определения активности этого фермента.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ «Ведущие научные школы Российской Федерации» НШ 3731.2010.4; программы ОН РАН «Биологические ресурсы России: оценка состояния и фундаментальные основы мониторинга» на 2009–2011 гг.; программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Биологическое разнообразие» на 2009–2011 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Валкин И. Ю. Экологофизиологическая характеристика густеры (*Blicca bjoerkna*) Куйбышевского водохранилища: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Ульяновск, 2008. 24 с.
- Ирейкина С. А. Молекулярные биомаркеры антиоксидантной системы и биотрансформации загрязняющих веществ у рыб и моллюсков из импактных районов залива Петра Великого (Японское море): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Владивосток, 2008. 20 с.
- Кулинский В. И. Обезвреживание ксенобиотиков // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 1. С. 8–12.
- Определение активности глутатионтрансферазы // Медицинские и лабораторные технологии. Т. 2. СПб.: Интермедика, 2002. С. 19–20.
- Burgeot T., Bocquene G., Porte C., Dimeet J., Santella R. M., Garcia de la Parra L. M., Pffol-Leszkowicz A., Raoux C., Galgani F. Bioindicators of pollutant exposure in the north-western Mediterranean Sea // Mar. Ecol. Prog. Ser. 1996. Vol. 131. P. 125–141.
- Habig W. H., Pabst M. J., Jakoby W. B. Glutathione S-transferases. The first enzymatic step in mercapturic acid formation // J. Biol. Chem. 1974. Vol. 249. № 22. P. 7130–7139.
- Lindström-Seppä P. Biotransformation in fish: monitoring in land, water pollution caused by pulp and paper mill effluents. Kuopio: Publication of the University of Kuopio, 1990. 69 p.
- Raza H., Robin M.-A., Fang J., Avadhanin G. Multiple isoforms of mitochondrial glutathione S-transferases and their differential induction under oxidative stress // Biochem. J. 2002. Vol. 368. P. 45–55.
- Sheenan D., Meade G., Foley V. M., Dowd C. A. Structure, function and evolution of glutathione transferases: implications for classification of non-mammalian members of an ancient enzyme superfamily // Biochem. J. 2001. Vol. 360. P. 1–16.
- Van der Oost R., Beyer J., Bermeulen N. P. E. Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment // Environ. Toxicol. Pharmacol. 2003. Vol. 13. № 2. P. 57–149.

УДК 597.552.51

ЛЕОНИД ПАВЛОВИЧ РЫЖКОВ

доктор биологических наук, профессор кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет
rlp@petrsu.ru

АНТОН ЕВГЕНЬЕВИЧ КУРИЦЫН

аспирант кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет
akuri3@rambler.ru

СИГИ (*COREGONUS LAVARETUS* L. (Linnaeus, 1758)) НЕКОТОРЫХ ВОДОЕМОВ СРЕДНЕЙ КАРЕЛИИ

Исследованы морфологические и биологические особенности сигов из водоемов Средней Карелии (Сегозеро, Елмозеро, Линдозеро, р. Сегежа, р. Елма). Установлено, что они относятся к комплексному виду *Coregonus lavaretus* L. Выявлены и описаны пять экологических форм, различающихся по ряду систематических признаков и биологическим особенностям.

Ключевые слова: сиг обыкновенный, пластические признаки, меристические признаки, длина тела, масса тела, индекс соотношения

Озерно-речные системы Сегозерско-Выгозерского бассейна в последние годы интенсивно осваиваются человеком. В результате на фоне естественных процессов эволюции водоемов антропогенные воздействия начинают оказывать негативное влияние на качественный состав водной среды, особенно на рыбное население озер и рек бассейна. Постепенно сокращается численность ценных в хозяйственном отношении видов рыб (лосось, сиги), которые заменяются малоценными (окунь, ерш, плотва). Если невысокая численность лосося все еще находится на стабильном уровне, то количество сиговых сокращается весьма интенсивно. Поэтому сохранение их запасов в настоящее время становится приоритетной задачей рыбохозяйственной отрасли. Решить данную проблему возможно лишь при наличии знаний о биологических особенностях сиговых в этом уникальном районе Карелии. К сожалению, ранее изучению сиговых в водоемах Средней Карелии уделялось мало внимания [10], [1], [4]. При этом в основном исследовались различные породы сигов в крупных водоемах бассейна. В настоящее время необходимы более глубокие знания о морфологии и биологии сигов не только для сохранения их биоразнообразия, но и для разработки и осуществления конкретных мероприятий по сохранению природных биоресурсов этих представителей ихтиофауны. В этом случае появится возможность сохранить устойчивое развитие молодой водной экосистемы северных водоемов.

Цель настоящей работы – выявить морфологические и биологические особенности сигов крупных водоемов озерно-речных систем Сегозерско-Выгозерского бассейна. В связи с наметченной целью предполагалось изучить:

- морфологические особенности и установить морфологический диагноз сигов;

- структуру популяций сигов в озерно-речных системах бассейна;
- биологические особенности сигов в различных водоемах.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Исследования проводились в период с 2002 по 2008 год. Материал собирался в крупнейшем озере региона Сегозеро, в р. Сегеже, соединяющей этот водоем с Выгозерским водохранилищем, Елмозере и р. Елма, впадающей в озеро Ондозеро, которое через речную сеть соединено с Выгозерским водохранилищем, а также Линдозере, являющимся озеровидным расширением дельты р. Сегежи. Рыба вылавливалась с помощью жаберных сетей с ячеей от 25 до 50 мм. Сети устанавливались в прибрежных русловых зонах и в озеровидных расширениях рек. В Сегозере, Линдозере и Елмозере облавливались как прибрежные, так и глубинные участки. Сети осматривались ежедневно. Всего был отловлен 241 экз. рыб в возрасте от 3 до 7 лет. Размеры сигов из Сегозера ($n = 90$) колебались в пределах 25,1–34,8 см при изменениях массы тела от 115 до 500 г, из Елмозера ($n = 39$) – 25–35 см и 160–550 г, из Линдозера ($n = 37$) – 20–28 см и 80–250 г, из р. Сегежи ($n = 25$) – 21,3–27,7 см и 100–225 г, из р. Елма ($n = 50$) – 19,1–26,0 см и 85–150 г соответственно.

Сбор и обработка ихтиологического материала выполнены по методике И. Ф. Правдина [11] с учетом методических указаний Ю. С. Решетникова [12] для сиговых. Морфологические измерения сигов проводились на свежем материале. Статистическая обработка материала проведена с использованием методического пособия Э. В. Ивантера и А. В. Коросова [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изучение пластических и меристических признаков половозрелых сигов из разных водоемов Сегозерско-Выгозерского бассейна показало, что, несмотря на наличие экологических форм, сиги исследованных водоемов принадлежат к комплексному виду *Coregonus lavaretus* L. (Linnaeus, 1758). Это подтверждается прежде всего таким значимым признаком, как число жаберных тычинок [12], величина которого у исследованных сигов колебалась в пределах 25–31 (лимит – 15–64 по [3]). Число чешуй в боковой линии, один из стабильных признаков [15], также входит в пределы лимита – 90–95. Подтверждением этого может быть и количество лучей в плавниках. Так, в D число ветвистых лучей колебалось от 10 до 13, в P – от 14 до 16, в V – от 9 до 11, в A – от 11 до 14. Более подробные сведения о морфометрии приведены в табл. 1.

В то же время в зависимости от условий обитания в водоемах Средней Карелии существуют экологические формы, различающиеся между собой по морфометрическим показателям и биологическим особенностям. Например, по минимальному количеству жаберных тычинок ($25,2 \pm 0,1$) и максимальному числу чешуй в боковой линии ($95,4 \pm 0,2$) выделяются сиги из р. Сегежи. По числу тычинок близки с сегежскими сиги из Елмозера ($25,8 \pm 0,1$). Больше количество тычинок обнаружено у сегозерских сигов ($27,5 \pm 0,1$). По числу чешуй в боковой линии елмозерские ($93,2 \pm 0,2$) и сегозерские ($92,3 \pm 0,1$) сиги находятся между сигами из р. Сегежи и из других исследованных водоемов. При исследовании сигов из р. Елма и Линдозера обнаружено большое сходство в величинах названных показателей. У сигов из этих водоемов число жаберных тычинок колеблется в пределах 25–34, число чешуй в боковой линии – 85–97. Из этой группы сигов меньшими величинами названных показателей отличаются сиги Линдозера (число тычинок – $30,0 \pm 0,2$, число чешуй – $90,3 \pm 0,2$). Интересно отметить, что в последние 50 лет у сегозерских сигов произошли некоторые изменения в морфологических показателях. В частности, несколько увеличилось число жаберных тычинок и чешуй в боковой линии. Причиной этого может быть превращение Сегозера в водохранилище, подъем уровня воды в нем начался в 1957 году. Уже в то время А. Ф. Смирнов отмечал, что при преобразовании Сегозера в водохранилище «условия существования сигов претерпят наибольшие изменения», особенно это касается озерных сигов (сократятся площади нерестилищ, ухудшатся кормовые условия для бентофагов). Предсказывалась также возможность смешения отдельных форм сигов, как это произошло при образовании Выгозерского водохранилища [4].

По количеству лучей в плавниках у сигов из разных водоемов существенных различий не выявлено (табл. 1). Несколько меньшее число лучей обнаружено у линдозерских сигов в плавнике A ($12,2 \pm 0,1$).

По средней массе тела выделяются сиги из Елмозера ($286,3 \pm 5,1$ г), затем по убывающей следуют сегозерские ($237,3 \pm 3,2$ г) и сегежские сиги ($142,8 \pm 4,4$ г). Наименьшей массой тела характеризуются линдозерские сиги ($124,3 \pm 8,4$ г). Весьма интересно, что по линейным размерам также отличаются озерные елмозерские ($322,8 \pm 1,4$ мм), сегозерские ($311,9 \pm 1,3$ мм) и сегежские сиги ($264,0 \pm 1,2$ мм). У других форм сигов линейные размеры сходны ($239,8 \pm 1,3$ – $256,3 \pm 1,4$ мм). По длине головы выделяются сиги из Сегозера ($20,6 \pm 0,2$ %) и р. Елма ($20,1 \pm 0,1$ %). Кроме того, у сигов из р. Елма ($d - 5,2 \pm 0,1$ %) и Линдозера ($d - 5,1 \pm 0,1$ %) обнаружены большие глаза. Сиги из Елмозера характеризуются большой высотой тела ($21,8 \pm 0,2$ %). По данному показателю к ним приближаются сиги из р. Елма ($21,0 \pm 0,3$ %).

Большую высоту тела сигов из Елмозера и р. Елма можно объяснить их сходным образом жизни и кормовой миграцией. Минимальная величина высоты тела у сигов из р. Сегежи и Сегозера ($19,3 \pm 0,1$ %) может быть связана с существовавшими до образования водохранилища общими нерестилищами и кормовыми угодьями. Сходство величин признаков у сигов из других водоемов можно отнести к сходным экологическим условиям. Гипотетически по пластическим и меристическим признакам сигов Сегозера и Елмозера можно считать чисто озерными формами, сигов из рек Елма и Сегежа, а также из Линдозера можно рассматривать как озерно-речных. Последнее хорошо подтверждается путями нерестовых миграций этих групп сигов. Однако следует отметить, что общие географические закономерности могут перекрываться влиянием местных экологических условий [15].

Крупные по массе тела формы сигов из Сегозера и Елмозера становятся половозрелыми в возрасте 4–5 лет. Более мелкие формы сигов из Линдозера и рек Елма и Сегежа начинают созревать в возрасте 3–4 лет. Причем самцы всех исследованных экологических форм сигов созревают на год, иногда даже на 2 года раньше самок. Большинство сигов нерестятся в ноябре (р. Сегежа, р. Елма, Линдозеро). Нерест сигов в Сегозере и Елмозере начинается в конце октября и продолжается в ноябре. В нерестовых стадах сегежской ($2,0 : 1,0$) и елминской ($1,9 : 1,0$) групп сигов преобладают самки. Незначительное преобладание самок отмечено у сигов в Елмозере ($1,2 : 1,0$). Интересно отметить, что у сигов из этого водоема в возрасте 3+ незначительно преобладали самцы. Это явление, очевидно, связано с более ранним созреванием самцов и, возможно, меньшей продолжительностью их жизненного цикла. В период проводимого исследования в основном отлавливались сиги в возрасте 3+...6+. В Сегозере (9), Елмозере (3) и Линдозере (1) были выловлены рыбы в возрасте 7+, что может свидетельствовать о более длинном возрастном диапазоне озерных сигов.

В табл. 2 и 3 приведены сведения о возрастной динамике роста сигов из различных водоемов.

Таблица 1

Пластические и меристические признаки сигов Сегозерско-Выгозерского бассейна

Признак (средние значения)	р. Сегежа (наши данные), n = 25			р. Елма (наши данные), n = 50			Линдозеро (наши данные), n = 37			Сегозеро (наши данные), n = 90			Елмозеро (наши данные), n = 39			Сегозеро [10]
	колебания	среднее значение	колебания	среднее значение	колебания	среднее значение	колебания	среднее значение	колебания	среднее значение	колебания	среднее значение	колебания	среднее значение	колебания	
масса тела, г	107–225	142,8 ± 4,4	85–157	116,3 ± 4,7	75–280	124,3 ± 8,4	120–380	237,3 ± 3,2	160–500	286,3 ± 5,1						
длина тела АС, мм	216–269	247,5 ± 1,1	210–255	226,2 ± 1,2	198–243	227,0 ± 1,3	238–315	281,9 ± 1,1	261–350	293,8 ± 1,2						260,0
длина тела АД, мм	202–268	226,9 ± 1,1	177–245	202,3 ± 1,2	187–257	215,2 ± 1,1	229–280	265,7 ± 1,1	253–335	283,4 ± 1,1						
длина головы, мм	41–53	46,3 ± 0,2	40–51	43,9 ± 0,2	41–62	44,9 ± 0,7	45–69	58,2 ± 0,6	47–70	55,8 ± 0,6						
чешуй в боковой линии	92–103	95,4 ± 0,2	86–97	91,6 ± 0,1	85–93	90,3 ± 0,2	85–99	92,3 ± 0,1	89–98	93,2 ± 0,2						90,0
число жаберных тычинок на 1 дуге	24–27	25,2 ± 0,1	29–34	31,2 ± 0,2	25–34	30,0 ± 0,2	26–30	27,5 ± 0,1	23–28	25,8 ± 0,1						25,0
число лучей в D ветв.	10–11	10,9 ± 0,1	10–12	11,0 ± 0,1	10–12	11,0 ± 0,1	10–13	11,3 ± 0,1	10–12	11,4 ± 0,1						–
число лучей в Р ветв.	14–16	15,1 ± 0,1	14–16	14,9 ± 0,1	14–16	14,9 ± 0,1	10–16	14,8 ± 0,1	14–16	15,1 ± 0,1						–
число лучей в V ветв.	10–11	10,2 ± 0,1	10–11	10,0 ± 0,1	10–11	10,2 ± 0,1	9–10	10,3 ± 0,1	9–10	10,2 ± 0,1						–
число лучей в А ветв.	12–14	13,1 ± 0,1	11–13	13,2 ± 0,1	11–13	12,2 ± 0,1	12–14	13,4 ± 0,1	12–14	13,3 ± 0,1						–
в % длины АС:																
длина рыла	4,9–5,2	5,0 ± 0,1	4,9–5,5	5,2 ± 0,1	4,6–5,0	4,7 ± 0,1	4,7–5,1	4,9 ± 0,1	4,5–4,9	4,7 ± 0,1						6,0
диаметр глаза горизонталь- ный	4,1–4,4	4,3 ± 0,1	4,9–5,3	5,2 ± 0,1	4,6–5,4	5,1 ± 0,1	4,2–4,8	4,6 ± 0,1	3,7–4,1	3,9 ± 0,1						6,0
длина головы	17,9–19,8	18,7 ± 0,2	19,9–20,8	20,1 ± 0,1	18,9–19,5	19,3 ± 0,1	20,3–20,9	20,6 ± 0,2	18,3–19,5	19,0 ± 0,1						23,0
наибольшая высота тела	18,1–20,7	19,3 ± 0,1	20,6–22,0	21,0 ± 0,3	20,1–20,6	20,3 ± 0,1	19,1–19,4	19,3 ± 0,1	21,6–21,9	21,8 ± 0,2						22,0
наименьшая высота тела	5,9–7,0	6,6 ± 0,1	5,4–7,2	6,9 ± 0,1	6,4–7,3	6,9 ± 0,1	5,9–6,5	6,3 ± 0,1	6,1–6,8	6,4 ± 0,1						7,0
антедорсальное расстояние	41,9–43,0	42,3 ± 0,1	42,7–43,4	43,0 ± 0,1	43,9–44,7	44,3 ± 0,3	44,1–44,6	44,4 ± 0,1	43,7–44,1	43,9 ± 0,2						45,0
постдорсальное расстояние	39,6–40,4	40,0 ± 0,2	39,9–40,7	40,5 ± 0,1	41,2–41,7	41,5 ± 0,1	42,1–42,5	42,3 ± 0,4	43,1–43,5	43,3 ± 0,2						–
длина основания D	10,7–11,6	11,1 ± 0,1	10,6–11,4	11,1 ± 0,1	11,2–11,8	11,5 ± 0,1	11,5–12,0	11,8 ± 0,1	10,8–11,5	11,2 ± 0,1						11,0
высота D	16,5–18,9	17,7 ± 0,1	16,5–17,2	16,8 ± 0,1	18,5–18,9	18,7 ± 0,1	18,7–19,1	18,8 ± 0,1	16,3–16,8	16,6 ± 0,1						18,0
высота A	10,2–11,1	10,7 ± 0,1	10,4–11,2	10,8 ± 0,1	10,7–11,3	11,0 ± 0,1	10,5–11,2	10,8 ± 0,1	9,3–9,8	9,5 ± 0,1						12,0
в % длины головы:																
длина рыла	26,8–27,3	27,0 ± 0,1	25,9–26,4	26,1 ± 0,1	24,4–24,9	24,7 ± 0,1	23,8–24,2	24,0 ± 0,1	24,6–25,2	24,9 ± 0,1						27,0
диаметр глаза горизонталь- ный	22,9–23,6	23,3 ± 0,1	24,9–26,2	25,8 ± 0,1	26,3–26,9	26,7 ± 0,2	22,2–22,7	22,5 ± 0,1	20,4–20,9	20,7 ± 0,1						25,0
высота головы у затылка	66,7–67,4	67,0 ± 0,3	64,7–65,3	65,1 ± 0,2	69,7–70,3	70,1 ± 0,3	63,7–64,1	63,9 ± 0,5	65,7–66,1	65,9 ± 0,3						–
ширина лба	26,0–26,6	26,3 ± 0,1	26,6–27,1	26,9 ± 0,1	25,0–25,6	25,4 ± 0,1	23,5–25,1	24,0 ± 0,1	26,1–26,5	26,3 ± 0,1						28,0
наименьшая высота тела	34,9–35,8	35,2 ± 0,1	33,8–34,7	34,3 ± 0,1	35,1–35,7	35,5 ± 0,1	30,4–31,0	30,7 ± 0,1	33,6–34,2	33,8 ± 0,2						29,0
длина основания D	58,8–60,5	59,5 ± 0,4	54,8–55,7	55,1 ± 0,2	59,1–59,7	59,4 ± 0,2	56,8–57,3	57,1 ± 0,2	58,9–59,3	59,1 ± 0,3						–
высота D	93,6–95,2	94,7 ± 0,4	82,9–84,0	83,6 ± 0,3	96,3–97,0	96,7 ± 0,5	91,0–91,6	91,3 ± 0,3	87,4–88,0	87,8 ± 0,1						–

Таблица 2
Динамика накопления массы (г) тела
у сигов из различных водоемов

Водоемы	3+	4+	5+	6+	7+
р. Сегежа, n = 25	115,7 ± 1,6	130,6 ± 2,5	151,0 ± 3,3	205,0 ± 3,7	–
р. Елма, n = 50	87,5 ± 3,2	105,4 ± 4,4	132,7 ± 2,2	145,0 ± 6,4	–
Елмозеро, n = 37	180,1 ± 3,4	220,4 ± 4,7	282,7 ± 2,4	350,2 ± 3,6	504,5 ± 6,2
Линдозеро, n = 39	82,3 ± 2,1	105,1 ± 1,4	164,5 ± 5,1	204,8 ± 7,4	330,0 ± 0,0
Сегозеро, n = 90	141,0 ± 5,7	196,8 ± 6,3	254,2 ± 2,4	308,2 ± 1,7	387,2 ± 5,1

Таблица 3
Возрастная динамика линейного роста
(см) сигов из различных водоемов

Водоемы	3+	4+	5+	6+	7+
р. Сегежа, n = 25	22,2 ± 0,2	23,4 ± 0,2	24,4 ± 0,4	26,6 ± 0,5	–
р. Елма, n = 50	21,1 ± 0,3	22,5 ± 0,2	24,7 ± 0,2	25,5 ± 0,3	–
Елмозеро, n = 39	26,3 ± 0,4	28,3 ± 0,2	30,0 ± 0,1	31,5 ± 0,2	35,5 ± 0,2
Линдозеро, n = 37	20,8 ± 0,3	22,7 ± 0,2	24,4 ± 0,3	25,7 ± 0,2	29,5 ± 0,5
Сегозеро, n = 90	23,9 ± 0,1	25,7 ± 0,2	28,4 ± 0,1	30,0 ± 0,2	33,4 ± 0,3

Таблица 4
Индекс соотношения массы тела (мг)
к кубу его длины (см³)

Водоемы	3+	4+	5+	6+	7+
р. Сегежа, n = 25	10,6	10,2	10,4	10,9	–
р. Елма, n = 50	9,3	9,2	8,8	8,7	–
Елмозеро, n = 39	9,9	9,7	10,5	11,2	11,3
Линдозеро, n = 37	9,0	9,0	11,3	12,1	12,9
Сегозеро, n = 90	10,3	11,6	11,1	12,1	12,9

К началу полового созревания рыб (3+) в каждом исследованном водоеме четко прослеживаются различия по средней массе тела. Наиболее тугорослыми оказались сиги из Линдозера и р. Елма. Более высокая масса тела отмечена у сигов из р. Сегежи, наиболее быстрорастущими оказались сегозерские и елмозерские сиги. При дальнейшем развитии сигов по темпу роста незначительно преобладали линдозерские и сегозерские. За 3 года масса тела у сигов из Линдозера увеличилась в 2,5 раза, у сигов из Сегозера – в 2,2 раза. Интенсивность роста у сигов из других водоемов была сходной.

В табл. 3 приведены сведения о линейном росте сигов. По показателям линейного роста к началу полового созревания также выделяются сиги из Елмозера и Сегозера. С возрастом рыб темп их роста оказался практически сходным. За

3 года жизни размеры сигов увеличились в 1,1–1,2 раза. К возрасту 6+ соотношение размерных групп сигов сохранилось на уровне начала полового созревания, то есть по размерам преобладали елмозерские сиги, затем следовали сегозерские и сегежские.

Полученные результаты по росту сигов показывают, что у всех форм сигов преобладает в основном накопление массы тела. Если в возрасте 3+...6+ усредненная масса тела у сигов выросла в 2 раза, то их линейные размеры увеличились лишь в 1,2 раза. Об изменениях интенсивности накопления массы тела можно судить также по динамике величин индекса соотношения (ИС) массы тела (мг) к кубу его длины (см³) [13], [14]. Известно, что при отклонении от изометрии величина ИС будет изменяться. При интенсивном увеличении линейных размеров величина ИС будет уменьшаться, а при преобладании роста в высоту и ширину (накопление массы тела) показатель ИС будет возрастать. Зная динамику ИС у рыб, можно судить о продукционных возможностях каждой возрастной группы рыб (табл. 4). Наибольшей величиной ИС (11,3) отличаются сегозерские сиги, затем следуют елмозерские и линдозерские (10,3). Наименьшая величина ИС отмечена у сигов из р. Елма (9,0).

Анализ полученных результатов по возрастной динамике роста сигов из различных водоемов показывает, что по исследованным показателям прослеживается существование экологических форм сигов в водоемах Средней Карелии. В частности, четко выделяются две экологические группы сигов – речные (реки Елма и Сегежа) и озерные (Сегозеро). В то же время географически разделенные популяции елмозерских и сегежских сигов существенно отличаются не только по меристическим признакам, но и по скорости роста. Как уже отмечалось, сегежские сиги стоят ближе к сегозерским. Очевидно, до устройства в 1957 году плотины у истока р. Сегежи из Сегозера такая связь существовала. Озерные сиги спускались на нерест в р. Сегежу. После строительства плотины эта связь прекратилась, но оставшиеся в реке сегозерские сиги сохранили свои признаки. Сиги Елмозера, по-видимому, являются промежуточной формой, и их можно отнести к озерно-речной экологической группе. В Линдозере, возможно, также обитает озерно-речная форма сигов, генетически связанная с выгозерскими сигами. Линдозеро является приустьевым расширением реки Сегежи (перед ее впадением в Выгозерское водохранилище). В этом озере сохраняются речные условия. Сегозерские сиги могут быть связаны по происхождению с сигами из Онежского озера. Существует гипотеза, согласно которой 11–12 тысяч лет назад существовало Южно-Онежское приледниковое озеро. Когда край ледника был севернее настоящего Онежского озера, Сегозеро могло быть заливом этого огромного приледникового водоема [6], [7], [8]. В это время онеж-

ский сиг мог свободно проникнуть в Сегозеро. При дальнейшем формировании Сегозера и его биопродукции образовались несколько форм сигов [10]. Среди них выделилась популяция озерного сига.

Обобщая изложенные материалы, следует отметить, что в Сегозерско-Выгозерском бассейне обитает обыкновенный сиг (*Coregonus lavaretus* L. (Linnaeus, 1758)). В зависимости от условий обитания можно выделить следующие экологические формы:

1. Сиг р. Сегежи. Масса тела – $142,8 \pm 4,4$ г, АС – $247,5 \pm 1,1$ мм, ИС – 10,5, число жаберных тычинок – $25,2 \pm 0,1$, число чешуй в боковой линии – $95,4 \pm 0,2$, длина головы в процентах к АС – $18,7 \pm 0,2$, ширина лба в процентах от длины головы – $23,3 \pm 0,1$, горизонтальный диаметр глаза в процентах от длины головы – $23,3 \pm 0,1$. Половозрелость – 3–4 года, нерест – ноябрь, соотношение полов – 2 : 1.
2. Сиг р. Елма. Масса тела – $116,3 \pm 4,7$ г, АС – $226,2 \pm 1,2$ мм, ИС – 9,0, число жаберных тычинок – $31,2 \pm 0,2$, число чешуй в боковой линии – $91,6 \pm 0,2$, длина головы в процентах к АС – $20,1 \pm 0,1$, ширина лба в процентах от длины головы – $26,9 \pm 0,1$, горизонтальный диаметр глаза в процентах от длины головы – $25,8 \pm 0,1$. Половозрелость – 3–4 года, нерест – ноябрь, соотношение полов – 1 : 1.
3. Сиг Линдозера. Масса тела – $124,3 \pm 8,4$ г, АС – $227,0 \pm 1,3$ мм, ИС – 10,3, число жаберных тычинок – $30,0 \pm 0,2$, число чешуй в боковой линии – $90,3 \pm 0,2$, длина головы в процентах к АС – $19,3 \pm 0,1$, ширина лба в процентах от длины головы – $25,4 \pm 0,1$, горизонтальный диаметр глаза в процентах от длины головы – $26,7 \pm 0,2$. Половозрелость – 3–4 года, нерест – ноябрь, соотношение полов – 1 : 1.
4. Сиг Елмозера. Масса тела – $286,3 \pm 5,1$ г, АС – $293,8 \pm 1,2$ мм, ИС – 10,3, число жаберных тычинок – $25,8 \pm 0,1$, число чешуй в боковой линии – $93,2 \pm 0,2$, длина головы в процентах к АС – $19,0 \pm 0,1$, ширина лба в процентах от длины головы – $26,3 \pm 0,1$, горизонтальный диаметр глаза в процентах от длины головы – $20,7 \pm 0,1$. Половозрелость – 4–5 лет, нерест – ноябрь, соотношение полов – 1,2 : 1.
5. Сиг Сегозера. Масса тела – $237,3 \pm 3,2$ г, АС – $281,9 \pm 1,1$ мм, ИС – 11,3, число жаберных тычинок – $27,5 \pm 0,1$, число чешуй в боковой линии – $92,3 \pm 0,1$, длина головы в процентах к АС – $20,6 \pm 0,2$, ширина лба в процентах от длины головы – $24,0 \pm 0,1$, горизонтальный диаметр глаза в процентах от длины головы – $22,5 \pm 0,1$. Половозрелость – 4–5 лет, нерест – октябрь – ноябрь, соотношение полов – 1 : 1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Б. М., Покровский В. В., Урбан В. В. Озеро Елмозера // Озера Карелии: природа, рыбы и рыбное хозяйство: Справочник. Петрозаводск: Госиздат Карельской АССР, 1959. С. 502–506.
2. Александров Б. М., Покровский В. В., Урбан В. В. Озеро Ондозера // Озера Карелии: природа, рыбы и рыбное хозяйство: Справочник. Петрозаводск: Госиздат Карельской АССР, 1959. С. 506–514.
3. Атлас пресноводных рыб России / Под ред. Ю. С. Решетникова. Т. 1. М.: Наука, 2002. 380 с.
4. Гордеева-Перцева Л. И., Смирнов А. Ф., Стефановская А. Ф. Озеро Сегозеро // Озера Карелии: природа, рыбы и рыбное хозяйство: Справочник. Петрозаводск: Госиздат Карельской АССР, 1959. С. 465–482.
5. Ивантер Э. В., Коросов А. В. Основы биометрии. Петрозаводск: Карелия, 1992. 168 с.
6. Квасов Д. Д. Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы. Л.: Наука, 1975. 278 с.
7. Квасов Д. Д., Амантов А. В. Происхождение котловины Онежского озера // Палелимнология Онежского озера. Л.: Наука, 1990. С. 80–82.
8. Кудерский Л. А. Онежское озеро // История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки. Л.: Наука, 1990. С. 106–108.
9. Озера Карелии: природа, рыбы и рыбное хозяйство: Справочник. Петрозаводск: Госиздат Карельской АССР, 1959. 620 с.
10. Правдин И. Ф. Сиги водоемов Карело-Финской ССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1954. 324 с.
11. Правдин И. Ф. Руководство по изучению рыб. М.: Пищевая пром-сть, 1966. 376 с.
12. Решетников Ю. С. Экология и систематика сиговых рыб. М.: Наука, 1980. 301 с.
13. Рыжков Л. П. Динамика соотношения весовых и размерных показателей у различных видов рыб // Материалы Всерос. конф. «Водные и наземные экосистемы: проблемы и перспективы исследований». Вологда, 2008. С. 357–359.
14. Рыжков Л. П. Экологические аспекты динамики соотношения величин массы и размеров тела окуня // Материалы XXVIII междунар. конф. «Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера». Петрозаводск, 2009. С. 475–478.
15. Svardson G. Significance of introgression in coregonid // Biology of coregonid fish. Winnipeg: University Manitoba Press, 1970. P. 33–59.

УДК 616.379-008.64

ТАТЬЯНА ВАЛЕНТИНОВНА ВАРЛАМОВАкандидат медицинских наук, доцент кафедры педиатрии
медицинского факультета, Петрозаводский государствен-
ный университет

varlamova@karelia.ru

НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА ДОРШАКОВАдоктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой
семейной медицины медицинского факультета, про-
ректор по научно-исследовательской работе, Петрозавод-
ский государственный университет

dorshakova@psu.karelia.ru

ТАТЬЯНА АЛЕКСЕЕВНА КАРАПЕТЯНдоктор медицинских наук, профессор кафедры семейной
медицины медицинского факультета, Петрозаводский го-
сударственный университет

kara@karelia.ru

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ САХАРНОГО ДИАБЕТА 1-го ТИПА У ДЕТСКОГО НАСЕЛЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ

Проведено генетическое исследование 2544 здоровых новорожденных Республики Карелия, выявлено 17,4 % HLA-положительных детей. Из 204 детей с сахарным диабетом 1-го типа отягощенная наследственность по диабету установлена у 25 %. В дебюте заболевания только в 25 % случаев была картина вирусной инфекции, в 4 % – вакцинация и в 3 % – тяжелый стресс. В анамнезе 64 % детей получали на 1-м году жизни смеси с содержанием белка коровьего молока или цельное коровье молоко.

Ключевые слова: сахарный диабет 1-го типа, эпидемиология, система HLA, грудное вскармливание

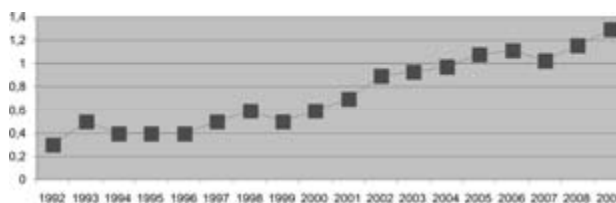
Сахарный диабет 1-го типа (СД 1) представляет собой важнейшую медико-социальную проблему во всем мире. Это объясняется его широким распространением, тяжестью поздних осложнений, высокой степенью инвалидизации, дороговизной средств диагностики и лечения, которые необходимы больным в течение всей жизни, а также не имеющей тенденции к снижению летальностью [1], [2].

Современное увеличение частоты СД 1 во всем мире подтверждено многочисленными исследованиями [7], [16], [17], [20], [25], [28]. Согласно прогнозам Р. Р. Onkamo [18], в 2010 году ожидается рост заболеваемости диабетом на 40 % по сравнению с 1998 годом.

СД 1-го типа – это наиболее часто встречающаяся эндокринная патология у детей, которую относят к приоритетам первого порядка. В последние годы во всем мире наблюдается всплеск заболеваемости сахарным диабетом 1-го типа, наиболее выраженный у детского и подросткового населения [1], [2], [14]. Так, за 25 лет заболеваемость СД 1 среди детей в московской популяции выросла в два раза [3]. Однако показатели заболеваемости существенно варьируют в разных странах [10], [28]. Самая высокая частота СД 1 у детей в возрасте до 15 лет обнаружена в Северной Европе (например, в Финляндии – 40 заболевших на 100 000 населения в год [25]). В России зарегистрирован

282 501 больной СД 1, из которых дети и подростки – 26 121 человек [1].

В Республике Карелия заболеваемость СД 1 в 2009 году составила 1,3 на 1000 детского населения в возрасте от 0 до 17 лет, что значительно выше, чем в среднем по России (см. рисунок). Первичная заболеваемость этой патологией в регионе среди возрастной группы от 0 до 17 лет в 2009 году составила 0,2 на 1000 детского населения, увеличившись на 0,06 по сравнению с 2007 годом.



Заболеваемость СД 1 в Республике Карелия
на 1000 детского населения (в возрасте от 0 до 17 лет)

В происхождении СД 1 существенное значение имеют два взаимосвязанных фактора – генетический и аутоиммунный. Первый подготавливает основу для аутоиммунных процессов, возникающих под влиянием вирусной инфекции и, возможно, химических цитотоксических воздействий, различных по своей природе и оказывающих повреждающее действие на б-клетки островков поджелудочной железы [1], [2], [12], [28].

В развитии заболевания принято выделять 6 стадий.

1-я стадия определяется генетической предрасположенностью к СД 1, обусловленной генами, относящимися к комплексу HLA и расположенными на коротком плече 6-й хромосомы [4], [6], [11], [13], [15]. Установлено, что в русской популяции высокую степень предрасположенности к СД 1-го типа несут аллели и их комбинации HLA-DQ-DR-генов.

2-я стадия – гипотетический пусковой момент (вирусная инфекция, стресс, питание, химические факторы). Действие различных факторов внешней среды может быть установлено у 60 % больных с впервые выявленным СД 1. Роль вирусных инфекций в патогенезе СД 1 связана с их способностью поражать β -клетки островков поджелудочной железы. Особое значение здесь имеют вирусы краснухи, эпидемического паротита, ветряной оспы, Коксаки В4, инфекционного мононуклеоза, инфекционного гепатита и цитомегаловирус [5], [8], [16], [24], [26], [27]. Подтверждением «вирусной теории» в развитии заболевания является тот факт, что СД 1 чаще развивается зимой и ранней весной (79 % от всех наблюдений), когда отмечается сезонный всплеск большинства из указанных вирусных инфекций.

Фактором риска в развитии СД 1 является раннее введение коровьего молока в рацион питания детей в возрасте до 1 года [18], [22]. Также установлено, что СД 1 чаще встречается у детей, которые находились на искусственном вскармливании. В состав молочных смесей, используемых для питания, входит белок коровьего молока. Применение таких смесей для кормления новорожденных, имеющих генетическую предрасположенность к СД 1, способствует развитию у них патологии, в отличие от новорожденных, находящихся на грудном вскармливании. Установлен механизм, посредством которого осуществляются инициация и активация иммунных процессов, приводящих к развитию СД 1. В состав коровьего молока входит белок альбумин, а фрагмент альбумина, названный «АБ-БОС», имеет молекулярную массу 69 килодальтон, что почти соответствует молекулярной массе клеточно-поверхностного белка β -клетки. Образование антител к белку «АББОС» в организме ребенка, находящегося на искусственном вскармливании, путем перекрестной реакции с белками β -клеток приводит к их деструкции, уменьшению их количества и развитию СД 1. Грудное вскармливание оказывает защитное действие против развития заболевания [9], [11], [21], [23].

3-я стадия – развитие иммунологических нарушений. Сохраняется нормальная секреция инсулина. Могут определяться иммунологические маркеры СД 1 – аутоантитела к антигенам β -клетки (ICA), к глутаматдекарбоксилазе (GAD) и инсулину (IAA).

4-я стадия – выраженные аутоиммунные нарушения. Для этой стадии характерно прогрессирующее снижение секреции инсулина вслед-

ствие развивающегося инсулита. Уровень гликемии остается в пределах нормы.

5-я стадия – клиническая манифестация СД 1, которая развивается после гибели 80–90 % всей массы β -клеток. При этом сохраняется остаточная секреция С-пептида.

6-я стадия – полная деструкция β -клеток.

Высокая частота заболеваемости СД 1 детского населения соседней с Карелией Финляндии, имеющей общие этнические и культурные корни, а также климатогеографическую близость, повышает актуальность изучения этой эндокринной патологии у детского населения республики, что позволит в последующем изыскать эффективные пути профилактики и остановки распространения заболевания в регионе.

Целью нашего исследования было изучение региональных особенностей в развитии СД 1 у детского населения Республики Карелия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Первую группу исследования составили 2544 здоровых новорожденных – уроженцы Карелии, обследованные на предмет предрасположенности к СД 1 по системе HLA в рамках выполнения международного проекта «Исследование гигиенической гипотезы развития сахарного диабета 1-го типа у детей» («DIABIMMUNE») VII рамочной программы Евросоюза.

Во вторую группу исследования вошли 204 ребенка (114 девочек, 90 мальчиков) в возрасте от 3 до 17 лет (средний возраст – $10,3 \pm 4,2$ года) с установленным диагнозом СД 1-го типа, находящихся на диспансерном наблюдении у эндокринологов Республики Карелия, со стажем заболевания от 6 месяцев до 13 лет (в среднем 4,5 года). Все дети получали интенсифицированную терапию генноинженерными инсулинами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что 17,4 % обследованных новорожденных имеют генетическую предрасположенность к СД 1 (положительные на HLA-DQB*0302 и/или *02 и отрицательные на защитные аллели *0602/03, *0301), что ниже по сравнению с Финляндией (23 %), но выше, чем в Эстонии (15,6 %). В развитии СД 1 имеет значение неблагоприятная комбинация аллельных вариантов нормальных генов, которые кодируют аутоиммунные процессы в организме [28]. Таким образом, 17,4 % новорожденных детей в Республике Карелия составляют группу риска развития СД 1.

Для СД 1 выявлена тенденция к семейной ассоциации болезни. Тем не менее отягощенный семейный анамнез по СД 1 имеет место только у 25 % из 204 обследованных детей. Первый пик развития заболевания приходится на 5–6 лет (54 ребенка), второй – на препубертатный и пубертатный возраст (136 детей).

По результатам наших исследований, перед дебютом СД 1 только в 25 % случаев была отмечена картина вирусной инфекции, в 4 % – вакцинация и в 3 % – тяжелый стресс. В 68 % случаев провоцирующий фактор установлен не был.

Из группы наблюдения грудное вскармливание до 1 года и старше было только у 36 % детей. 64 % детей получали на 1-м году жизни смеси с содержанием белка коровьего молока, молочные каши или цельное коровье молоко.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в развитии СД 1 у детского населения в Республике Карелия важную роль играет генетический фактор, который «реализуется»

широким применением при вскармливании детей белка коровьего молока (в составе каш или в цельном коровьем молоке) при относительно невысоком значении вирусной инфекции в патогенезе заболевания. Учитывая вышеизложенное, необходимо в группе HLA-положительных по СД 1 детей региона провести иммунологический скрининг с определением четырех видов АТ b-клеткам поджелудочной железы. В группе риска по развитию СД 1 следует рекомендовать родителям исключение из питания ребенка в течение первых 6 месяцев жизни протеинов коровьего молока. У лиц, имеющих генетическую предрасположенность к СД 1, следует проводить профилактическую иммунизацию против диабетогенных вирусов (краснуха, грипп, эпидемический паротит).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дедов И. И., Кураева Т. Л., Петеркова В. А. Сахарный диабет у детей и подростков. М.: Гэотар-Медиа, 2008. 160 с.
2. Дедов И. И., Петеркова В. А. Руководство по детской эндокринологии. М.: Универсум Паблишинг, 2006. 600 с.
3. Петеркова В. А., Кураева Т. Л., Титович Е. В. Современная инсулинотерапия сахарного диабета 1 типа у детей и подростков // Лечащий врач. 2010. № 6. С. 36–40.
4. Awa W. L., Boehm B. O., Kapellen T., Rami B., Rupprath P., Marg W., Becker M., Holl R. W. HLA-DR genotypes influence age at disease onset in children and juveniles with type 1 diabetes mellitus // Eur. J. Endocrinol. 2010. Vol. 163 № 1. P. 97–104.
5. Bach J. F. Infections and autoimmune diseases // J. Autoimmun. 2005. Vol. 25. P. 74–80.
6. Bjørnvold M., Undlien D. E., Joner G., Dahl-Jørgensen K., Njølstad P. R., Akselsen H. E., Gervin K., Rønningen K. S., Stene L. C. Joint effects of HLA, INS, PTPN22 and CTLA4 genes on the risk of type 1 diabetes // Diabetologia. 2008. Vol. 51. № 4. P. 589–596.
7. Borchers A. T., Uibo R., Gershwin M. E. The geoepidemiology of type 1 diabetes // Autoimmun Rev. 2010. Vol. 9. № 5. P. 355–365.
8. Cinek O., Witsø E., Jeansson S., Rasmussen T., Drevinek P., Wetlesen T., Vavrinec J., Grinde B., Rønningen K. S. Longitudinal observation of enterovirus and adenovirus in stool samples from Norwegian infants with the highest genetic risk of type 1 diabetes // J. Clin. Virol. 2006. Vol. 35. № 1. P. 33–40.
9. Erkkola M., Salmenhaara M., Kronberg-Kippilä C., Ahonen S., Arkkola T., Uusitalo L., Pietinen P., Veijola R., Knip M., Virtanen S. M. Determinants of breast-feeding in a Finnish birth cohort // Public Health Nutr. 2010. Vol. 13. № 4. P. 504–513.
10. EURODIAB ACE Study Group. Variation and trends in incidence of childhood diabetes in Europe // Lancet. 2000. Vol. 355. P. 873–876.
11. Holmberg H., Wahlberg J., Vaarala O., Ludvigsson J. Short duration of breast-feeding as a risk-factor for beta-cell autoantibodies in 5-year-old children from the general population // Br. J. Nutr. 2007. Vol. 97. № 1. P. 111–116.
12. Knip M., Siljander H. Autoimmune mechanisms in type 1 diabetes // Autoimmun. Rev. 2008. Vol. 7. № 7. P. 550–557.
13. Larsson H. E., Lynch K., Lernmark B., Nilsson A., Hansson G., Almgren P., Lernmark A. Diabetes-associated HLA genotypes affect birthweight in the general population // Diabetologia. 2005. Vol. 48. № 8. P. 1484–1491.
14. Liese A. D., Lawson A., Song H. R., Hibbert J. D., Porter D. E., Nichols M., Lamichhane A. P., Dabelea D., Mayer-Davis E. J., Standiford D., Liu L., Hamman R. F., D'Agostino R. B. Jr. Evaluating geographic variation in type 1 and type 2 diabetes mellitus incidence in youth in four US regions // Health Place. 2010. Vol. 16. № 3. P. 547–556.
15. Lynch K. F., Lernmark B., Merlo J., Cilio C. M., Ivarsson S. A., Lernmark A. Cord blood islet autoantibodies and seasonal association with the type 1 diabetes high-risk genotype // J. Perinatol. 2008. Vol. 28. № 3. P. 211–217.
16. McNally R. J., Pollock R., Court S., Begon M., Cheetham T. D. Space-time clustering analyses of type 1 diabetes in children from north-east England: support for an infectious aetiology? // Environ Health. 2009. Vol. 21. № 8. P. 4–14.
17. Patterson C. C., Dahlquist G. G., Gyürüs E., Green A., Soltész G. Incidence trends for childhood type 1 diabetes in Europe during 1989–2003 and predicted new cases 2005–20: a multicentre prospective registration study // Lancet. 2009. Vol. 13. № 373. P. 2027–2033.
18. Pflüger M., Winkler C., Hummel S., Ziegler A. G. Early infant diet in children at high risk for type 1 diabetes // Horm. Metab. Res. 2010. Vol. 42. № 2. P. 143–148.
19. Pitkaniemi J., Onkamo P., Tuomilehto J., Arjas E. Increasing incidence of Type 1 diabetes-role for genes? // BMC Genet. 2004. Vol. 2. P. 5–15.
20. Podar T., Solntsev A., Karvonen M., Padaiga Z., Brigis G., Urbonaitė B., Viik-Kajander M., Reunanen A., Tuomilehto J. Increasing incidence of childhood-onset type I diabetes in 3 Baltic countries and Finland 1983–1998 // Diabetologia. 2001. Vol. 44. № 3. P. 17–20.

21. Sadeharju K., Knip M., Virtanen S. M., Savilahti E., Tauriainen S., Koskela P., Akerblom H. K., Hyöty H. Maternal antibodies in breast milk protect the child from enterovirus infections // *Pediatrics*. 2007. Vol. 119. № 5. P. 941–946.
22. Savilahti E., Saarinen K. M. Early infant feeding and type 1 diabetes // *Eur. J. Nutr.* 2009. Vol. 48. № 4. P. 243–249.
23. Sorkio S., Cuthbertson D., Bärlund S., Reunanen A., Nucci A. M., Berseth C. L., Koski K., Ormiston A., Savilahti E., Uusitalo U., Ludvigsson J., Becker D. J., Dupré J., Krischer J. P., Knip M., Akerblom H. K., Virtanen S. M. Breast feeding patterns of mothers with type 1 diabetes: results from an infant feeding trial // *Diabetes Metab. Res. Rev.* 2010. Vol. 26. № 3. P. 206–211.
24. Tracy S., Drescher K. M., Jackson J. D., Kim K., Kono K. Enteroviruses, type 1 diabetes and hygiene: a complex relationship // *Rev. Med. Virol.* 2010. Vol. 20. № 2. P. 106–116.
25. Tuomilehto J., Karvonen M., Padaiga Z., Tuomilehto-Wolf E., Kohtamäki K. Epidemiology of insulin-dependent diabetes mellitus around the Baltic Sea // *Horm. Metab. Res.* 1996. Vol. 28. № 7. P. 340–343.
26. Viskari H. R., Koskela P., Lönnrot M., Luonansuu S., Reunanen A., Baer M., Hyöty H. Can enterovirus infections explain the increasing incidence of type 1 diabetes? // *Diabetes Care*. 2000. Vol. 23. № 3. P. 414–416.
27. Viskari H., Ludvigsson J., Uibo R., Salur L., Marciulionyte D., Hermann R., Soltesz G., Fuchtenbusch M., Ziegler A. G., Kondrashova A., Romanov A., Knip M., Hyöty H. Relationship between the incidence of type 1 diabetes and enterovirus infections in different European populations: results from the EPIVIR project // *J. Med. Virol.* 2004. Vol. 72. № 4. P. 610–617.
28. Zubkiewicz-Kucharska A., Noczyńska A. Epidemiology of type 1 diabetes in Lower Silesia in the years 2000–2005 // *Pediatr. Endocrinol. Diabetes Metab.* 2010. Vol. 16. № 1. P. 45–49.

УДК 579

ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ МАРКЕЛОВ

кандидат медицинских наук, доцент курса фтизиопульмонологии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет
markelov@psu.karelia.ru

АННА АЛЕКСАНДРОВНА ВЯЗОВАЯ

кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории молекулярной микробиологии, ФГУН «Санкт-Петербургский НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Пастера» Роспотребнадзора
annavyazovaya@pasteurorg.ru

ВЯЧЕСЛАВ ЮРЬЕВИЧ ЖУРАВЛЕВ

кандидат медицинских наук, заведующий лабораторией молекулярно-генетических методов, Санкт-Петербургский НИИФ Росмедтехнологий
jouravlev-slava@mail.ru

АНДРЕЙ ОЛЕГОВИЧ МАРЬЯНДЫШЕВ

доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАМН, заведующий кафедрой фтизиопульмонологии, Северный государственный медицинский университет (г. Архангельск)
maryandyshev@mail.ru

ГЕНОТИПИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МИКОБАКТЕРИЙ ТУБЕРКУЛЕЗА С МНОЖЕСТВЕННОЙ ЛЕКАРСТВЕННОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ В КАРЕЛИИ

Исследованы 119 штаммов (в том числе 54 с множественной лекарственной устойчивостью (МЛУ)) с помощью молекулярно-генетических методов. Абсолютное большинство штаммов с МЛУ (90,9 %) и половина полирезистентных (ПР) штаммов, циркулирующих на территории Карелии, принадлежали к генетическому семейству Beijing. Устойчивость к рифампицину у большинства штаммов с МЛУ семейства Beijing была связана с мутацией 531 TCG → TTG гена *rpoB*, обуславливающей высокий уровень устойчивости к рифампицину и кросс-резистентность к рифабутинам. Представленные данные демонстрируют эпидемическую опасность МЛУ штаммов генотипа Beijing, циркулирующих на территории Карелии.

Ключевые слова: туберкулез с множественной лекарственной устойчивостью, генотипирование микобактерий туберкулеза, Beijing

В настоящее время проблема распространения туберкулеза с множественной лекарственной устойчивостью (МЛУ-ТБ) приобрела глобальное значение и является ведущим фактором, определяющим недостаточную эффективность противотуберкулезных мероприятий. В 1997 году в отчете Всемирной организации здравоохранения и Международного союза борьбы с туберкулезом и заболеваниями легких впервые был введен термин «горячие точки» распространения МЛУ-ТБ, которые обозначили страны или регионы, включая Российскую Федерацию, где более 5 % общего числа больных туберкулезом имели формы заболевания, обусловленного МЛУ штаммами микобактерий туберкулеза (МБТ) [5]. В Карелии, несмотря на некоторую стабилизацию показателя заболеваемости туберкулезом, удельный вес первичной МЛУ МБТ за последние 10 лет увеличился в 11 раз (с 2,8 до 30,9 %). Показатель частоты первичной МЛУ МБТ в Карелии в 2008 году превысил аналогичный показатель по РФ (8,1 %) более чем в 3 раза [4].

В последние годы большое внимание уделяется изучению циркуляции различных генотипов МБТ на различных территориях. Показана связь МЛУ с принадлежностью МБТ к генотипу Beijing в РФ [3], [7]. Установлено, что штаммы этого генотипа, обладающие высокой трансмиссивностью и гипервирулентностью, вызывают тяжелое прогрессирующее течение туберкулеза [1], [2], [3], [6], [7]. Таким образом, необходима углубленная характеристика популяции возбудителя МЛУ-ТБ на территории Карелии.

С помощью молекулярно-генетических методов нами были изучены 119 штаммов МБТ, выделенных от впервые выявленных больных туберкулезом легких в 2004–2007 годах, включая 54 штамма МЛУ, 40 лекарственно чувствительных и 25 полирезистентных к противотуберкулезным препаратам (ПТП) первого ряда. Из 119 штаммов 46 были подвергнуты генотипированию методом IS6110-RFLP [10] в референс-лаборатории Национального института общественного здоровья г. Осло (Норвегия), 73 – методом ПЦР с инверти-

рованными праймерами, *Ris1* и *Ris2*, расположенными на терминальных участках элемента *IS6110* [9], 11 – методом *IS6110*-RFLP [10] в лаборатории молекулярной микробиологии ФГУН «Санкт-Петербургский НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Пастера» Роспотребнадзора. Мутации в гене *rpoB*, ассоциированные с устойчивостью МБТ к рифампицину, определяли с помощью тест-системы «ТБ-БИОЧИП» в лаборатории молекулярно-генетических методов Санкт-Петербургского НИИФ Росмедтехнологий согласно [2].

Результаты генотипирования штаммов МБТ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика 119 штаммов МБТ, выделенных от впервые выявленных больных в Республике Карелия

Генотип МБТ	Отношение к ПТП I ряда					
	МЛУ		ПР		ЛЧ	
	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Beijing	50	92,6	13	52	4	10
Другие (не Beijing)	4	7,4	12	48	36	90
Итого	54	100	25	100	40	100

Таблица 2

Генотипическая характеристика МЛУ штаммов Beijing (n = 11)

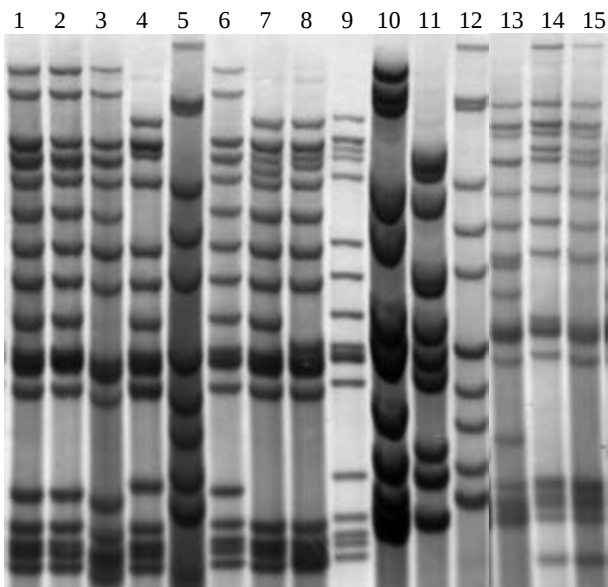
Число копий <i>IS6110</i>	Профиль <i>IS6110</i> -RFLP	Число штаммов
17	Генотип В	
	В0	3
	В1	2
	В7	1
16	Генотип С	1
	С1	1
	С8	1
	С7	1
15	С30	1
	Генотип А	
	А4	1

Таблица 3

Мутации в гене *rpoB* у МЛУ штаммов МБТ различных генотипов (n = 29)

Мутация в гене <i>rpoB</i>	Число штаммов	Генотип	
		Beijing	не Beijing
531TCG → TTG	24	22	2
526CAC → GAC	2	1	1
516GAC → GTC	3	2	1

Как видно из табл. 1, подавляющее большинство (92,5 %) МЛУ штаммов (n = 54) и половина полирезистентных штаммов по результатам генотипирования принадлежат к генетическому семейству Beijing. У 36 (87,8 %) из 41 ЛЧ штамма выявлены другие генотипы (не Beijing). Из 54 МЛУ штаммов 37 (68,5 %) обладали тотальной устойчивостью к ПТП I ряда.



Электрофореграмма профилей ДНК штаммов МБТ различных генотипов (метод *IS6110*-RFLP):

Дорожки: 1, 2, 6 – В0; 3 – С1; 4 – А4; 5, 12 – маркер (ДНК штамма М. t. 14323); 7 – С8; 8 – С30; 9 – С7; 10, 11 – не Beijing; 13 – В7; 14, 15 – В1. Обозначения профилей указаны согласно базе данных лаборатории молекулярной микробиологии ФГУН «СПбНИИЭМ им. Пастера» Роспотребнадзора

Из 11 штаммов генетического семейства Beijing, изученных методом *IS6110*-RFLP, 6 штаммов представляют варианты генотипа В, 4 – генотипа С и 1 штамм – генотипа А (табл. 2). Принадлежность штаммов Beijing к определенному генотипу (и его вариантам) обусловлена различиями в количестве и расположении копий элемента *IS6110* на хромосоме бактерии. Несмотря на вариативность профилей *IS6110* (см. рисунок), изученные штаммы Beijing являются генетически близкородственными, что свидетельствует об эндемическом характере циркуляции штаммов данного генотипа на территории Карелии и согласуется с существующими представлениями о единстве происхождения и последующей клональной диссеминации МБТ генотипа Beijing [3], [9].

У 29 штаммов МБТ, обладавших МЛУ по результатам определения устойчивости к препаратам методом абсолютных концентраций, в гене *rpoB* был изучен спектр мутаций, контролирующей устойчивость к рифампицину. Из 29 штаммов 25 принадлежали к генотипу Beijing. Как видно из табл. 3, установлено полное совпадение результатов определения устойчивости к препарату с помощью культурального и молекулярно-генетического методов. Устойчивость к рифампицину подавляющего большинства (22 из 25) штаммов генотипа Beijing была обусловлена мутацией TCG(Ser) → TTG(Leu) в кодоне 531, ассоциированной с высоким уровнем устойчивости к рифампицину и кросс-резистентностью к рифабутинам, что согласуется с опубликованными ранее данными о доминировании данной мутации у

штаммов российской популяции МЛУ МБТ генетического семейства Beijing [3], [7].

ВЫВОДЫ

1. Среди штаммов МЛУ МБТ, выделенных от впервые выявленных больных туберкулезом легких на территории Республики Карелия, доминируют штаммы генотипа Beijing.

2. Устойчивость к рифампицину у абсолютного большинства изученных штаммов МЛУ МБТ генотипа Beijing обусловлена мутацией TCG(Ser) → TTG(Leu) в кодоне 531 гена *rpoB*, ассоциированной с высоким уровнем устойчивости к рифампицину и кросс-резистентностью к рифабутинам.

Циркуляция МЛУ штаммов МБТ генотипа Beijing представляет эпидемическую угрозу в плане распространения МЛУ-ТБ в Карелии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишневский Б. И., Иванов Л. И., Колечко Н. Г. и др. Клиническое значение микобактерий туберкулеза с различными биологическими свойствами // Проблемы туберкулеза. 1991. № 4. С. 51–55.
2. Журавлев В. Ю., Нарвская О. В., Вязовая А. А., Мокроусов И. В., Оттен Т. Ф., Вишневский Б. И. Молекулярно-генетические технологии в этиологической диагностике диссеминированного туберкулеза легких // Журнал микробиологии. 2010. № 3. С. 77–81.
3. Нарвская О. В. Геномный полиморфизм *Mycobacterium tuberculosis* и его значение в эпидемическом процессе: Автореф. дис. ... д-ра мед. наук. СПб., 2003. 35 с.
4. Пунга В. В., Ерохин В. В., Нагорная Е. Д. и др. Итоги и опыт работы ЦНИИТ РАМН в пилотных территориях по контролю за выявлением и лечением туберкулеза (когортный анализ) // Проблемы туберкулеза и болезни легких. 2006. № 8. С. 6–8.
5. Самойлова А. Г., Марьяндышев А. О. Лекарственная устойчивость микобактерий туберкулеза – актуальная проблема фтизиатрии // Проблемы туберкулеза и болезни легких. 2005. № 7. С. 3–9.
6. Скворцова Л. А., Павлова М. В., Сапожникова Н. В. и др. Показатели иммунитета и биологические свойства микобактерий при инфильтративном туберкулезе легких // Проблемы туберкулеза и болезни легких. 2005. № 11. С. 6–9.
7. Тунгусова О. С. Бактериология и молекулярная генетика микобактерий туберкулеза. Архангельск: Изд. центр СГМУ, 2003. 102 с.
8. Glynn J., Whitley J., Bifani P. et al. Worldwide occurrence of Beijing/W strains of *Mycobacterium tuberculosis*: a systematic review // Emerg. Infect. Dis. 2002. Vol. 8. P. 843–849.
9. Mokrousov I., Otten T., Vyazovaya A. et al. PCR-based methodology for detecting multidrug-resistant strains of *Mycobacterium tuberculosis* Beijing family circulating in Russia // Eur. J. Clin. Microbiol. Infect. Dis. 2003. Vol. 22. P. 342–348.
10. Van Embden J., Cave D., Crawford J. et al. Strain identification of *Mycobacterium tuberculosis* by DNA fingerprinting: recommendations for a standardized methodology // J. Clin. Microbiol. 1993. Vol. 31. № 2. P. 406–409.

УДК 616.248:575.17

МАРИЯ АЛЕКСАНДРОВНА СИМАКОВА

аспирант кафедры госпитальной терапии им. акад. М. В. Черноруцкого, Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова Росздрава
Maria.Simakova@gmail.com

ВАСИЛИЙ ИВАНОВИЧ ТРОФИМОВ

доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой госпитальной терапии им. акад. М. В. Черноруцкого, Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова Росздрава
trofvi@mail.ru

ЖАННА АЛЕКСАНДРОВНА МИРОНОВА

доцент кафедры госпитальной терапии им. акад. М. В. Черноруцкого, Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова Росздрава
zhanmir@mail.ru

ЕЛЕНА ДМИТРИЕВНА ЯНЧИНА

кандидат медицинских наук, сотрудник отдела молекулярно-генетических технологий НИЦ, Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова Росздрава
dr-lena@mail.ru

МИХАИЛ ВЛАДИМИРОВИЧ ДУБИНА

доктор медицинских наук, сотрудник отдела молекулярно-генетических технологий НИЦ, Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова Росздрава
m.dubina@spmu.rssi.ru

**АССОЦИАЦИЯ ПОЛИМОРФИЗМА C3435T ГЕНА MDR1
СО СТЕПЕНЬЮ ТЯЖЕСТИ БРОНХИАЛЬНОЙ АСТМЫ**

Целью работы было оценить встречаемость полиморфизма C3435T гена множественной лекарственной устойчивости MDR1, кодирующего транспортный белок Р-гликопротеин-170 (Pgp-170) у больных бронхиальной астмой. Получены данные в пользу ассоциации аллеля C3435 и генотипа CC гена MDR1 с астмой тяжелого течения и снижением чувствительности к терапии ингаляционными глюкокортикостероидами (ИГКС).

Ключевые слова: фармакогенетика, бронхиальная астма, ген MDR1, глюкокортикостероиды

Прогресс, достигнутый в генетике за последние 20 лет, очевиден. Примером тому является общедоступность каталогов полиморфизмов генов человека. Существенные успехи сделаны в понимании роли генетической изменчивости в определении такого сложного фенотипа, как бронхиальная астма (БА). БА является мультифакториальным заболеванием с полигенным типом наследования, в основе которого лежит хроническое воспаление дыхательных путей, приводящее к повышению гиперреактивности бронхов и развитию обратной бронхообструкции.

Результаты 12 широкогеномных скрининговых исследований пациентов с атопией, атопическим дерматитом и БА показали, что гены, ассоциированные с упомянутыми заболеваниями, расположены в десяти участках генома человека. Наиболее высокая повторяемость результатов этих работ получена для регионов

5q23-31, 6p21.1-p23, 11q13, 12q14-24.33 и 13q11-32 [10]. Однако обращает внимание тот факт, что необходимо учитывать этническую специфику при интерпретации полученных ассоциаций. С помощью метода позиционного картирования и технологии микрочипов для оценки профиля экспрессии генов число наиболее существенных для атопических заболеваний генов было сокращено до 150 [8].

Двумя важными разделами современной генетики, имеющими непосредственное отношение к лечению пациентов, являются фармакогенетика и фармакогеномика [6]. Изучением генетических особенностей пациента, влияющих на фармакологический ответ, занимается фармакогенетика. Эти генетические особенности, как правило, представляют собой полиморфные участки генов, кодирующих белки, которые участвуют в фармакокинетике и фармакодинамике

лекарственных средств. К первой группе относятся гены, кодирующие ферменты биотрансформации лекарственных средств, в частности изоферменты цитохрома Р-450 (CYP2E1, CYP1A1, CYP2C19) и ферменты II фазы биотрансформации (N-ацетилтрансферазы, глутатион SH-S-трансферазы и т. д.). Существует несколько российских исследований по оценке распространенности полиморфизмов генов семейства глутатионтрансфераз при БА. В работах исследователей из Новосибирска и Санкт-Петербурга была установлена ассоциация «нулевых» генотипов GSTT1 и GSTM1, приводящих к отсутствию ферментов, с бронхиальной астмой [1], [4]. В последние годы изучается связь фармакокинетики лекарственных средств с полиморфизмами генов транспортеров: переносчиков органических анионов (OATP-C, OAT-1, OAT-3), органических катионов (OCT-1) и транспортного белка Р-гликопротеина-170, кодируемого геном MDR1. Ко второй группе объектов изучения фармакогенетики относятся гены, кодирующие «молекулы-мишени» лекарственных препаратов (рецепторы, ферменты, ионные каналы), и гены, продукты которых вовлечены в патогенетические процессы (факторы свертывания крови, аполипопротеины, цитокины, факторы транскрипции и т. д.). Выявлением конкретных аллельных вариантов генов-кандидатов, определением уровня их экспрессии и степени влияния на фармакологический ответ с последующим составлением так называемых маркерных профилей для конкретного человека занимается фармакогеномика. Таким образом, фармакогеномика – это прикладное применение всего генома человека, в котором фармакогенетика исследует взаимодействия отдельного гена с лекарствами. Это позволяет прогнозировать эффективность терапии и является перспективным направлением персонализированной медицины [5].

Согласно современным взглядам, в патогенезе БА ведущая роль принадлежит воспалению. Общеизвестно использование глюкокортикостероидных гормонов (ГКС) в качестве базисной противовоспалительной терапии БА. При этом, согласно опубликованным результатам международных эпидемиологических исследований (A1RE, AIRCEE и др.), контроль над болезнью регистрируется только у 5–30 % пациентов. Данные эпидемиологических исследований, проведенных в Томской области в 2001–2002 годах, свидетельствуют об отсутствии контроля над симптомами БА у 86,1 % пациентов [2]. Одной из причин неконтролируемого течения может быть неэффективность терапии. В связи с этим привлекательным для фармакогенетических исследований у больных астмой является ген MDR1, кодирующий транспортный белок Р-гликопротеин-170 (Pgp-170), который осуществляет активный процесс выведения липофильных соединений из клетки. Осуществляя эффлюкс стероидов и неко-

торых цитокинов из клетки, Pgp-170 может оказывать влияние на эффективность лечения и выраженность воспаления [11].

На сегодняшний день идентифицировано 40 полиморфизмов гена MDR1. Установлено, что полиморфизм в 26-м экзоне С3435Т гена MDR1 коррелирует с уровнем экспрессии и функционированием Pgp-170 у здоровых людей. Основная масса работ по изучению полиморфизмов и экспрессии гена MDR1 выполнена у больных онкологического профиля и посвящена поиску причин множественной лекарственной резистентности и способов ее преодоления. При изучении воспалительных заболеваний кишечника и ревматоидного артрита выявлена ассоциация аллеля С3435 гена MDR1 со стероидорезистентностью и тяжелым течением заболевания [9]. Кроме того, ведутся поиски механизмов воздействия на активность Pgp-170. Так, в работе Е. Б. Логашенко (2006) предложен способ подавления экспрессии гена MDR1 с помощью малых интерферирующих РНК, расширяющий возможности химиотерапии [3]. В настоящее время проходят клинические испытания препарата Р833, который является ингибитором Pgp-170. Таким образом, изучение MDR1 гена расширяет возможности повышения эффективности фармакотерапии в будущем.

Целью нашего исследования была оценка встречаемости аллельных вариантов С3435Т гена MDR1 у больных БА и выявление их ассоциации со степенью тяжести заболевания и эффективностью терапии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Клинико-лабораторное обследование больных осуществлялось на базе клиники госпитальной терапии ГОУ ВПО «СПбГМУ им. акад. И. П. Павлова Росздрава». В исследование были включены 105 больных бронхиальной астмой, из них 77 (73 %) женщин, 28 (27 %) мужчин. Все обследованные пациенты не состояли в кровном родстве. Обследованная популяция была представлена жителями Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Диагноз ставился согласно международной классификации болезней 10-го пересмотра с учетом рекомендаций Европейского респираторного общества и Российского руководства по диагностике, лечению и профилактике БА [7]. Для постановки диагноза БА применялись общеклинические и лабораторные методы обследования, включая цитологическое исследование мокроты и исследование функции внешнего дыхания. Среди обследованных было 46 (44 %) пациентов со средней степенью тяжести и 59 (56 %) больных с тяжелым течением заболевания, в возрасте от 19 до 82 лет (средний возраст – $52,13 \pm 1,3$ года). Средний возраст начала заболевания составил $36,52 \pm 1,36$ года.

Группа контроля состояла из 103 человек: 66 (64 %) женщин и 37 (36 %) мужчин. Критерии отбора в контрольную группу были сле-

дующими: 1) возраст от 20 до 75 лет, 2) отсутствие курения в анамнезе, 3) отсутствие хронической бронхолегочной патологии, аутоиммунной и онкопатологии, 4) отсутствие аллергических заболеваний в анамнезе, 5) неотягощенная наследственность в отношении аллергических заболеваний.

Молекулярно-генетические методы исследования: геномную ДНК выделяли из лейкоцитов периферической крови методом фенольно-хлороформной экстракции; для идентификации аллельных вариантов гена MDR1 использовали амплификацию соответствующих фрагментов ДНК методом полимеразной цепной реакции (ПЦР) с последующим рестрикционным анализом.

Статистический анализ полученных данных выполняли с использованием пакета статистической программы Statistica 7.0. Средние величины представлены как $M \pm m$, где M – среднее, m – стандартная ошибка среднего. Сравнение частот аллелей и генотипов оценивалось при помощи критерия χ^2 и точного метода Фишера (Fisher exact test). Для оценки достоверности различий между средними использовался непараметрический тест Манн – Уитни (Mann – Whitney U test). При p менее 0,05 различия между сравниваемыми показателями считались достоверными, при p менее 0,1 различия расценивались как тенденция.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При сравнении больных тяжелой и средней степени тяжести БА достоверных различий по распределению сопутствующей патологии (гастроэзофагеальная рефлюксная болезнь, ожирение, ЛОР-патология, хроническая обструктивная болезнь легких (ХОБЛ)) между группами не было. У 44 % ($n = 47$) больных БА был отягощенный наследственный анамнез в отношении аллергических заболеваний (БА и атопический дерматит у родственников первой и второй линий). У 47 % ($n = 50$) пациентов в анамнезе существовало указание на профессиональные вредности, у подавляющего большинства (84 % ($n = 89$)) больных БА был отягощенный аллергологический анамнез. Интересно, что в группе больных тяжелой БА чаще встречалось сочетание более трех вариантов сенсибилизации по сравнению с пациентами со средней степенью тяжести: 21 % против 7,3 % ($\chi^2 = 4,08$, $p = 0,041$). При этом у пациентов с тяжелой БА чаще встречалась пыльцевая, пищевая и лекарственная сенсибилизация по сравнению с больными со средней степенью тяжести: 64,6 % против 46 % ($\chi^2 = 3,92$, $p = 0,05$), 46 % против 22 % ($\chi^2 = 5,56$, $p = 0,018$), 75 % против 46 % ($\chi^2 = 7,69$, $p = 0,005$) соответственно. Среди обследованных 38 больных в прошлом были курильщиками, среднее количество пачка/лет составило $14,18 \pm 2,21$. При этом на момент исследования 25 пациентов (24 %) продолжали курить.

Распределение частот аллелей С и Т гена MDR1 в позиции 3435 было различным в группах больных со средней и тяжелой степенью тяжести БА, а также отличалось от группы контроля. Аллель С3435 достоверно чаще встречался в группе БА по сравнению с группой контроля: 53 % против 31 % ($\chi^2 = 21,23$, $p = 0,0001$). При этом в группах больных тяжелой и средней степени тяжести БА аллель С3435 гена MDR1 также встречался чаще по сравнению с контрольной группой: 57 % против 31 % ($\chi^2 = 21,34$, $p = 0,0001$), 47 % против 31 % ($\chi^2 = 8,68$, $p = 0,0032$) соответственно. При сравнении пациентов с разной степенью тяжести БА достоверных различий в распределении частот аллелей не было выявлено.

Оценивая данные по распределению генотипов С3435Т гена MDR1, следует отметить, что гомозиготы по аллелю С3435 были чаще среди больных БА, чем в группе контроля: 29,52 % против 8,74 % ($\chi^2 = 14,48$, $p = 0,0001$). В группе больных БА тяжелого течения, как и у больных со средней степенью тяжести заболевания, чаще встречался генотип СС по сравнению с контрольной группой: 30,43 % против 8,74 % ($\chi^2 = 12,41$, $p = 0,0004$), 26,83 % против 8,74 % ($\chi^2 = 10,21$, $p = 0,001$) соответственно. В то же время гомозиготы по аллелю 3435Т чаще встречались среди больных со средней степенью тяжести БА, чем в группе тяжелой астмы: 32,72 и 16,12 % соответственно ($\chi^2 = 3,96$, $p = 0,036$).

В группе больных тяжелой БА среднее значение объема форсированного выдоха за первую секунду (ОФВ1) было меньше у носителей генотипа СС $50,32 \pm 4,21$ % по сравнению с пациентами с генотипами СТ 62 ± 4 % и ТТ 53 ± 6 %, однако эти отличия были статистически незначимы. Кроме того, в этой же группе у гомозигот по аллелю С3435 удельное сопротивление бронхов (Sgaw) ($0,046 \pm 0,009$) было достоверно меньше по сравнению с гетерозиготами ($0,103 \pm 0,028$), $p = 0,016$, что свидетельствует о более выраженной обструкции у этой категории лиц. При этом отличий в дозе ИГКС между сравниваемыми группами больных тяжелой БА не было: $1350,0 \pm 142$ мкг/сутки – у носителей генотипа СС3435 гена MDR1, $1442,86 \pm 111$ мкг/сутки – у гетерозигот.

У 16 пациентов с тяжелой БА коморбидной патологией была ХОБЛ. Распределение генотипов С3435Т гена MDR1 у этих пациентов было следующим: СС 37 % ($n = 6$), СТ 44 % ($n = 7$), ТТ 19 % ($n = 3$) и не отличалось от распределения генотипов у пациентов с тяжелой астмой без ХОБЛ. Однако в группе больных с сочетанной легочной патологией (БА и ХОБЛ) при наличии генотипа СС гена MDR1 были ниже показатели ОФВ1 ($43,41 \pm 5,34$ %) по сравнению с генотипом СТ ($64,13 \pm 7,21$ % ($p = 0,045$)) и ЖЕЛ (жизненная емкость легких) ($72,32 \pm 4,2$ % против $100,13 \pm 7,52$ % ($p = 0,016$)), что свидетельствовало о более выраженной бронхообструкции у гомозигот по аллелю С3435 гена MDR1.

ВЫВОДЫ

В результате нашего исследования обнаружена ассоциация полиморфных вариантов C3435T гена MDR1 с БА. Более тяжелое течение заболевания было характерно для лиц с вариантом генотипа CC3435 гена MDR1, тогда как у носителей генотипа TT3435 чаще диагностировалась БА средней степени тяжести. При срав-

нении больных тяжелой БА выяснилось, что у носителей генотипа CC гена MDR1 степень выраженности бронхообструктивного синдрома была больше при отсутствии различий в дозах применяемых ИГКС. Этот факт, вероятно, связан с меньшей эффективностью терапии, а аллель C3435 гена MDR1 может рассматриваться в качестве маркера, ассоциированного со снижением чувствительности к терапии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иващенко Т. Э., Желенина Л. А. Полиморфизм генов семейства глутатион-S-трансферазы (GST) при бронхиальной астме у детей // Аллергология. 2003. Т. 2. С. 13–16.
2. Кобякова О. С. Клинико-патогенетическая характеристика и базисная терапия тяжелой неконтролируемой бронхиальной астмы: Автореф. дис. ... д-ра мед. наук. Томск, 2005. 46 с.
3. Логашенко Е. Б. Подавление экспрессии гена MDR1 с помощью малых интерферирующих РНК: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск, 2006. 20 с.
4. Ляхович В. В., Вавилин В. А., Макарова С. И., Гришанова А. Ю. Экогенетический аспект полифакторных заболеваний // Вестник ВОГиС. 2006. Т. 10. № 3. С. 514–519.
5. Середенин С. Б. Лекции по фармакогенетике. М.: МИА, 2004. 303 с.
6. Сычев Д. А., Раменская Г. В., Игнатъев И. В., Кукес В. Г. Клиническая фармакогенетика. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2007. 248 с.
7. Трофимов В. И. Руководство по диагностике, лечению и профилактике бронхиальной астмы / Под ред. акад. РАМН А. Г. Чучалина. М., 2005. 51 с.
8. Фрейдин М. Б., Брагина Е. Ю., Огородова Л. М., Пузырев В. П. Генетика атопии: современное состояние // Вестник ВОГиС. 2006. Т. 10. № 3. С. 492–503.
9. Barnes P. J., Adcock I. M. Glucocorticoid resistance in inflammatory diseases // Lancet. 2009. Vol. 373. P. 1905–1917.
10. Cookson W. O. C. Asthma Genetics // Chest. 2002. Vol. 121. P. 7–13.
11. Toshiyuki S. MDR1 Genotype-related Pharmacokinetics: Fact or Fiction? // Drug Metab. Pharmacokinet. 2005. Vol. 20. № 6. P. 391–414.

УДК 616.7

АЛЕКСЕЙ ОЛЕГОВИЧ ЮРЬЯН

ассистент курса травматологии, ортопедии и ВПХ кафедры общей и факультетской хирургии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет
yuryan1@rambler.ru

РУДОЛЬФ ИОНТЕЛЕВИЧ МЕЛЬЦЕР

доктор медицинских наук, профессор, заведующий курсом травматологии, ортопедии и ВПХ кафедры общей и факультетской хирургии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет
surgery@karelia.ru

ОСОБЕННОСТИ ЛЕЧЕНИЯ ЧРЕЗВЕРТЕЛЬНЫХ ПЕРЕЛОМОВ БЕДРЕННОЙ КОСТИ У ПАЦИЕНТОВ СТАРШИХ ВОЗРАСТНЫХ ГРУПП

В статье рассмотрены биомеханические аспекты взаимовлияния структуры и функции вертельной части при переломах проксимального отдела бедренной кости. По результатам решения модельных задач с использованием методов биомеханики сделан вывод о необходимости восстановления и фиксации малого вертела в анатомически правильном положении.

Ключевые слова: биомеханика, чрезвертельные переломы, стабильность остеосинтеза, математическое моделирование

Одной из закономерностей современной демографии во многих развитых странах является прогрессирующая тенденция к увеличению доли людей старших возрастных групп в общей численности населения. В этой связи становится еще более понятной необходимость исследования и учета особенностей оказания помощи лицам преклонного возраста. Гендерные характеристики и наличие сенильного остеопороза определяют существенное возрастание вероятности перелома с увеличением возраста. Одной из возрастных стигм являются переломы проксимального метаэпифиза бедренной кости, проблема улучшения результатов лечения которых весьма актуальна [2], [3]. Решение данной многоплановой проблемы требует проведения исследований, выполняемых как специалистами в области традиционной травматологии, так и на стыке с другими областями современной науки, прежде всего с использованием современных возможностей новых информационных технологий, биомеханики, физики. Целью таких исследований является совершенствование методик лечения переломов и их внедрение в клиническую практику.

Устойчивая тенденция к увеличению числа людей пожилого и старческого возраста придает организации лечения переломов вертельной области бедра все большее медико-социальное значение. Средний возраст больных с повреждениями данной локализации составляет 74,0–81,5 года. Это делает вполне понятным тот факт, что, по данным ряда авторов, от 71,0 до 83,2 % пациентов с переломами вертельной области бедра составляют женщины. Переломы проксимального отдела бедренной кости у больных преклонного

возраста относятся, как известно, к тяжелым повреждениям опорно-двигательного аппарата и составляют от 3,7 до 17,0 % всех переломов костей скелета, а по данным эпидемиологических исследований, встречаются с частотой от 35,3 до 105,9 на 100 тыс. населения. Больше половины травм данной локализации приходится на долю вертельных переломов, нестабильные варианты которых составляют от 55,0 до 84,0 % и являются наиболее сложными для лечения [5], [6].

В литературе отмечается высокая летальность в группе больных с переломами вертельной области бедренной кости, основными причинами которой становятся пролежни, гипостатическая пневмония, тромбоэмболии и обострение хронических заболеваний. При консервативном лечении летальность в группе больных пожилого возраста еще четверть века назад составляла от 30,7 до 68,0 %, а среди пациентов старше 80 лет этот показатель достигал 97,5 %. В последние десятилетия принципиальным стал тактический подход, согласно которому общепризнанным методом выбора стало оперативное лечение подобных переломов. Это позволило существенно столь необходимую в данном возрасте раннюю активизацию больных и привело к снижению показателей летальности до 3,3–26,0 % [10], [11]. Более высокая летальность регистрируется в группе нестабильных чрезвертельных переломов, что адекватно объясняется техническими трудностями оперативной фиксации и обеспечения стабильности остеосинтеза.

В настоящей статье рассматриваются особенности оперативного лечения чрезвертельных переломов бедренной кости у пациентов старших возрастных групп и сравнивается эффек-

тивность применения различных остеофиксаторов. Как известно, основной целью операции в подобных обстоятельствах является обеспечение стабильного скрепления отломков травмированной кости в анатомически правильном положении при неизбежных воздействиях, сопровождающих повседневные движения пациента в послеоперационный период.

Достижение стабильности послеоперационной системы «кость – фиксатор» без достаточного восстановления опорной архитектуры проксимального метаэпифиза бедра, то есть только за счет дальнейшего конструктивного совершенствования остеофиксаторов или их укрупнения, уже не может в современных условиях считаться достаточным. Еще в 1951 году Е. М. Эванс выявил основную причину нестабильности вертельных переломов [8]. Согласно данной теории, стабильные переломы более благоприятны в прогностическом плане, поскольку при сопоставлении коркового слоя кости воссоздается взаимоопорность отломков, позволяющая обеспечить стабильность остеосинтеза. При хорошей репозиции и фиксации прорастающие сосуды не разрушаются из-за постоянной избыточной подвижности отломков, что способствует своевременному формированию костной мозоли. При нестабильных переломах аналогичные условия создать очень сложно, что заставляет предъявлять более высокие требования к конструкции фиксатора или прибегать к реконструктивным операциям, в разряд которых, очевидно, следует отнести и вмешательства, когда восстанавливается и жестко фиксируется опорная архитектура шеечно-диафизарного угла.

При лечении указанных переломов в нашей стране в 1960–70-е годы широкое применение получил фиксатор Я. П. Бакычарова, представляющий собой целостную конструкцию из V-образной внутришеечной части и диафизарной накладки. Однако частые переломы фиксатора и недостаточная стабильность подобного остеосинтеза уже давно и значительно сократили диапазон использования данной конструкции.

К недостаткам альтернативных способов фиксации, в частности остеосинтеза с помощью динамического бедренного винта, можно отнести отсутствие достаточной ротационной устойчивости, что заставляет травматологов вводить дополнительные внутришеечные детали, травмирующие спонгиозу проксимального отломка, к тому же в условиях остеопороза или характерной для нестабильных переломов оскольчатости далеко не всегда достигается та степень стабилизации перелома, которая позволяла бы производить раннюю активизацию пациентов.

Применение проксимального бедренного винта и гамма-гвоздя в случае вертельно-подвертельных и стабильных чрезвертельных переломов, бесспорно, обеспечивает устойчивый остеосинтез. Однако при наличии нестабильных переломов и в условиях выраженного ос-

теопороза внутришеечный элемент зачастую «прорезает» головку и вступает своим концом в контакт с вертлужной впадиной, что ведет к появлению дополнительного расклинивающего воздействия на сформированную систему «кость – фиксатор». Кроме того, высокая травматичность как установки, так и удаления фиксатора резко сокращает показания к его применению.

Под влиянием разнонаправленных нагрузок (мышечная тяга, вес тела) в месте соприкосновения фиксатора с костью возникает ее постепенная деструкция, приводящая к дестабилизации системы «кость – фиксатор» (рис. 1).

К сожалению, ни одна из конструкций не учитывает дестабилизирующего эффекта оскольчатых переломов вертельной области. При этом следует ожидать возникновения избыточной деформации напряжения в местах максимального опорного контакта элементов конструкции и костной ткани. Это, в свою очередь, приводит к мысли о необходимости восстановления костной структуры с использованием дополнительных опорных точек в системе «кость – фиксатор».

С целью объективизации сравнительного эффекта остеофиксации и последующего улучшения результатов оказания помощи при переломах вертельной области бедренной кости у больных преклонного возраста нами был проведен методом конечных элементов биомеханический анализ причин и степени дестабилизации при различных вариантах переломов вертельной зоны бедра, а также дана оценка стабильности моделей «кость – фиксатор», обеспечиваемых различными конструкциями.

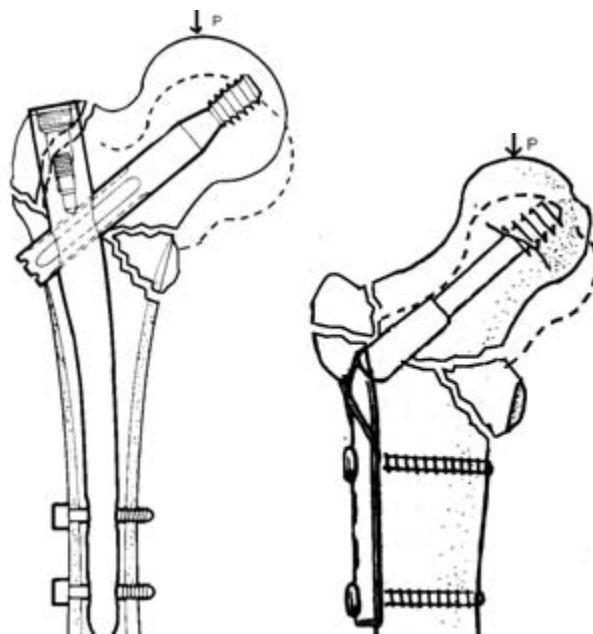


Рис. 1. Остеосинтез нестабильных переломов динамическим бедренным винтом и гамма-гвоздем (пунктиром отмечено типичное послеоперационное смещение отломков)

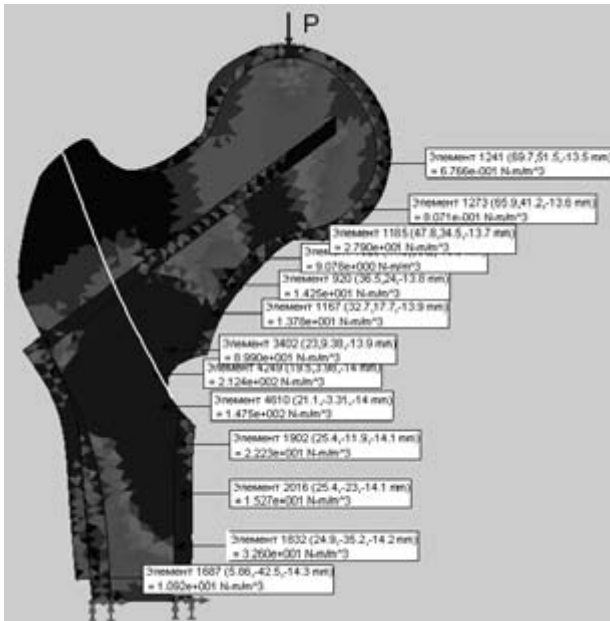


Рис. 2. Распределение плотности потенциальной энергии деформации для модели с отколом малого вертела

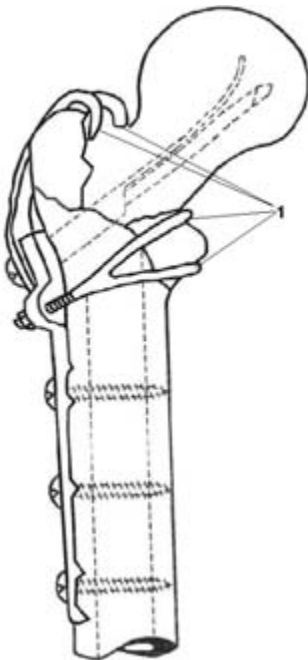


Рис. 3. Фиксатор для остеосинтеза нестабильных переломов вертельной области бедренной кости: 1 – дополнительные точки фиксации отломков

Для анализа, например, степени влияния на стабильность проксимального отдела бедренной кости при отрывных переломах малого вертела нами использовалась биомеханическая модель, построенная с применением метода конечных элементов. Такой подход часто используется в настоящее время, так как позволяет при относительно небольших затратах получить достаточно полные данные об объектах, исследуемых методами биомеханики [1], [6].

Расчеты были выполнены в учебно-методическом комплексе систем автоматизированного проектирования Петрозаводского госуниверситета с использованием лицензированной программы ЛИРА-9.4 [5]. Исследование показало, что в области наиболее прочного участка кости – дуги Адамса – значения потенциальной энергии деформации снижаются, а нагрузка на область дефекта, сформировавшегося после откола и смещения малого вертела, значительно возрастает (в 13 раз) (рис. 2). По результатам решения модельных задач с использованием методов биомеханики сделан вывод о необходимости восстановления и фиксации малого вертела в анатомически правильном положении путем применения более совершенных фиксирующих устройств.

За период с 2001 по 2008 год было проведено обследование, консервативное и оперативное лечение 261 пациента преклонного возраста, получившего различные переломы вертельной области бедренной кости (203 (77,8 %) женщины и 58 (22,2 %) мужчин). Средний возраст больных составил 75,5 года.

В ходе исследования пострадавшие с нестабильным типом вертельных переломов были разделены на две группы: основную и контрольную. Сформированные группы не имели существенных различий по полу, возрасту и тяжести сопутствующей патологии. В контрольную группу (84 пациента) были объединены больные, которым устанавливались наиболее распространенные конструкции без дифференцировки в зависимости от оценки типа перелома по принципу стабильности, что имело место на начальном этапе данного исследования. В основной группе (47 пациентов) в зависимости от вида повреждения использовались разработанные во время исследования средства остеосинтеза с дополнительной фиксацией малого и/или большого вертелов (удостоверение на рационализаторское предложение № 1093 от 22.03.01, ПетрГУ; патент РФ на полезную модель № 63212. Приоритет от 06.04.2006) (рис. 3).

Базовой конструкцией явилась оригинальная разработка А. Сеппо [7], которая уже использовалась в отделении более 20 лет для лечения переломов шейки бедра. Ее существенной особенностью является пространственное «рогаткообразное» распределение двух внутрикостных элементов и их минимальное травмирующее воздействие на губчатое вещество головки и шейки бедра. В ходе практической работы с целью адаптации данной криволинейной трехплечной конструкции к остеосинтезу вертельных переломов она была трансформирована и дополнена необходимыми деталями, повышающими стабилизирующий эффект именно переломов вертельной части бедра за счет воссоздания взаимопорности отломков и появления дополнительных точек фиксации в послеоперационных системах «кость – фиксатор». Кроме того, в разные годы применялись имевшие тогда наи-

большее распространение фиксаторы: конструкция Бакычарова, угловая пластина и динамический бедренный винт.

Отдаленные результаты изучены у 185 (70,8 %) больных в сроки от 1 года до 4 лет с момента госпитализации. При анализе лечения нестабильных переломов в контрольной группе, где еще не производилась дифференцировка выбора конструкции в зависимости от типа перелома, выявлено 28,8 % неудовлетворительных результатов, 39,0 % удовлетворительных, лишь 23,7 % хороших и 8,5 % отличных. В основной же группе благодаря применению дополнительных деталей для фиксации костных фрагментов при оскольчатых переломах хорошие и отличные результаты были получены у 66,7 % пациентов, удовлетворительных было 30,3 %, а неудовлетворительные – только у 3,0 % оперированных больных.

Оценка результатов лечения переломов вертельной области, производившаяся с помощью шкалы Харриса, подтвердила наличие прямой зависимости исходов не только характера от повреждения метаэпифиза бедра и степени последующей дестабилизации, в свою очередь достаточно тесно связанной с возрастными изменениями костной ткани. Существенное значение имели конструктивные особенности остеосинтеза и их адаптация к условиям оскольчатого повреждения.

Среди общих осложнений наиболее часто встречались пролежни (8,6 %), появление которых обычно связано с замедленной активизацией больных старческого возраста после травмы. К сожалению, обстоятельства, не всегда благоприятно складывающиеся в послеоперационный период, в 7 % наблюдений вызвали удлинение срока постельного режима до 10–12 дней.

Среди местных осложнений при использовании конструкций с недостаточным количеством опорных точек превалировало послеоперационное смещение отломков (16,2 %), связанное с нестабильностью выполненного остеосинтеза. Следует отметить, что в группе оперированных больных с дополнительной фиксацией большого и малого вертелов в результате повышения стабильности остеосинтеза послеоперационное смещение отломков и внекостная миграция элементов фиксаторов наблюдались в 2,5 раза реже. Заметное снижение процента деструкции фиксаторов в основной группе может быть объяснено более рациональным распределением деформирующих нагрузок.

Таким образом, данные клинического анализа, а также результаты биомеханического моделирования позволяют считать, что созданные в ходе данной работы варианты фиксатора для остеосинтеза нестабильных вертельных переломов с дополнительными деталями для фиксации большого и малого вертелов в положении, реконструирующем опорную анатомию шеечно-диафизарного угла, клинически наиболее эффективны, так как значительно повышают прочность остеосинтеза и способствуют более быстрому восстановлению двигательной активности пациента.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи искренне благодарят заведующего кафедрой механики ПетрГУ, доктора технических наук, профессора Г. Н. Колесникова и кандидата технических наук П. П. Назарьева за большую помощь в осуществлении этого раздела работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулич Ю. В., Акулич А. Ю., Денисов А. С. Адаптационные изменения свойств костной ткани фрагментов кости после остеосинтеза шейки бедра жесткими и упругими резьбовыми фиксаторами // Биомеханика-2008. IX Всероссийская конференция по биомеханике: Тез. докл. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2008. С. 149–150.
2. Анкин Л. Н., Левицкий В. Б. Принципы стабильно-функционального остеосинтеза. Киев, 1991. 142 с.
3. Гильфанов С. И. Лечение переломов проксимального отдела бедра: Автореф. дис. ... д-ра мед. наук. М., 2010. 32 с.
4. Котельников Г. П., Безруков А. Е., Нагота А. Г. Новое в хирургическом лечении переломов вертельной области у лиц пожилого и старческого возраста // Вестник травматологии и ортопедии им. Н. Н. Приорова. 2000. № 4. С. 13–17.
5. Мельцер Р. И., Назарьев П. П., Юрьян А. О. Количественный анализ причин нестабильности вертельных переломов с применением метода конечных элементов // Биомеханика-2008. IX Всероссийская конференция по биомеханике: Тез. докл. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2008. С. 127–129.
6. Мителева З. М., Олиниченко Г. Д., Полетаева Н. Ю. Биомеханическое обоснование туннелизации шейки бедренной кости при асептическом некрозе // Биомеханика-2008. IX Всероссийская конференция по биомеханике: Тез. докл. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2008. С. 208–209.
7. Сеппо А. И. Металлосинтез переломов костей на основе точных клинко-технических наук. Таллин: Периодика, 1978. 80 с.
8. Evans E. M. The treatment of trochanteric fractures of the femur // J. Bone Joint Surg. 1951. Vol. 31. P. 190–203.
9. Fogagnolo F., Kfuri M. Jr., Paccola C. A. Intramedullary fixation of petrochanteric hip fractures with the short AO-ASIF proximal femoral nail // Arch. Orthop. Trauma Surg. 2004. № 124. P. 31–37.
10. Gebhard F., Becker C., Hoellen I., Kinzl L. Therapy of para-articular hip fractures in the elderly // Z. Orthop. Ihre Grenzgeb. 1999. № 137(6). P. 492–495.
11. Pavelka T., Kortus J., Linhart M. Osteosynthesis of proximal femoral fractures using short proximal femoral nails // Acta Chir. Orthop. Traumatol. Cech. 2003. № 70(1). P. 31–38.

УДК 630*238

АНАТОЛИЙ ПЕТРОВИЧ ЦАРЕВ

доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры
лесного хозяйства лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет
tsarev@psu.karelia.ru

МИРОВОЙ ОПЫТ ПЛАНТАЦИОННОГО ЛЕСОВЫРАЩИВАНИЯ

В статье приводится обзор состояния проблемы создания лесных плантаций в нашей стране и за рубежом. Анализируются достоинства и недостатки плантационного лесовыращивания. Приведены результаты, полученные за рубежом и в России при выращивании хвойных и лиственных пород. Показано, что создание лесных плантаций является одним из перспективных путей покрытия дефицита древесины.

Ключевые слова: плантационное лесовыращивание, сырьевые базы, быстрорастущие породы, хвойные, тополя, ивы

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Потребление древесины в мире имеет тенденцию к увеличению. В начале 1950-х годов оно составляло около 1,6 млрд м³, в 1980 году – 2,5 млрд м³, в 1985-м – 3,0 млрд м³, в 2000-м – 3,34 млрд м³, в 2010 году ожидается около 3,5–3,8 млрд м³ [14], [18], [19], [31]. Возможности же удовлетворения возрастающих потребностей в древесине существенно уменьшаются по разным причинам. Покрытая лесом площадь в мире составляет около 3,87 млрд га с общим запасом древесины 386,4 млрд м³ и средним запасом около 100 м³/га [31]. К сожалению, мы не располагаем данными о ежегодном среднем приросте древесины в лесах всего мира. Его можно вычислить только примерно, исходя из среднего запаса в 100 м³/га и предположения, что средний возраст лесов мира составляет около 50 лет, а средний прирост – около 2 м³/га/год. В этом случае с учетом вышеприведенных статистических данных теоретически годовой прирост может составить около 7,7 млрд м³/год.

Однако значительная часть покрытых лесом площадей (до 35–40 % и более) является малопродуктивной или экономически недоступной. Так, в России площадь возможных для эксплуатации лесов составляет 330 млн га [7], или только 45 %, а 55 % лесопокрытых площадей являются экономически недоступными. Если принять, что во всем мире экономически недоступной является только треть лесов, то получается, что среднегодовой прирост древесины на экономически доступных лесопокрытых площадях составляет около 5,2 млрд м³/год.

Во многих странах наблюдается тенденция сохранения лесов для рекреационного и других видов их прижизненного использования, поэтому возможности полного использования доступного годового прироста древесины уменьшаются. Кроме того, в мире в течение 2005–2010 годов площадь покрытых лесом площадей, несмотря на

создаваемые лесные культуры, ежегодно уменьшалась на 5 млн га [27], что тоже существенно уменьшает запасы доступной древесины.

Статистика по запасам и размерам расчетной лесосеки, к сожалению, не всегда реальна как у нас, так и за рубежом. Так, И. В. Шутов отмечает, что данные государственного доклада по России на 2003 год, в котором расчетная лесосека по главному пользованию представлена в 550 млн м³ в год, многократно завышены [16]. Таким образом, может оказаться, что возможный размер расчетной годичной лесосеки мира в 5 млрд м³ еще и слишком оптимистичен. То есть мир подходит к порогу, когда потребность в древесине будет значительно перекрывать годичный прирост в естественных лесах. В связи с этим для покрытия дефицита потребуются более масштабное создание искусственных насаждений. Для уменьшения издержек будут применяться новые технологии и подходы, которые характерны для так называемых плантационных насаждений.

Уже к концу прошлого и в начале настоящего века доля заготовки древесины в плантационных лесах составляла около 1/3 для круглого леса, используемого в промышленности, и 10 % для древесины, используемой в отоплении. При этом доля плантационных насаждений составляла менее чем 3 % от всей лесопокрытой площади мира [18].

Что же такое плантационные насаждения, которым предстоит сыграть важную роль в восполнении дефицита древесины?

Слово «плантация» этимологически происходит от англ. «plantation». Всякие искусственные посадки лесных древесных растений за рубежом называются «лесными плантациями». У нас же искусственные насаждения подразделяют на «лесные культуры» (термин, отсутствующий в англоязычной литературе) и «лесные плантации». Лесные культуры – это обычные искусственные насаждения, которые у нас создаются в последние 150–200 лет. Словом «лесные плантации» обозначают нечто более прогрессивное, чем

обычные лесные культуры. В последние годы, учитывая, очевидно, что лесные плантации и лесные культуры во многих случаях при статистических учетах не разделяются, отчего нет возможности получить достоверные сведения, ФАО предложила термин «semi-natural forests» (полуестественные леса) [21]. Он близок к нашему пониманию термина «лесные культуры», то есть речь идет о таких искусственных насаждениях, которые как бы копируют естественные леса (по составу пород, густоте и другим показателям).

Учитывая трудности разделения плантационных и полустественных лесных насаждений при статистических исследованиях, ряд авторов [21], [24], [26] оперируют понятием «посаженные» («посеянные») леса, которых в мире к 2010 году создано около 264 млн га [27]. Эти данные включают и площади искусственных насаждений в странах бывшего СССР и России. К сожалению, некоторые исследования внушают сомнения в достоверности этих официальных статистических показателей.

Так, главный инженер Вологодского лесостроительного предприятия Е. Г. Тюрин, проанализировав состав пород многих тысяч выделов, установил, что на месте искусственных хвойных насаждений повсеместно произрастают древостои с подавляющим преобладанием мелколиственных пород [16]. Это объясняется отсутствием ухода за лесными культурами после их посадки. Такую же удручающую картину состояния искусственных насаждений в настоящее время показал начальник Управления воспроизводства лесов и учета лесного фонда Федерального агентства лесного хозяйства Н. Н. Кашпор, который установил отсутствие лесных культур там, где они, согласно официальным отчетам, были созданы [16]. То есть большинство наших лесных культур были созданы лишь на бумаге. Поэтому для объективного анализа следует получить более точные статистические данные.

В настоящей работе речь идет не обо всех искусственных насаждениях, а только о сугубо плантационных, создание которых направлено на решение определенных задач.

Существует множество определений лесных плантационных насаждений. Википедия (<http://ru.wikipedia.org>) приводит следующее определение: «Лесная плантация – участок лесных земель, на которых выращивают древесные и кустарниковые породы для получения ценных сортов древесины». Оно не совсем точно, но дает представление о предмете. В статье 42 Лесного кодекса РФ говорится о создании и эксплуатации лесных плантаций, однако определения этого понятия не приводится. В комментариях к Лесному кодексу имеется отсылка к Лесной энциклопедии 1985 года: «Плантации лесных пород создаются для получения древесины с целью ее дальнейшей механической и химической переработки, в том числе для целлюлозно-бумажной промышленности» [6].

ФАО предложено следующее определение лесных плантаций для умеренного и бореального климата: «Плантационные насаждения – это лесные насаждения, созданные посадкой и (или) посевом в процессе облесения или лесовозобновления. Они могут быть созданы: интродуцированными видами (для всех насаждений) или аутохтонными видами (для *интенсивно* управляемых насаждений) и должны отвечать следующим критериям: один или два вида в насаждении, одного класса возраста, регулярное размещение растений» [18].

Интенсивное управление подразумевает выбор условий местопроизрастания в соответствии с биологией культивируемой лесной породы, подбор ее улучшенных генетико-селекционных форм, применение соответствующей агротехники создания насаждения, регулярные уходы за почвой и растениями, защиту от болезней и вредителей и др. Поэтому большинство лесных культур, созданных в нашей стране, к сожалению, не могут называться плантациями.

Но и не все «*plantations*», упоминаемые в западной литературе, подходят к данному определению. Несмотря на то что статистика ФАО показывала, что в мире к 2000 году создано 187 млн га лесных «*plantations*» [22], [31], ABARE and Jaakko Pöyry [18] для «настоящих» плантационных насаждений называют цифру в 115,9 млн га (табл. 1). Возможно, что эти данные также имеют определенные погрешности, однако, пока не получены более точные цифры, приходится пользоваться существующей информацией.

Главное, что необходимо учитывать, когда мы говорим о плантационных насаждениях, что это не любые искусственно созданные насаждения, а именно интенсивного типа определенной целевой направленности. Таких в нашей стране совсем немного, хотя исследования в данном направлении ведутся уже много лет [4], [8], [12], [15] и др.

ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ПЛАНТАЦИОННОГО ЛЕСОВЫРАЩИВАНИЯ

Основное достоинство плантационных насаждений – это их продуктивность. Она зависит от условий местопроизрастания, вида, селекционной ценности репродуктивного материала, агротехники выращивания и др. В целом варьирование приростов на лесных плантациях мира колеблется от 7 до 30 м³/га/год. При этом стоимость затрат на выращивание без учета стоимости земли может варьировать от 1500 до 2500 долларов США на один гектар хвойных и от 1800 до 4200 долларов США – лиственных плантаций [18].

Большая стоимость лиственных плантаций компенсируется их более высокой продуктивностью. Так, в самых благоприятных условиях для плантационного лесоводства Океании ежегодный прирост для самых перспективных в этой зоне

хвойных видов (*Pinus radiata* и *Pinus caribaea*) колеблется от 12 до 26 м³/га. В тех же условиях приросты лиственных растений (*Eucalyptus globulus* и *Acacia mangium*) колеблются от 15 до 38 м³/га/год для эвкалипта и от 20 до 60 м³/га/год для акации. В Северной и Центральной Америке хвойные (различные виды сосны, ели и лжетсуги) дают приросты 2–12 м³/га/год. В Европе, включая Россию, приросты разных видов ели и сосны обыкновенной колеблются от 1 до 8 м³/га/год. В то же время тополевые и ивовые плантационные насаждения показывают приросты до 7–20 и даже 35 и более м³/га/год [18], [34], [35].

В мировой практике достоинства и недостатки тех или иных методов, изобретений, технологий, разработок, приемов, предложений и т. п. принято оценивать с точки зрения экологии, экономики, социальных, этических и других эффектов [18], [25]. Некоторые из этих подходов при оценке плантационного лесовыращивания представлены ниже.

1. Воздействие плантационного лесовыращивания на окружающую среду

Достоинства:

- Вовлечение неиспользуемых в сельском и лесном хозяйствах земель и территорий.
- Мелиорация деградированных почвенно-экологических условий среды.
- Защита окружающей среды: предотвращение эрозии почв, закрепление склонов, предотвращение роста оврагов, регулирование уровня грунтовых вод, осветление сточных вод, защита от ветра, песчаных бурь и др.
- Создание насаждений комплексного назначения как для защиты окружающей среды, так и для производства древесины и недревесных ресурсов.
- Связывание избыточного содержания углекислого газа в атмосфере.
- Снижение давления на природные леса при лесозаготовках.

Недостатки:

- Упрощение и разрушение сложившихся экосистем.
- Снижение уровня природного биоразнообразия.
- Нарушение почв при предпосадочной подготовке, особенно на склонах, может привести к их эрозии.
- Истощение почв при многолетнем интенсивном лесовыращивании.
- Снижение уровня грунтовых вод.
- Увеличение риска появления новых болезней и вредителей, принесенных с интродуцированными видами.
- Загрязнение окружающей среды применяемыми при плантационном лесовыращивании удобрениями и инсектицидами.
- Гибридизация интродуцированных растений с местными может привести к потере уникальных адаптивных способностей аутохтонных видов.

2. Экономические оценки плантационного лесовыращивания

Достоинства:

- Интенсификация ростовых процессов путем оптимального сочетания лучших культиваров древесных пород и условий местопроизрастания, а также внесения удобрений и полива.
- Однородные насаждения по составу, возрасту и размещению позволяют применить механизацию большинства процессов выращивания и рубки.
- Повышение приростов, удешевление затрат на выращивание и рубки в пересчете на 1 м³ древесины.
- Возможность предварительного планирования и создания плантаций разного целевого назначения за счет различного размещения растений (фанерный краж, пиловочник, бревна, балансы, топливная древесина, энергетические, короткоротационные, многоцелевые плантации и др.).
- Экономия на транспортных издержках при размещении плантационных насаждений вблизи крупных лесоперерабатывающих предприятий.

Недостатки:

- Зависимость успеха от многих факторов (стоимости рабочей силы, возможности получения площадей для создания плантаций, почвенно-климатических, политических и экономических условий в государстве, развитости инфраструктуры, наличия специальных машин и механизмов и др.).
- Риски, связанные с длительным сроком выращивания (вероятностный характер окупаемости вложенных средств, риск форс-мажорных явлений природного и политического характера).
- Сложности управления многолетними процессами производства, когда начинают одни люди в одних условиях и с соответствующими потребностями производства, а заканчивают другие в других условиях и с другими потребностями.
- Необходимость увязывания процессов выращивания древесины с процессами ее переработки, логистики, условиями и потребностями рынка.

3. Социальная значимость плантационного лесовыращивания

Достоинства:

- Плантации могут повышать рациональность затрат, обеспечивая высокий уровень занятости на единицу инвестиций.
- Они повышают мотивацию развития инфраструктуры: дороги, связь, бытовое обслуживание, жилье, магазины, школы и т. п., нередко в очень отдаленных районах.
- Они также способствуют развитию рекреации и других социальных удобств.
- Облесение территорий может повышать продуктивность животноводства, увеличивать

численность сельского населения, обеспечивать наполняемость школ, развитие медицинского обслуживания и спроса на жилье.

Недостатки:

- Уменьшение доступа в леса для местного населения.
- Ограничение прав по использованию земель для традиционного использования.
- Уменьшение местного контроля за рациональным использованием земель и лесов.
- Вытеснение сельских общин, потеря дохода и средств к существованию, эстетическая деградация.

Обзор соответствующей информации и отдельные исследования показывают, что потери при бездумном создании плантаций могут быть весьма значительными. К неудаче могут привести следующие моменты:

- отсутствие постоянного наблюдения и ухода за плантациями;
- недостаток знаний о росте и продуктивности тех или иных видов древесных растений и особенностей создания их плантаций;
- крупномасштабные работы по созданию плантаций часто базируются на частичных результатах небольших экспериментов;
- виды, формы, сорта, гибриды и клоны, отобранные для создания промышленных плантаций, часто не подходят к климатическим или эдафическим условиям произрастания в конкретном регионе;
- недостаточно квалифицированное планирование ведет к минимальным или полностью отсутствующим возможностям реализации полученной продукции;
- зачастую расчетная продуктивность плантаций переоценена, а производственные затраты – недооценены.

Несерьезное отношение к различным аспектам, отраженным в этих положениях, ведет к значительным потерям затраченных сил и средств. Чтобы избежать плачевных последствий при создании сырьевых баз на плантационной основе, необходимо тщательно взвешивать все «за» и «против», и избегать появления перечисленных выше и, возможно, других недостатков.

МИРОВОЙ ОПЫТ СОЗДАНИЯ ПЛАНТАЦИОННЫХ НАСАЖДЕНИЙ

Краткие данные по общим объемам и некоторым характеристикам плантационных насаждений в отдельных регионах мира представлены в табл. 1. Более поздние данные приводятся по всем искусственно созданным насаждениям [21], [24], [26], [27].

Из представленных в табл. 1 данных видно, что общая площадь эффективных плантационных насаждений к концу XX века составляла около 94 млн га, или 81 % от общей площади промышленных плантаций. Это связано с тем, что некоторые плантации малоэффективны из-за

низкой продуктивности площадей, плохой организации работ и неправильного выбора видового и сортового состава насаждений.

Большая часть плантаций была расположена в Европе и Азии (66,6 %). Далее по убыванию шли Северная и Центральная Америка (20,9 %), Южная Америка (6,7 %), Африка (3,4 %) и Океания (2,4 %).

Соотношение между частным и общественным характером лесовладений значительно колебалось в разных регионах. Так, частный характер владения плантационными лесами был четко выражен в Южной Америке и Океании (67–69 %), примерно равные доли плантаций находились в общественном и частном владении в Европе, и небольшое уменьшение частного лесовладения имело место в Северной и Центральной Америке (40 %). Следует отметить, что эти данные приблизительные, так как по многим странам сведения о плантационных насаждениях не были представлены или были представлены не совсем точно.

При создании плантаций в большинстве регионов отдается предпочтение хвойным породам: их площади примерно в 2,5 раза превышают площади лиственных пород. Однако в разных регионах это соотношение разное. Можно отметить абсолютное преобладание хвойных в Северной и Центральной Америке, Океании и Европе, примерно равное представительство хвойных и лиственных в Африке и Южной Америке и преобладание лиственных пород более чем в 2 раза в Азии.

Таблица 1

Краткая характеристика промышленных плантаций по регионам мира*

Континенты и регионы	Общая площадь, млн га	Эффективная площадь, млн га / %	Соотношение хвойных и лиственных пород	Соотношение общественно-го и частного лесовладений
Африка	3,9	1,4 / 36	50:50	н. д.**
Азия	30,1	11,2 / 37	31:69	н. д.
Европа и территория бывшего СССР	47,1	47,1 / 100	88:12	50:50
Океания	2,8	2,5 / 89	90:10	33:67
Северная и Центральная Америка	24,2	24,2 / 100	98:2	60:40
Южная Америка	7,8	7,5 / 96	53:47	31:69
Сумма	115,9	93,9 / 81	71:29	н. д.

* По данным ФАО [18].

** Нет данных.

На территориях умеренного пояса наибольшую перспективу для создания плантационных насаждений из лиственных древесных растений имеют тополь и ива. Они могут использоваться в качестве сырья для целлюлозно-бумажной промышленности, шпона и фанеры, древесностружечных и древесноволокнистых плит, производства мебели, упаковочных материалов, белковых субстратов, таннидов, биоэнергии и др.

Значение тополей и ив для создания целевых промышленных насаждений отмечалось неоднократно в течение всего XX века [1], [3], [5], [10], [11], [17], [32]. При ФАО ООН в 1947 году была создана специальная Международная тополевая комиссия (МТК), выпустившая за первые 30 лет своего существования 2 крупные обобщающие коллективные монографии, в которых отражены основные достижения в разведении тополей и ив [28], [29]. В 2003 году в Риме под эгидой ФАО прошла Первая международная конференция по будущему культуры тополей [23]. На ней отмечалось большое значение быстрорастущих пород, тополей и ив, для плантационного лесовыращивания. Две последующие сессии МТК ФАО в Сантьяго [33] и в Пекине [30] подтвердили перспективность данной установки.

Последние статистические данные по распространению и использованию этих пород были представлены на 23-й Сессии МТК в Пекине в 2008 году [20]. К этому времени общая площадь насаждений тополей и ив в мире оценивалась в 79,1 млн га. Большая часть этих насаждений – естественные леса, но значительную долю (около 7 %) составляют плантационные насаждения (5,3 млн га для тополей и 133,4 тыс. га для ив). Общее производство древесины на этих плантациях составляло 83,637 млн м³.

В среднем плантации тополей и ив в мире имеют ежегодные приросты более 15 м³/га, что значительно больше, чем у многих других пород. Кроме того, насаждения тополей и ив выполняют множество других полезных функций: защита почв, вод, сельскохозяйственных посевов, дорог и т. п., пастьба скота, выращивание птицы, получение кормового сырья и другие агролесоводственные аспекты, применение в рекультивации, мелиорации, озеленении и др. Все это привлекает к ним огромное внимание во всем мире, особенно в таких странах, как Италия, Китай, Турция, Швеция, Канада, США, Чили, Аргентина, Испания, Франция, Румыния и др.

Так, тополевых плантаций в Китае создано 4,3 млн га, во Франции – 236 тыс. га, в Турции – 125 тыс. га, в Италии – 118,5 тыс. га, в Германии – 100 тыс. га, в Испании – 98,5 тыс. га. В Китае создано 43,2 тыс. га ивовых плантаций, в Аргентине – 39 тыс. га, в Румынии – 20, 4 тыс. га, в Швеции – 15 тыс. га.

Из общего количества древесины, получаемой на плантациях, около 60 % идет на изготовление фанеры и шпона, 21,7 % – на изготовление

панелей, 11,7 % – на производство целлюлозы, бумаги и картона, 5,6 % используется для получения пиловочника. Очень небольшая доля (около 1 %) идет на получение топливной древесины и биомассы для производства энергии.

Таким образом, плантации во всем мире становятся существенным фактором покрытия нарастающего дефицита древесины, при этом в регионах с умеренным климатом наиболее перспективными являются тополевые плантации.

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ СОЗДАНИЯ ПЛАНТАЦИОННЫХ НАСАЖДЕНИЙ

О необходимости создания плантационных насаждений в нашей стране говорилось в период всей второй половины XX века и даже ранее, проводились соответствующие исследования. В 1980-х годах была даже принята целевая комплексная программа «Создание в европейско-уральской зоне СССР постоянной лесосырьевой базы на основе плантационного способа воспроизводства лесных ресурсов». В соответствии с этой программой предусматривалось создание плантационных насаждений в течение нескольких десятилетий (до 2030 года) по 35 тыс. га в год [6], [16].

Фактические результаты оказались намного скромнее. Так, по данным М. Д. Гиряева (2003), за 20-летний период в 13 субъектах РФ было заложено 36 тыс. га плантационных культур хвойных пород [4]. По отношению к размерам покрытой лесом площади (776,1 млн га [7]) доля плантационных насаждений страны составляет ничтожную величину (около 0,005 %). При этом неизвестно, какая часть из упомянутых насаждений отвечает требованиям, предъявляемым к плантациям. Такое положение сложилось несмотря на то, что в течение последних 30–40 лет о значении и необходимости создания плантационных насаждений было сказано едва ли не больше, чем о любой другой лесной проблеме. Однако, несмотря на все преимущества плантационных насаждений для создания, скажем, сырьевых баз для ЦБП, когда средние ежегодные приросты в таежных условиях у хвойных пород могут превышать 8 м³/га [2], [8], [9], [15], [16], дело продвигается чрезвычайно медленно и пока в основном в пределах научных исследований на экспериментальных насаждениях.

Примерно такое же положение характерно и для насаждений из быстрорастущих лиственных древесных пород (тополей и ив). Потенциал этих пород огромный не только по исследованиям и практике за рубежом, но и в природных условиях России. Наши исследования на специально заложенных экспериментальных объектах показали, что продуктивность тополей к возрасту технической спелости (примерно 25 лет в условиях Центрально-Черноземного региона) может достигать огромных размеров и превышать контрольные образцы в несколько раз [13] (табл. 2).

Таблица 2

Характеристика продуктивности перспективных для ЦЧР клонов и сортов тополей в 25-летнем возрасте (Семилюкский популетум Воронежской области, почва – типичный чернозем, размещение растений 5 х 4 м, по каждому клону высажено 24 растения)

Наименование тополя	Инв. №	Сохранность, %	Высота, м	Диаметр, см	Объем ствола, м ³	Запас древесины, м ³ /га	Приросты, м ³ /га в год	
							средний	текущий
Пионер	42	50	33,6	40,5	1,64	410	16,4	25,0
Брабантика-175	158	63	31,5	41,5	1,63	512	20,5	32,0
Вернирубенс	54	88	31,7	38,1	1,39	612	24,5	29,4
Гельрика	80	79	32,8	46,1	2,09	824	33,0	57,8
Мариландика-239	34	88	28,7	40,4	1,42	624	25,0	38,2
Регенерата	78	92	34,4	49,1	2,50	1151	46,0	88,2
Регенерата	79	71	33,6	48,0	2,22	976	39,0	49,6
Робуста-236	156	88	30,1	32,3	0,94	414	16,6	8,9
Серотина	19	71	29,8	42,5	1,61	572	22,9	37,0
Волосистоплодный	83	100	28,1	32,2	0,86	428	17,1	17,2
Китайский	133	96	28,3	32,5	0,88	423	16,9	21,4
Э.с.-38	94	100	28,5	36,6	1,14	569	22,8	32,8
Берлинский	130	88	30,2	38,7	1,30	570	22,8	39,8
Гибрид -10	106	83	26,3	37,0	1,07	442	17,7	6,4
Гибрид-300	49	96	29,0	32,6	0,93	445	17,8	15,6
Осокорь (контроль)	131	50	26,6	33,3	0,87	218	8,7	12,0

Как видно из данных табл. 2, наиболее быстрорастущими оказались евроамериканские тополя (Регенерата, Гельрика, Мариландика-239; Вернирубенс), запас которых к 25-летнему возрасту (возрасту количественной спелости) достигал 612–1151 м³/га, а текущие приросты – 29–88 м³/га/год. При этом средние приросты у этих тополей колебались от 16,6 до 46 м³/га/год.

К сожалению, пока что наше лесное хозяйство остается невосприимчивым даже к таким практически явно полезным инновациям, и исследователи пока не могут надеяться на широкое внедрение в производство полученных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая тенденции развития лесного хозяйства в современном мире, можно прогнозировать возможный недостаток лесных ресурсов в недалеком будущем. Для его покрытия необходимо предпринимать меры, способствующие получению дополнительных объемов древесины, в числе которых может быть создание лесных плантационных насаждений.

Краткий обзор состояния и возможностей плантационного лесоразведения показывает пути возмещения намечающегося дефицита лесных материалов в густонаселенных регионах. Однако необходимо иметь в виду, что создание плантационных насаждений может иметь как положительное, так и отрицательное значение для мест их создания в экологическом, экономическом, социальном, этическом и других аспектах.

Поскольку современные технологии сближают сугубо плантационные насаждения и

обычные лесные культуры, ФАО разработала специальные принципы создания искусственных лесов [27]. Большая их часть вполне подходит к теории и практике создания плантационных насаждений определенной целевой направленности. Среди них следует отметить необходимость разумного государственного управления; согласования подходов как у лиц, принимающих государственные решения, так и лесоводов и лесовладельцев; эффективной организации и обеспеченности кадрами; оценки доходов и возможных затрат, благоприятности условий для инвестиций, емкости рынка; поддержки социальных и культурных ценностей; обеспечения экологической устойчивости и здоровья лесов; введения новых генетически улучшенных форм, адаптированных к изменяющимся условиям среды и экономическим условиям, и др.

В нашей стране в ряде регионов проведены многолетние исследования по созданию и выращиванию высокоэффективных плантационных насаждений хвойных и лиственных лесных древесных пород. Однако если в мире созданы условия для широкого практического применения научных достижений в этом направлении, то у нас в стране пока еще нет механизмов, которые стимулировали бы промышленные предприятия использовать имеющиеся наработки для резкого увеличения производства технически полезной древесины и древесной биомассы.

С другой стороны, известны примеры, когда длительный латентный период развития науки и накопления фактов и знаний использовался для получения качественных рывков в производстве. Так было в физике (атомная энергия), химии (получение полимеров), генетике (медицинская

генетика, клонирование животных, создание искусственной жизни и др.), селекции (зеленая революция в зернопроизводстве) и в других областях науки. Возможно, что уже в ближайшем будущем наши промышленные предприятия, уставшие от дефицита древесного сырья, при-

мутся за создание плантационных насаждений. И тогда усилия отечественных исследователей по выведению новых сортов и улучшенного селекционного посадочного материала, разработке прогрессивных технологий лесовыращивания и лесопереработки найдут своего потребителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альбенский А. В. Культура тополей. М.: Гос. кн. изд-во, 1946. 45 с.
2. Багаев С. С. Опыт создания лесосырьевых плантаций ели на генетико-селекционной основе в Костромской обл. // Лесохозяйственная информация. 2008. № 3–4. С. 29–30.
3. Богданов П. Л. Тополя и их культура. Л.: Гослестехиздат, 1936. 55 с.
4. Жигунов А. В. Приоритетные направления лесного селекционного семеноводства и плантационного выращивания на Северо-Западе России // Лесохозяйственная информация. 2008. № 3–4. С. 11–15.
5. Иванников С. П. Выведение и использование тополей в СССР и за рубежом. М.: ЦБНТИлесхоз, 1971. 105 с.
6. Лесной кодекс Российской Федерации. Комментарии. Изд. 2-е, доп. / Под общ. ред. Н. В. Комаровой, В. П. Рошупкина. М.: ВНИИЛМ, 2007. 856 с.
7. Лесной фонд России: Справочник. М.: ВНИИЛМ, 2003. 640 с.
8. Редько Г. И., Мерзленко М. Д., Бабич Н. А. Лесные культуры. СПб.: СПб. ГЛТА, 2005. 556 с.
9. Соколов А. И., Синькевич С. М., Крутов В. И., Пеккоев А. Н., Харитонов В. А. Перспективы ускоренного выращивания сосны в среднетаежной подзоне Карелии // Лесное хозяйство. 2010. № 1. С. 42–44.
10. Старова Н. В. Селекция ивовых. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 208 с.
11. Царев А. П. Сортоведение тополя. Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1985. 152 с.
12. Царев А. П., Царева Р. П., Иванников С. П. Создание плантационных насаждений тополя. Обзорная информация. М.: ЦБНТИ Госкомлеса СССР, 1988. 48 с.
13. Царев А. П., Царева Р. П., Царев В. А. Динамика сохранности и продуктивности настоящих тополей при испытании в условиях умеренного климата // Вестник ВОГиС. 2010. Т. 14. № 1. С. 659–668.
14. Царев В. А. Мировые лесные ресурсы и их использование. Воронеж: Воронежская гос. лесотехн. акад., 2006. 63 с.
15. Шутлов И. В., Маслаков Е. Л., Маркова И. А. и др. Лесные плантации (ускоренное выращивание ели и сосны). М.: Лесн. пром-сть, 1984. 248 с.
16. Шутлов И. В., Маркова И. А., Омеляненко А. Я., Постников М. В., Товкач Л. Н., Власов Р. В., Подшиваев Е. Е., Сергиенко В. Г. Плантационное лесоводство / Под общ. ред. И. В. Шутлова. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2007. 366 с.
17. Яблоков А. С. Пирамидальные тополи. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1956. 58 с.
18. ABARE and Jaakko Pöyry. Global outlook for plantations. Canberra: Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics. ABARE project 1601, 1999. 99 p.
19. Boulter W. K. Global supply – demand outlook for industrial round wood // Forest Chron. 1986. Vol. 62. № 4. P. 306–313.
20. Carle J., Andrade G., Lei Chen, Millanes M., Lungo A. D., Tetu P. Synthesis of Country Progress Reports – Activities Related to Poplar and Willow Cultivation and Utilization, 2004 through 2007 // Poplars, Willows and People's Wellbeing. 23rd Session of International Poplar Commission Beijing, China, 27–30 October, 2008. 65 p.
21. Carle J., Holmgren P. Wood from Planted Forests: A Global Outlook 2005–2030 // Journal Forest Products. 2008. Vol. 58. № 12. P. 6–18.
22. Carle J., Vuorinen P., Lungo A. D. Status and Trends in Global Forest Plantation Development // Journal Forest Products. 2002. Vol. 52. № 7. P. 2–13.
23. First International Conference on the future of poplar culture. Rome, 13–15 November, 2003: FAO headquarters – Report and Round Table, 2003. 114 p.
24. Holmgren P., Carle J. Responsible management of planted forests: voluntary guidelines. Planted Forests and Trees Working Paper 37/E. Rome: FAO, 2006. 73 + 5 p.
25. Humphreys D., Gosens J., Jackson M. J., Plasmeijer A., Wouter van Betuw, Mohren F. Biotechnology in the Forest? Policy Options on Research on GM Trees. European Forest Institute (Torikatu, 34, FIN-80100, Joensuu, Finland), Discussion Paper, 12. 2005. 35 p.
26. Lungo A. D., Ball J., Carle J. Global planted forests thematic study: Results and analysis. Rome: FAO – Forestry Department – Working Paper FP/38, 2006. 168 + 3 p.
27. Planted Forests in Sustainable Forest Management: A Statement of Principles. FAO, 2010. 18 p.
28. Poplars and willows in wood production and land use. Rome: FAO Forestry series, 1979. № 10. 330 + 32 p.
29. Poplars in forestry and land use. № 12. Rome: FAO – Forestry and forest products studies, 1958. 511 p.
30. Poplars, Willows and People's Wellbeing. 23rd Session of International Poplar Commission Beijing, China, 27–30 October, 2008. Abstract and Submitted Papers. Rome: FAO, Working Paper IPC/5, 2008. 259 p.
31. Situation des forets du monde. Rome: Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, 2003. 151 p.
32. Stout A. B., McKee R., Schreiner E. J. Tree breeding of forest trees for pulp wood // Journal of the New York Botanical Garden. 1927. Vol. 28. № 327. P. 49–63.
33. The contribution of poplars and willows to sustainable forestry and rural development. 22nd Session of International Poplar Commission, Santiago, Chile, 29 November – 2 December 2004. Abstract and Submitted Papers. Rome: FAO, Working Paper IPC/2, 2004. 194 p.
34. Tsarev A. P. Natural poplar and willow ecosystems on a grand scale: the Russian Federation // Unasylva (An international journal of forestry and forest industries – FAO). 2005. Vol. 56. № 2 (221). P. 10–11.
35. Tsarev V. A., Tsarev A. P. Results of introduction poplars tests in the European part of Russia // Eurasian forests – Polish forests: Materials of the IX International Conference of Young Scientists, dedicated to 145-th anniversary from the date of prof. I. K. Pachzowski's birth (24–30 May 2009). Moscow; Kornik: The Publishing house of the Moscow State University of Forest, 2009. P. 171–172.

УДК 628.3

РЕНАТ ИСХАКОВИЧ АЮКАЕВ

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водоснабжения, водоотведения и гидравлики строительного факультета, Петрозаводский государственный университет
 ayukaev@psu.karelia.ru

ЕЛЕНА ОЛЕГОВНА ГРАФОВА

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры водоснабжения, водоотведения и гидравлики строительного факультета, Петрозаводский государственный университет
 chistayavoda@rambler.ru

ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ АВТОДОРОГ СЕВЕРО-ЗАПАДА В ГРАНИЦАХ ВОДООХРАННЫХ ЗОН

При пересечении автодорогами водоохранных зон требуется очистка от нефтепродуктов и взвешенных веществ дождевых и талых вод с канализуемых участков. Загородные участки автодорог имеют ряд особенностей, исключающих применение типовых конструкций очистных сооружений. Предложена новая технология и конструктивное оформление локальных очистных сооружений.

Ключевые слова: загородные водоохранные зоны, сорбционная очистка от нефтепродуктов

В поисках выхода из периодически возникающих осложнений с бывшими республиками СССР по продвижению отечественных товаров на рынки Западной Европы Россия предпринимает в последние годы кардинальные меры: строительство обходных нефте- и газопроводов, автомобильных дорог северного и южного направлений. Одна из таких строек – автодорога М-18 «Кола» от Санкт-Петербурга через Петрозаводск, Мурманск, Печенгу до границы с Норвегией.

С 1 января 2007 года введен в действие Водный кодекс РФ от 16.11.1995 № 167-ФЗ, согласно которому собственники водных объектов, а также физические или юридические лица, использующие их или прилегающие к ним территории, осуществляют мероприятия по охране водных объектов, предотвращению их загрязнения, засорения и истощения вод, а также меры по ликвидации последствий указанных явлений.

При эксплуатации водохозяйственной системы запрещается:

- сброс в водные объекты сточных вод, не подвергшихся санитарной очистке, обезвреживанию, а также сточных вод, не соответствующих требованиям технических регламентов;
- проведение строительных, дноуглубительных, взрывных, буровых и других работ, связанных с изменением дна и берегов водных объектов, в водоохранных зонах, в границах особо ценных водно-болотных угодий осуществляется в соответствии с требованиями законодательства в области охраны окружающей среды и законодательства о градостроительной деятельности.

Проект капитального ремонта автомобильной дороги М-18 «Кола» на участках, находящихся в водоохранной зоне, предусматривает обустройство локальными очистными сооружениями мест сброса дождевых и талых вод.

Для определения расхода сточных вод, попадающих в водоохраный водоем, по профилю определяются самые возвышенные участки, с которых возможен спуск дождевой воды до водоема. Далее определяется общий объем дождевых стоков со всего участка. Для удобства общий расход разбивается на несколько небольших, от 0,3 до 3,0 л/с. Соответственно им трасса разбивается на участки. На границах участков устанавливаются выпуски с дорожного полотна, которые обустроиваются локальными очистными сооружениями с соответствующей производительностью. В табл. 1 представлены расчетные параметры стока с дорожного полотна на одном из таких участков автодороги в районе г. Кандалакша Мурманской области.

Таблица 1

Расчетные параметры дождевого и талого стока с дорожного полотна справа по ходу пикетажа

Положение водосброса	Площадь водосбора, га	Годовое количество дождевых вод, м ³	Годовое количество талых вод, м ³	Расход дождевых вод, л/с	Расход талых вод, л/с
слева по пикетажу	0,04	89,7	16,67	0,15	0,26

Таблица 2

Ожидаемый уровень загрязнения
дождевого и талого стока и требуемые
параметры очищенного стока

Загрязняющее вещество	Исход- ный дож- девой сток, мг/л	Исход- ный тал- ый сток, мг/л	Очищен- ный дожде- вой сток, мг/л	Очищен- ный талый сток, мг/л
Взвешенные вещества	780,0	1620,0	3,0	3,0
Нефтепро- дукты	14,4	15,6	0,05	0,05

В табл. 2 представлен ожидаемый уровень загрязнения дождевого и талого стока и требуемые параметры очищенного стока.

На российском рынке природоохранного оборудования для очистки дождевых и талых вод с территорий, связанных с пребыванием автотранспорта (АЗС, нефтебазы, автохозяйства, автодороги, проходящие через водоохранные зоны, автостоянки), предлагаются установки заводской готовности различных отечественных и зарубежных фирм. Общим почти для всех конструкций таких установок является их подземное расположение.

подавляющее большинство канализуемых участков по трассе автодороги М-18 «Кола» имеют ряд особенностей, которые исключают применение локальных очистных сооружений (ЛОС) подземного расположения:

- на территории размещения ЛОС отсутствует электроснабжение, в связи с чем исключены электрообогрев сооружений и насосная перекачка очищенного стока, возможно только самотечное движение стоков;
- в местах пересечения с автодорогой водоохранных зон (реки, озера, болота) перепад отметок между полотном дороги и прилегающей местностью или уровнем воды в водоприемнике дождевого стока обычно колеблется от 0,5 до 1,5 м, тогда как выпуск очищенных стоков при подземном (из условия непромерзания) размещении ЛОС проходит ниже уровня воды в водоеме на 3,0–3,5 м;
- с учетом диаметра емкостных элементов ЛОС ($D = 1,5\text{--}2,0$ м) наиболее часто предлагаемых на рынке сооружений потребуются

отрывка котлована глубиной до 4,5 м, размером по поверхности в плане 15,0 х 6,0 м, что в прибрежной водонасыщенной зоне практически невозможно (исходя из соображений затраты – результат);

- в водонасыщенных грунтах необходимо предусматривать дополнительные «противоархимедовые» пригрузочные плиты.

На рис. 1 показан профиль «по воде» ЛОС в случае применения емкостной водоочистной установки подземного размещения. На кафедре водоснабжения, водоотведения и гидравлики Петрозаводского государственного университета разработаны и переданы для внедрения в производство новая технология и конструктивное оформление сооружений для очистки дождевых и талых стоков, в наибольшей степени отвечающие особенностям автодороги М-18 «Кола»:

1. ЛОС имеют наземное расположение. Движение стоков самотечное.
2. ЛОС в режиме ожидания дождевых и талых стоков находятся в «сухом» состоянии.
3. ЛОС в рабочем режиме находятся в «водозаполненном» состоянии.
4. Сброс очищенных стоков осуществляется на рельеф с учетом существующих отметок, примыкающих к ремонтируемому участку.
5. Глубокая очистка дождевых и талых стоков осуществляется на многослойном сорбционном фильтре.
6. «Продувочные» воды, обеспечивающие «сухое» состояние ЛОС в режиме ожидания, проходят глубокую сорбционную очистку перед сбросом на рельеф.
7. Сорбционная емкость различных слоев многослойного фильтра обеспечивает продолжительность фильтроциклов, достаточную для условий сервисного обслуживания специализированной организацией.
8. Размещаются наземные ЛОС за пределами 4-метровой придорожной полосы, регламентируемой СНиП 2.05.02-85. Автомобильные дороги.
9. Перепуск собранных придорожными лотками дождевых и талых стоков на ЛОС наземного размещения обеспечивается дюкерным переходом без нарушения профиля земляного полотна.

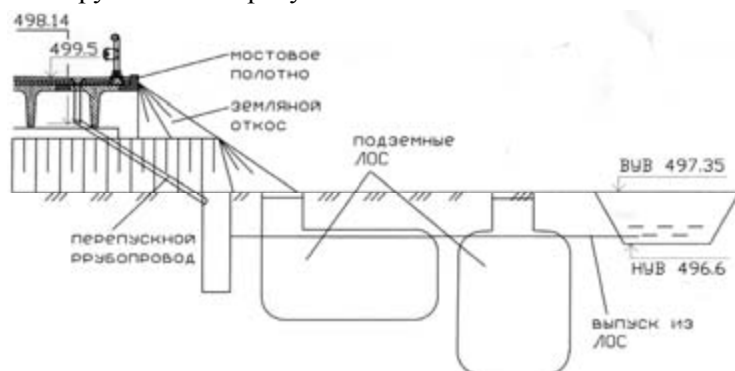


Рис. 1. Профиль «по воде» ЛОС подземного размещения для очистки дождевых вод с мостового полотна

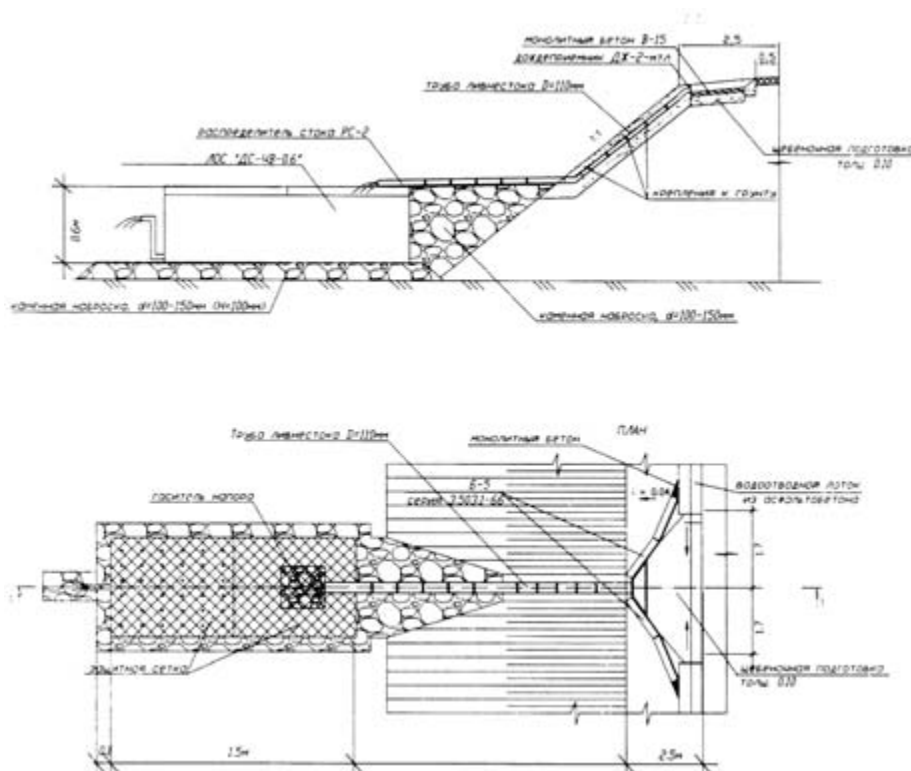


Рис. 2. Профиль «по воде» придорожных ЛОС наземного размещения

На рис. 2 показан профиль «по воде» ЛОС в случае применения водоочистной установки наземного размещения.

По результатам разработки была рассчитана смета на обустройство нескольких участков автодороги М-18 «Кола» 41 комплектом ЛОС новой конструкции. Для проведения экспертизы были разработаны подробные расчеты, основная часть которых приведена в настоящей статье. Для каждого участка определялся объем загрязнений. Годовое количество задержанных загрязнений (взвешенных веществ (вв) или нефтепродуктов (нп)) составит:

$$M_{зв} = W \times (C_{вх} - C_{вых}) / 1000 \text{ (кг)},$$

где W – объем годового стока с расчетного участка, $C_{вх}$ – концентрация загрязняющих веществ на входе в ЛОС, $C_{вых}$ – концентрация загрязняющих веществ на выходе из ЛОС.

Годовой объем задержанных загрязнений составит:

$$V_{зв} = M_{зв} \times \rho \text{ (л)},$$

где ρ – плотность осадка ($1,6 \text{ г/см}^3$ для взвешенных веществ, $0,8 \text{ г/см}^3$ для нефтепродуктов). Годовое количество задержанных минеральных загрязнений (взвешенные вещества):

$$M_{зв} = M_{зв(д)} + M_{зв(т)}; V_{зв} = V_{зв(д)} + V_{зв(т)}.$$

Годовое количество задержанных минеральных загрязнений для выбранного участка составит:

- дождевой сток:
 $M_{вв(д)} = 89,7 \times (780,0 - 3,0) / 1000 = 69,7 \text{ кг};$
 $V_{вв(д)} = 43,56 \text{ л};$
- талый сток:
 $M_{вв(т)} = 16,67 \times (1620,0 - 3,0) / 1000 = 26,95 \text{ кг};$
 $V_{вв(т)} = 16,85 \text{ л};$

- всего:

$$M_{вв} = 96,65 \text{ кг}, V_{вв} = 60,41 \text{ л}.$$

Годовое количество задержанных нефтепродуктов для выбранного участка (с учетом объемной плотности ρ нефтепродуктов $0,8 \text{ г/см}^3$) составит:

- дождевой сток:
 $M_{нп(д)} = 89,7 \times (14,40 - 0,05) / 1000 = 1,29 \text{ кг};$
 $V_{нп(д)} = 1,61 \text{ л};$
- талый сток:
 $M_{нп(т)} = 16,67 \times (15,6 - 0,05) / 1000 = 0,26 \text{ кг};$
 $V_{нп(т)} = 0,32 \text{ л};$
- всего:
 $M_{нп} = 1,55 \text{ кг}, V_{нп} = 1,93 \text{ л}.$

Расчет и конструирование песколовки для ЛОС наземного размещения выполнены в соответствии со СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения, п. 6.26-6.35. Песколовки:

- в соответствии с п. 6.26 песколовки необходимо предусматривать при производительности сооружений свыше $100 \text{ м}^3/\text{сут.}$;
- в соответствии с п. 6.28а продолжительность протекания стоков при максимальном притоке на горизонтальную песколовку должна быть не менее 30 с;
- в соответствии с п. 6.27, табл. 28 содержание отстоянного песка составляет 50 %;
- в соответствии с п. 6.29 удаление песка из песколовки всех типов следует предусматривать вручную при объеме песка до $0,1 \text{ м}^3/\text{сут.}$;
- в соответствии с п. 6.35 для поддержания в горизонтальной песколовке постоянной ско-

рости движения сточных вод на выходе из нее надлежит предусматривать водослив с широким порогом [3].

С учетом изложенных нормативов принята песколовка горизонтального типа, состоящая из двух ступеней.

- Первая ступень (входит в состав водосброса на обочине) – водосборный лоток, соединяющий водоотводной лоток из асфальтобетона с дождеприемником; имеет трапециевидную форму с размерами по нижнему и верхнему основаниям 3400 и 350 мм соответственно, длину 2000 мм и глубину 70 мм. Роль решетки выполняет щебеночный пандус высотой 100 мм, уложенный перед дождеприемником. Песколовка объемом $V = 262$ л обеспечивает примерно двухминутное пребывание в ней дождевого стока, что в 4 раза перекрывает нормативные 30 с. Под накопление песка отводится четверть объема – 25 % (0,25).
- Вторая ступень (входит в конструкцию ЛОС «ДС-ЧВ-0.6») – герметичная часть крышки ЛОС, имеет размеры 0,6 х 0,75 х 0,04 (м), рабочий объем $V = 18$ л; для интенсификации процесса пескоотделения вторая ступень песколовки выложена двумя слоями (съёмными на время регенерации) полимерной сетки с размерами ячеек 18 мм. Под накопление песка также отводится четверть объема – 25 % (0,25).

С учетом опыта эксплуатации локальных очистных сооружений дождевых и талых вод в условиях Карелии (на загородных и городских АЗС) эффективность песколовки горизонтального типа при соответствующей организации гидравлики потоков колеблется между 45 и 60 %. Для дальнейших расчетов эффективность задержания **взвешенных веществ** ($\mathcal{E}_{\text{п(вв)}}$) в песколовке принята равной 50 % (30 % (0,3) на первой ступени и 20 % (0,2) на второй ступени).

Из соотношения годового объема поступающих на ЛОС и задерживаемых на песколовке минеральных загрязнений (в среднем 50 %) рассчитывается количество сервисных посещений ЛОС для удаления и вывоза задержанного песка после песколовки первой ступени:

$$P_1 = Z_{\text{м}} \times 0,3 : 65,5 \text{ раза,}$$

где $Z_{\text{м}}(\text{л})$ – годовой объем минеральных загрязнений с расчетного участка, 65 – объем накопительной зоны песколовки первой ступени (262 л × 0,25).

Количество сервисных посещений ЛОС для удаления и вывоза задержанного песка после песколовки второй ступени:

$$P_2 = Z_{\text{м}} \times 0,2 : 4,5,$$

где 0,25 х a (л) – объем свободного объема песколовки (18 л х 0,25), $Z_{\text{м}}(\text{л})$ – годовой объем минеральных загрязнений с расчетного участка.

Время пребывания дождевого стока расчетного расхода составляет:

$$t = a \times 0,75 : q,$$

где a – объем песколовки, 0,75 (75 %) – доля свободного объема песколовки; q – расход дождевых вод (л/с).

Для заданного участка количество сервисных посещений ЛОС после песколовки первой ступени составляет:

$$P_1 = 60,41 \text{ л} \times 0,3 : 65,5 = 0,3 \text{ раза}$$

(обслуживание каждые 22 месяца).

Количество сервисных посещений ЛОС после песколовки второй ступени:

$$P_2 = 60,41 \text{ л} \times 0,2 : 4,5 = 2,7 \text{ раза}$$

(обслуживание каждые 2,2 месяца),

где 60,41 л – годовой объем минеральных загрязнений с расчетного участка.

Время пребывания дождевого стока расчетного расхода в песколовке второй ступени составляет:

$$t = 18 \text{ л} \times 0,75 : 0,26 = 51 \text{ с,}$$

где 18 л – рабочий объем песколовки, 0,26 – расход дождевых вод (л/с). Это соответствует нормативно рекомендуемым 30 с.

После песколовки стоки поступают на намывной и далее на сорбционный фильтры. Намывной фильтр работает в режиме намыва загрязнений на уложенную по поверхность сорбента пленку из нетканого пористого материала. Накапливающаяся пленка сама становится дополнительным фильтром для поступающих загрязнений, прошедших песколовку. Пленка работает как экран и обеспечивает съём до 50 % взвешенных веществ ($\mathcal{E}_{\text{ф(вв)}}$).

Остаточные концентрации взвешенных веществ после песколовки ($\mathcal{E}_{\text{п(вв)}} = 50 \%$) и пленки из нетканого пористого материала ($\mathcal{E}_{\text{ф(вв)}} = 50 \%$):

$$C_{\text{ос}} = C_{\text{овв}} \times \mathcal{E}_{\text{п(вв)}} \times \mathcal{E}_{\text{ф(вв)}} \text{ (мг/л),}$$

где $C_{\text{овв}}$ – объем минеральных загрязнений, поступающих на ЛОС, $\mathcal{E}_{\text{п(вв)}}$ и $\mathcal{E}_{\text{ф(вв)}}$ – эффективность очистки песколовки и намывного фильтра по взвешенным веществам:

- от дождевого стока:

$$C_{\text{ос}} = (780,0 \times 0,5 \times 0,5) = 195,0 \text{ мг/л,}$$

- от талого стока:

$$C_{\text{ос}} = (1620,0 \times 0,5 \times 0,5) = 405 \text{ мг/л.}$$

Габариты намывного фильтра в плане соответствуют габаритам сорбционного фильтра и составляют $1,5 \times 0,6 = 0,9 \text{ м}^2$.

Толщина слоя из минеральных загрязнений на пленке из нетканого пористого материала при условии ее периодичной замены составит:

$$(Z_{\text{м}}/\text{год} \times 0,5 \times 0,5 \times 1000) : 9000 \text{ см}^2, \text{ см,}$$

где $Z_{\text{м}}$ (л) – объем задержанных за год минеральных примесей, 0,5 – доля загрязнений, задерживаемых на песколовке, 0,5 – доля загрязнений, задерживаемых на пленке из нетканого материала, 9000 см² – площадь фильтра размерами 0,6 х 1,5 м.

Толщина слоя из минеральных загрязнений для заданного участка:

$$V_{\text{вв}} = (60,41 \times 0,5 \times 0,5 \times 1000) : 9000 \text{ см}^2 = 1,68 \text{ см,}$$

где 60,41 – объем задержанных за год минеральных примесей.

Далее очистка происходит непосредственно на многослойном сорбционном фильтре. В качестве загрузки многослойного сорбционного фильтра используются:

- полимерный материал пенополиуретан «ППРТ»;
- органический материал торфоплиты «ЭФТ»;
- минеральный сорбент «Новосорб».

Технологические параметры сорбентов представлены в табл. 3.

С учетом ограничений на общую высоту ЛОС из-за малого перепада высот между полотном дороги и местом сброса очищенного стока (0,6 м) по конструктивным соображениям и условиям компоновки сорбционных материалов толщина фильтрующих слоев принимается равной:

- 1-й слой – пенополиуретан «ППРТ» – 80 мм = (60 + 20) мм;
- 2-й слой – торфоплита «ЭФТ» – 200 мм;
- 3-й слой – «Новосорб» (вариант № 2) – 150 мм.

Исходя из требований задержать годовой объем нефтепродуктов (с учетом эффекта задержания на песколовке и намывном фильтре), максимально допустимой высоты придорожных ЛОС в 0,5 м (по топографическим соображениям) и сорбционной емкости материалов, удобства изготовления, транспортировки, монтажа и сервисного обслуживания, принимаются следующие параметры сорбционного фильтра. Размер:

$$0,6 \text{ м} \times 1,5 \text{ м} \times 0,5 \text{ (h) м}; F = 0,9 \text{ м}^2.$$

Скорость фильтрации при расчетном расходе дождевого стока q (л/с) составит:

$$u = (q \times 3600 : 1000) \text{ м}^3/\text{ч} : 0,9 \text{ м}^2 = \dots, (\text{м}/\text{ч}).$$

Скорость фильтрации для заданного участка при расчетном расходе дождевого стока (0,26 л/с (0,94 м³/ч)) составит:

$$u = 0,94 \text{ м}^3/\text{ч} : 0,9 \text{ м}^2 = 1,04 \text{ м}/\text{ч}.$$

Объем каждого из слоев сорбента при умножении площади на высоту загрузки будет равен:

- 1-й слой – пенополиуретан «ППРТ» – 0,9 м² x 0,08 м = 0,07 м³;
- 2-й слой – торфоплита «ЭФТ» – 0,9 м² x 0,20 м = 0,18 м³;
- 3-й слой – «Новосорб» – 0,9 м² x 0,15 м = 0,135 м³.

Сорбционную емкость материалов такого объема (и соответствующего веса) см. в табл. 4.

Исходя из продолжительности «мокрого» сезона (6 месяцев), объема поступающих на сорбционный фильтр за сезон нефтепродуктов X (кг), сорбционной емкости используемых в конструкции фильтра сорбентов (126,85 кг), для устойчивой работы ЛОС потребуется замена или регенерация:

$$T = 126,85 \text{ кг} : X \text{ кг}, \dots \text{ сезон}.$$

В рассматриваемом примере, где исход объема поступающих на сорбционный фильтр за сезон нефтепродуктов – 1,55 кг, сорбционной емкости используемых в конструкции фильтра сорбентов – 126,85 кг, для устойчивой работы ЛОС потребуется замена или регенерация сорбентов:

$$T = 126,85 \text{ кг} : 0,285 \text{ кг} = 81,8 \text{ сезона}.$$

Такая продолжительность межрегенерационного периода (или замены отработавшего сорбента на новый) получается при предположении концентрации нефтепродуктов в исходных стоках на уровне 14,4–15,5 мг/л. Если принять в

расчет концентрации нефтепродуктов, характерные для городских условий (в пределах 80–150 мг/л), то межрегенерационный период снизится до 3–5 сезонов, что необременительно для сервисного обслуживания.

Для опорожнения ЛОС в период ожидания дождей и в морозное время года предусмотрен выпуск стока на рельеф.

Отверстие диаметром 6 мм в поддренажном объеме корпуса ЛОС при напоре от 0,5 до 0,1 м обеспечивает расход порядка 0,06 л/с – 0,2 м³/ч. Расход определяем согласно формуле гидравлического расчета расхода жидкости через отверстие в тонкой стенке:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH} = 0,62 \cdot 0,00003 \cdot \sqrt{(19,6 \cdot 0,5)} = 0,06 \text{ л/с} \\ \text{или } 0,2 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где μ – коэффициент расхода для расчетов, который принимается равным 0,62, H – высота резервуара, ω – площадь отверстия, которая рассчитывается как:

$$(3,14 \times (0,006)^2 \text{ м}) / 4 = 0,00003 \text{ м}^2.$$

В периоды дождей и обработки талых вод такой слив происходит постоянно параллельно с основным фильтрационным потоком.

Таблица 3

Технологические параметры сорбентов

Показатели	«ППРТ»	«ЭФТ»	«Новосорб»
скорость фильтрации, м/ч	до 25	до 5	до 4,0
объемный вес, г/см ³	0,005	0,25	0,01
потери напора за ф/цикл, см	0,003 м на 1 см ф/слоя	0,002 м на 1 см ф/слоя	0,002 м на 1 см ф/слоя
грязеёмкость по нефтепродуктам, кг/кг	5,0	4,0	5,0
концентрация в очищенной воде: нефтепродукты	до 10	0,3	0,05
взвешенные вещества	до 10	10,0	3,0

Таблица 4

Сорбционная емкость (по нефтепродуктам) материалов многослойного сорбционного фильтра

№	Наименование	Показатели	«ЭФТ»	«Новосорб»	Итого
1	удельная сорбционная емкость, кг/кг	5	4	5	
2	объем сорбента, м ³	0,07	0,18	0,135	0,385
3	объемный вес, кг/м ³	5,0	80	100,0	
4	вес сорбента, кг	0,35	14,5	13,5	28,35
5	сорбционная емкость в объеме фильтра, кг	1,75	57,6	67,5	126,85
6	потери напора, м/цикл	0,03	0,04	0,005	0,075

После прекращения дождя или дневного снеготаяния время опорожнения объема ЛОС:

$$T = (1,5 \times 0,6 \times 0,5) \text{ м}^3 : 0,2 \text{ м}^3/\text{ч} = 2,25 \text{ ч.}$$

Этого времени достаточно, чтобы в период снеготаяния фильтр успел опорожниться до наступления ночных заморозков.

Любые сооружения эффективно работают только при соответствующем обслуживании. В сервисное обслуживание придорожных ЛОС входит: контроль за эффективностью работы ЛОС; сбор и вывоз песка, задержанного песколовками; сбор и вывоз для регенерации пленки из нетканых материалов и пенополиуретановых ковров; сбор и вывоз отработанных сорбентов для сжигания (торфоплиты) или отжига («Новосорб»); комплектация фильтров свежими сорбционными материалами и регенерированными неткаными материалами и полиуретановыми коврами.

В 2009 году по трассе автодороги М-18 «Кола» смонтирован и пущен в эксплуатацию 41 комплект ЛОС наземного размещения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработке новой технологии и конструктивному оформлению ЛОС наземного размещения предшествовало исследование процессов «сухого» и медленного фильтрования методами математического моделирования.

ЛОС наземного размещения разработаны с учетом особенностей загородных участков автомагистралей, отсутствия на них электроснабжения, «неудобной» топографии придорожных территорий в районе пересекаемых водоемов, требований «самоопорожнения» емкостных элементов и коммуникаций ЛОС на зиму и в переходные периоды (заморозки и оттепели). Согласно расчетам для наиболее типичного участка дороги, для работы сооружений в проектном режиме необходимо выполнять технологические обслуживания каждые 2 месяца за сезон (выемка накопившегося песка и взвешенных веществ) и только один раз за 81 сезон по нефтепродуктам. Такой большой межрегенерационный период объясняется небольшой степенью загрязненности нефтепродуктами загородных автотрасс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГТПО-02ИП. Сорбент «Новосорб». СПб., 2003.
2. Карелин Я. А., Яромский В. Н., Яковлев С. В. Справочное пособие. Таблицы для гидравлических расчетов сетей из пластмассовых труб круглого сечения. М.: Стройиздат, 1986. 54 с.
3. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения. М., 2001.
4. Справочник проектировщика. Канализация населенных мест и промышленных предприятий. М.: Стройиздат, 1981. С. 150–152.
5. ТУ №0391-003-2997983-95. Элементы фильтрующие торфяные «ЭФТ».
6. <http://WWW.goldformula.ru/index.phpa=contentissue>.

УДК 539.26; 547.458.81

ЛЮДМИЛА АЛЕКСАНДРОВНА АЛЕШИНАкандидат физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет
aleshina@psu.karelia.ru**ИННА ВЛАДИМИРОВНА ЛЮХАНОВА**аспирант кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет
luhanova@yandex.ru**РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕЛЛЮЛОЗ С ВОДОЙ**

Рентгенографические исследования взаимодействия целлюлозы с водой показали, что при набухании целлюлозы вода проникает в капиллярно-пористую систему и аморфную составляющую целлюлозы. Это приводит к уменьшению угла взаимной дезориентации молекул.

Ключевые слова: рентгенографический анализ, целлюлоза, набухание в воде

ВВЕДЕНИЕ

Изучение сорбционных свойств целлюлозы представляет большой теоретический и практический интерес, так как дает возможность не только охарактеризовать структурные изменения волокна, но и выяснить влияние сорбированных жидкостей, в частности воды, на химическое поведение, механические свойства и электрические характеристики целлюлозы [1].

На сегодняшний день не существует единой теории механизма протекания сорбционных процессов, характерных для гидрофильных полимеров биологического происхождения, к которым относится целлюлоза [4]. Одним из путей решения вопроса о механизме сорбции воды целлюлозой является исследование изменений молекулярной и надмолекулярной структуры целлюлозы при взаимодействии с водой методом рентгеноструктурного анализа.

ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ

В качестве объектов исследований были выбраны хлопковая, бисульфитная кондопожская (К) и сульфатные светогорская (С) и финская (Ф) целлюлозы. Волокна исследуемых образцов целлюлозы располагались параллельно поверхности образца. Исследовались образцы в исходном (сухом) состоянии и насыщенные водой. Насыщение водой происходило путем набухания при комнатной температуре в течение 2–3 часов.

За время рентгенографирования всего интервала углов рассеяния 3–145° ($S = 0.3\text{--}6.15 \text{ \AA}^{-1}$) изменение массы набухших в воде образцов не превышало 3 %. Контроль изменения массы проводился при помощи аналитических электронных весов Госметр ВЛ-210.

**МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

Рентгенограммы образцов целлюлозы были получены на дифрактометре ДРОН-3.0 в геометриях на отражение и на прохождение на FeK_α -излучении с монохроматизацией падающих лучей кристаллом пиролитического графита. Рентгенограмма дистиллированной воды была получена на рентгеновском дифрактометре SAXSees mc^2 фирмы Anton Paar на $\text{CuK}\alpha$ -излучении.

В измеренные в эксперименте распределения интенсивности рассеяния образцами $I_{\text{изм}}(S)$ ($S = 4\pi \times \sin\theta/\lambda$ – длина дифракционного вектора, θ – угол скольжения, λ – длина волны падающего излучения) была введена поправка на рассеяние воздухом. Рассеяние воздухом $I_{\text{возд}}(S)$ измерялось в отсутствие образца, для тонких образцов в геометрии на отражение к стандартной величине поправки, равной $0.5I_{\text{возд}}(S)$, добавлялось слагаемое

$$\frac{1}{2}I_{\text{возд.}}(S)\exp\left(\frac{-2\mu_m \rho \cdot t}{\sin\theta}\right),$$

где μ_m – массовый коэффициент поглощения, ρ – плотность, t – толщина образца. Таким образом, поправка на рассеяние воздухом $I_{\text{в}}(S)$ в геометрии на отражение имеет вид:

$$I_{\text{в}}(S) = \frac{1}{2}I_{\text{возд.}}(S)\left[1 + \exp\left(\frac{-2\mu_m \rho \cdot t}{\sin\theta}\right)\right]. \quad (1)$$

В геометрии на прохождение с учетом поглощения в образце интенсивность рассеяния воздухом записывалась в виде:

$$I_{\text{в}}(S) = I_{\text{возд.}}(S)\exp\left(\frac{-\mu_m \rho \cdot t}{\cos\theta}\right). \quad (2)$$

Исправленные на рассеяние воздухом собственный фон регистрирующей системы (с. ф.) и поглощение интенсивности рассеяния $I_0(S)$ в геометрии на отражение записываются как

$$I_0(S) = 2\mu_m \rho (I_{изм.}(S) - I_{в.}(S) - \text{с.ф.}) / (1 - \exp(-2\mu_m \rho t / \sin\theta)). \quad (3)$$

В случае геометрии на прохождение

$$I_0(S) = (\cos\theta/t) (I_{изм.}(S) - I_{в.}(S) - \text{с.ф.}) / (\exp(-\mu_m \rho t / \cos\theta)). \quad (4)$$

В полученные значения интенсивности $I_0(S)$ была введена поправка на поляризацию, затем они были переведены в электронные единицы на формульную единицу (эл. ед.) и исправлены на комптоновское рассеяние. Коэффициент нормировки рассчитывался по методу Крог – Мое и Нормана. Полученные в результате значения интенсивности рассеяния в эл. ед. обозначены $I_{норм.}(S)$. Методика обработки данных подробно изложена в [3].

Из интегральных интенсивностей отражений и диффузного фона аморфной составляющей рентгенограмм рассчитывались значения степени кристалличности (СК):

$$k = \frac{I - I_a}{I}, \quad (5)$$

где I – суммарная интегральная интенсивность рассеяния кристаллической и аморфной фазы, I_a – интенсивность рассеяния аморфной фазой.

Из ширины дифракционных линий по формуле Шеррера [9] рассчитывались размеры областей когерентного рассеяния (ОКР), иногда называемых областями кристалличности, в направлении нормали к отражающим семействам плоскостей [9]. Контуры линий аппроксимировались по Гауссу.

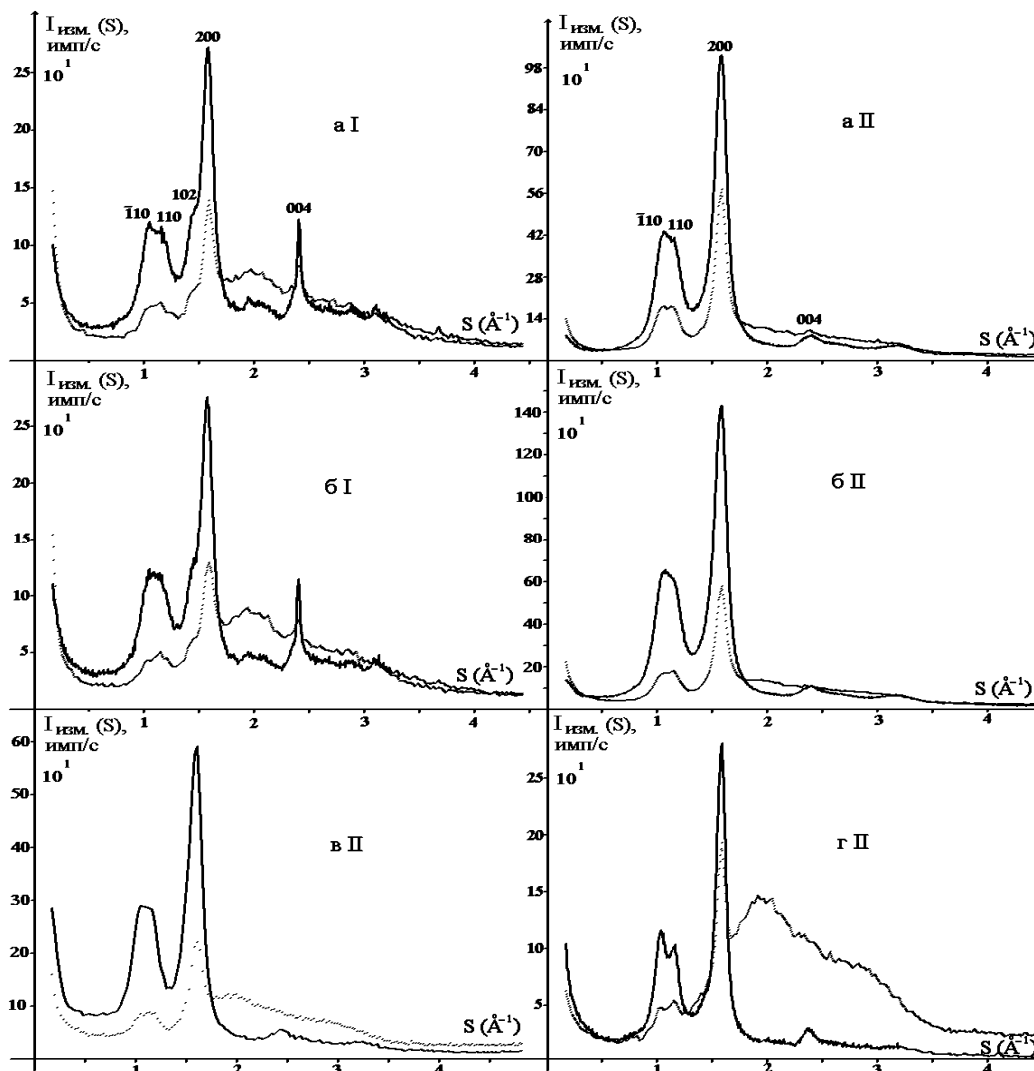


Рис. 1. Экспериментальные кривые распределения интенсивности рассеяния для исходных — и набухших в воде образцов: Ф (aI, aII), С (бI, бII), К (вII) и хлопковая (гII) целлюлозы. Геометрия на прохождение – I, на отражение – II

Для определения значений относительной влажности образцов, а также для определения количества воды, внедренной в образец при его набухании, образцы взвешивались до и после набухания в воде на аналитических электронных весах Госметр ВЛ-210 (предел допустимой погрешности – ± 0.0005 г, наименьший предел взвешивания – 0.001 г). Из результатов измерений массы образцов до (m) и после (m_1) набухания в воде были рассчитаны относительная влажность

$$W_C = \frac{m_1 - m}{m_1} \cdot 100\%$$

и число молекул воды $N_{H_2O} = (m_1 - m) / M_{H_2O}$ в набухших образцах (M_{H_2O} – масса молекулы воды). Число молекул целлюлозы в образцах рассчитывалось как $N_{целл} = m / M_{C_6O_5H_{10}}$. Здесь $M_{C_6O_5H_{10}}$ – масса молекулы целлюлозы. Формульная единица, используемая для расчета нормированных интенсивностей рассеяния, записывалась таким образом, чтобы число атомов С оставалось равным 6.

Для определения плотности ρ исследуемых объектов были проведены измерения толщины и площади поверхности образцов в исходном состоянии и после набухания в воде.

Из значений плотности и разности масс $m_1 - m$ были рассчитаны объемы поглощенной образцами воды (V_{H_2O}).

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 сравниваются кривые распределения интенсивности рассеяния $I_{изм.}(S)$ исходными и набухшими в воде образцами. Указаны индексы основных отражений.

Анализ рентгенограмм, приведенных на рис. 1, показывает, что на дифракционных картинах, полученных от образцов целлюлоз, пропитанных водой, наблюдается уменьшение интенсивности рассеяния в области отражений ($\bar{1}10$), (110) и (200) в области $S \sim 1.5 \text{ \AA}^{-1}$ ($2\theta_{Fe} \sim 27^\circ$) и возрастание интенсивности диффузного рассеяния в области значений $S \sim 2 \text{ \AA}^{-1}$ ($2\theta_{Fe} \sim 36^\circ$).

Уменьшение интенсивности рассеяния в области отражений ($\bar{1}10$), (110) и (200) обусловлено возрастанием поглощения в образцах за счет заполнения капиллярной системы целлюлозы водой и разбухания целлюлозы. Причиной возрастания интенсивности диффузного рассеяния является появление рассеяния водой, максимум которого приходится на $S \sim 2 \text{ \AA}^{-1}$ ($2\theta_{Fe} \sim 36^\circ$) (рис. 2).

При набухании целлюлозы в воде значение относительной влажности W_C составляет выше 20 % (табл. 1), то есть выше предела совместимости целлюлозных волокон с водой [8]. Вода, поглощаемая сверх предела ее совместимости с волокнами, начинает заполнять систему межволоконных макропор. При этом картина рассеяния представляет собой суперпозицию дифракционных картин от трех компонент системы:

кристаллической и аморфной составляющих целлюлозы и воды, заполняющей межволоконные промежутки.

Рентгенограммы сульфатных Ф и С целлюлоз были получены в двух геометриях: на прохождение (рис. 1 аI и бI соответственно) и на отражение (рис. 1 аII и бII соответственно). Как видно из представленных рентгенограмм, на дифракционных картинах, полученных на прохождение, резко ослаблены максимумы с индексами ($\bar{1}10$), (110) и (200), но наблюдается линия с индексами (004). Причина различия в интенсивностях брэгговских отражений на рентгенограммах, полученных на прохождение и отражение, кроется в волокнистой структуре исследованных образцов и методике их ориентации относительно падающих лучей, что подробно изложено в [2].

Результаты определения толщины t и массы (m , m_1) образцов, а также расчета плотности ρ , числа молекул целлюлозы $N_{целл}$ и воды N_{H_2O} , элементного состава (x_C , x_O , x_H), объемов и относительной влажности W_C приведены в табл. 1.

Значения плотностей для образцов целлюлозы в исходном (сухом) состоянии изменяются от 0.25 г/см^3 для хлопковой до 0.74 г/см^3 для сульфатной Ф целлюлозы. Для образцов, набухших в воде, плотность принимает значения от 1.25 до 1.48 г/см^3 .

Увеличение плотности образцов, насыщенных водой, по сравнению с плотностями образцов в исходном состоянии можно объяснить тем, что, согласно литературным данным [5], в процессе набухания целлюлозы вода проникает в капилляры и приводит к повышению плотности упаковки системы в целом. Это связано с характерным для процесса набухания полимеров явлением контракции [5], при котором объем набухшей целлюлозы оказывается меньше суммы объемов исходной (сухой) целлюлозы ($V_{исх}$) и поглощенной воды, что и наблюдается в данном эксперименте (табл. 1).

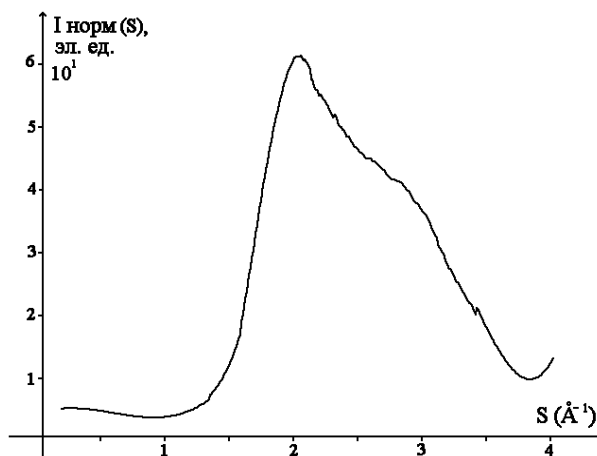


Рис. 2. Распределение интенсивности рассеяния рентгеновских лучей дистиллированной водой

Таблица 1

Некоторые физические характеристики образцов целлюлозы

Образец	ρ , г/см ³	t, см	m, м ₁ , г	$V_{\text{сH}_2\text{O}}$, см ³	$V_{\text{исх}} + V_{\text{H}_2\text{O}}$, см ³	$N_{\text{целл}}$, 10 ²⁰	$N_{\text{H}_2\text{O}}$, 10 ²⁰	$\frac{N_{\text{H}_2\text{O}}}{N_{\text{целл}}}$	X _C	X _O	X _H	Wc%
Сульфат. (Ф) исх.	0.74 ± 0.06	0.045 ± 0.002	0.189 ± 0.009			7			6	5	10	
с H ₂ O	1.37 ± 0.05	0.055 ± 0.004	0.421 ± 0.011	0.315	0.494	7	77	11	6	16	32	56
Сульфат. (С) исх.	0.67 ± 0.03	0.032 ± 0.007	0.182 ± 0.003			6			6	5	10	
с H ₂ O	1.48 ± 0.08	0.063 ± 0.012	0.512 ± 0.007	0.415	0.697	7	97	16	6	21	42	65
Бисульф. (К) исх.	0.30 ± 0.01	0.097 ± 0.002	0.131 ± 0.002			5			6	5	10	
с H ₂ O	1.25 ± 0.03	0.109 ± 0.002	0.612 ± 0.001	0.481	0.899	7	157	31	6	36	72	78
Хлопковая исх.	0.25 ± 0.01	0.042 ± 0.007	0.024 ± 0.002			1			6	5	10	
с H ₂ O	1.39 ± 0.04	0.032 ± 0.001	0.096 ± 0.001	0.071	0.165	7	32	32	6	37	74	76

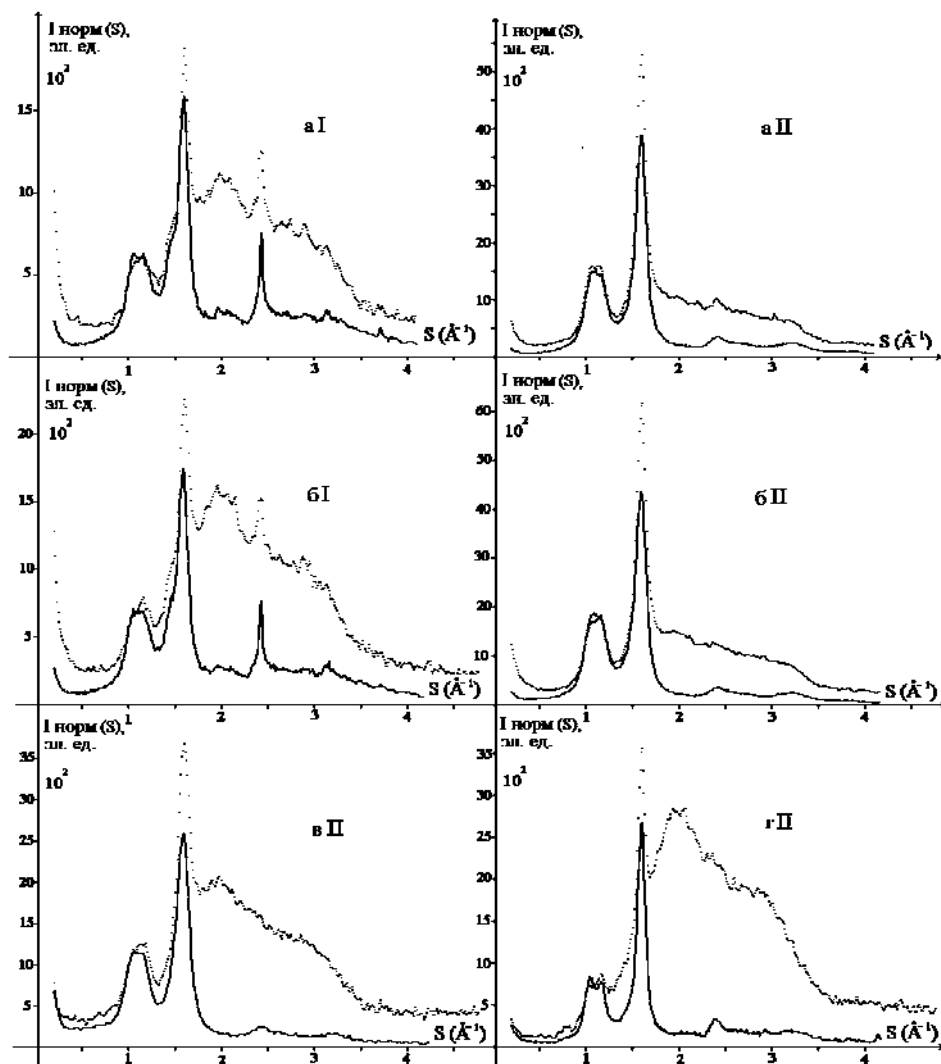


Рис. 3. Нормированные кривые распределения интенсивности рассеяния для исходных — и набухших в воде образцов: Ф (а I, а II) и С (б I, б II), К (в II) и хлопковой (г II) целлюлоз. Геометрия на прохождение – I, на отражение – II

На рис. 3 представлены кривые распределения интенсивности $I_{\text{норм}}(S)$, нормированные на формульные единицы, элементный состав которых указан в табл. 1.

Для выявления структурных изменений, происходящих в целлюлозе при набухании, из

кривых распределения интенсивности образцов целлюлозы, набухших в воде, было исключено рассеяние водой с учетом числа ее молекул в образцах (табл. 1). Результирующие дифракционные картины представлены на рис. 4.

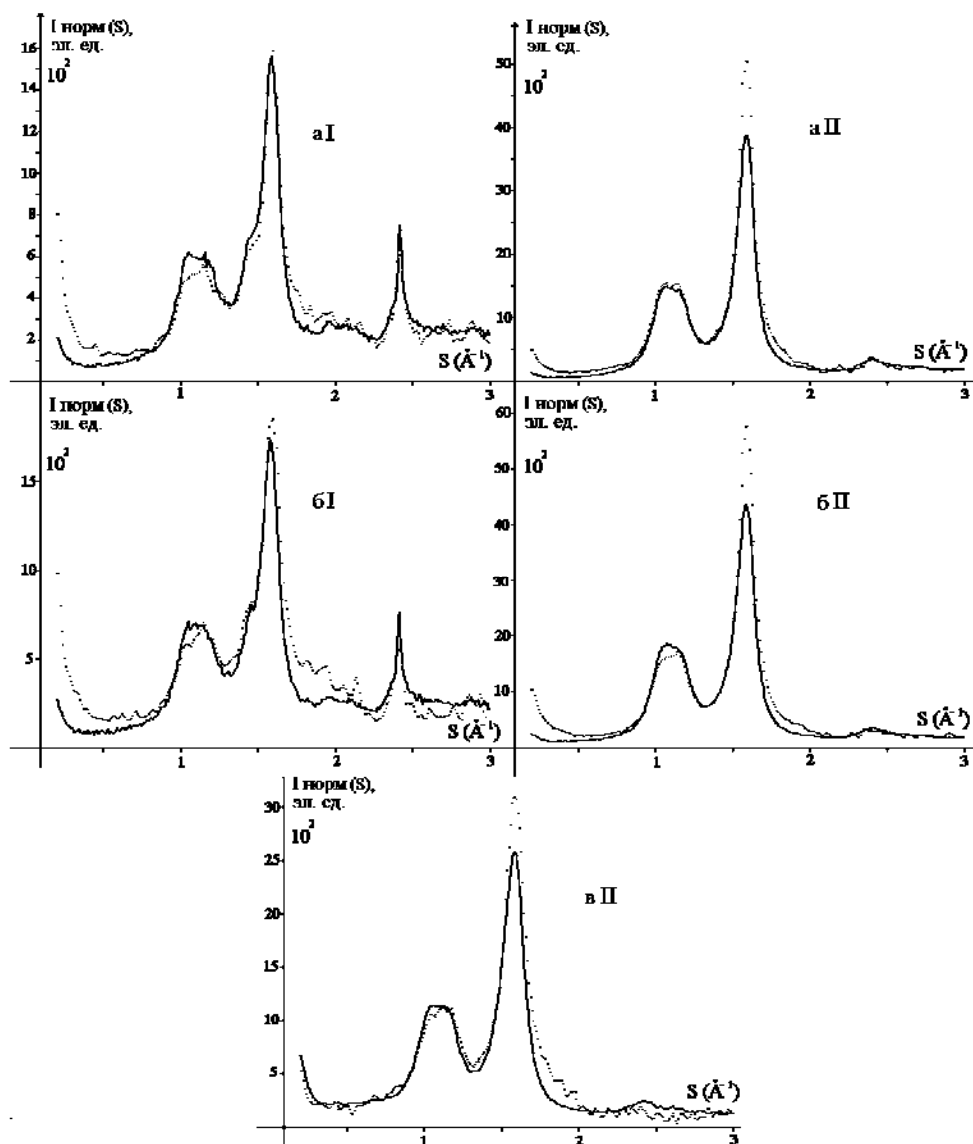


Рис. 4. Кривые распределения нормированных значений интенсивности для исходных — образцов; для набухших в воде образцов после исключения вклада воды в рассеяние: Ф (а I, а II), С (б I, б II), К (в II). Геометрия: на прохождение — I, на отражение — II

Таблица 2
Отношения высот отражений ($\bar{I}_{110}$), (110), (200) и (004) для исходных ($I_{исх}$) и набухших в воде ($I_{с H_2O}$) образцов целлюлозы

Образец целлюлозы	Геометрия съемки	$\frac{I_{\bar{1}10}}{I_{исх}}$	$\frac{I_{110}}{I_{исх}}$	$\frac{I_{200}}{I_{исх}}$	$\frac{I_{004}}{I_{исх}}$
		$S = 1.04 \text{ \AA}^{-1}$	$S = 1.17 \text{ \AA}^{-1}$	$S = 1.6 \text{ \AA}^{-1}$	$S = 2.4 \text{ \AA}^{-1}$
Сульфат. (Ф)	Отражение	1	0.95	1.32	1
Сульфат. (С)	Отражение	0.77	0.91	1.32	1.1
Бисульфит. (К)	Отражение	0.83	1	1.2	1.4

В табл. 2–4 представлены количественные характеристики, рассчитанные из приведенных

на рис. 3 кривых распределения интенсивностей рассеяния.

Как видно из табл. 2, для всех исследованных образцов целлюлозы, насыщенных водой, наблюдается возрастание интенсивности отражения с индексами (200). Аналогичные результаты были получены в [8] для хлопковой целлюлозы. В работах [7], [8] этот эффект объясняется повышением упорядоченности структуры, которое вызвано заполнением водой дефектов кристаллической структуры.

Расчет межплоскостных расстояний d из положений на рентгенограммах, соответствующих отражениям (110), (110), (200), (004) кристаллической фазы, показал, что в набухших образцах значения d не отличаются от таковых для исходных (табл. 3).

Результаты расчета степени кристалличности и размеров ОКР приведены в табл. 4.

Таблица 3

Межплоскостные расстояния для исходных образцов целлюлозы (числитель) и образцов целлюлозы, набухших в воде (знаменатель)

Тип целлюлозы	Межплоскостные расстояния			
	d1 ($\bar{1}10$), Å	d2 (110), Å	d3 (200), Å	d4 (004), Å
Сульфат. (Ф)	5.98 ± 0.01	5.46 ± 0.01	3.95 ± 0.02	2.62 ± 0.02
	5.98 ± 0.02	5.46 ± 0.02	3.95 ± 0.02	2.62 ± 0.02
Сульфат. (С)	6.03 ± 0.01	5.43 ± 0.01	3.95 ± 0.02	2.61 ± 0.02
	6.03 ± 0.02	5.44 ± 0.01	3.95 ± 0.02	2.61 ± 0.02
Бисульфит. (К)	6.03 ± 0.01	5.43 ± 0.01	3.95 ± 0.02	2.59 ± 0.02
	6.03 ± 0.01	5.42 ± 0.01	3.95 ± 0.02	—
Хлопковая	6.05 ± 0.02	5.39 ± 0.01	3.94 ± 0.03	2.63 ± 0.01
	6.05 ± 0.02	5.39 ± 0.01	3.94 ± 0.03	—

Таблица 4

Степень кристалличности и размеры ОКР исследованных образцов целлюлозы

Образец целлюлозы	СК (%)	Размер кристаллитов, D _{hkl} (Å), в направлениях	
		[100]	[001]
Ф исходная	78	48	45
Ф после набухания	83	47	45
С исходная	77	48	42
С после набухания	82	47	41
К исходная	80	39	48
К после набухания	80	39	—
Хлопковая исх.,	79	63	53
после набухания	82	65	—
Расчет из ширины отражений		(200)	(004)

$\Delta SK = \pm 3\%$, $\Delta D_{hkl} = \pm 5\text{ Å}$

Как видно из табл. 4, все исследованные исходные образцы целлюлозы имеют одинаковую в пределах погрешности СК. Следует отметить, что значение СК хлопковой целлюлозы совпадает с литературными данными [7], [8]. После взаимодействия с водой СК сульфатных С и К

целлюлоз возрастает примерно на 5 %. Этот результат незначительно выходит за предел погрешности эксперимента.

В исходных образцах исследованных целлюлоз размер ОКР в направлении оси волокна ([001]) составляет $42 \div 53\text{ Å}$, то есть равен 4–5 целлюлозным фрагментам. Это значение соответствует приводимым в литературе данным о длине микрофибрилл [6].

Наибольший поперечный размер (направление [100]) имеют микрофибриллы хлопковой целлюлозы (63 Å, то есть ~8 элементарных ячеек). Наименьший поперечный размер имеют микрофибриллы бисульфитной целлюлозы (39 Å, то есть ~5 элементарных ячеек).

Взаимодействие с водой не приводит к изменениям размеров областей кристалличности.

Таким образом, размер ОКР в направлениях [100] и [001] фактически соответствует толщине и длине упорядоченных областей элементарных фибрилл и не меняется в набухшей в воде целлюлозе. Практически не изменяется и СК. Данные результаты согласуются с высказываемыми в литературе предположениями о том, что проникновению воды и набуханию наиболее доступны аморфные области целлюлозы [5], [8]. Набухание аморфной целлюлозы приводит к появлению дополнительного рассеяния на «хвосте» отражения (200) (рис. 4). Возрастание интенсивности данного отражения в набухшей целлюлозе можно объяснить уменьшением угла взаимной дезориентации целлюлозных микрофибрилл при увеличении плотности их упаковки в результате заполнения капиллярно-пористой структуры целлюлозы водой.

Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, ГК № П 415 от 30.07.09, а также гранта РФФИ «Север» № 08-02-98802.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авакова О. Г., Боголицин К. Г. Растительная клетчатка: структура, свойства, применение // Известия вузов. Лесной журнал. 2004. № 4. http://www.agtu.ru/hpd_2004_4/sx/art/316249/cp/1/br/316219/discart/316249.html (дата обращения: 18.10.2009)
2. Алешина Л. А., Мелех Н. В., Фофанов А. Д. Исследование структуры целлюлоз и лигнинов различного происхождения // Химия растительного сырья. 2005. № 3. С. 31–59.
3. Алешина Л. А., Фофанов А. Д. Рентгеноструктурный анализ аморфных материалов. Петрозаводск: Изд-во ПГУ, 1987. 85 с.
4. Грунин Ю. Б., Смотрина Т. В., Грунин Л. Ю., Лежнина М. М., Гогелашвили Г. Ш., Грунина Н. Г., Красильникова С. В. Возможности ЯМР в анализе структурных и сорбционных свойств биополимеров // Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения. 2001. № 4. http://chem.kstu.ru/butlerov_comm/vol1/cda1/data/JCHEM&CS/RUSSIAN/n4/appl4/yal2000/0sdms41/0sdms41.htm (дата обращения 18.10.2009)
5. Дулькин Д. А., Южанинова Л. А., Миронова В. Г., Спиридонов В. А. Интенсификация процессов разволокнения макулатуры и последующего размола полученной массы // Известия вузов. Лесной журнал. 2005. № 1–2. С. 104–123.
6. Комаров В. И. Деформация и разрушение волокнистых целлюлозно-бумажных материалов. Архангельск: Изд-во Архангельского гос. техн. ун-та, 2002. 440 с.
7. Якунин Н. А., Завадский А. Е. Изменение структуры аморфной фазы хлопковой целлюлозы при взаимодействии с парами воды // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 2004. Т. 46. № 6. С. 1023–1029.
8. Якунин Н. А., Завадский А. Е., Морыганов А. П. Изменение надмолекулярной структуры хлопковых волокон при сорбции паров воды // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 2003. Т. 45. № 5. С. 767–772.
9. Thygesen A., Oddershede J., Lilholt H., Thomsen A. B., Stahl K. On the determination of crystallinity and cellulose content in plant fibres // Cellulose. 2005. № 12. P. 563–576.

УДК 630*372/375

ВЛАДИМИР ЯКОВЛЕВИЧ ШАПИРО

доктор технических наук, профессор кафедры высшей математики лесоинженерного факультета, Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С. М. Кирова
unpplta@mail.ru

ИГОРЬ ВЛАДИСЛАВОВИЧ ГРИГОРЬЕВ

доктор технических наук, профессор кафедры технологии лесозаготовительных производств лесоинженерного факультета, Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С. М. Кирова
silver73@inbox.ru

ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ЛЕПИЛИН

аспирант кафедры технологии лесозаготовительных производств лесоинженерного факультета, Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С. М. Кирова
tlzp@inbox.ru

АНТОНИНА ИВАНОВНА ЖУКОВА

доцент кафедры технологии лесозаготовительных производств лесоинженерного факультета, Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С. М. Кирова
tlzp@inbox.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПЛОТНЕНИЯ ПОЧВОГРУНТА В БОКОВЫХ ПОЛОСАХ ТРЕЛЕВОЧНОГО ВОЛОКА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТРАССЫ ДВИЖЕНИЯ

В статье представлена модель объемного уплотнения почвы трелевочными тракторами, позволяющая прогнозировать степень ее уплотнения в полосах, прилегающих к волокам, с учетом изменчивости трассы движения тракторов.

Ключевые слова: трелевка, уплотнение почвы, трасса движения, поворот трактора

Проблема уплотнения почвогрунтов, разрушение их структуры в процессе циклического нагружения массой трелевочного трактора и трелевочной системы (ТС) на его базе, является актуальной. Решению вопросов прогнозирования деформации и уплотнения почвогрунта под воздействием движителей машин и древесины при использовании одномерных моделей о вдавливании штампа посвящены работы [1], [2], [3] и др.

Исследования объемной модели деформирования грунта в главных напряжениях направлены на минимизацию вредного воздействия техники на подрост и его корневую систему при многократном проходе ТС [8], что обусловлено требованием движения по заранее намеченным трассам волоков. Однако в процессе трелевки точно выдержать заданное направление движения не представляется возможным, и трактор вынужден неоднократно совершать поворотные движения. В этом случае грунт находится в объемном напряженно-деформированном состоянии и напряжения возникают на произвольных, в общем случае – неглавных площадках, что обуславливает возникновение дополнительных касательных напряжений в направлении, перпендикулярном действию нормальной нагрузки.

Рассмотрим действие на грунт сосредоточенной силы $Q = G + Q_1$, где G – сила тяжести

трактора, Q_1 – сила тяжести пачки, размещенной на тракторе (рис. 1). Процесс деформирования происходит в пространственной декартовой системе координат $Oxyz$, оси которой принимаются главными, а на элементарных площадках массива действуют соответствующие главные напряжения $\sigma_1 = \sigma_z$, $\sigma_2 = \sigma_y$, $\sigma_3 = \sigma_x$, тогда как касательные напряжения отсутствуют.

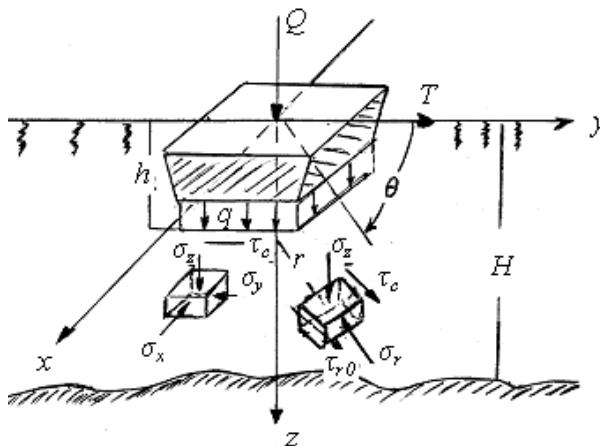


Рис. 1. Схема объемного напряженного состояния грунта при повороте штампа

В процессе погружения грунтозацепа (штампа) на глубину h происходит уплотнение грунта, который испытывает действие вертикальной нагрузки (вертикального давления) q . Поскольку к штампу кроме вертикальной силы Q приложена касательная (горизонтальная) сила T тяги трактора, возникает деформация грунта в направлении действия этой силы. Следствием этого является формирование горизонтальной нагрузки τ_θ (горизонтального давления), характеризующей величину удельного сопротивления грунта срез.

В момент маневра трактора и отклонения ТС от заданного направления движения на угол θ деформирование грунта целесообразно рассмотреть в цилиндрической системе координат $Ozr\theta$. Компоненты тензора напряжений в этой системе в общем случае при наличии касательных напряжений $\tau_{r\theta}$, совпадающих по направлению с действием нагрузки τ_c , определяются соотношениями [4]:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \sigma_1; \quad \sigma_r = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta; \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta; \quad \tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta.\end{aligned}\quad (1)$$

Из соотношений (1) следует, в частности, что при $\theta = 0$ компоненты тензора напряжений являются главными, то есть имеем:

$$\sigma_z = \sigma_1, \quad \sigma_r = \sigma_2, \quad \sigma_\theta = \sigma_3, \quad \tau_{r\theta} = 0,$$

и будут определяться соотношениями [3]:

$$\sigma_z = -\frac{3Q}{2\pi} z^3 (r^2 + z^2)^{-5/2}, \quad (2a)$$

$$\sigma_r = \frac{Q}{2\pi} \left\{ (1-2\nu) \left[\frac{1}{r^2} - \frac{z}{r^2} (r^2 + z^2)^{-1/2} \right] - 3r^2 z (r^2 + z^2)^{-5/2} \right\}, \quad (2б)$$

$$\sigma_\theta = \frac{Q}{2\pi} \left\{ (1-2\nu) \left[-\frac{1}{r^2} + \frac{z}{r^2} (r^2 + z^2)^{-1/2} \right] + z (r^2 + z^2)^{-3/2} \right\}, \quad (2в)$$

где ν – коэффициент бокового расширения (коэффициент Пуассона).

Из анализа соотношений (2а)–(2в) можно заключить, что если среда абсолютно несжимаема ($\nu = 0,5$), то уравнения, определяющие напряжения в вязко-упругой среде, трансформируются в уравнения чистой упругости. Применительно к поставленной задаче трелевки лесоматериалов такое состояние почвы характерно для весенних и осенних периодов, когда она чрезмерно увлажнена и глубина ее слоев в таком состоянии достигает 0,5 м [1].

На рис. 2 при исходных данных $Q = G + Q_1 = 150 + 40 = 190$ кН и $\nu = 0,35$ представлены зависимости величины $\tau_{r\theta}$, кПа, от координаты r , характеризующей величину удаления элемента массива от штампа, м, для трех значений угла поворота θ .

Как видно из рис. 2, для всех трех значений углового параметра θ отрицательный показатель

степени в экспоненциальной функции обуславливает достаточно интенсивное снижение касательных напряжений в массиве грунта с ростом величины r , то есть по мере удаления от трассы волока.

Необходимо также отметить, что при $r \rightarrow 0$, то есть рассматривая в одномерной постановке процесс деформирования грунта в непосредственной близости от штампа, снижение вертикальных напряжений σ_z подчиняется степенному закону и происходит пропорционально величине $1/z^2$. В этом случае связь σ_z с величиной нормальной нагрузки q описывается с помощью зависимости [1]:

$$\sigma_z = \frac{q}{1 + (z/aD)^2}, \quad (3)$$

где a, D – параметры штампа.

Из (3) следует, что при $z = 0$ $\sigma_z = q$.

Под действием давления q и погружении штампа на глубину h происходит деформация прилегающего элементарного слоя грунта.

Вертикальную координату z целесообразно ограничить от 0 до $H - h$, где H – размер зоны распространения деформаций, то есть удаление твердого недеформируемого основания почвы от свободной поверхности. Тем самым будем использовать подвижную цилиндрическую систему координат с перемещением центра системы (точки O) вглубь массива по мере погружения штампа.

Величина нагрузки q при вдавливании штампа шириной b на глубину h с учетом вертикального давления в боковых полосах, удаленных на расстояние r от направления волока, определена в [8]:

$$q = \frac{E H k(r, h)}{k_\phi R} \left(\frac{1}{\arctg H/R} - \frac{1 - h/H}{\arctg \frac{H-h}{R}} \right), \quad (4)$$

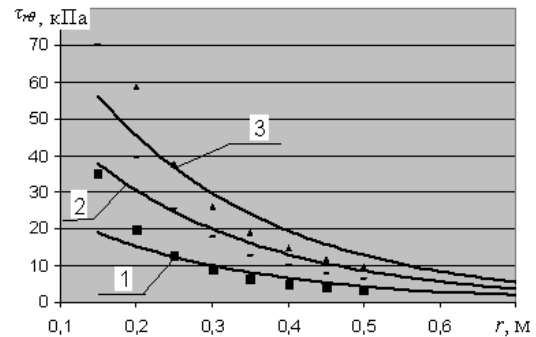


Рис. 2. Изменение величины касательного напряжения по мере удаления от направления волока и роста угла поворота ТС: 1 – $\theta = 5^\circ$ ($\nu = 35,632e^{-4,2291x}$ $R^2 = 0,9195$); 2 – $\theta = 10^\circ$ ($\nu = 70,992e^{-4,2291x}$ $R^2 = 0,9195$); 3 – $\theta = 15^\circ$ ($\nu = 105,81e^{-4,2291x}$ $R^2 = 0,9195$); (здесь и далее R^2 – коэффициент детерминации)

где E – модуль деформации,

$$k_{\varphi} = tg^{-5/3} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$$

– коэффициент, учитывающий увеличение общей деформации грунта при погружении ядра уплотнения, φ – угол внутреннего трения, $R = aD$ – параметр штампа, определяемый через величины a и D :

$$a = 1 + \frac{b}{H},$$

D – диаметр круга, равновеликий площади F грунтозацепа, $k(r, h)$ – безразмерная функция, учитывающая снижение напряжений на глубине зоны деформаций h по мере удаления расчетной точки от границы волока.

Величина удельного сопротивления грунта срезу τ_c связана с вертикальной нагрузкой q обобщенным уравнением Кулона:

$$\tau_c = qtg\varphi + C_0, \quad (5)$$

где C_0 – внутреннее сцепление грунта.

На рис. 3 при исходных данных $E = 400$ кПа, $\nu = 0,35$, $C_0 = 12$ кПа, $\varphi = 15^\circ$, $b = 0,08$ м, $F = 0,04$ м², $H = 0,5$ м представлены зависимости $\tau_c(r)$ для трех состояний погружения штампа: $h = 0,05, 0,13$ и $0,25$ м. Величина $h = 0,13$ м соответствует глубине грунтозацепа l_d .

Из анализа данных рис. 3 следует, что с ростом глубины погружения грунтозацепа от 0,05 до 0,13 м, то есть на его полную глубину, угловой коэффициент в уравнении прямых, характеризующий интенсивность снижения нагрузки, пропорционально увеличивается по модулю с 4,96 до 12,53. При дальнейшем погружении грунтозацепа пропорциональность не выполняется, что свидетельствует о проявлении нелинейных процессов деформирования грунта под действием вертикальных и соответствующих горизонтальных нагрузок.

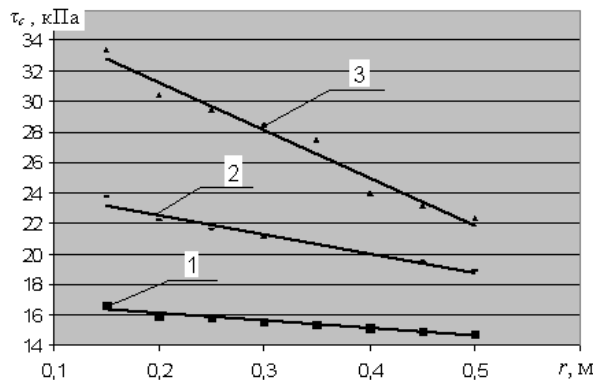


Рис. 3. Зависимость величины горизонтального давления от расстояния удаления от трассы волока:

- 1 – $h = 0,05$ ($y = -4,9571x + 17,129$ $R^2 = 0,9616$);
 2 – $h = 0,13$ ($y = -12,531x + 25,006$ $R^2 = 0,9612$);
 3 – $h = 0,25$ ($y = -31,307x + 37,521$ $R^2 = 0,9674$)

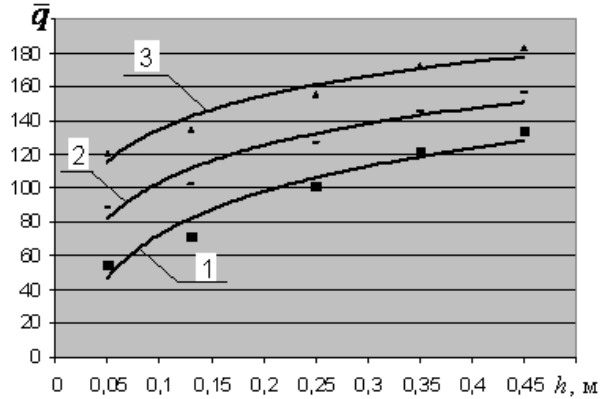


Рис. 4. Зависимости приведенного давления от величины погружения грунтозацепа:

- 1 – $\theta = 5^\circ$ ($y = 28,594\ln(x) + 200,94$ $R^2 = 0,9417$);
 2 – $\theta = 10^\circ$ ($y = 31,702\ln(x) + 176,48$ $R^2 = 0,9381$);
 3 – $\theta = 15^\circ$ ($y = 36,864\ln(x) + 157,48$ $R^2 = 0,9464$)

Суммируя величину τ_c с величиной касательного напряжения $\tau_{r\theta}$, получим некоторую результирующую нагрузку τ на грунт, действующую в элементарном слое на глубине h в направлении, перпендикулярном действию нормальной нагрузки q . Тогда величину приведенного давления [1] можно определить как $\bar{q} = \sqrt{q^2 + \tau^2}$.

На рис. 4 для трех значений углового параметра $\theta = 5, 10$ и 15 град. при значении $r = 0,05$ м (в непосредственной близости от волока) представлены зависимости $\bar{q}(h)$.

Процесс уплотнения при циклических нагрузках, когда трелевочный трактор проходит N раз по одному и тому же участку трассы, оценивается с помощью соотношения [2]:

$$\bar{\rho}_1 = 1 + \frac{\omega b \bar{q} (1 - \nu^2)}{EH} (1 + \chi \lg N), \quad (6)$$

где $\bar{\rho}_1$ – относительная плотность:

$$\bar{\rho}_1 = \frac{\rho_1}{\rho_0},$$

$\rho_0 = 850$ кг/м³ – начальная плотность почвы (плотность влажного почвогрунта естественного сложения), χ – эмпирический коэффициент интенсивности накопления необратимой деформации почвы при повторных нагрузках (в расчетах принят равным 1); ω – эмпирический коэффициент, зависящий от размера и формы опорной поверхности (в расчетах принят равным 2,15).

Уплотнение $\bar{\rho}_1$ соответствует фазе упругой деформации $\varepsilon_1 = \bar{\rho}_1 - 1$, когда осуществляется процесс активного формирования ядра уплотнения.

Вязкопластическая деформация грунта ε_2 характеризует вторую фазу процесса уплотнения, когда сила сопротивления уплотнению соизмерима с силой сопротивления сдвигу. Величина уплотнения $\bar{\rho}_2$ определяется в соответствии с результатами исследований [7], а соответствующая деформация равна $\varepsilon_2 = \bar{\rho}_2 - 1$.

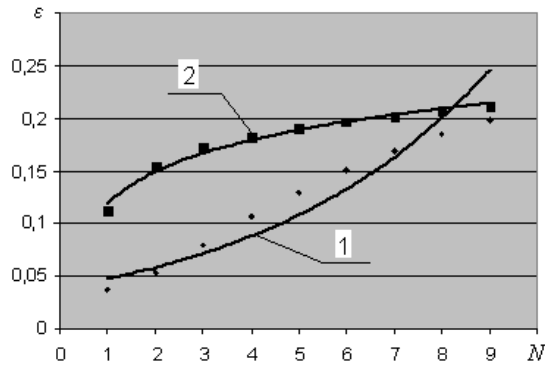


Рис. 5. Изменение деформаций с ростом числа циклов проходки:

1 – упругая деформация, $\varepsilon_1 (y = 0,0433\ln(x) + 0,1195 R^2 = 0,9846)$;
2 – вязкопластическая деформация, $\varepsilon_2 (y = 0,0386e^{0,2061x} R^2 = 0,9161)$

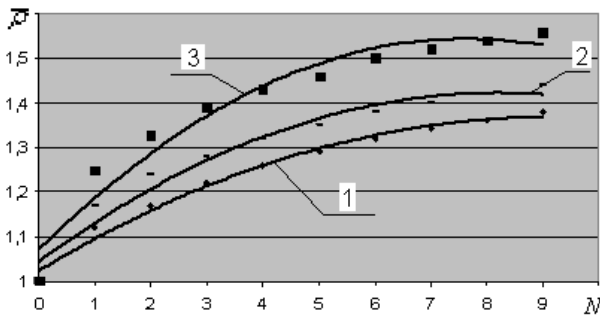


Рис. 6. Зависимости $\bar{\rho}(N)$ с учетом изменения угла поворота ТС:

1 – $\theta = 0 (y = -0,0081x^2 + 0,1237x + 1,0722 R^2 = 0,9462)$;
2 – $\theta = 10 (y = -0,0056x^2 + 0,0919x + 1,0462 R^2 = 0,9645)$;
3 – $\theta = 25 (y = -0,0041x^2 + 0,0752x + 1,0252 R^2 = 0,9867)$

На рис. 5 представлены зависимости $\varepsilon_1(N)$ (кривая 1) и $\varepsilon_2(N)$ (кривая 2), анализ данных которых показывает, что по достижении определенного числа циклов (для данного примера расчета $N = 8$) вязкопластическая деформация практически не увеличивается. В механике грунтов [5] этому состоянию соответствует завершение процесса переупаковки грунта, и дальнейшее уплотнение возможно только с развитием упругих деформаций.

Истинная деформация определяется как $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$, после чего величину суммарного уплотнения можно оценить в виде: $\bar{\rho} = \varepsilon + 1$.

Изменение величины относительной плотности $\bar{\rho}$ от N при погружении грунтозацепа на полную глубину ($h = 0,13$ м) для трех значений углового параметра $\theta = 0, 10$ и 25 град. (кривые 1, 2 и 3 соответственно) представлено на рис. 6.

Как видим, по достижении величиной цикличности уровня $N = 7-8$ графики выходят на свои асимптоты, то есть дальнейшее уплотнение практически не происходит. Можно полагать, что произошли необратимые структурные изменения элементов массива грунта и процесс его упаковки завершен.

Таким образом, результаты выполненных исследований свидетельствуют о том, что величина углового параметра θ , достигая значений 10 и более градусов, оказывает существенное влияние на процесс циклического уплотнения грунта. Данный параметр необходимо учитывать в прогнозных оценках допустимых размеров зон охранных полос, снижающих вредное воздействие ТС на корневую систему подраста и оставляемых на доращивание деревьев при выборочных рубках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агейкин А. С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. М.: Машиностроение, 1972. 183 с.
2. Анисимов Г. М., Большаков Б. М. Основы минимизации уплотнения почвы трелевочными системами. СПб.: СПбГЛТА, 1998. 106 с.
3. Бленд Д. Теория линейной вязкоупругости. М.: Мир, 1965. 199 с.
4. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений. М.: Недра, 1989. 270 с.
5. Валов С. С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высш. шк., 1978. 447 с.
6. Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Жукова А. И. Влияние сдвиговых деформаций на процесс циклического уплотнения почвы // Естественные и технические науки. 2006. № 1(21). С. 174–180.
7. Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Жукова А. И. Особенности динамического уплотнения почвы при ее циклическом нагружении // Актуальные проблемы современной науки. 2006. № 3(30). С. 286–293.
8. Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Рудов С. Е., Жукова А. И. Модель процесса циклического уплотнения грунта в полосах, прилегающих к трелевочному волоку // Вестник КрасГАУ. 2010. № 2. С. 8–14.

УДК 597.585.2: 591.4: 519.22

ЕЛЕНА АЛЕКСАНДРОВНА КЛЮКИНА

кандидат технических наук, доцент кафедры теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет
elenak@psu.karelia.ru

ИРИНА МИХАЙЛОВНА ДЗЮБУК

кандидат биологических наук, доцент кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет
ikrup@petrsu.ru

МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЕРША ЛАХТИНСКОЙ ГУБЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

В работе представлены результаты математико-статистического анализа данных по следующим морфофизиологическим параметрам ерша Лахтинской губы Онежского озера: возраст, масса, длина, упитанность, пол, индексы органов. Высокие показатели массы, размера и упитанности ерша свидетельствуют о благоприятных условиях для него в Лахтинской губе.

Ключевые слова: анализ данных, морфофизиологические параметры, ерш, Онежское озеро, выборка, сравнение двух независимых выборок, компонентный анализ

ВВЕДЕНИЕ

С 1999 года сотрудниками лаборатории экологических проблем Севера Петрозаводского государственного университета на базе Шелтозерской учебно-производственной станции проводятся ихтиологические исследования в рамках работ по мониторингу юго-западного района Онежского озера (Лахтинская губа), целью которых является изучение динамики состояния экосистемы, выявление возможностей использования и условий сохранения ее биоресурсов. В ходе исследований проводятся сбор и обработка материалов по различным видам рыб. В уловах в больших количествах встречается ерш, что дало возможность собрать репрезентативный материал.

Цель настоящего исследования – провести математико-статистический анализ данных по результатам морфофизиологического исследования ерша Лахтинской губы Онежского озера.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отлов рыбы проводился в летний период (июль, 2002 год) с помощью ставных сетей. Были исследованы и проанализированы 94 особи возраста от 2+ до 8+, из них 75 самок и 19 самцов (табл. 1). Обработка ихтиологического материала осуществлялась по общепринятой методике [12].

При математико-статистической обработке результатов исследования применялся дескриптивный (описательный) анализ, методы сравнения двух независимых выборок и компонентный анализ. Оценка достоверности различий между средними арифметическими осуществлялась по критерию Стьюдента (t-тест), а между диспер-

сиями – по критерию Фишера (F-тест) (при нормальном распределении признака). Нормальность распределения признака определяли по тесту Шапиро – Уилкса (W-тест). Оценка по t-, F- и W-тестам проводилась для уровня значимости $\alpha = 0,05$. Все математические операции, графические построения и статистическая обработка данных проведены с использованием стандартных программных пакетов Word и Excel и компьютерной программы StatGraphics Centurion XV.

Таблица 1
Количество материала (n = 94)

Пол	Возраст							Всего
	2+	3+	4+	5+	6+	7+	8+	
Самки	4	16	22	15	6	6	6	75
Самцы	3	4	9	3	0	0	0	19
Всего	7	20	31	18	6	6	6	94

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выборка состоит из самок и самцов. В данном случае мы имеем дело с альтернативным признаком (самка – самец). Таким образом, из 94 проб 75 содержат самок (значение 1), а 19 – не содержат (значение 0). Таким образом, выборка состоит из 75 единиц и 19 нулей. Доля вариант со значением 1 (доля самок) составляет:

$$p = \frac{75}{94} = 0,8$$

(то есть 80 %), тогда доля самцов составляет $q = 0,2$ (то есть 20 %). Отметим, что доля самок сильно отличается от доли самцов (в 4 раза), поэтому наиболее точные границы доверительного

интервала для альтернативного признака «пол ерша» даст ϕ -преобразование Фишера [7]. Итак, найдем границы доли самок ерша $p = 0,8$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$:

$$\phi_{лев.} = 2,214 - 1,96 \cdot \frac{1}{\sqrt{94}} = 2,012,$$

$$\phi_{прав.} = 2,214 + 1,96 \cdot \frac{1}{\sqrt{94}} = 2,416, \text{ тогда}$$

$$p_{лев.}(2,012) = 71,4 \%, \quad p_{прав.}(2,416) = 87,4 \%.$$

То есть доля самок в генеральной совокупности (популяции ершей) составляет минимум 71,4 %, а максимум – 87,4 %.

Самки ерша были представлены возрастными группами от 2+ до 8+, самцы – от 2+ до 5+. Наибольшее количество особей как самок, так и самцов было возраста 4+ (пятiletки) (рис. 1). В отдельных возрастных группах соотношение полов было сдвинуто в сторону самок (рис. 2).

Размеры ерша были в пределах 20,4–82,0 г и 13,9–18,7 см (табл. 2), что значительно превышает размеры ерша из других районов Онежского озера. Например, размеры ерша Кондопожской губы (2+...7+) составляют 16,6–30,6 г и 11,7–14,3 см, а ерша района Кузаранды (1+...5+) – 7,9–14,6 г и 9,8–11,9 см [9]. Известно, что в большинстве карельских водоемов обитает мелкий ерш – 5–10 см и до 15 г, но в некоторых озерах он может достигать веса 50 и даже 100 г [5]. Ерш – медленно растущий вид [6], [11]. Однако для ерша Лахтинской губы показатели роста (прирост длины, массы) значительны. Так, величины абсолютного прироста ерша Лахтинской губы находятся в диапазоне от 1,6 до 24,3 г и от 0,2 до 2,2 см. Максимальный абсолютный прирост массы и длины ерша характерен для возрастного периода 7+...8+ – 24,3 г, 2,2 см. Величина относительного прироста массы ерша наи-

большая в возрасте 5+...6+ – 1,5 г, относительный прирост длины для всех возрастных периодов у ерша находится в пределах 1,0–1,1.

Потенциальные возможности роста ерша велики, и их реализация возможна в условиях хорошей обеспеченности пищей. Вероятно, что в условиях Лахтинской губы сложились благоприятные кормовые условия для ерша. Это подтверждают и результаты по упитанности ерша.

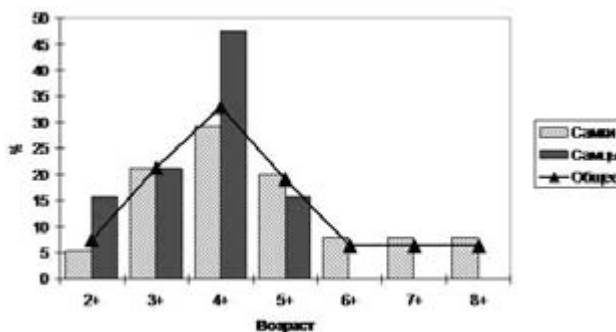


Рис. 1. Возрастной состав ерша Лахтинской губы Онежского озера (июль, 2002 год)

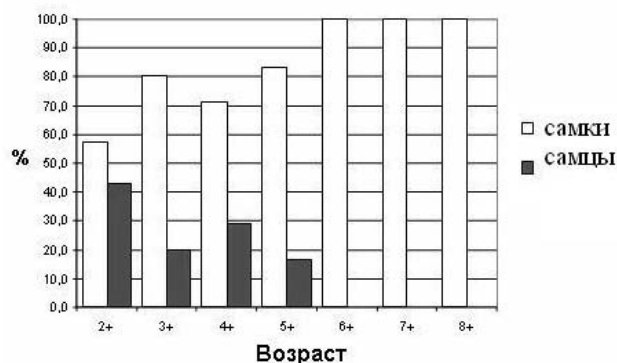


Рис. 2. Соотношение самок и самцов ерша Лахтинской губы Онежского озера (июль, 2002 год)

Таблица 2

Размерно-весовые показатели ерша
Лахтинской губы (июль, 2002 год) (n = 94)

Параметры		Возраст						
		2+	3+	4+	5+	6+	7+	8+
Масса, г	♀♂	20,4 ± 3,8	29,1 ± 3,1	30,7 ± 1,4	35,6 ± 1,5	52,2 ± 2,4	57,7 ± 4,2	82,0 ± 6,0
	♀	23,8 ± 6,2	28,7 ± 3,8	31,8 ± 1,7	36,6 ± 1,6	52,2 ± 2,4	57,2 ± 4,2	82,0 ± 6,0
	♂	15,8 ± 2,2	30,5 ± 2,1	28,1 ± 2,2	30,3 ± 2,0	–	–	–
Длина тела, см	♀♂	13,9 ± 1,2	14,1 ± 0,5	14,3 ± 0,3	15,3 ± 0,3	16,0 ± 0,2	16,5 ± 1,0	18,7 ± 0,4
	♀	13,4 ± 1,4	13,9 ± 0,7	14,6 ± 0,3	15,4 ± 0,3	16,0 ± 1,2	16,5 ± 1,0	18,7 ± 0,4
	♂	14,6 ± 2,5	14,8 ± 0,2	13,5 ± 0,5	14,8 ± 0,6	–	–	–
Упитанность	♀♂	1,1 ± 0,2	1,3 ± 0,1	1,4 ± 0,1	1,2 ± 0,1	2,1 ± 0,7	1,9 ± 0,7	1,5 ± 0,1
	♀	1,3 ± 0,1	1,3 ± 0,1	1,3 ± 0,1	1,3 ± 0,1	2,1 ± 0,7	1,9 ± 0,7	1,5 ± 0,1
	♂	0,9 ± 0,4	1,3 ± 0,2	1,5 ± 0,1	1,1 ± 0,1	–	–	–

Примечание. ♀♂ – общее, ♀ – самки, ♂ – самцы.

Упитанность (u) рассчитывали по следующей формуле:

$$u = \frac{100m}{d^3},$$

где m – масса тела в г, d – длина тела без хвостового плавника в см. Величина u была в пределах 1,1–2,1, наиболее упитанными были рыбы (самки) возраста 6+...7+, наименее упитанными – возраста 2+ (табл. 2). В возрасте 2+ и старше ерш переходит от питания бентосом к хищничеству. Поэтому смена пищевых объектов, возможно, отражается на его упитанности.

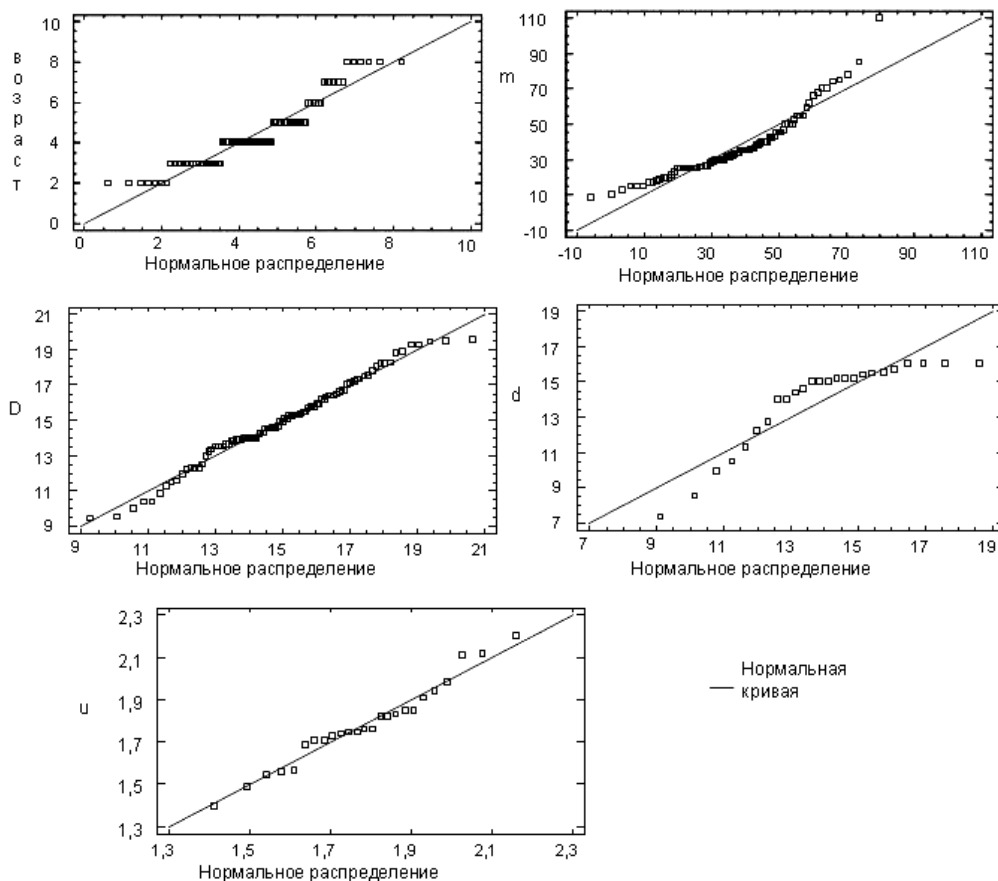
В ходе анализа была проведена проверка нормального характера распределения ершей Лахтинской губы Онежского озера для уровня значимости $\alpha = 0,05$ (для 94 особей) с помощью W-теста по следующим признакам: возраст, масса, длина тела, длина тела без хвостового плавника и упитанность. Результаты проверок представлены в табл. 3. Заметим, что только для длины тела (D) извлеченное из теста значение $p > 0,05$ ($p = 0,150215$), следовательно, гипотеза о нормальном распределении длины тела ершей Лахтинской губы принимается с надежностью, равной 95 %. Для остальных признаков с 5 % вероятностью ошибки гипотеза о нормальном распределении отвергается, причем для упитан-

ности значение p настолько мало, что оно обозначено как 0,00.

На диаграммах нормального распределения (также называемых Quantile-Quantile Plot) видно, как близко заданное распределение приближается к нормальному (рис. 3). На диаграммах каждое наблюдаемое значение (ось ординат) сравнивается со значением, ожидаемым при нормальном распределении (ось абсцисс). Также оценка соответствия данного распределения нормальному распределению представлена на гистограммах (рис. 4), тонкой линией показана кривая нормального распределения.

Таблица 3

Тесты на нормальное распределение		
Тест	Статистика	p (P-Value)
Шапиро – Уилкс (W-тест)	Для возраста	
	0,88831	1,59334E-9
	Для массы тела	
	0,899556	2,66951E-8
	Для длины тела (D)	
	0,969756	0,150215
	Для длины тела без хвоста (d)	
	0,960445	0,0306247
	Для упитанности	
	0,649041	0,00

Рис. 3. Диаграммы нормального распределения для возраста, массы (m), длины тела D и d , упитанности (u) ерша

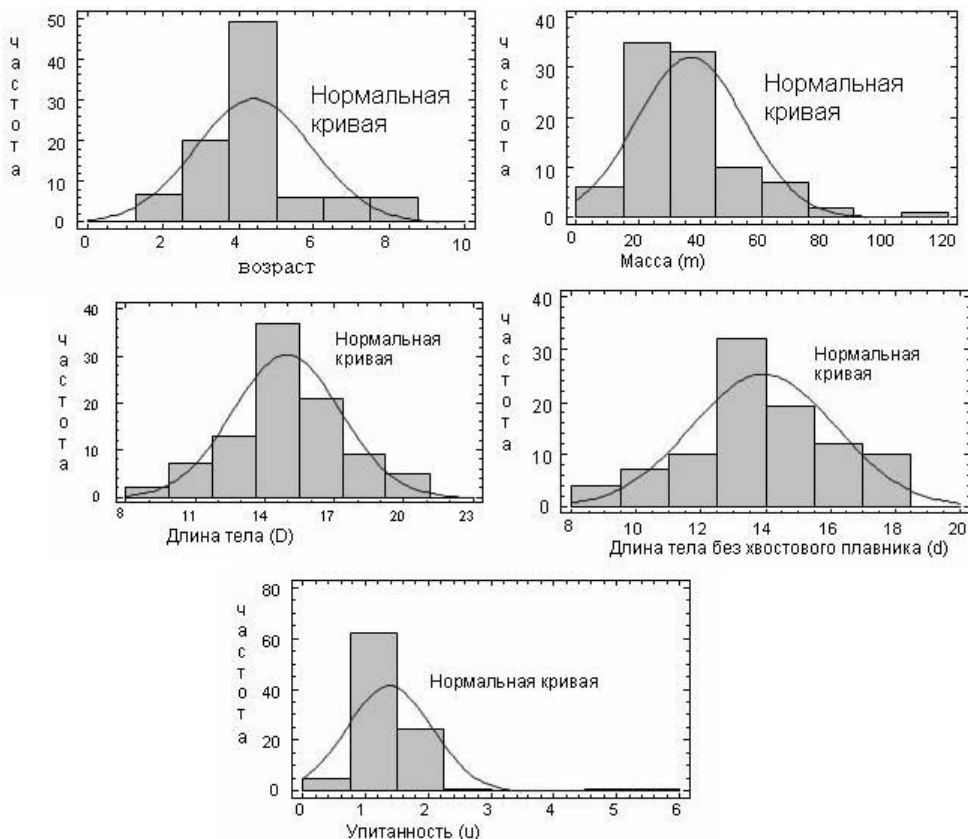


Рис. 4. Гистограммы соответствия нормальному распределению для возраста, массы (m), длины тела D и d, упитанности (u) ерша

Таблица 4

Общая статистическая характеристика для массы, длины тела и упитанности ерша (2+...5+)

Статистики	Масса (m)		Длина тела (D)		Упитанность (u)	
	самки	самцы	самки	самцы	самки	самцы
Объем	57	19	57	19	57	19
Среднее	31,614	27,0263	14,5404	14,1684	1,26601	1,28563
Медиана	32,0	26,0	14,5	14,3	1,2444	1,2289
Дисперсия	117,884	50,9576	4,16102	3,63228	0,117528	0,213995
Стандартное отклонение	10,8574	7,13846	2,03986	1,90585	0,342824	0,462596
Коэффициент вариации	34,3437 %	26,413 %	14,0289 %	13,4514 %	27,0791 %	35,982 %
Минимальный предел варьирования	9,0	12,5	9,5	9,6	0,4395	0,3662
Максимальный предел варьирования	68,0	45,0	19,3	17,3	2,1478	2,3324
Размах выборки	59,0	32,5	9,8	7,7	1,7083	1,9662
Стандартизированная асимметрия	1,44497	0,545528	-0,481319	-1,14782	1,29383	0,670024
Стандартизированный эксцесс	2,1101	1,65011	0,895464	0,63802	0,967495	0,929577

С помощью статистического пакета Stat-Graphics был проведен анализ отличий между самцами и самками ерша Лахтинской губы Онежского озера по различным признакам – массе, длине тела, упитанности, а также по индексам органов. Так как самцы возраста старше 5+ в выборке не представлены, для исследования отличий между самцами и самками ерша по этим признакам рассмотрена группа особей возраста 2+...5+ (всего 76 особей). В табл. 4 приведена общая статистика обеих выборок для

массы (m), длины тела (D) и упитанности (u) ерша.

Подробнее результаты табл. 4 представлены на рис. 5 с помощью диаграмм частот встречаемости разных значений двух выборок и «ящиков с усами». «Ящики» (окрашенные прямоугольники) демонстрируют доверительные интервалы для средних, «усы» (тонкие линии) – размах варьирования данных, вертикальные линии, делящие каждый ящик на две части, – медианы, а крестиками обозначены средние выборок.

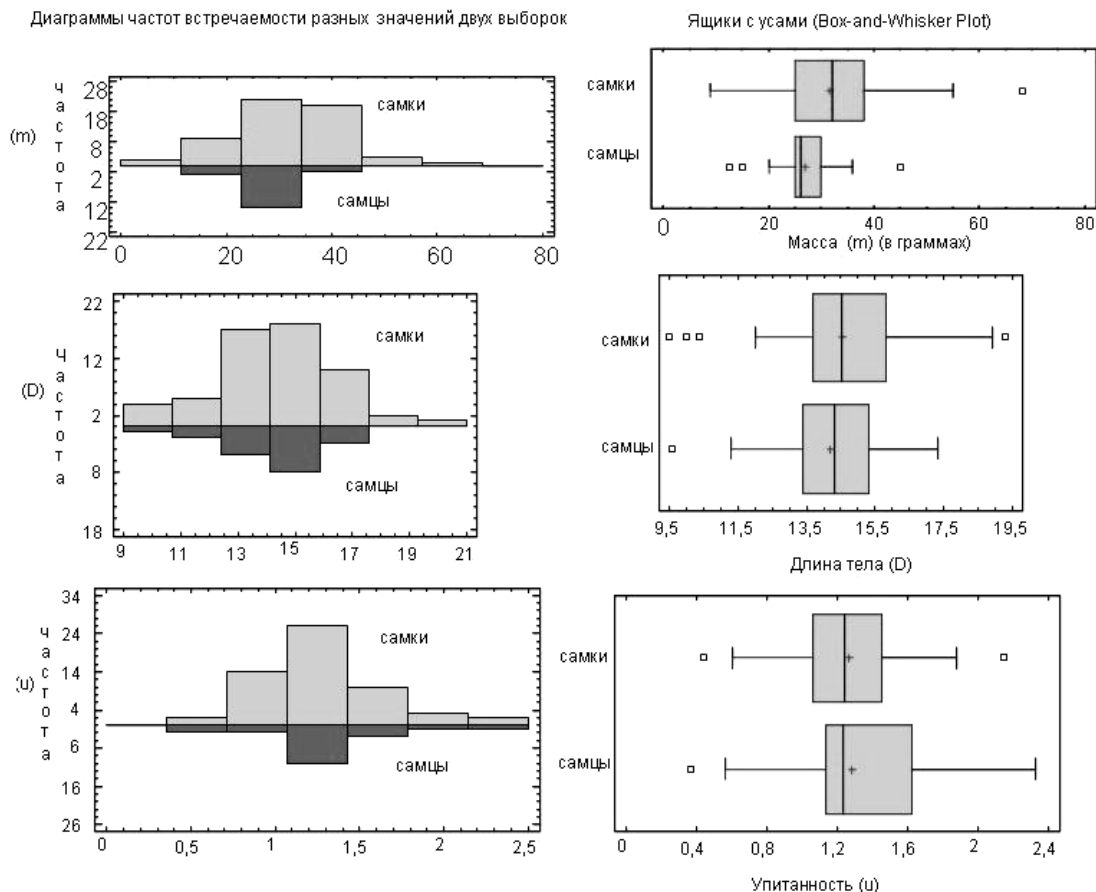


Рис. 5. Диаграммы частот встречаемости разных значений двух выборок и «ящики с усами» (для m, D, u)

Наибольший интерес из статистических характеристик в рамках данного анализа представляют стандартизированные эксцесс и асимметрия, с помощью которых можно определить, относятся ли эти выборки к нормально распределенным. Так, для самцов выборочные значения стандартизованных асимметрии и эксцесса массы тела попадают в нормальный диапазон, для самок стандартизованная асимметрия попадает в этот диапазон, а стандартизованный эксцесс немного (на 0,1101) превысил правую границу нормального диапазона. При этом доверительные интервалы на уровне надежности 95 % для выборочных средних по массе для самок и самцов соответственно равны [28,7332; 34,4949] и [23,5857; 30,467].

Проверка с помощью t-теста подтвердила гипотезу о равенстве среднего значения массы тела самок и самцов на уровне значимости $\alpha = 0,05$: для альтернативной гипотезы о неравенстве средних вычисленное значение вероятности $p = 0,0899609 > 0,05$, то есть альтернативная гипотеза отвергается на уровне значимости $\alpha = 0,05$. Доверительные интервалы на уровне надежности 95 % для стандартных отклонений для самок и самцов соответственно равны [8,23998; 12,0144] и [5,39391; 10,5565]. Отметим, что при-

менение критерия Стьюдента предполагает равенство выборочных дисперсий.

Проверка равенства дисперсий с помощью критерия Фишера показала, что гипотеза о равенстве дисперсий выборок по массе тела не отвергается на уровне значимости $\alpha = 0,05$ ($p = 0,0519313 > 0,05$). Это подтверждается также тем, что 95 % доверительный интервал для отношения различий [0,992631; 4,6309] содержит 1. Заметим, что для данного признака среди самок исследуемой возрастной группы 2+...5+ одна особь возраста 3+ значительно отличается (68 г при длине тела 17,1 см) от особей этого же возраста, для которых максимальный предел варьирования равен 55. Вероятно, возникла ошибка в определении возраста (возможно, при внесении данных в среду Excel). Исключив из рассмотрения данную особь (выброс), получим следующие значения стандартизованных асимметрии и эксцесса по массе: -0,338909 и -0,120373 соответственно, находящиеся в нормальном диапазоне.

Аналогично были проанализированы отличия между самцами и самками ерша по длине тела. Поскольку вычисленные значения стандартизованных асимметрии и эксцесса для обеих выборок находятся в пределах диапазона от -2 до 2 (табл. 4), нет оснований считать, что рас-

пределение выборок по длине тела существенно отличается от нормального. Доверительные интервалы на уровне надежности 95 % для выборочных средних длины тела для самок и самцов соответственно равны [13,9991; 15,0816] и [13,2498; 15,087]. Проверка с помощью t-теста подтвердила гипотезу о равенстве среднего значения по длине тела самок и самцов на уровне значимости $\alpha = 0,05$: для альтернативной гипотезы о неравенстве средних вычисленное значение вероятности $p = 0,486634 > 0,05$, то есть альтернативная гипотеза отвергается на уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Поскольку предположение о нормальном распределении выборок (длина тела самок и самцов) не отвергается, для проверки равенства дисперсий можно воспользоваться F-тестом. Доверительные интервалы на уровне надежности 95 % для стандартных отклонений по длине тела для самок и самцов соответственно равны [1,72216; 2,50239] и [1,44009; 2,81842]. Поскольку вычисленная вероятность $p = 0,778036 > 0,05$, гипотеза о равенстве дисперсий (то есть гипотеза о том, что рассмотренные выборочные дисперсии оценивают одну и ту же генеральную дисперсию) не отвергается на уровне значимости $\alpha = 0,05$. На это же указывает доверительный интервал для отношения различий, который простирается от 0,491544 до 2,29319. Так как этот доверительный интервал содержит значение 1, нет статистически существенного различия между стандартными отклонениями этих выборок на уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Для упитанности вычисленные значения стандартизированных асимметрии и эксцесса для обеих выборок также находятся в пределах

нормального диапазона от -2 до 2 (табл. 4). На уровне значимости $\alpha = 0,05$ t-тест подтвердил гипотезу о равенстве среднего значения упитанности самок и самцов ($p = 0,844168 > 0,05$), а F-тест – гипотезу о равенстве дисперсий обеих выборок ($p = 0,0908117 > 0,05$).

В качестве морфофизиологических индикаторов состояния водной среды и организмов используют показатели массы органов рыб. Для анализа был проведен расчет индексов органов (в ‰), которые позволяют устранить существующую прямую пропорциональную зависимость массы органа от массы тела (табл. 5). Индекс органа (i) определяется по следующей формуле:

$$i = \frac{m_o}{m},$$

где m_o – масса органа (в мг), m – масса тела (в г).

Для ерша Лахтинской губы характерны высокие показатели относительной массы сердца (2,7–3,9 ‰). Например, индексы сердца ерша (2+...7+) из Кондопожской губы Онежского озера составляют 1,8–2,0 ‰, ерша района Кузаранды (1+...5+) – 1,9–2,2 ‰ [9]. Высокая относительная масса сердца, вероятно, является следствием того, что в имеющихся условиях среды Лахтинской губы у ерша высокие затраты энергии на обеспечение жизнедеятельности. В ходе исследований была подтверждена закономерность уменьшения индекса сердца ерша с возрастом.

Для анализа были исследованы отличия между самцами и самками ерша возрастной группы (2+...5+) по индексам сердца. В табл. 6 представлена общая статистика обеих выборок для самок и самцов ерша.

Таблица 5

Индексы органов (‰) ерша Лахтинской губы Онежского озера (июль, 2002 год)

Органы	Половой состав	Возраст						
		2+	3+	4+	5+	6+	7+	8+
Сердце	♀♂	3,9 ± 0,6	3,6 ± 0,2	3,0 ± 0,1	3,0 ± 0,2	2,9 ± 0,2	2,8 ± 0,3	2,7 ± 0,3
	♀	3,8 ± 1,1	3,7 ± 0,2	3,0 ± 0,1	3,1 ± 0,2	2,9 ± 0,2	2,8 ± 0,3	2,7 ± 0,3
	♂	4,0 ± 0,2	3,2 ± 0,4	3,2 ± 0,2	2,7 ± 0,3	–	–	–
Жабры	♀♂	30,8 ± 5,3	31,8 ± 2,4	29,9 ± 1,6	31,2 ± 2,6	32,2 ± 2,7	28,5 ± 2,1	21,6 ± 4,6
	♀	78,3 ± 21,4	104,3 ± 12,6	109,5 ± 7,7	31,6 ± 3,1	32,2 ± 1,7	28,5 ± 2,1	21,6 ± 4,6
	♂	26,4 ± 1,3	26,1 ± 8,2	26,2 ± 3,1	29,4 ± 3,5	–	–	–
Печень	♀♂	15,0 ± 3,3	17,0 ± 1,7	16,5 ± 1,4	19,4 ± 2,0	19,2 ± 2,0	23,0 ± 1,9	20,0 ± 4,3
	♀	42,4 ± 13,3	51,6 ± 9,9	60,8 ± 6,1	20,0 ± 2,4	19,2 ± 2,0	23,0 ± 1,9	20,0 ± 4,3
	♂	10,2 ± 1,1	24,4 ± 5,5	14,3 ± 3,2	16,9 ± 0,4	–	–	–
Селезенка	♀♂	2,4 ± 0,6	2,6 ± 0,2	2,0 ± 0,1	2,0 ± 0,3	2,3 ± 0,8	1,4 ± 0,4	1,2 ± 0,3
	♀	5,0 ± 1,3	7,9 ± 1,0	7,2 ± 0,7	1,8 ± 0,2	2,3 ± 0,8	1,4 ± 0,4	1,2 ± 0,3
	♂	2,3 ± 1,2	2,4 ± 0,2	1,9 ± 0,1	2,9 ± 1,4	–	–	–
Желудок	♀♂	11,2 ± 1,8	10,2 ± 0,5	9,2 ± 0,7	10,3 ± 0,7	11,3 ± 1,4	7,8 ± 0,7	8,9 ± 1,3
	♀	26,6 ± 6,1	31,0 ± 3,4	32,9 ± 2,0	10,9 ± 0,7	11,3 ± 1,4	7,8 ± 0,7	8,9 ± 1,3
	♂	10,1 ± 1,8	10,0 ± 1,1	7,4 ± 1,0	7,2 ± 1,5	–	–	–
Кишечник	♀♂	12,3 ± 4,5	11,2 ± 0,9	10,8 ± 1,1	12,1 ± 1,5	9,9 ± 0,8	10,7 ± 1,6	10,7 ± 1,9
	♀	29,1 ± 6,0	35,5 ± 4,7	37,0 ± 3,6	12,8 ± 1,7	9,9 ± 0,8	10,7 ± 1,6	10,7 ± 1,9
	♂	7,4 ± 1,3	9,0 ± 0,7	9,7 ± 1,5	8,1 ± 1,2	–	–	–

Отметим, что вычисленные значения стандартизированных асимметрии и эксцесса для самок ершей превышают правую границу диапазона от -2 до 2, что указывает на существенные отклонения от нормального распределения. Среди самок исследуемой возрастной группы 2+...5+ у одной самки возраста 2+ индекс сердца намного больше (6,58 %), чем у других самок изучаемой группы (2+...5+), для которых максимальный предел варьирования равен 5,19. Это указывает на то, что либо у этой особи была патология сердца, либо она отличалась высокими энергетическими затратами для обеспечения жизнедеятельности.

Исключив из рассмотрения данную особь, мы получили следующие значения стандартизированных асимметрии и эксцесса для самок: 0,762207 и 0,653316 соответственно, которые, как и значения данных статистик для самцов, принадлежат нормальному диапазону. При этом для уровня значимости $\alpha = 0,05$ проверка с помощью t-теста подтвердила гипотезу о равенстве среднего значения по индексу сердца самок и самцов (так как $p = 0,40498 > 0,05$); критерий Фишера показал, что гипотеза о равенстве дисперсий выборок также подтверждается на данном уровне значимости ($p = 0,387831 > 0,05$).

Индекс жабр ерша был в пределах 21,6–31,8 %, что близко к величине относительной массы жабр ерша Кондопожской губы (30,2–34,8 %) и Кузаранды (28,1–33,1 %) [9]. Индексы жабр имеют прямую связь с изменением уровня газообмена, а интенсивность газообмена и потребность в кислороде зависят от характера пищи и активности рыб. Не выявлена зависимость изменений этого показателя от возраста рыб, однако у ерша в возрасте 8+ был

наименьший индекс жабр по сравнению с рыбами младших возрастов.

Были исследованы отличия между самцами и самками ерша возрастной группы 2+...5+ по индексам жабр. Для обеих выборок значения стандартизированных асимметрии и эксцесса попадают в нормальный диапазон (табл. 6). При этом доверительные интервалы на уровне надежности 95 % для выборочных средних для самок и самцов соответственно равны [29,4207; 34,8688] и [22,1326; 31,2674]. Проверка с помощью t-теста не подтвердила гипотезу о равенстве среднего значения по индексу жабр самок и самцов на уровне значимости $\alpha = 0,05$ ($p = 0,0450151 < 0,05$). Доверительные интервалы на уровне надежности 95 % для стандартных отклонений для самок и самцов соответственно равны [8,66739; 12,5942] и [7,16031; 14,0136]. Проверка равенства дисперсий с помощью критерия Фишера показала, что гипотеза о равенстве дисперсий выборок не отвергается на уровне значимости $\alpha = 0,05$ ($p = 0,731504 > 0,05$), что подтверждается также тем, что 95 % доверительный интервал для отношения различий [0,503623; 2,34954] содержит 1.

Изменения массы печени за счет накопления или расходования углеводов и отчасти белков и жиров позволяют судить о характере метаболизма рыб. Так, индекс печени ерша Лахтинской губы колеблется в широком диапазоне: 15,0–23,0 %. Для сравнения: индекс печени ерша Кондопожской губы составляет 21,7–26,8 %, района Кузаранды – 11,8–14,2 % [9]. Наименьший индекс печени был выявлен у ерша в возрасте 2+. С возраста 3+ происходит увеличение этого показателя, что, вероятно, связано со сменой пищевых объектов (переход к хищничеству) и с изменением метаболизма.

Таблица 6

Общая статистическая характеристика для индексов органов ерша (2+...5+)

Статистики	Индекс сердца		Индекс жабр		Индекс печени		Индекс селезенки	
	самки	самцы	самки	самцы	самки	самцы	самки	самцы
Объем	57	19	57	19	57	19	57	19
Среднее	3,24614	3,26263	32,1447	26,7	17,5647	16,1663	2,18175	2,22789
Медиана	3,2	3,4	32,35	28,0	17,59	14,0	2,1	2,0
Дисперсия	0,934878	0,469532	105,397	89,7978	55,7116	84,3439	0,882325	1,30587
Стандартное отклонение	0,966891	0,685224	10,2663	9,47617	7,46402	9,18389	0,939322	1,14275
Коэффициент вариации	29,7859 %	21,0022 %	31,9378 %	35,4913 %	42,4944 %	56,8088 %	43,0535 %	51,2927 %
Минимальный предел варьирования	1,37	2,04	10,0	3,46	3,2	5,19	0,53	0,02
Максимальный предел варьирования	6,58	4,25	61,54	41,94	46,4	36,67	4,0	5,56
Размах выборки	5,21	2,21	51,54	38,48	43,2	31,48	3,47	5,54
Стандартизированная асимметрия	2,21536	-0,53324	1,62126	-1,55477	3,09413	2,08921	0,705979	2,13091
Стандартизированный эксцесс	2,61973	-1,0336	1,98678	0,741828	4,36626	0,705396	-0,948447	3,2522

Также были проведены исследования отличий между самцами и самками ерша возрастной группы (2+...5+) по индексам печени. Выборочные значения стандартизированной асимметрии для самок и самцов, а также выборочное значение стандартизированного эксцесса находятся за пределами нормального диапазона, что указывает на существенные отклонения исследуемых выборок от нормального распределения (табл. 6). Однако среди самок исследуемой возрастной группы 2+...5+ индекс печени у одной самки возраста 5+ (46,4 %) намного больше, чем у остальных самок этой выборки. Среди самцов исследуемой возрастной группы 2+...5+ у самца возраста 4+ и у самца возраста 3+ индекс печени (36,67 и 35,48 % соответственно) намного больше, чем у других самцов изучаемой группы, для которых максимальный предел варьирования равен 30,56. Это указывает на то, что у данных особей могла быть патология печени.

Исключив из рассмотрения эти особи, мы получили следующие значения стандартизированных асимметрии и эксцесса для индекса печени: 0,455248 и -0,377295 для самок, 1,67233 и 1,62625 для самцов, которые принадлежат нормальному диапазону. При этом для уровня значимости $\alpha = 0,05$ проверка с помощью t-теста подтвердила гипотезу о равенстве среднего значения индекса печени самок и самцов (так как $p = 0,0728045 > 0,05$), а критерий Фишера показал, что гипотеза о равенстве дисперсий выборок также подтверждается на данном уровне значимости ($p = 0,968315 > 0,05$).

Известно, что масса селезенки по сравнению с массой других органов варьирует в больших пределах. Это связано с ее разнообразной функциональной деятельностью: продуцирование форменных элементов крови (эритроциты и лейкоциты), депонирование крови, образование лимфоцитов. Индекс селезенки ерша Лахтинской губы был в пределах 1,2–2,6 %. Для ерша Кондопожской губы и Кузаранды этот показатель находится в диапазоне 1,0–1,3 % и 1,4–1,5 % соответственно. Вероятно, в условиях Лахтинской губы интенсивность работы селезенки у ерша очень высока. Наибольшие показатели отмечены у рыб возраста 3+ (2,6 %), что может быть связано с перестройкой пищевой активности и метаболизма в этом возрасте.

Исследованы отличия между самцами и самками ерша возрастной группы 2+...5+ по индексам селезенки. Отметим, что выборочные значения стандартизированных асимметрии и эксцесса для самцов, в отличие от самок, находятся за пределами нормального диапазона, что указывает на существенные отклонения данной выборки от нормального распределения (табл. 6). Однако заметим, что среди самцов исследуемой возрастной группы 2+...5+ у одного самца возраста 5+ индекс селезенки (5,56 %) намного больше, чем у других самцов изучаемой группы (2+...5+), для которых максимальный предел варьирования равен 3,93. Это объясняется патологией или тем, что у этих

особей интенсивность работы селезенки в силу каких-то причин была больше, чем у других.

Исключив из рассмотрения данную особь, мы получили следующие значения стандартизированных асимметрии и эксцесса для индекса селезенки самцов: -0,309174 и 1,69731, которые принадлежат нормальному диапазону. При этом для уровня значимости $\alpha = 0,05$ проверка с помощью t-теста подтвердила гипотезу о равенстве среднего значения по индексу селезенки самок и самцов (так как $p = 0,576234 > 0,05$), а критерий Фишера показал, что гипотеза о равенстве дисперсий выборок также подтверждается на данном уровне значимости ($p = 0,597917 > 0,05$).

Бесовые показатели пищеварительного тракта (индексы желудка и кишечника) могут быть использованы в качестве характеристики обмена веществ в организме рыб, так как пищеварительный тракт перерабатывает разные пищевые компоненты, которые могут иметь разную пищевую ценность и разную степень усвояемости. Поэтому нагрузка на него может существенно колебаться, что способствует изменению его весовых параметров [13], [14].

Исследованы отличия между самцами и самками ерша возрастной группы 2+...5+ по индексам желудка. Общая статистика обеих выборок для самок и самцов ерша представлена в табл. 7.

В отличие от самцов, выборочные значения стандартизированных асимметрии и эксцесса для индекса желудка самок находятся за пределами нормального диапазона, что указывает на существенные отклонения данной выборки от нормального распределения. Однако среди самок исследуемой возрастной группы у самки возраста 2+ и особей возраста 4+ индексы желудка (19,78 и 22,50 % соответственно) гораздо больше, чем у других самок изучаемой группы, для которых максимальный предел варьирования равен 17,65.

Таблица 7

Общая статистическая характеристика для индексов желудка и кишечника ерша (2+...5+)

Статистики	Индекс желудка		Индекс кишечника	
	самки	самцы	самки	самцы
Объем	57	19	57	19
Среднее	10,4218	8,33316	12,1174	8,94211
Медиана	10,0	8,23	10,6	9,14
Дисперсия	12,4935	8,12126	44,7042	10,9703
Стандартное отклонение	3,53462	2,84978	6,68612	3,31214
Коэффициент вариации	33,9158 %	34,1981 %	55,178 %	37,0398 %
Минимальный предел варьирования	4,67	2,89	3,71	4,27
Максимальный предел варьирования	22,5	13,53	38,89	18,0
Размах выборки	17,83	10,64	35,18	13,73
Стандартизированная асимметрия	3,31705	0,161026	5,99432	1,85111
Стандартизированный эксцесс	2,83249	-0,229915	7,10964	1,51976

Исключив из рассмотрения данные особи, мы получили следующие значения стандартизованных асимметрии и эксцесса для индекса желудка самок: 1,23733 и -0,117339, которые принадлежат нормальному диапазону. При этом для уровня значимости $\alpha = 0,05$ проверка с помощью t-теста гипотезы о равенстве среднего значения по индексу желудка самок и самцов также не подтвердилась ($p = 0,0307113 < 0,05$). Критерий Фишера показал, что гипотеза о равенстве дисперсий выборок подтверждается на данном уровне значимости ($p = 0,963301 > 0,05$).

Результаты исследования отличия между самками и самцами ерша возрастной группы 2+...5+ по индексам кишечника показали, что для самцов выборочные значения стандартизованных асимметрии и эксцесса для индекса кишечника принадлежат нормальному диапазону от -2 до 2 (табл. 7). Для самок значения данных статистик превышают правый предел нормального диапазона более чем в 2,98 и 3,55 раза соответственно, что указывает на существенные отклонения данной выборки от нормального распределения. Таким образом, по индексу кишечника самки и самцы имеют существенные различия, поскольку не являются однородными (заданы разными законами распределения).

Также в рамках данного исследования была решена задача оценки степени различия между самками (57 особей) и самцами (19 особей) половозрелых ершей Лахтинской губы, возраст которых варьируется от 2+ до 5+, по следующим 9 морфологическим признакам: массе тела (m), длине D и d, индексам сердца, печени, селезенки, желудка, кишечника, жабр. Даная задача решалась с помощью компонентного анализа в среде статистического пакета StatGraphics.

Отметим, что компонентный анализ (метод главных компонент) как один из многомерных методов является отражением двух основных тенденций развития современной биометрии. С одной стороны, это стремление к более полному (многоплановому, многомерному) изучению действительности, что требует количественной оценки большого числа свойств исследуемых объектов. С другой стороны, это формирование все более наглядного, интегрированного, обобщенного представления об огромных массивах информации [7]. Наблюдения за эколого-биологическими феноменами дают n объектов (в нашем случае особей ерша), охарактеризованных набором из s признаков (в нашем случае это масса тела, длина тела, длина тела без хвостового плавника, масса органов и др.).

Компонентный анализ стремится сконцентрировать информацию об отличиях объектов в гораздо меньшее число расчетных индексов ($k < s$), называемых главными компонентами. Новые показатели отображают в себе общие причины, в силу которых группы признаков изменяются параллельно, а группы объектов оказываются сходными. В качестве таких общих факторов, например, мо-

гут выступать пол, возраст, состояние здоровья. Значение каждого признака x_j ($j=1, s$) особи распадается на несколько частей, каждая из которых связана с действием определенной причины ($a, b, c, \dots$): $x_j = x_{aj} + x_{bj} + x_{cj} + \dots$. Тогда сумма вкладов, например фактора a , в значения всех s признаков вычисляется по формуле: $GK_a = x_{a1} + x_{a2} + \dots + x_{as}$, где x_{aj} ($j=1, s$) – вклад фактора a в значение варианты j-го признака. Выразим эффект действия фактора a на j-й признак как долю от общего значения варианты следующим образом: $x_{aj} = a_j \cdot x_j$, где a_j – относительный вклад данного фактора в конечное значение варианты, x_j – значение варианты j-го признака. Тогда уравнение первой главной компоненты имеет вид: $GK_a = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_s \cdot x_s$. Аналогично определяются уравнения второй главной компоненты GK_b и всех последующих. Коэффициенты (a_j и т. п.), стоящие перед значениями признаков x_j ($j=1, s$) в уравнениях компонент, являются аналогами коэффициентов корреляции данных признаков с общим фактором и называются факторными нагрузками [8]. Низкое значение факторной нагрузки говорит о независимости признака от данного фактора. Компонентный анализ эффективно «концентрирует» информацию: дисперсии первых компонент выражают большую долю общей изменчивости. Так, первые 2–3 компоненты накапливают в себе основную содержательную информацию об отличиях объектов, заменяя собой s исходных признаков.

Применение общего фактора «пол особи» позволило дать оценку степени различия между самками и самцами половозрелых ершей Лахтинской губы (2+...5+) по описанным выше 9 морфологическим признакам (то есть число признаков $s = 9$). Результаты расчетов представлены в табл. 8 (в расчетах используются нормированные значения исходных признаков).

Таблица 8
Результаты расчетов компонентного анализа для общего фактора «пол особи»

Номер компоненты	Значение дисперсий главных компонент (Eigenvalue)	Относительный вес главных компонент (Percent of variance)	Суммативный вес главных компонент (Cumulative percentage)
1	3,37857	37,540	37,540
2	2,09512	23,279	60,819
3	1,26672	14,075	74,893
4	0,719251	7,992	82,885
5	0,53556	5,951	88,836
6	0,454349	5,048	93,884
7	0,289387	3,215	97,100
8	0,237479	2,639	99,738
9	0,0235633	0,262	100,000

Заметим, что первая компонента учла в себе большую долю исходной изменчивости (ее дисперсия $S_{ГК1}^2 = 3,37857$ из 9, относительный вес составляет 37,54 %). Информативность второй компоненты выражается дисперсией $S_{ГК2}^2 = 2,09512$ и относительным весом, равным 23,279 %. Информативность третьей компоненты выражается дисперсией $S_{ГК3}^2 = 1,09512$ и относительным весом, равным 14,075 %. Дисперсии остальных компонент меньше единицы, что указывает на их низкую информативность, поскольку по умолчанию минимальное значение дисперсии главной компоненты (Minimum Eigenvalue) принимается равным 1. График Scree Plot отражает изменение дисперсий компонент (сплошная линия) и минимальный уровень компонент (пунктир) (рис. 6).

Значения факторных нагрузок для первых трех главных компонент рассматриваемых морфологических признаков представлены в табл. 9.

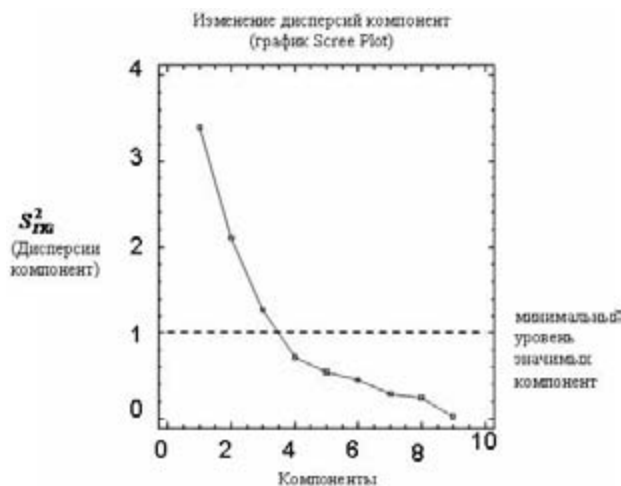


Рис. 6. Изменение дисперсий компонент для общего фактора «пол особи»

Таблица 9
Таблица значений факторных нагрузок в главных компонентах

Признаки	Компонента 1	Компонента 2	Компонента 3
Масса тела (m) (г)	0,412956	0,223743	-0,0206958
Длина тела (D) (см)	0,402107	0,370433	-0,233382
Длина тела без хвостового плавника (d) (см)	0,415668	0,359758	-0,204312
Индекс сердца (m1) (мг)	-0,394719	0,0904513	-0,460582
Индекс печени (m2) (мг)	-0,01825	0,494377	0,270413
Индекс селезенки (m3) (мг)	-0,31011	0,117718	-0,550079
Индекс желудка (m4) (мг)	-0,315346	0,393559	0,279557
Индекс кишечника (m5) (мг)	-0,30411	0,306402	0,419827
Индекс жабр (m7) (мг)	-0,225314	0,409968	-0,2472

Уравнение расчета значений первой компоненты следующее:

$$\begin{aligned} \text{Component 1} = & 0,413 \cdot m + 0,402 \cdot D + 0,416 \cdot d - \\ & - 0,395 \cdot m1 - 0,018 \cdot m2 + 0,31 \cdot m3 - \\ & - 0,315 \cdot m4 - 0,304 \cdot m5 - 0,225 \cdot m6. \end{aligned}$$

Все факторные нагрузки первых трех признаков положительны и больше 0,3, остальные отрицательны, причем для индексов печени и жабр факторные нагрузки по модулю меньше 0,3, то есть их влияние наименее значимо. Первую компоненту можно назвать «Уменьшение индексов сердца, селезенки, желудка и кишечника при увеличении массы и размеров ерша». Для второй компоненты все факторные нагрузки положительны, причем для массы тела и индексов сердца и селезенки их величина меньше 0,3. Поэтому вторую компоненту можно назвать «Увеличение индексов печени, жабр, желудка и кишечника при увеличении размеров тела». Третью компоненту можно назвать «Уменьшение индекса селезенки и индекса сердца при увеличении индекса кишечника», поскольку она объясняется в основном за счет переменных «индекс селезенки», «индекс сердца» и «индекс кишечника», их факторные нагрузки равны 0,55, -0,461 и 0,42 соответственно.

Рассмотрим численные характеристики особей, выраженные в трех главных компонентах (табл. 10). Для всех главных компонент и самцов (f), и самок (с) эти значения принимают как положительные, так и отрицательные значения, то есть для этих компонент знак численной характеристики особи не зависит от пола.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях Лахтинской губы Онежского озера ерш имеет максимальные размеры, высокие приросты и упитанность, а также максимальные индексы сердца и пищеварительного тракта, широкий диапазон колебаний индекса селезенки и печени по сравнению с этими показателями у ерша в других районах Онежского озера (Кондопожская губа, Кузаранда). С большой вероятностью можно считать, что в 2002 году в Лахтинской губе сложились наиболее благоприятные пищевые условия для ерша, что, возможно, связано с работой форелевого хозяйства. По результатам отлова и опросным данным известно, что в период функционирования хозяйства в губе качественный и количественный состав рыб в уловах был высоким. Появился лещ, не встречавшийся в этом районе до организации хозяйства. В больших количествах стали вылавливать ряпушку, плотву и другие виды. Известно, что при переходе к хищничеству ерш часто охотится на рыбу, включая молодь того же вида. Он охотно поедает икру различных видов рыб (ряпушки, леща, плотвы). Сложившиеся в Лахтинской губе благоприятные кормовые условия для ерша,

обусловленные работой хозяйства, отразились на его морфофизиологическом состоянии.

Для ершей возрастной группы 2+...8+ с 95 % достоверной вероятностью было выявлено, что длина его тела имеет нормальное распределение.

С 95 % достоверностью выявлено отличие самок и самцов одной возрастной группы 2+...5+ по весовым показателям пищеварительного тракта (индексам желудка и кишечника) и по индексу жабр. Для остальных морфофизиологических признаков (масса, длина тела, длина тела без хвостового плавника, упитанность, индексы сердца, печени, селезенки), за исключением особей с патоло-

гией, существенных различий между самками и самцами на уровне значимости 5 % не обнаружено (при нормальном характере распределения выборок). Также для ершей возрастной группы 2+...5+ были замечены следующие закономерности: 1) уменьшение индексов сердца, селезенки, желудка и кишечника при увеличении массы и размеров ерша; 2) увеличение индексов печени, жабр, желудка и кишечника при увеличении размеров тела; 3) уменьшение индексов селезенки и сердца при увеличении индекса кишечника, которые не зависят от пола рыбы (ерша Лахтинской губы Онежского озера).

Таблица 10

Численные характеристики особей, выраженные в главных компонентах

№ ряда	Метка (с – самка, f – самец)	Компонента 1	Компонента 2	Компонента 3	№ ряда	Метка (с – самка, f – самец)	Компонента 1	Компонента 2	Компонента 3
1	с	-6,12308	1,41647	2,3042	39	с	1,6869	-0,521527	0,801433
2	с	-4,45018	1,58058	-2,11261	40	с	1,65057	1,70079	2,3146
3	с	2,28985	-2,10592	-0,454106	41	с	2,07744	1,81038	-1,71901
4	с	1,84703	-0,125954	1,44667	42	с	0,589043	-1,37391	-0,317117
5	f	-2,0432	-3,30558	1,5707	43	с	1,34662	-1,86487	0,0435226
6	f	-0,258481	0,599828	-1,92146	44	с	1,45519	0,251025	0,0562624
7	f	0,384944	-0,276337	-2,14482	45	с	1,11879	-0,832046	-1,07978
8	с	-4,33018	-1,00817	0,481406	46	с	0,960517	0,0433192	-0,975247
9	с	-2,27951	-3,06538	0,0450712	47	с	2,00865	0,898473	-1,25265
10	с	-2,76973	-1,88369	0,178356	48	с	0,111796	0,696392	-0,491625
11	с	-1,10599	-1,38561	0,579863	49	с	3,09015	-0,753296	-0,0735608
12	с	0,1922	0,130438	-1,96484	50	f	-0,557063	-3,05861	-0,315866
13	с	-0,876327	-1,71357	0,0678525	51	f	-0,347011	-1,09079	-1,01857
14	с	-0,433809	0,34987	-0,604301	52	f	-1,26734	0,294449	0,582169
15	с	-0,211629	0,831523	0,681087	53	f	-0,489403	-0,864343	0,571373
16	с	-1,97457	0,864856	-1,72525	54	f	-0,625915	-0,796724	-0,453623
17	с	-3,58448	1,11715	-1,20036	55	f	0,399526	-0,376344	0,226167
18	с	0,808437	1,00611	-0,949569	56	f	0,0658157	-3,55223	0,366113
19	с	-0,117693	-0,328563	-0,115229	57	f	-0,157844	1,25817	0,675066
20	с	-1,59095	1,14218	-0,0949976	58	f	3,19381	-2,34388	0,0729681
21	с	0,29709	-0,737892	-1,10293	59	с	-0,196112	-0,504879	0,799256
22	с	2,75963	2,47286	-1,58159	60	с	0,0431036	-0,994454	-0,359415
23	с	4,49462	0,704298	0,53886	61	с	0,559504	0,361771	-0,124298
24	f	1,04563	-0,828179	0,707224	62	с	1,04332	1,36969	-1,14579
25	f	-0,722265	-0,00961921	-0,736094	63	с	0,315808	2,05829	1,38357
26	f	-0,669869	1,26956	-0,273727	64	с	-0,182978	0,571661	0,454876
27	f	1,35892	0,560471	0,66861	65	с	0,779205	0,444373	0,138653
28	с	-1,99887	-0,469097	2,18703	66	с	2,02667	-0,153904	1,40277
29	с	-3,26901	2,36922	1,35051	67	с	0,441921	1,6244	-0,497019
30	с	-1,00794	0,33046	0,290611	68	с	-2,84282	1,94485	-1,91719
31	с	-1,23955	-1,18104	0,101608	69	с	0,42474	1,25727	2,85178
32	с	-1,79385	1,78507	-0,755595	70	с	2,0433	0,064037	0,44329
33	с	-0,0532005	-0,959125	0,337348	71	с	0,913886	-0,685667	-0,645632
34	с	-0,213046	-0,577952	0,222258	72	с	2,41815	-0,0865143	0,359717
35	с	0,266583	-0,841282	1,52479	73	с	1,97936	4,88588	1,99735
36	с	-0,761346	1,38452	1,22434	74	f	-0,578833	-0,783703	-2,26556
37	с	0,199767	0,890789	-0,611525	75	f	0,606633	0,0867251	0,534439
38	с	0,0990222	-0,559134	0,512173	76	f	1,72993	-0,428431	-0,094992

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Основы моделирования и первичная обработка данных: Справочное издание. М.: Финансы и статистика, 1983. 471 с.
2. Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.
3. Боровиков В. П., Боровиков И. Д. Statistica. Статистический анализ и обработка данных в среде Windows. М.: Информационно-издательский дом «Филин», 1997. 608 с.
4. Гублер Е. В., Генкин А. А. Применение непараметрических критериев статистики в медико-биологических исследованиях. Л.: Медицина, 1973. 142 с.
5. Ивантер Д. Э., Рыжков Л. П. Рыбы. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2004. 176 с.
6. Ковалев П. М. Биологические особенности окуня и ерша озер Ильмень и Псковско-Чудского // Сб. науч. тр. ГосНИОРХ. Вып. № 236. Л., 1985. С. 117–127.
7. Коросов А. В. Специальные методы биометрии: Учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. 364 с.
8. Коросов А. В., Горбач В. В. Компьютерная обработка биологических данных: Метод. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2010. 84 с.
9. Крупень И. М. Морфофизиологические особенности ерша *Gymnocephalus cernuus* L. из различных условий обитания: Дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 1999. 190 с.
10. Малета Ю. С., Тарасов В. В. Непараметрические методы статистического анализа в биологии и медицине. М.: Изд-во МГУ, 1982. 178 с.
11. Мельянцев В. Г. Рыбы. Петрозаводск: Карелия, 1974. 120 с.
12. Правдин И. Ф. Руководство по изучению рыб. М.: Пищ. пром-сть, 1966. 376 с.
13. Смирнов В. С., Божко А. М., Рыжков Л. П., Добринская Л. А. Применение метода морфофизиологических индикаторов в экологии рыб // Тр. Т. 7. Петрозаводск, 1972. 190 с.
14. Строганов Н. С. Экологическая физиология рыб. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 444 с.

УДК 538.975:539.23

ОЛЬГА ЯКОВЛЕВНА БЕРЕЗИНА

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет
berezina@psu.karelia.ru

ЕЛЕНА ЛИОНОВНА КАЗАКОВА

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет
ekazakova@psu.karelia.ru

АЛЕКСАНДР ЛИОНОВИЧ ПЕРГАМЕНТ

доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет
aperg@psu.karelia.ru

ОЛЬГА ВЛАДИМИРОВНА СЕРГЕЕВА

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет
osergeeva@psu.karelia.ru

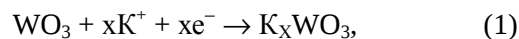
МОДИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ СЛОЕВ ГИДРАТИРОВАННОГО ОКСИДА ВАНАДИЯ ПРИ ЛЕГИРОВАНИИ ВОДОРОДОМ И ВОЛЬФРАМОМ

Были исследованы свойства пленок V_2O_5 и VO_2 , полученных из геля V_2O_5 и легированных H и W. Показано, что при катодной поляризации пленка $V_2O_5 \times nH_2O$ меняет цвет с коричневого на красный. Наблюдаемый внутренний электрохромный эффект вызван перераспределением протонов внутри пленки. В пленках VO_2 , легированных W, в результате замещения ионов V^{4+} ионами W^{6+} происходит понижение температуры перехода металл–изолятор.

Ключевые слова: оксид ванадия, легирование, внутренний электрохромный эффект, переход металл–изолятор

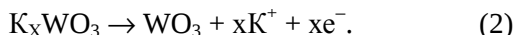
Фазы внедрения (бронзы, гидраты, легированные соединения) на основе оксидов переходных металлов (ОПМ) обладают уникальными физико-химическими свойствами, которые определяются особенностями кристаллической и электронной структур этих соединений. Они проявляют свойства как основной матрицы оксидов, так и ионов или молекул интеркалатов, например смешанную электронно-ионную проводимость. Гидратированный оксид ванадия (или ксерогель $V_2O_5 \times nH_2O$) принадлежит именно к этому классу материалов, и интенсивное развитие исследований данных соединений в последнее время [2], [5], [10], [21], [27] связано в первую очередь с очевидными перспективами для прикладных разработок в различных областях физики, электроники и химической технологии. Электрохромные индикаторы и дисплеи, электронные переключатели и сенсоры, катоды литиевых батарей и ионоселективные мембраны, антистатические покрытия и проводящие резисты для электронно-лучевой литографии – вот далеко не полный перечень применений гидратированных ОПМ и композитных материалов на их основе [2], [5], [10], [19], [27], [28], [29], [31].

Явление электрохромизма в тонких пленках связано с реверсивными процессами инъекции или экстракции катионов (H^+ , Li, Na, K и др.) и электронов в пленке и заключается в обратимом изменении оптических свойств материала (светопропускания, цвета и т. д.) [8], [18], [19]. Электрохромным эффектом (ЭХЭ) обладают аморфные и кристаллические пленки предельных оксидов целого ряда переходных металлов, таких как W, Mo, V, Nb, Ti, Ni и др. Обычно для достижения ЭХЭ электрод с нанесенной на него окисной пленкой катодно поляризуют в электролите, содержащем протоны или одновалентные катионы щелочных металлов. Достаточно подробно ЭХЭ изучен в триоксиде вольфрама WO_3 . Электрохимический процесс при катодной поляризации можно представить как одновременный процесс переноса катиона (K^+) со стороны электролита в окисел и электрона от границы электрод – окисел согласно уравнению



где $0 < x < 1$. При этом цвет пленки меняется от бледно-серого до голубого или синего. Изменение полярности на противоположную по знаку

приводит оксид к первоначальному неокрашенному состоянию и может быть представлено обратной реакцией



Появление и исчезновение окраски связывают с процессами электродиффузии катионов, а электронный заряд обеспечивает компенсацию заряда диффундирующего катиона.

Реакции (1) и (2) представляют ЭХЭ как окислительно-восстановительную реакцию. Однако образование вольфрамовой бронзы K_xWO_3 подобно легированию вещества, тогда как в окислительно-восстановительной реакции на аноде или катоде происходит выделение вещества, объем которого зависит от длительности процесса. При росте K_xWO_3 объем фиксирован и равен объему WO_3 . Тот факт, что K_xWO_3 образует фазовое продолжение исходного материала, оказывает сильное влияние на динамику окрашивания. Окрашивание и обесцвечивание не являются симметричными явлениями. Окрашивание в основном регулируется свойствами границы раздела WO_3 – инжектирующий ионы контакт, тогда как обесцвечивание определяется переносом протонов в WO_3 .

Электрохромными свойствами обладают и другие ОПМ, например V_2O_5 [6], NiO [3], Nb_2O_5 [1]. Впервые ЭХЭ в поликристаллических пленках V_2O_5 , полученных термическим испарением, наблюдался нами [6]. В качестве электролита использовалась дистиллированная вода. В зависимости от количества электричества, прошедшего через ячейку, пленка меняла цвет с желтого на зеленый, голубой, синий и черный. Предполагается, что причина изменения окраски в пленках V_2O_5 связана с образованием водородно-ванадиевой бронзы ($H_xV_2O_5$). При этом часть атомов ванадия, соответствующая доле x внедрившихся атомов, переходит из пятивалентного в четырехвалентное состояние. Аналогично ЭХЭ в анодной окисной пленке пятиоксида ванадия при окрашивании сопровождается образованием $H_4V_2O_5$ [25]. Для пленок V_2O_5 , полученных магнетронным распылением [23], интеркаляция ионов Li^+ из безводного электролита приводит к смещению края поглощения в область больших энергий и появлению слабой полосы поглощения около $\lambda = 1,1$ мкм. Смещение края поглощения соответствует увеличению ширины запрещенной зоны от 2,27 эВ для V_2O_5 до 2,47 эВ для $Li_{0,86}V_2O_5$. Подобные результаты получены и в работе [17] для пленок V_2O_5 толщиной 0,1 мкм и концентрацией лития в окрашенном образце $Li_xV_2O_5$ $x = 0,78$. Однако для аморфных пленок V_2O_5 , полученных с помощью золь-гель технологии, наблюдался иной эффект [26]. Катодная поляризация пленки в литийсодержащем электролите приводила к уменьшению коэффициента пропускания (на 28 % для пленки толщиной 210 нм) (рис. 1). Пленка меняла цвет с желтого на коричневый, а состав окрашенной пленки соответствовал $Li_xV_2O_5$.

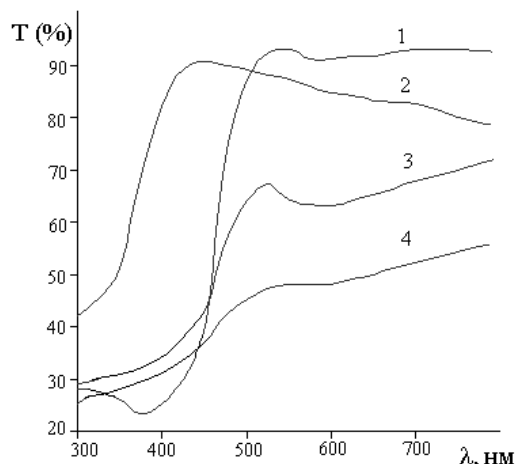


Рис. 1. Изменение спектральной зависимости коэффициента пропускания пленок V_2O_5 при электрохромном окрашивании (по данным [22] (1, 2) и [26] (3, 4)): 1, 3 – исходные пленки; 2, 4 – $Li_xV_2O_5$

Диоксид ванадия вызывает значительный интерес благодаря наблюдаемому в нем переходу металл–изолятор (ПМИ) [4], который заключается в резком обратимом изменении электрических и оптических свойств материала. В стехиометричных монокристаллах VO_2 ПМИ происходит при температуре $T_1 = 68$ °С. Важно подчеркнуть, что золь-гель технология получения пленок VO_2 отличается от других способов синтеза тонких пленок (вакуумное напыление, электрохимическое и термическое окисление и т. п.) [2], [24], [28] своей простотой, так как она не требует применения сложного технологического оборудования. Это является чрезвычайно важным в случае массового производства.

Тонкие пленки VO_2 нашли применение, например, в оптических затворах для импульсных лазерных генераторов, в энергосберегающих покрытиях для окон, в пленочных интерферометрах, используемых в качестве реверсивной голографической среды, оптических лимитеров, датчиков температуры, болометров, резистов для нанолитографии [4], [10], [13], [15], [22], [24], [28]. Изменение таких параметров ПМИ, как температура перехода, величина скачка сопротивления и коэффициента отражения, форма петли гистерезиса, является перспективным для практических применений. Например, пленки с широкой (15–20 °С) петель термического гистерезиса отражательной способности и маленькой протяженностью (4–6 °С) ее ветвей по температуре необходимы для создания узлов оптической памяти. Для создания оптического лимитера, наоборот, требуются пленки, имеющие узкую (3–5 °С) сильно протяженную по температуре (25–35 °С) петлю [11]. Достичь модификации параметров ПМИ можно легированием [2], [4], [5], [10], [11], [13], [15], [19], [24], [27], [28], [29], [31]. Кроме того, исследование влияния легирования на ПМИ в диоксиде ванадия имеет большое значение для понимания природы этого явления.

Для многих оксидов переходных металлов характерно явление электрического переключения, связанное с развитием токовых неустойчивостей в сильных электрических полях, приводящих к появлению на вольт-амперных характеристиках участков с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС). В пентаоксиде ванадия эффект переключения обусловлен образованием в процессе электроформовки канала, состоящего из VO_2 . Структуры металл/ V_2O_5 /металл с эффектом электрического переключения перспективны для использования их в качестве различных электронных устройств и чувствительных элементов сенсорных систем. Это определяется их малыми размерами и сэндвич-конфигурацией, совместимой с современной интегральной кремниевой технологией.

Введение примесей в эти соединения позволяет изменять их физические свойства, однако для пленок, изготовленных золь-гель методом, влияние примесей изучено недостаточно.

Задача настоящей работы заключалась в разработке золь-гель технологии получения тонких пленок гидратированного пентаоксида и диоксида ванадия, легированных вольфрамом и водородом, и исследовании влияния примеси на свойства полученных пленок.

1. МЕТОДИКА

Исходный водный раствор V_2O_5 -геля получали методом плавления [27]. Порошок пентаоксида ванадия плавляли в алуновом тигле в муфельной печи (температура плавления – 670 °С), расплав нагревали до 900 °С и выдерживали при данной температуре в течение одного часа. Полученный расплав быстро выливали в дистиллированную воду при комнатной температуре и размешивали. После отделения непрореагировавших частиц получали однородный гелеобразный раствор красно-коричневого цвета. Интеркаляционные соединения состава $\text{V}_{2-y}\text{W}_y\text{O}_{5\pm\delta} \times n\text{H}_2\text{O}$ ($y = 0,01\text{--}0,12$) получали путем добавления порошка WO_3 в расплав пентаоксида ванадия за несколько минут до закали в дистиллированной воде.

Для получения пленок гидратированного пентаоксида ванадия гель наносили на подложку контактным способом (погружением или путем нанесения капли раствора из пипетки с последующим распределением по подложке) или центрифугированием [2], [10].

После нанесения геля образцы высушивались в течение 24 часов при комнатной температуре; при этом образуется пленка ксерогеля $\text{V}_2\text{O}_5 \times n\text{H}_2\text{O}$ ($n = 1,6\text{--}1,8$). Свежевысохшие пленки имели цвет от темно-красно-коричневого (более толстые) до оранжевого или желтого (тонкие). С течением времени цвет толстых пленок меняется до желто-коричневого, а тонких – до желто-зеленого. Полученные пленки ксерогеля рентгеноаморфны и обладают слоистой структурой (слои V_2O_5 разделены слоями воды) [5], [10].

В качестве подложек при проведении оптических исследований в видимой области спектра использовали стеклянные пластинки (предметные стекла), которые перед нанесением геля обезжиривались при кипячении в водном растворе щелочи и тщательно промывались в дистиллированной воде. Для проведения оптических измерений в инфракрасном диапазоне использовались подложки из монокристаллического кремния (вырезанные из стандартных Si шайб, выпускаемых микроэлектронной промышленностью). Стеклянную и кремневую подложки гель хорошо смачивает, поэтому можно получать пленки на достаточно большой площади и различной толщины.

Исследование модификации гидратированного пентаоксида ванадия под действием электрического тока проводилось в следующих условиях. Пленки, нанесенные на стеклянную или ситалловую подложки, подвергались электрополевому воздействию на постоянном токе 10–20 мкА в течение 10–30 минут в двухэлектродной планарной системе; напряжение на системе составляло ~100 В при расстоянии между электродами ~1 мм. При пропускании тока через образец наблюдалось постепенное увеличивающееся красное пятно у катода, что позволяло визуально наблюдать процесс модификации. Для проведения ИК-спектроскопии модифицированной пленки окрашивание осуществлялось в сэндвич-структуре (Si / $\text{V}_2\text{O}_5 \times n\text{H}_2\text{O}$ / прижимной электрод), а сам прижимной электрод (Au) служил катодом.

В качестве основных методов исследования электрофизических свойств пленок ксерогеля пентаоксида ванадия использовались методика измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) и измерение электропроводности. При исследовании ВАХ на постоянном токе использовался стабилизированный источник питания В1-13 с возможностью прецизионной установки силы тока (с точностью до 10^{-9} А) в диапазоне от 0 до 100 мА. Температурные зависимости сопротивления в диапазоне температур 50–380 К измерялись четырехзондовым методом, для чего был создан измерительный комплекс на базе персонального компьютера (ПК) и платы PCI-1800Н. Явление электрического переключения исследовалось с помощью характеристикографа (осциллограф С1-83, на частоте 137 Гц) и автоматизированной установки на базе ПК, микроконтроллера PCI-1202 и специально разработанного программного обеспечения на LabView [11].

Оптические свойства пленок исследовались в видимом и ИК диапазонах частот. Исследование качественного состава пленок ксерогеля V_2O_5 методом ИК-спектроскопии было проведено на установке Specord M80 в интервале частот ν ($\nu = \lambda^{-1}$) от 400 до 4000 см^{-1} со спектральной шириной щели 8 см^{-1} [31]. Спектральная зависимость коэффициента пропускания τ в видимом диапазоне была получена на спектрофотометре СФ-46. Рабочий диапазон длин волн – 190–1100 нм. Измерения τ проводились в сравнении с пропусканием подложки (стекло).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Внутренний электрохромный эффект

Учитывая высокую ионную проводимость V_2O_5 -геля, сравнимую с электропроводностью супериоников или твердых электролитов, можно предположить, что электрические свойства этого материала (в достаточно сильных полях) будут в значительной степени обусловлены этим фактором. Предполагается возможность существенной модификации свойств материала при электрополовом воздействии в результате электромиграции протонов.

Типичная ВАХ сэндвич-структуры с прижимным электродом представлена на рис. 2. На ВАХ можно выделить четыре участка. Участок 1 соответствует омической зависимости $I(U)$. На участке 2 наблюдается неустойчивость напряжения при заданном токе. При этом пленка под катодом окрашивается: появляется красное пятно. На участке 3 наблюдается отклонение от линейной зависимости $I(U)$. Дальнейшее увеличение тока (участок 4) либо приводит к пробое пленки, либо происходит электроформовка низкоомного канала с S-образной вольт-амперной характеристикой.

Омическая зависимость как для планарной структуры, так и для сэндвич-структуры наблюдается при токах, меньших некоторого критического значения $I_{кр}$ (~ 10 мкА). Дальнейшее увеличение тока сопровождается, как уже было сказано, появлением красного пятна под катодом (рис. 3), размеры которого увеличиваются с течением времени. После снятия приложенного напряжения пятно сохраняется некоторое время и исчезает при приложении напряжения противоположной полярности. Это явление мы назвали «внутренним» электрохромным эффектом, так как в отличие от обычного ЭХЭ оно наблюдается без контакта пленки с электролитом.

Время появления пятна, скорость роста пятна, контраст зависят от толщины и возраста пленки. Наиболее наглядно данный электрохромный эффект проявляется для пленок с исходным желтым или желто-зеленым цветом. Окрашенное пятно может сохраняться достаточно длительный промежуток времени (от нескольких часов до нескольких месяцев), который зависит от величины заряда, протекающего при окрашивании ($q = I \cdot t$). По аналогии с обычным ЭХЭ мы предполагаем, что при внутреннем ЭХЭ в электрическом поле происходит увеличение концентрации протонов около катода, но не в результате внедрения их извне (то есть из электролита), а из-за перераспределения внутри пленки.

На рис. 4 представлена зависимость коэффициента пропускания от длины волны. Видно, что при окрашивании наблюдаются сдвиг края поглощения в длинноволновую область спектра и увеличение пропускания. При этом оптическая шири-

на запрещенной зоны E_g уменьшается (от 2,28 до 2,22 эВ) (рис. 4б). Так, для пленки толщиной $d = 4$ мкм при токе $I = 10$ мкА и времени окрашивания $t = 10$ мин диаметр окрашенного пятна $D = 2$ мм. Отметим, что несмотря на незначительные изменения E_g ($\sim 0,1$ эВ), визуальный оптический контраст достаточно высок (рис. 3). Цвет пленки изменялся от желто-зеленого или желто-коричневого (в зависимости от d) до красного или темно-пурпурного. Это связано с тем, что при окрашивании происходит не только сдвиг края, но и значительное уменьшение поглощения (увеличение пропускания) в красной области спектра (рис. 4а).

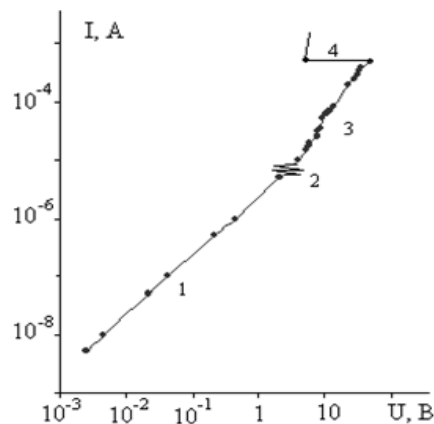


Рис. 2. ВАХ сэндвич-структуры $Au / V_2O_5 \times nH_2O /$ прижимной электрод

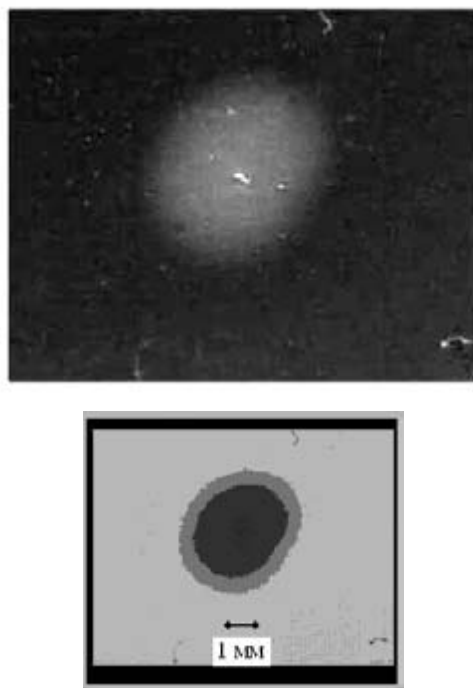


Рис. 3. (а) Фотоизображение окрашенной ($d = 8,4$ мкм, $I = 20$ мкА) области пленки ксерогеля V_2O_5 на стеклянной подложке при 10-кратном увеличении (в цвете – on-line). (б) Черно-белое изображение того же пятна, демонстрирующее контраст

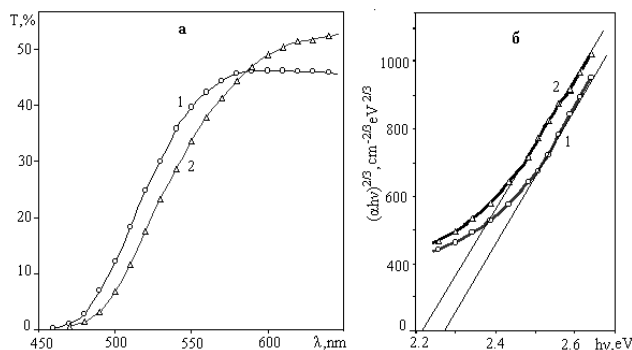
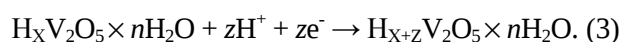


Рис. 4. Модификация оптических свойств V_2O_5 -геля при внутреннем электрохромном эффекте: 1 – исходная пленка, 2 – после электрополевого воздействия ($I = 8$ мкА, $t = 10$ мин); (а) экспериментальный спектр пропускания и (б) коэффициент поглощения в координатах, соответствующих прямым запрещенным переходам

Поскольку собственное поглощение в гидратированном пентаоксиде ванадия (как и в V_2O_5) обусловлено $O2p \rightarrow V3d$ переходами, небольшая модуляция E_g связана, по-видимому, с некоторым искажением ванадий-кислородных полиэдров в структуре $V_2O_5 \times nH_2O$. Как известно, величина ширины запрещенной зоны E_g в V_2O_5 весьма чувствительна к такого рода искажениям [24]. Отметим, что при стандартном ЭХЭ (когда катионы H^+/Li^+ инжектируются из электролита) в аморфном V_2O_5 изменение цвета происходит от желтого к зеленому и синему [3], [6]. Также меняется цвет пленки ксерогеля V_2O_5 при фотоинжекции водорода [7]. Только по данным [26] поляризация аморфной пленки V_2O_5 в Li^+ содержащем электролите приводит к смещению края поглощения в сторону больших длин волн (рис. 1).

Для выяснения механизма модификации оптических свойств V_2O_5 -геля были проведены исследования структуры и электрофизических свойств модифицированных пленок. В ходе исследования проводимости окрашенных пленок на переменном токе [9] выяснилось, что в результате катодной поляризации наблюдается увеличение в несколько раз ионной составляющей проводимости σ_i пленок V_2O_5 -геля. Данный факт подтверждает наше предположение о том, что при электрохромном окрашивании происходит локальное увеличение концентрации протонов около катода. Известно, что в структуре гидратированного пентаоксида ванадия имеются ионы водорода как в квазисвободном состоянии (H^+ или H_3O^+), так и в составе групп H_2O [16], [27], поэтому химическая формула гидратированного пентаоксида ванадия может быть записана как $H_xV_2O_5 \times nH_2O$ с $x = 0,3-0,4$ при $n = 1,6-1,8$, то есть соединение, по сути дела, представляет собой поливанадиевую кислоту [16]. Увеличение концентрации протонов около катода под действием электрического поля можно описать следующей реакцией (по типу реакции (1)):



Электроны для обеспечения электронной-тральности поступают в пленку из внешней цепи через металлический электрод. Величину избытка концентрации протонов z в окрашенных пленках можно оценить, зная величину прошедшего заряда (при условии стопроцентной эффективности реакции (3)) и диаметр D окрашенного участка:

$$z = \frac{4It\mu}{q\rho\pi D^2dN_A}, \quad (4)$$

где $\mu = 214$ г/моль – молекулярная масса $V_2O_5 \times 1,8H_2O$, $\rho = 3,09$ г/см³ – плотность пленки, N_A – число Авогадро, I – величина силы тока, t – время окрашивания, d – толщина пленки, q – заряд иона H^+ (и It/q – общее число избыточных ионов водорода). Для одного из образцов $D \approx 5$ мм, $d = 8,4$ мкм, $I = 20$ мкА (рис. 3), при времени окрашивания $t = 30$ мин вычисленная по формуле величина z составила $\sim 0,17$. Для разных образцов и разных схем (сэндвич или планарная структура) z получается порядка 0,1–0,5. Такие значения z вполне допустимы. Для сравнения отметим, что, например, при электрохромном окрашивании анодного оксида ванадия эта величина составляет порядка 4, то есть состав окрашенной пленки $H_4V_2O_5$ [25].

Сравнение ИК-спектров исходной и окрашенной пленок (рис. 5) позволяет говорить об увеличении концентрации воды в пленке при электрохромном окрашивании (например, в результате реакции соединения H^+ с дефектом $V-OH$). Для окрашенного образца наблюдается более интенсивное поглощение в области 2800–3600 см⁻¹ (валентные колебания молекул воды) и увеличение поглощения около 1600 см⁻¹ (деформационные колебания H_2O). Причем пики поглощения в области 500–760 см⁻¹, соответствующие колебаниям связей $V-O$, практически не изменяются. Также в ИК-спектре окрашенной пленки появляется пик на 1740 см⁻¹, который может быть отнесен к колебаниям в H_3O^+ [16].

Особого внимания заслуживает пик на частоте ~ 2000 см⁻¹ (рис. 5б). В спектрах V_2O_5 -геля, как и чистого пентаоксида ванадия и воды, поглощение в области ~ 2000 см⁻¹ отсутствует: в литературе почти нет данных по этому вопросу (за исключением двух работ [20], [30]). В [30] в ИК-спектре пропускания гибридного материала на основе V_2O_5 -геля и (поли)-этиленгликоля также наблюдалась слабая линия в области 1900–2000 см⁻¹, а в [20] исследовался ИК-спектр отражения систем V_2O_5 /окисел (SeO_2 , ZrO_2 , TiO_2 , Nb_2O_5 , Al_2O_3), и линия в области ~ 2030 см⁻¹ приписывается обертоном с удвоением частоты колебаний $V=O$ (1010–1020 см⁻¹). В нашем экспериментальном спектре (рис. 5) даже на фоне сильной интерференции видно, что в этой области имеется значительное поглощение, которое увеличивается при окрашивании. Более точ-

но интенсивность этой линии можно оценить из выделенного спектра коэффициента поглощения $\alpha(\nu)$ (рис. 5б). Она составляет $\alpha \sim 50\text{--}100\text{ см}^{-1}$, что несколько меньше интенсивности основных линий воды ($\alpha \sim 300\text{--}500\text{ см}^{-1}$) и V_2O_5 ($\alpha \sim 1500\text{--}2000\text{ см}^{-1}$). Отметим, что в большинстве работ по ИК-спектроскопии V_2O_5 -геля эта область частот ($1600\text{--}3000\text{ см}^{-1}$) вообще не исследуется (по крайней мере, не приводится на экспериментальных кривых), так как основное внимание уделяется диапазонам $< 1000\text{ см}^{-1}$ (фононные моды и колебания V-O связей), $\sim 1600\text{ см}^{-1}$ и $> 3000\text{ см}^{-1}$ (колебания H_2O).

Появление в ИК-спектре линии в районе $\nu = 2000\text{--}2100\text{ см}^{-1}$ может быть вызвано целым рядом причин, среди которых отметим следующие: 1) наличие посторонних примесей (углерода из непрореагировавших карбонатов в исходном порошке V_2O_5 или органических загрязнений, кремния из подложки); 2) вклад коллективных (плазмонных, поляронных) колебаний; 3) учитывая наличие водорода в исследуемых образцах, можно предположить, что эта линия обусловлена колебаниями V-H ($1800\text{--}1900\text{ см}^{-1}$ для различных металло-гидратных комплексов [13]).

Как показано в [10], наиболее вероятным представляется третий из перечисленных выше вариантов, то есть то, что пик при $\nu = 2000\text{ см}^{-1}$ обусловлен колебаниями связей V-H. Отметим, что в идеальной структуре V_2O_5 -геля таких связей нет: водород непосредственно связан с атомами кислорода H_2O или V_2O_5 -каркаса. Однако в метастабильной фазе $\text{H}_x\text{V}_2\text{O}_5 \times n\text{H}_2\text{O}$ избыток (x) водорода может быть связан с V, образуя своего рода дефекты V-H в «идеальной решетке» V-OH₂. Тогда колебания таких дефектов должны проявляться в виде локальных мод, подобно локальным колебаниям U-центров в кристаллах. Например, локальная мода примеси водорода в решетке KCl дает пик поглощения при $\nu = 500\text{ см}^{-1}$ ($\alpha = 12\text{ см}^{-1}$ для $N_{\text{H}} = 3 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$) [27]. Для случая $M' \ll M$ (M' – масса замещающего атома) частота локального колебания дается выражением [27]:

$$\nu = \nu_m(M/2M')^{1/2}, \quad (5)$$

где ν_m – характерная частота невозмущенной системы. В нашем случае ν_m (соответствующая V-OH₂ колебаниям в геле) может лежать в широком диапазоне частот: $300\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ (внешние – то есть веерные, крутильные, маятниковые и т. п. – колебания M-OH₂ [14], [17]). В частности, по данным [33], один из этих типов колебаний проявляется в гидратированном оксиде ванадия при $\nu = 711\text{ см}^{-1}$. Положив в (5) $\nu_m \sim 700\text{ см}^{-1}$ и $M/M' = 18$ (отношение массы H_2O к массе протона), получим как раз $\nu = 2100\text{ см}^{-1}$. Отметим, что интенсивность этой линии может быть значительно усилена за счет резонанса с обертоном $\nu(\text{V=O})$ (2030 см^{-1}) [10].

Основной вывод из всего вышесказанного заключается в том, что данная линия с $\nu_0 = 1970$

$\pm 50\text{ см}^{-1}$ (рис. 5) связана, скорее всего, с наличием в пленке избыточного (то есть не входящего в состав воды) водорода. Если это так, то увеличение интенсивности этой линии при электрохромном окрашивании свидетельствует о соответствующем увеличении концентрации связей V-H и, следовательно, общего содержания H (то есть x в формуле $\text{H}_x\text{V}_2\text{O}_5 \times n\text{H}_2\text{O}$).

Таким образом, идентификация ИК-спектров исходной и окрашенной пленок позволяет говорить об увеличении концентрации воды и ионов водорода в окрашенной пленке. Этот факт подтверждается и исследованиями с помощью рентгеноструктурного анализа (РСА). В [10], [31] показано, что кривые распределения интенсивности рассеяния $I(s)$ исходной и окрашенной пленок качественно полностью идентичны, однако первый максимум на кривой для окрашенной пленки смещен относительно исходного образца в сторону меньших значений модуля дифракционного вектора s. По положению первого пика определяется величина межслоевого расстояния в ксерогеле V_2O_5 , которое при окрашивании увеличивается от 11,3 до 11,5 Å для образца толщиной 3 мкм при следующем режиме окрашивания: $I = 20\text{ мкА}$, $t = 60\text{ мин}$ [10].

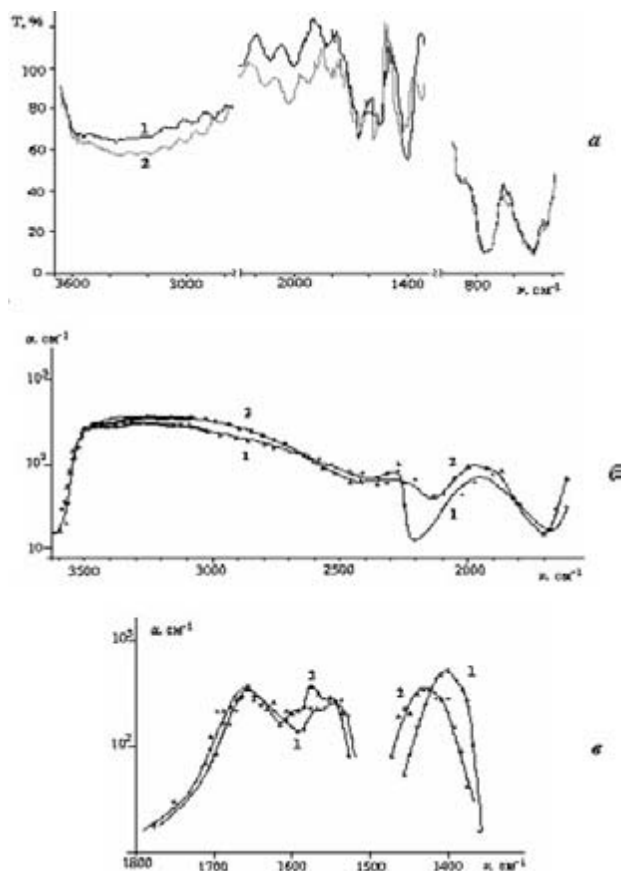


Рис. 5. (а) ИК-спектр исходной (1) и модифицированной (окрашенной) (2) пленок. (б, в) Дисперсия коэффициента поглощения исходной (1) и модифицированной (2) пленок

Суммируя основные результаты, представленные в данном разделе, можно сказать, что внутренний электрохромный эффект в гидратированном пентаоксиде ванадия, наблюдаемый при катодной поляризации без контакта пленки с электролитом, возникает в результате электромиграции протонов в электрическом поле и увеличения их концентрации в окрашенной области. Это приводит к увеличению количества воды и как следствие – к увеличению межслоевого расстояния в окрашенной пленке. Модификация оптических свойств при локальном легировании водородом («внутреннем» ЭХЭ) проявляется визуально как изменение цвета пленки с желто-коричневого (желто-зеленого) на красный.

2.2. Влияние примеси вольфрама на свойства пленок оксидов ванадия
Как показали РСА-исследования, исходные ксерогели гидратированного пентаоксида $V_2O_5 \times nH_2O$ имеют квазиоднородную слоистую структуру, подобно полимерам: слои оксида ванадия V_2O_5 соединены молекулами воды и образуют переплетающиеся волокна. Межслоевое расстояние зависит от содержания H_2O и, как показано в предыдущем разделе, для состава $V_2O_5 \times 1.6H_2O$ равно $\sim 11,3 \text{ \AA}$.

По данным проведенного рентгеноструктурного исследования, добавка W даже с высокой концентрацией (до 12 ат. %) не приводит к резким структурным изменениям в пленках пентаоксида ванадия: слоистая структура сохраняется [2]. Отсутствие на рентгенограмме дополнительных брэгговских отражений свидетельствует о замещении части ионов V^{4+} ионами W^{6+} , а не о встраивании вольфрама между ванадий-кислородными слоями. В результате восстановления пленок $V_2O_5 \times nH_2O$ отжигом в вакууме происходит их кристаллизация и образуется нестехиометрический VO_2 , близкий по составу к V_6O_{13} . В легированных восстановленных пленках часть ионов V^{4+} также замещена ионами W^{6+} .

Как показали измерения удельного сопротивления (ρ) пленок $V_{2-y}W_yO_{5\pm\delta} \times nH_2O$, ρ при фиксированной температуре в них значительно растет с ростом «у» (рис. 6), что можно объяснить уменьшением подвижности ионов H^+ , зарядоперенос которых дает существенный вклад в общую проводимость гидратированного оксида. Кроме того, поскольку электронный зарядоперенос осуществляется за счет прыжкового механизма между разновалентными ионами ванадия [9], замещение части центров V^{4+} ионами W^{6+} должно неизбежно приводить к уменьшению электропроводности, что и наблюдается в эксперименте.

Для восстановления пентаоксида ванадия до низших оксидов (VO_2) образцы на ситалловых подложках отжигались в вакууме при давлении остаточных паров $< 10^{-3}$ Торр (0,13 Па) и $T = 500 \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$; в результате получались пленки состава $V_{1-y}W_yO_{2\pm\delta}$.

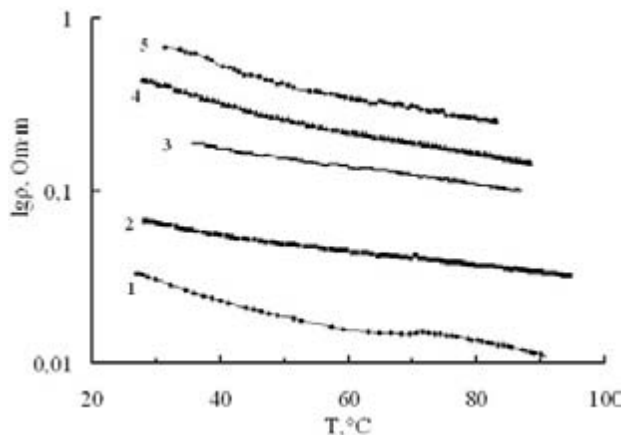


Рис. 6. Температурные зависимости сопротивления пленок: $V_{2-y}W_yO_{5\pm\delta} \times nH_2O$: 1) $y = 0$; 2) $y = 0,01$; 3) $y = 0,03$; 4) $y = 0,06$; 5) $y = 0,12$

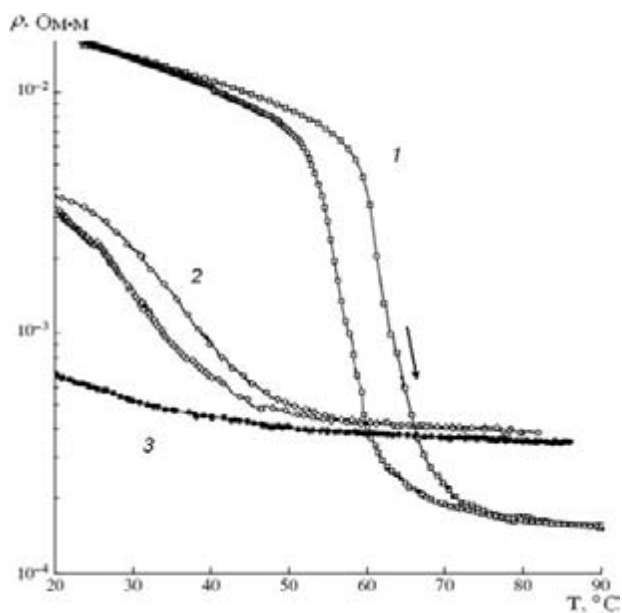


Рис. 7. Температурная зависимость сопротивления пленок: $V_{1-y}W_yO_2$ с $y = 0$ (1), $y = 0,3$ (2) и $y = 0,12$ (3)

Удельное сопротивление пленок $V_{1-y}W_yO_{2\pm\delta}$ при комнатной температуре с ростом «у» наоборот уменьшается (рис. 7). У пленок с низкой концентрацией примеси (до 6 %) наблюдается ПМИ. Причем чем больше концентрация примеси, тем ниже температура перехода T_i (рис. 7). Снижение температуры перехода ΔT_i составляет $\sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$ на 1 ат. % W, что практически совпадает с результатом, полученным в [9] ($\Delta T_c = 12,1 \text{ }^\circ\text{C}$ на 1 ат. % W), где пленки синтезировали методом лазерной абляции. С ростом «у» увеличивается растянутость перехода по T и уменьшается скачок сопротивления при ПМИ (то есть отношение ρ_s/ρ_m , где ρ_s – удельное сопротивление в полупроводниковой фазе, а ρ_m – в металлической фазе). У пленок с концентрацией W больше 6 % ПМИ не наблюдался.

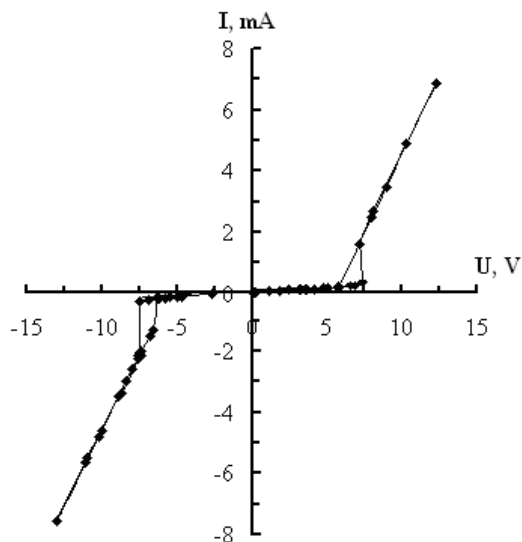


Рис. 8. ВАХ сэндвич-структуры $\text{Au/V}_{2-y}\text{W}_y\text{O}_{5\pm\delta}/\text{Al}$ с переключением

Можно предположить, что увеличение проводимости и снижение T_i связано с появлением дефектов донорного типа: при замещении иона V^{4+} ионом W^{6+} возникают два иона V^{3+} , что диктуется необходимостью сохранения электронейтральности. Это, в свою очередь, подтверждает электронный (Моттовский) механизм ПМИ в VO_2 [11].

Далее мы исследовали возможность переключения в системе $\text{V}_{2-y}\text{W}_y\text{O}_{5\pm\delta}$. ВАХ-структуры металл/ $\text{V}_{2-y}\text{W}_y\text{O}_{5\pm\delta}$ /металл с $y = 3\%$ изображены на рис. 8. Эффект переключения обусловлен образованием в процессе формовки канала, состоящего из VO_2 , и, соответственно, переходом металл-изолятор в нем. В данном случае канал имеет состав $\text{V}_{1-y}\text{W}_y\text{O}_{5\pm\delta}$ с $y \sim 3\%$

Необходимо отметить, что разброс параметров переключения был существенно меньше, чем при исследовании сэндвич-структур на основе пленок чистого (нелегированного) ксерогеля пентаоксида ванадия. Это может говорить о том, что введение примеси вольфрама в определенной концентрации ($\sim 3 \text{ at. \%}$ [32]) приводит к снижению вышеуказанного разброса поро-

вых параметров ввиду снижения температуры ПМИ.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что легирование водородом и вольфрамом существенным образом модифицирует электрические и оптические свойства оксидов ванадия.

Обнаруженный в V_2O_5 -геле внутренний электрохромный эффект делает эти пленки перспективными для использования в качестве безэлектролитных электрохромных индикаторов и оптических элементов памяти. Цветовой контраст, достигнутый уже в тестовых экспериментах на лабораторных образцах, достаточно высок, и этот параметр может быть улучшен соответствующей оптимизацией технологии приготовления пленок и процесса окрашивания. Подчеркнем, что существенным недостатком обычных электрохромных устройств по сравнению с традиционными индикаторами является необходимость использования электролитов в качестве анодной обкладки, инжектирующей протоны [18]. Можно предположить, что использование внутреннего электрохромного эффекта позволит обойти эту проблему и тем самым ускорить более широкое внедрение электрохромных индикаторных устройств и дисплеев.

Продемонстрирована возможность введением примеси вольфрама направленно изменять электрические свойства пленок пентаоксида и диоксида ванадия, полученных золь-гель методом, а также влиять на параметры ПМИ в пленках диоксида ванадия, что может быть использовано в различных электронных устройствах.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства РФ по науке и инновациям ГК № 02.740.11.0395, № 02.740.11.5179, Федерального агентства по образованию, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России, 2009–2013 год», проекты № П1156 и П1220, и АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» проект № 4978.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белозеров В. В., Малюк Ю. И., Скатков Л. И. Механизм электрохромного эффекта в пятиокиси ниобия // Физика окисных пленок: Тез. докл. II Всесоюзной науч. конф. Петрозаводск, 1987. Ч. 1. С. 32–33.
2. Березина О. Я. Влияние условий синтеза и легирования на физические свойства оксидов ванадия: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Петрозаводск, 2007. 156 с.
3. Бетс В. В., Бендерс Ю. А. Получение и электрохромные свойства тонких пленок оксида никеля // Электрохромизм: Сб. науч. тр. Рига, 1987. С. 121–131.
4. Бугаев А. А., Захарченя Б. П., Чудновский Ф. А. Фазовый переход металл-полупроводник и его применение. Л.: Наука, 1979. 183 с.
5. Волков В. Л. Фазы внедрения на основе оксидов ванадия. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987. 180 с.
6. Гаврилюк А. И., Рейнов Н. М., Чудновский Ф. А. Фото- и термохромизм в аморфных пленках V_2O_5 // ПЖТФ. 1979. Т. 5. Вып. 20. С. 1227–1230.
7. Гаврилюк И. А., Чудновский Ф. А. Электрохромизм в пленках V_2O_5 // ПЖТФ. 1977. Т. 3. № 4. С. 174–177.
8. Гуртов В. А., Райкерус П. А., Малиненко В. П. Физика окисных пленок: Учебное пособие. Петрозаводск, 1988. 88 с.
9. Ильинский А. В., Климов В. А., Ханин С. Д., Шадрин Е. Б. Электрические и оптические явления в диоксиде ванадия вблизи фазового перехода полупроводник-металл // Известия РГПУ им. А. И. Герцена: Физика. 2006. № 6(15). С. 100–120.

10. Казакова Е. Л. Электронные и ионные процессы в гидратированном оксиде ванадия: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Петрозаводск, 2002. 153 с.
11. Казакова Е. Л., Пергамент А. Л., Стефанович Г. Б. Модификация электрических и оптических свойств гидратированного пентаоксида ванадия при электромиграции протонов // ПЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 20. С. 35–41.
12. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. 792 с.
13. Климов В. А., Тимофеева И. О., Ханин С. Д., Шадрин Е. Б., Ильинский А. В., Сильва-Андрате Ф. Формирование петли температурного гистерезиса при фазовом переходе металл-полупроводник в пленках диоксида ванадия // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 9. С. 67–74.
14. Накамото К. Инфракрасные спектры неорганических и координационных соединений. М.: Мир, 1966. 411 с.
15. Пергамент А. Л. Электронные неустойчивости в соединениях переходных металлов: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. СПб., 2007. 302 с.
16. Плетнёв Р. Н., Ивакин А. А., Клещев Д. Г., Денисова Т. А., Бурмистров В. А. Гидратированные оксиды элементов IV и V групп. М.: Наука, 1986. 160 с.
17. Спектроскопические методы в химии комплексных соединений / Под ред. В. М. Вдовенко. М.; Л.: Химия, 1964. 268 с.
18. Фаунен Б. В., Крэнделл Р. С. Электрохромные дисплеи на основе WO_3 // Дисплеи / Под ред. Ж. М. Панкова. М.: Мир, 1982. 320 с.
19. Aegerter M. A., Avellandera C. O., Pawlica A., Atic M. Electrochromism in Materials Prepared by the Sol-Gel Process // Journal of Sol-Gel Science and Technology. 1997. Vol. 8. P. 689–696.
20. Burcham L. J., Deo G., Gao X., Wachs I. E. In situ IR, Raman, and UV-Vis DRS spectroscopy of supported vanadium oxide catalysts during methanol oxidation // Topics in Catalysis. 2000. Vol. 11/12. P. 85–100.
21. Ceccato R., Diru S., Barone T., De Santo G., Cazzanelli E. Growth of nanotubes in sol-gel-derived V_2O_5 powders and films prepared under acidic conditions // J. Mat. Res. 2009. Vol. 24. № 2. P. 475–481.
22. Chain E. E. Optical properties of vanadium dioxide and vanadium pentoxide thin films // Applied Optics. 1991. Vol. 30. № 19. P. 2782–2787.
23. Cogan S. F., Nguyen N. M., Perrotti S. J., Rauh R. D. Optical properties of electrochromic vanadium pentoxide // J. Appl. Phys. Vol. 66. № 3. P. 1333–1336.
24. Hanlon T. J., Walker R. E., Coath J. A., Richardson M. A. Comparison between vanadium dioxide coatings on glass produced by sputtering, alkoxide and aqueous sol-gel methods // Thin Solid Films. 2002. Vol. 405. № 1–2. P. 234–237.
25. Ord J. L., Bishop S. D., De Smet D. J. An optical study of hydrogen insertion in the anodic oxide of vanadium // J. Electrochem. Soc. 1991. Vol. 138. № 3. P. 208–214.
26. Özer N. Electrochemical properties of sol-gel deposited vanadium pentoxide films // Thin Solid Films. 1997. Vol. 305. P. 80–87.
27. Livage J. Vanadium Pentoxide Gels // Chem. Mater. 1991. Vol. 3. № 4. P. 578–593.
28. Livage J. Optical and electrical properties of vanadium oxides synthesized from alkoxide // Coordination Chemistry Reviews. 1999. Vol. 190–192. P. 391–403.
29. Livage J., Ganguli D. Sol-gel electrochromic coatings and devices: A review // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2001. Vol. 68. P. 365–381.
30. Mohseni M., James P. F., Wright P. V. Vanadium-based organic-inorganic hybrid materials prepared by a sol-gel method // J. Sol-Gel Sci. Technol. 1998. Vol. 13. P. 495–497.
31. Pergament A. L., Kazakova E. L., Stefanovich G. B. Optical and electrical properties of vanadium pentoxide xerogel films: Modification in electric field and the role of ion transport // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002. Vol. 35. № 17. P. 2187–2197.
32. Pergament A. L., Velichko A. A., Berezina O. Ya., Kazakova E. L., Kuldin N. A., Artyukhin D. V. Influence of doping on the properties of vanadium oxide gel films // J. Phys.: Condens. Matter. 2008. Vol. 20. № 42. 422204 (4 pp).
33. Sanches C., Livage J., J. Lucazeau J. Infrared and Raman study of amorphous V_2O_5 // J. Raman Spectroscopy. 1982. Vol. 12. № 1. P. 68–72.

УДК 621.3.049:535.016:537.876.4:681.723

БОРИС ЗАЛМАНОВИЧ БЕЛАШЕВ

доктор технических наук, старший научный сотрудник
Института геологии, Карельский научный центр РАН
belashev@krc.karelia.ru

НАНОМЕТРОЛОГИЯ

В статье по литературным источникам и материалам Интернета описаны современные подходы к нанометрологии. Рассмотрены эталонная система на базе атомно-силового микроскопа и лазерных интерферометрических измерителей наноперемещений, метод терагерцовой спектроскопии диагностики нанообъектов, новые оптические микроскопы, регистрирующие интегральный отклик объекта.

Ключевые слова: нанометрология, измерители наноперемещений, меры длины, терагерцовая спектроскопия, мезооптические микроскопы, аксикон

История науки и техники неразрывно связана с развитием системы, методов и средств измерений. Особенность современного этапа состоит в появлении новых задач, обусловленных малыми размерами элементов и структур.

Основной задачей метрологии является обеспечение единства измерений, то есть достижение состояния, при котором результаты измерений выражены в узаконенных единицах, а погрешности известны с заданной вероятностью. Привязка измерительных приборов к эталонам позволяет разным пользователям разных приборов получать в рамках погрешности одинаковые результаты при измерении одного объекта. Впервые эта идея была выражена французским ученым Лакодемоном во время экспедиции в Перу, цель которой состояла в измерении длины меридиана, соответствующей одному градусу, на экваторе. Неслучайным поэтому оказался и выбор первого эталона длины как одной сорокамиллионной доли Парижского меридиана.

Для устранения затруднений, связанных с междисциплинарным характером нанотехнологий, использованием различной терминологии, разных исследовательских, технологических и измерительных подходов, ведущих к разобщенности и затрудняющих обмен информацией, в 2005 году было инициировано создание Технического комитета Международной организации по стандартизации ИСО/ТК 229. Работа комитета состоит в стандартизации по следующим направлениям:

- 1) термины и определения,
- 2) метрология, методы испытаний и измерений,
- 3) стандартные образцы состава и свойств,
- 4) моделирование процессов,
- 5) медицина и безопасность,
- 6) воздействие на окружающую среду.

Согласно выработанной комитетом терминологии, под нанотехнологиями понимают «знание и управление процессами, как правило, в масштабе нанометра, но не исключающее масштаб менее 100 нм в одном или нескольких измерени-

ях, когда ввод в действие размерного эффекта (явления) приводит к возможности новых применений, использование свойств объектов и материалов, которые отличаются от свойств свободных атомов или молекул, а также от объемных свойств вещества, состоящего из этих атомов или молекул, для создания более совершенных материалов, приборов, систем, реализующих эти новые свойства» [3].

В статье дан обзор источников [1], [2], [3], содержащих основные подходы к нанометрологии и метрологические идеи, которые могут оказаться полезными для развития отрасли.

МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ

Предмет метрологии касается:

1. Эталонов физических величин, эталонных установок, стандартных образцов состава, структуры, свойств для передачи размера единиц физических величин в нужный диапазон;
2. Аттестованных методик измерений физико-химических параметров и свойств объектов, методики калибровки (поверки) средств измерений;
3. Метрологического сопровождения технологических процессов производства продукции;
4. Мероприятий государственной метрологической службы по техническому регулированию метрологии, испытания вновь произведенных или импортируемых средств измерений, надзора за состоянием и применением эксплуатируемых средств измерений, метрологической экспертизы стандартов, организации службы стандартизации, разработки нормативных документов, участия в работе международных метрологических организаций.

В задачу стандартизации входит определение диапазона параметров и свойств материалов, подлежащих измерениям и отвечающих определенному его качеству. Особое значение стандар-

тизация приобретает в задачах обеспечения здоровья и безопасности операторов технологических процессов и лиц, взаимодействующих с продукцией технологий, а также экологической безопасности окружающей среды.

Сертификация представляет собой подтверждение соответствия параметров и свойств объектов, материалов и структур технологических процессов и инструментальной и измерительной базы требованиям технических регламентов, стандартов и нормативных элементов.

В союзе метрологии, стандартизации, сертификации метрология играет главную роль, является количественным базисом стандартизации и сертификации.

ЕДИНСТВО ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В НАНОДИАПАЗОНЕ

Метр – естественная единица длины, сопоставимая с размерами человека. Но микроэлектроника уже имеет дело с элементами поверхности, минимальные размеры которых приближаются к десяткам нанометров, а нанотехнологии оперируют объектами от сотен нанометров до десятых долей нанометра. Развитие этих отраслей поставило проблему создания методов и средств линейных измерений в нанометровом диапазоне и обеспечения их единства с абсолютной привязкой к первичному эталону длины – метру.

Для нанометрологии измерение геометрических линейных размеров объектов является первоочередной задачей. Необходимость обеспечения единства линейных измерений в нанометровом диапазоне связана с тем, что линейные измерения в неявном виде присутствуют в большинстве методов и средств измерений механических, оптических, магнитных, электрических, акустических и других параметров объектов. Другая причина заключается в прецизионном пространственном позиционировании зонда измерительного устройства в место съема информации. При этом диапазон линейного сканирования по каждой координате может простирается от единиц нанометра до сотен и более микрометров, а требуемая точность выставления координаты должна составлять десятые доли нанометра. Помимо привязки средства измерения к эталону, воспроизводящему единицу физической величины, в нанотехнологии обязательна привязка к базисному эталону единицы длины, обеспечивающая точность попадания в цель. Сложность состоит в том, что диапазон измерений длины от единиц нанометров до сотен микрометров перекрывает пять порядков при точности измерений в десятые доли нанометра.

Из всех физических эффектов только интерференция способна осуществить передачу эталона длины в нанодиапазон. Эталонная система в нанодиапазоне состоит из атомно-силового микроскопа (АСМ) и лазерных интерферометрических измерителей наноперемещений (ЛИ-

ИН) по трем координатам (рис. 1). Диапазон измерения перемещений – 1 нм – 10 мм, дискретность – 0,1 нм, максимальная скорость перемещения – 3 мм/с, абсолютная погрешность измерений – 0,5–3 нм. Эталон используют для калибровки измерительных систем потребителей.

Существуют вещественные меры длины с программно заданным рельефом (рис. 2), аттестуемые эталонной системой перемещений. Вещественные меры длины используют для калибровки растровых электронных микроскопов. Они позволяют по одному изображению меры в растровом микроскопе определить его увеличение, линейность шкал, диаметр электронного зонда.

ТЕРАГЕРЦОВАЯ КОГЕРЕНТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДИАГНОСТИКИ НАНООБЪЕКТОВ

Область терагерцовых волн находится между инфракрасными и миллиметровыми волнами. Диапазон 0,3–100 ТГц соответствует длинам волн 1 мм – 3 мкм. Освоение диапазона содержит отсутствие надежного, достаточно мощного и компактного источника излучения и качественных детекторов, хотя часть его используется ИК-спектроскопией и спектроскопией комбинационного рассеяния.

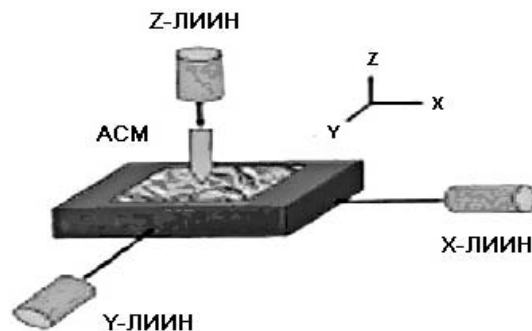


Рис. 1. Схематическое изображение эталонной системы наноперемещений

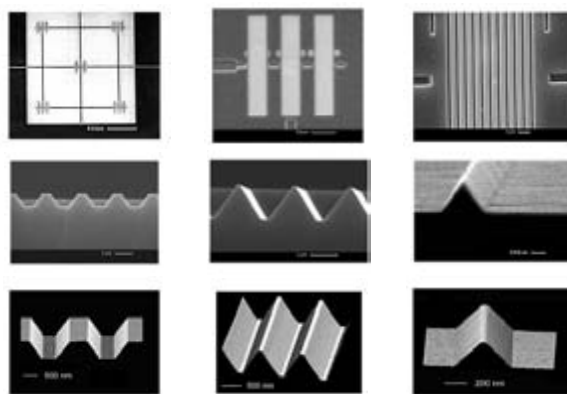


Рис. 2. Вещественные меры длины с программируемым рельефом в нанодиапазоне

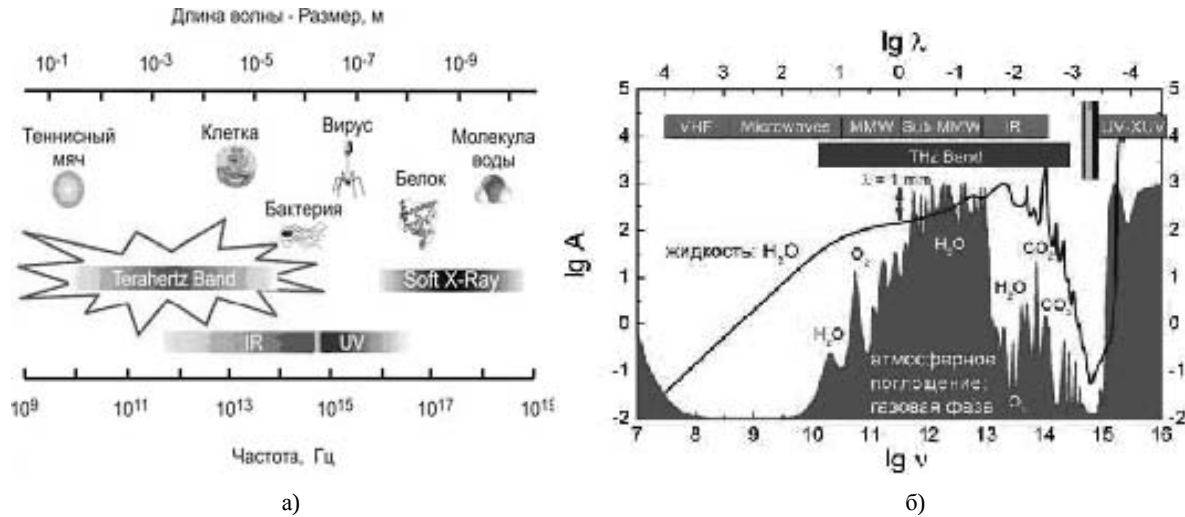


Рис. 3. Терагерцовый диапазон по частоте, длине волны и размеры объектов (а), попадающих в диапазон полосы поглощения некоторых соединений (б)



Рис. 4. Схема совмещения ТГц-спектроскопии с атомно-силовым микроскопом

Большинство спектральных особенностей атомов и многоатомных молекул, обусловленных структурой, химической композицией и типами молекулярных связей, находятся в этом диапазоне (рис. 3).

ТГц-излучение сравнительно хорошо проникает в конденсированные среды, исключая металлы и некоторые растворы. В отличие от микроволновых видеосистем, ТГц-приборы имеют лучшее разрешение. Однако из-за дифракционного предела даже коротковолновые волны диапазона невозможно использовать для визуализации нанообъектов.

Существенным дополнением в арсенал нанотехнологий может явиться синтез ТГц-когерентной спектроскопии со сканирующим полемым и атомно-силовым микроскопами (рис. 4).

Такое совмещение позволяет зарегистрировать спектральный отклик нанообъекта благодаря гигантскому усилению Раман-эффекта на острие зонда.

Спектральные данные несут информацию об интегральных характеристиках нанообъекта. При этом оценка пространственного разрешения, определяемого картиной остаточного электромагнитного поля вблизи острия зонда, дает величину порядка 100 нм.

Терагерцовую спектроскопию предполагают использовать в метрологии для полупроводниковой промышленности при производстве интегральных схем для анализа дефектов в подложках, межэлементных соединений, контроля толщин и материальных различий в элементах. В области биофизики, биологии и медицины ТГц-технологии могут быть использованы для анализа особенностей ДНК, неразрушающего контроля оболочек лекарственных капсул, диагностики полиморфизма лекарств, диагностики рака кожи.

НОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МИКРОСКОПЫ

Принципы, составляющие основу новых оптических микроскопов для просмотра фотоэмульсий в физике высоких энергий, могут быть использованы при разработке наноскопа.

Развитие метода ядерной фотоэмульсии для регистрации треков частиц закончилось к 1945 году, когда размер зерна бромистого серебра был уменьшен до 80 нм, а плотность зерен серебра в следе релятивистской частицы повышена до 40 зерен на 100 мкм. С помощью этого метода были открыты заряженные пи-мезоны, исследованы распады и обнаружена их перезарядка на ядрах фотоэмульсии. В настоящее время метод фотоэмульсии используют в экспериментах по регистрации нейтрино. Существенными проблемами при этом являются поиск треков в объеме фотоэмульсии 200 л и обмер этих следов под оптическим микроскопом с перефокусировкой по глубине, требующие колоссального объема времени.

Для преодоления этих трудностей применен подход мезооптики, согласно которому регистрация рассеянных объектом конических волн позволяет получить информацию об объекте в целом. Тем самым обеспечивается быстрдействие и высокая степень сжатия информации.

На рис. 5 показаны оптические схемы микроскопов горизонтальных (а) и вертикальных (б) следов.

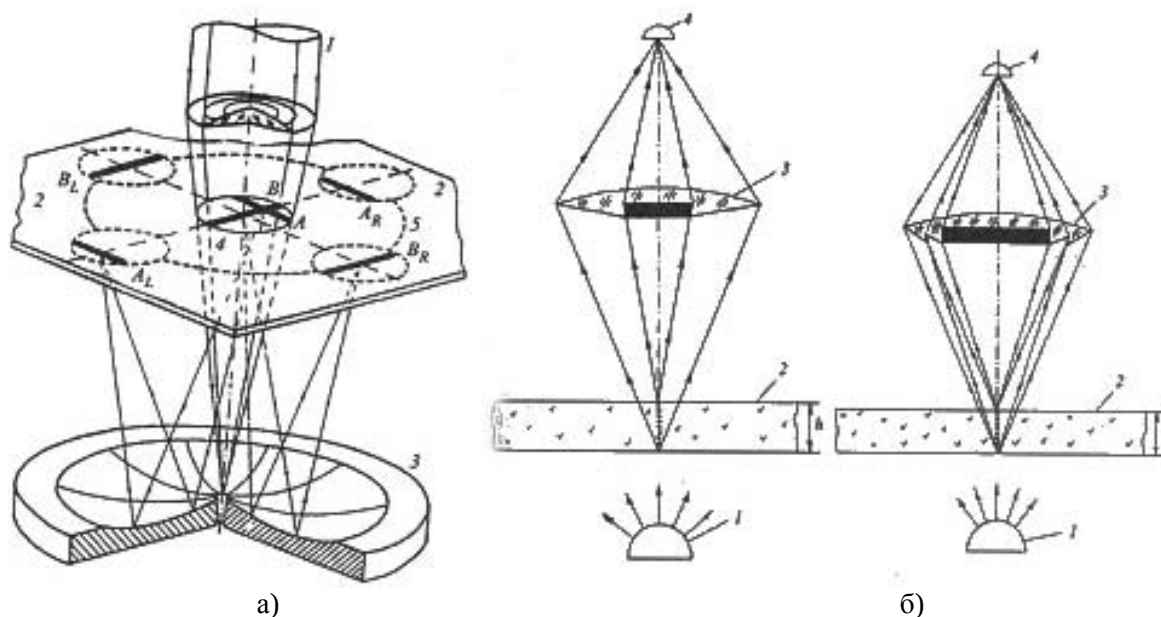


Рис. 5. Микроскопы для регистрации треков в ядерной фотоэмульсии:

а – микроскоп горизонтальных следов: 1 – сходящийся пучок света, 2 – слой ядерной фотоэмульсии, 3 – мезооптическое зеркало с кольцевым откликом, 4 – поле зрения микроскопа с двумя следами частиц, 5 – фокальное кольцо; б – микроскоп вертикальных следов с одним и двумя кольцевыми аксиконами: 1 – источник света, 2 – слой ядерной фотоэмульсии, 3 – аксикон, 4 – точечный фотоприемник

Главным элементом мезооптического фурие-микроскопа (5а) является тороидальное зеркало, удваивающее изображение горизонтального трека. Расстояние между изображениями зависит от глубины залегания трека в эмульсии. В микроскопе вертикальных следов использован аксикон, преобразующий точку на оптической оси в отрезок, лежащий на этой оси. Обращение хода лучей в схеме (5б) позволяет поставить в соответствие точечному детектору вертикальный отрезок фотоэмульсии. По этой причине при сканировании фотоэмульсии рассеивающий свет вертикальный трек даст резкое уменьшение показаний детектора. При сканировании фото-

эмульсии этими микроскопами, в отличие от обычного микроскопа, операции перефокусировки микроскопа по глубине не требуется. Изображения наклонных треков могут быть преобразованы в изображения горизонтальных треков с помощью мультиплексных отражательных элементов.

Появление новых идей является принципиально важным для опережающего развития нанометрологии, стимулирующей прогресс всей nanoиндустрии.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 08-01-98804.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зиновьев Н. Н., Андрианов А. В., Трухин В. Н. Терагерцовая когерентная спектроскопия для диагностики нанообъектов [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://rusnanjtech08.rusnanoforum.ru/sadm_files/disk/Docs/2/3/3%20\(22\)](http://rusnanjtech08.rusnanoforum.ru/sadm_files/disk/Docs/2/3/3%20(22)).
2. Сороко Л. М. Новые оптические микроскопы / ОИЯИ. Дубна, 2006. 88 с.
3. Тодуа П. А. Метрология в нанотехнологии // Российские нанотехнологии. 2007. Т. 2. № 1–2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.nanorfu.ru/.

УДК 622.026.01

ВИТАЛИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ БОРОДУЛИН

аспирант Центра физико-технических проблем энергетики
Севера, Кольский научный центр РАН
student_noo@admksk.apatity.ru

АНАТОЛИЙ ФЕДОРОВИЧ УСОВ

кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
начальник научно-организационного отдела, Кольский на-
учный центр РАН
usov@admksk.apatity.ru

ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫХ ДЕЗИНТЕГРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК

В статье дан анализ проблемы улучшения технических характеристик установок электроимпульсной технологии. Приведено сравнение устройств дезинтеграции различными способами по удельным параметрам и сравнение электротехнического оборудования на различной элементной базе.

Ключевые слова: электроимпульсное разрушение материалов, высоковольтные генераторы импульсов, импульсные конденсаторы

Работами Кольского научного центра (КНЦ) РАН, Томского и Карагандинского политехнических институтов, института Механобр, выполнявшимися с 60-х годов прошлого века, созданы научно-технические основы технологий электроимпульсного разрушения материалов (ЭИТ) для бурения, дробления и резания горных пород, предназначенных для добычи и обогащения руд, горно-строительных работ, обработки камня и других целей [1], [4], [5], [9]. Технологии с положительным технологическим эффектом апробированы в опытно-промышленном масштабе. Технологическая эффективность способа обусловлена его высокой энергетической эффективностью, малой зависимостью электроимпульсной разрушаемости от крепости горных пород, высокой селективностью дезинтеграции полиминеральных сред, отсутствием влияния крепости и абразивности разрушаемого материала на стойкость и износ электроимпульсных породоразрушающих устройств.

При свойственной электроимпульсным технологиям высокой технологической эффективности их масштабному применению до последнего времени препятствовал ряд объективных технико-экономических факторов, и прежде всего – отставание в разработке электротехнического обеспечения способа. Под электротехническим обеспечением технологий ЭИ понимается оптимальный выбор схемных решений и элементной базы технических средств формирования и передачи к забою разрушения импульсов высокого напряжения с параметрами, обеспечивающими эффективный пробой и энергетически эффективное нагружение материала, и с техническими характеристиками оборудования (производительностью, стоимостью, ресурсом работы, массогабаритными параметрами), обеспечивающими экономическую эффективность процесса. По

удельным массогабаритным характеристикам установки отдельных ЭИ-технологий, прежде всего установки дезинтеграции руд, значительно уступают установкам механического дробления и измельчения. Все это, естественно, учитывается через экономические составляющие (затраты на строительство и эксплуатацию зданий), но является сдерживающим фактором при отсутствии необходимых площадей под размещение установки. Решение проблем повышения конкурентоспособности электроимпульсных технологий состоит в кардинальном совершенствовании электротехнического обеспечения электроимпульсных процессов, в разработке и освоении новых технических решений, в использовании источников импульсов с высокими удельными энергетическими характеристиками, например адаптацией технических решений в отношении зарядных устройств и генераторов импульсов, заимствованных из смежных отраслей электротехники и электроники, к условиям электроимпульсной технологии.

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭИТ

Электроимпульсные технологии реализуются на импульсном высоком напряжении с амплитудой импульса не ниже 200–250 кВ при длительности фронта не выше 10^{-6} с, если процесс разрушения материала осуществляется в диэлектрической среде, и не выше $(1-2) \cdot 10^{-7}$ с при осуществлении процесса в воде. Оптимальный выбор уровня напряжения – это предмет компромисса между электрической надежностью работы устройства и энергетической эффективностью процесса. С повышением амплитуды напряжения электрическая надежность снижается по причине увеличения вероятности пробоя

изоляции устройства, но за счет возможности увеличить разрядные промежутки может быть повышена энергетическая эффективность процесса, так как величина разрядного промежутка определяет потенциально возможный объем разрушения единичным импульсом, КПД передачи энергии в канал разряда, полноту использования энергии канала разряда на производительный процесс трещинообразования. В большинстве процессов разрядные промежутки составляют 20–30 мм и это часто определяется технологическими условиями (диаметром скважины, шириной щели). Однако при бурении скважин большого диаметра, дезинтеграции крупных фрагментов горных пород, руд, искусственных материалов разрядные промежутки могут достигать величины 0,1–0,3 м, а уровни напряжения, соответственно, повышаются до 600–800 кВ.

Мощность зарядных устройств определяется требуемой производительностью установки, исходя из учета энергоемкости процессов разрушения и того факта, что частота следования импульсов по условиям экономически обоснованной промывки забоя разрушения не превышает 25–30 Гц. Это соответствует десяткам киловатт при работе генератора на один породоразрушающий элемент и не более 100–150 кВт при параллельной работе нескольких генераторных блоков.

Принципиальная блок-схема и электрическая схема электроимпульсной установки представлены на рис. 1.

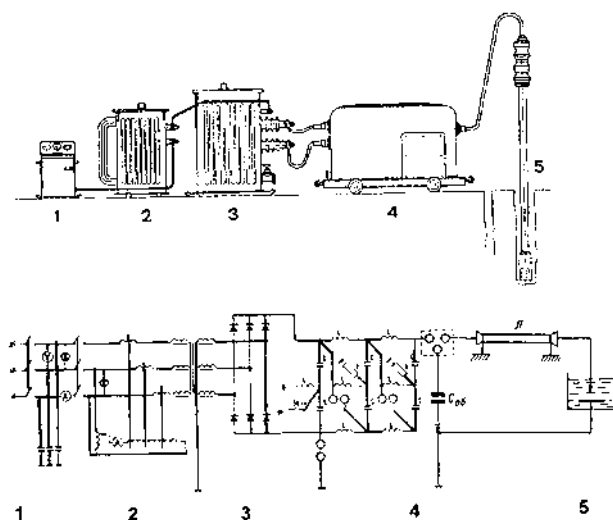


Рис. 1. Принципиальная блок-схема и электрическая схема электроимпульсной установки: 1 – пульт управления, 2 – регулирующий дроссель, 3 – повысительно-выпрямительное устройство, 4 – генератор импульсов, 5 – технологическое устройство с системой передачи импульса, $C_{об}$ – элемент коррекции фронта импульса, Л – передающая линия

Электротехническая часть установок различного технологического назначения содержит одинаковые элементы и включает в себя два от-

носительно самостоятельных блока: зарядное повысительно-выпрямительное устройство с элементами, позволяющими управлять процессом заряда и частотой следования импульсов, и источник импульсов высокого напряжения. Определяющими параметрами установки являются уровень импульсного напряжения, энергия единичного импульса и номинальная мощность.

ЗАРЯДНЫЕ УСТРОЙСТВА

Начало работ по электроимпульсным технологиям относится ко времени, когда только начиналось освоение полупроводниковой техники. В исследовательских установках еще использовались кенотроны и селеновые вентили; к разработке выпрямительных устройств для технологических установок были привлечены организации электротехнической промышленности с ориентацией на использование все более совершенных полупроводников с более высоким КПД выпрямления. С учетом требуемого для ЭИТ-уровней импульсного напряжения (300 кВ и выше) предпочтительный уровень зарядного напряжения определялся в диапазоне 50–100 кВ, а максимальная мощность зарядных устройств в большинстве случаев могла быть ограничена величиной 100–250 кВт.

Отдельные вопросы – оптимизация величины заряда емкостного накопителя энергии и управление частотой срабатывания генератора импульсов. В разработку вопросов оптимизации процесса заряда емкостных накопителей существенный вклад внесла николаевская школа электрогидравлики (И. В. Пентегов и др.), и этот опыт учитывается при создании оборудования для электроимпульсных технологий. В исследовательской практике ЭИ-способа используется весь спектр установок одно- и трехфазного выпрямления с токоограничивающими и регулирующими скорость заряда элементами как по высокой, так и по низкой стороне.

Опыт эксплуатации установок с дросселями по высокой стороне показал, что создание высоковольтных дросселей для больших зарядных токов связано со значительными трудностями, требует больших размеров сердечников, изготовленных из специальных сталей, а по массогабаритным параметрам схема существенно уступает регулированию заряда дросселем насыщения с низкой стороны. Существенным недостатком является и то, что при использовании схемы зарядки через высоковольтный дроссель ограничены возможности плавного изменения частоты следования импульсов. Для ступенчатого изменения частоты следования импульсов используют дроссели с отпайками, плавная регулировка возможна лишь в режимах отбора мощности ниже номинальной (при зарядном напряжении генератора импульсов ниже номинального выходного напряжения выпрямителя частота регулируется изменением напряжения с низкой стороны

трансформатора). Например, в схеме с дросселями по высокой стороне и автотрансформатором АТМКТ 250/0,5 (мощность 250 кВА, класс изоляции обмоток 0,5 кВ) по низкой стороне для получения частоты следования импульсов от 10 до 20 Гц величина индуктивности зарядного дросселя с высокой стороны должна составлять от 880 до 220 Гн. Наш опыт работы с дросселем по высокой стороне индуктивностью в пределах 400–600 Гн показал, что кроме отмеченных выше особенностей может иметь место неустойчивая работа генераторов импульсных напряжений (ГИН), собранных по схеме Аркадьева – Маркса.

Нередки случаи, когда спустя несколько зарядных циклов происходило насыщение сердечника дросселя, индуктивность дросселя резко падала, вследствие чего происходило загорание дуги в искровых промежутках разрядников.

В промышленных установках предпочтение отдается зарядным устройствам (ЗУ) с дросселем насыщения по низкой стороне. Достоинствами такой схемы по сравнению с другими являются более полное использование мощности трансформатора, малые пульсации выходного напряжения, сравнительно низкие обратные напряжения вентилей. При регулировании напряжения и скорости заряда на низкой стороне трансформатора габариты и вес ЗУ получаются минимальными по сравнению с вариантами регулирования на стороне выпрямленного тока. Исследовательские и промышленные установки ограниченной мощности могут использовать промышленные типы зарядных устройств однофазного выпрямления. На рис. 2 представлена установка для раскрытия сростков слюды в процессе монтажа, зарядное устройство которой выполнено на базе трансформатора АИФ-400 с дросселем насыщения по низкой стороне (напряжение – 80 кВ, мощность – 38 кВА).

Трехфазный трансформатор (Тр) подключается к сети через управляемый подмагничиванием трехфазный дроссель насыщения (Др). На выходе трансформатора включен трехфазный мостовой выпрямитель (В). Конденсатная батарея генератора импульсов (С) подключена непосредственно к выпрямителю. Схема зарядного устройства с дросселем насыщения позволяет плавно изменять частоту следования импульсов путем подмагничивания дросселя постоянным током. Суммарная индуктивность зарядной цепи складывается из индуктивных сопротивлений дросселя насыщения и силового трансформатора и выполняет роль ограничителя тока в начальный период зарядки генератора и в период разряда генератора на нагрузку.

Для целей ЭИТ по заданиям КНЦ РАН Московским электрозаводом им. Куйбышева (МЭЗ) и Тольяттинским филиалом Всесоюзного энергетического института (ТФ ВЭИ) был разработан ряд зарядных устройств, испытанных на технологических установках КНЦ РАН.

Принципиальная схема зарядного устройства трехфазного выпрямления приведена на рис. 3.



Рис. 2. Установка для раскрытия сростков слюды (в процессе монтажа), на переднем плане – зарядное устройство АИФ-400

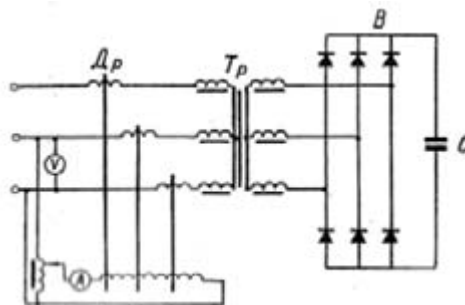


Рис. 3. Принципиальная схема зарядного устройства трехфазного выпрямления с дросселем насыщения по низкой стороне

БЛОК РНТМ 78/05-ВТМ 125/70 (ВТМ 27/45)

Для стандартного выпрямителя типа ВТМ 125/70 производства МЭЗ (полная мощность – 153 кВА, активная мощность – 125 кВт, номинальное выпрямленное вторичное напряжение – 70 кВ, номинальный выпрямленный ток – 1,8 А) и отдельно разработанного ВТМ 27/45 в качестве регулятора напряжения и скорости заряда емкостного накопителя разработан дроссель насыщения с подмагничиванием РНТМ 78/05 (номинальная мощность – 78 кВА, максимальный фазный ток – 120 А) с пределами изменения фазной индуктивности дросселя от 0,05 до 0,01 Гн при изменении тока подмагничивания от 0 до 5 А.

В технологической установке дробления руд зарядный блок РНТМ 78/05-ВТМ 125/70 (рис. 4) обеспечивал в режиме параллельного заряда работу 6 ГИН двух уровней напряжения и энергии (2 ГИН с зарядной емкостью по 0,47 мкФ и 4 ГИН по 0,33 мкФ) с регулируемой частотой срабатывания от 1 до 10 в секунду (при последовательном соединении катушек РНТМ) и до 20 в секунду (при параллельном соединении катушек РНТМ) при КПД = 0,74 и $\cos \phi = 0,84$.

Нестабильная работа ГИН с загоранием дуги в искровых разрядниках отмечалась в ряде случаев и в схеме с дросселем насыщения на низкой стороне. Вследствие наличия паразитных связей разрядного контура ГИН с цепью подмагничивания РНТМ и сравнительно большой постоянной времени последней при каждом срабатыва-

нии ГИН имеют место броски тока в цепи подмагничивания до 20 А, совпадающие по направлению с постоянным током. Это приводит к кратковременному (на 20–50 мксек) насыщению дросселя до значения 0,001 Гн и загоранию дуги с последующим ее самопогасанием по мере снижения фазного тока РНТМ. В данной схеме необходимы специальные меры по защите цепи подмагничивания, уменьшение ее постоянной времени на порядок или включение последовательно с РНТМ дополнительной нерегулируемой линейной индуктивности (0,01 Гн).

ЗАРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО ЗУ-400 (РАЗРАБОТКА ТФ ВЭИ)

Данное ЗУ собрано по трехфазной мостовой схеме при соединении обмоток трансформатора Y/Y_0 , имеет вторичное выпрямленное напряжение 40–60 кВ со ступенью регулирования 5 кВ, номинальный выпрямленный ток 0,6 А, номинальную мощность 58 КВА. Раздельное регулирование уровня напряжения и скорости заряда осуществлялось переключением числа витков обмотки низкого напряжения трансформатора и изменением числа витков линейной индуктивности, включенной в фазы трансформатора со стороны НН, в диапазоне от 0,05 до 0,005 Гн. Данное ЗУ, предназначенное для питания импульсного трансформатора установки бурения скважин, обеспечивало заряд емкостного накопителя 1 мкФ до напряжения 55 кВ с регулируемой частотой от 1 до 10 Гц. Устройство лишено отмеченного выше недостатка, свойственного дросселю насыщения, и работает стабильно, но однако не имеет возможности плавного изменения частоты срабатывания.

ЗАРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО ТИПА КВТМ-75/2×50-76У2 (РАЗРАБОТКА МЭЗ)

В стандартных выпрямителях типа ВТМ и в ЗУ-400 используются селеновые столбы типа 15ГЕ, обладающие значительным сопротивлением в проводящем направлении. Это приводит к существенным потерям мощности и снижению КПД выпрямителя (на 15–16 %). В зарядном устройстве КВТМ-75/2×50 (номинальная активная мощность – 75 кВт, номинальное выпрямленное напряжение – ± 50 кВ, средний выпрямленный ток – 0,75 А), предназначенном для питания ГИН шахтного исполнения (ГИНШ), применены кремниевые диоды. Регулирование напряжения и скорости заряда осуществляется встроенным РНРМ-100/0,5 по низкой стороне трансформатора. Величина индуктивности дросселя при полном изменении тока подмагничивания лежит в пределах от 0,02 до 0,002 Гн, что позволяет регулировать скорость заряда емкостью накопителя 0,7 мкФ до 100 кВ в пределах от 1 до 20 Гц с КПД 0,9 и $\cos \phi$ 0,8.

Созданные ЗУ по номиналам напряжения и мощности удовлетворяли требованиям устано-

вок для электроимпульсных технологий, но революционный прорыв в выпрямительной технике, произошедший в последние два десятилетия, переносит эти достижения в область истории разработки ЭИ. Последние достижения в технологии изготовления источников питания обеспечили существенное уменьшение их габаритных размеров, массы и рост КПД энергопреобразования по сравнению с их аналогами, которые выпускались всего несколько лет назад. В этом плане представляют интерес разработки ВЭИ (РТГ2), Института импульсных процессов и технологий НАН Украины, фирмы Spellman и др. В табл. 1 представлена оценка удельной мощности ЗУ различных фирм. Как видно, конструкции ЗУ на современной элементной базе уже сейчас позволяют на два порядка улучшить удельные мощностные характеристики оборудования. При равенстве удельных затрат энергии на дезинтеграцию различными аппаратами это соответствует соотношению удельных характеристик способов по производительности.

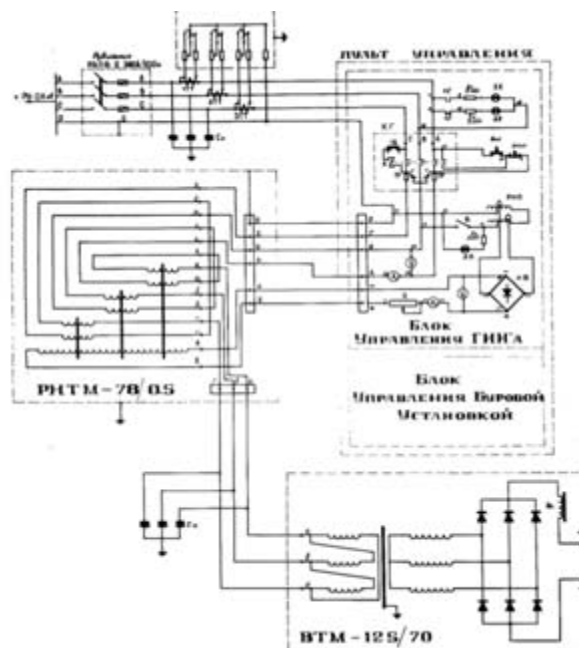


Рис. 4. Схема зарядного устройства РНТМ 78/05-ВТМ 125/70

Таблица 1
Удельная мощность зарядных устройств на различной элементной базе

Устройство	Мощность, кВт	Габариты, мм	Удельная мощность, кВт/м ³
УВН-1,2,3 (РТГ2 ВЭИ)	0,45–0,6	522 × 310 × 240	11,5 ... 15,4
УВН-4 (РТГ2 ВЭИ)	50	1405 × 1190 × 996	30
Spellman	0,6	89 × 483 × 508	27
ДИК (ВТМ)	20	5000 × 4000 × 2800	0,36

ГЕНЕРИРОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

В исследовательских и технологических установках генерирование импульсов для процессов ЭИ в основном базируется на использовании относительно надежной, но большой по габаритам многоступенчатой (5–6 ступеней) схемы генератора Аркадьева – Маркса. Низкие удельные характеристики по габаритным параметрам генератора импульсов обусловлены очень высоким уровнем напряжения (сотни киловольт). При этом габариты установки определяются не только и не столько габаритами электротехнического оборудования, сколько большими изоляционными промежутками до ограждений, которые вынужденно выдерживаются в конструкции установки. Размещение генераторного блока в маслonaполненном баке решает проблему только частично; имеются технические сложности с компоновкой и обслуживанием блока разрядников и разделительных индуктивностей между ступенями генератора.

Оптимальным вариантом промышленного генератора импульсов для электроимпульсных технологий по схеме генератора Аркадьева – Маркса можно считать созданный по техническим условиям Кольского научного центра РАН Харьковским политехническим институтом генератор импульсных напряжений шахтного исполнения ГИНШ-300 (разработка выполнена под руководством профессора В. В. Конотопа) [7]. При разработке генератора сделана попытка в максимально возможной мере учесть требования, предъявляемые промышленной эксплуатацией к подобной установке. К числу основных требований относятся следующие.

- Энергетически эффективное формирование импульсов напряжения требуемых параметров на низкоомной нагрузке. ГИНШ рассчитан на напряжение 300 кВ с длительностью фронта $0,15 \cdot 10^{-6}$ с на нагрузке в 50 Ом. Практически это соответствует возможности использования генератора с водой в качестве рабочей жидкости для основных технологий ЭИ: бурения скважин 100–150 мм, крупного дробления и мелкого измельчения руд, резания и поверхностной обработки массива и блочного камня с длиной режущей части до 400–500 мм. В ГИНШ использована схема коррекции фронта высоковольтных импульсов компенсацией индуктивности разрядного контура обостряющей емкостью.
- Обеспечение плавного регулирования частоты импульсов, приспособляемого в соответствии с конкретными режимами работы установки. Электрическая схема ГИНШ предусматривает принудительный запуск ГИН поджигающим импульсом от дополнительного устройства. Испытания показали стабильную работу ГИНШ как в режиме управляемого запуска в интервале до 25 Гц, так и «на самоходе».

- Улучшение удельных энергетических и массогабаритных характеристик. В генераторе использованы конденсаторы с высоким уровнем рабочего напряжения (50 кВ), с работой в номинальном режиме и схема двухстороннего заряда, то есть напряжение ступени составило 100 кВ. Таким образом, в генераторе всего 3 ступени, что снижает потери и повышает стабильность срабатывания разрядников, а также компактность генератора.
- Обеспечение высокого ресурса работы элементов оборудования. ГИНШ собран на конденсаторах КБМЭГ-50-0,2 с гарантированным ресурсом работы 10^8 циклов. Обостритель на 300 кВ емкостью $2 \cdot 10^{-9}$ Ф выполнен из секций с тем же уровнем рабочей напряженности поля, что и конденсаторы ГИН. Коммутирующие разрядники тороидального типа на рабочее напряжение 100 кВ выполнены вентилируемыми воздухом в герметичном исполнении и при атмосферном давлении рассчитаны на токи до 20 кА с декрементом 1,2–1,5 на частоту импульсов до 25 Гц. Большая рабочая поверхность электродов обеспечивает повышенный ресурс работы разрядников. Герметичное исполнение разрядного блока позволяет снизить уровень шума до допустимых норм, оградить обслуживающий персонал от светового облучения и воздействия ионизированного газа.
- Соответствие конструктивного исполнения условиям эксплуатации. Конструкция генератора с прочным герметичным и ударостойким стеклопластиковым корпусом позволяет использовать его в рудниках и карьерах, на обогатительных фабриках в условиях повышенной влажности атмосферы, наличия агрессивных рудничных вод, запыленности и загазованности воздуха.

В ГИНШ-300 (рис. 5) обеспечены следующие удельные энергогабаритные характеристики: удельная энергия – $0,25$ кДж/м³ ($6,25$ кВт/м³ при частоте следования 25 импульсов в секунду) с коэффициентом заполнения объема установки энергонакопительными элементами 0,25. Это лучше по сравнению с другими экспериментальными электроимпульсными установками, но тем не менее недостаточно, чтобы быть сопоставимым с механическими преобразователями энергии в работу разрушения (дезинтеграторами).

Одним из путей улучшения удельных энергогабаритных характеристик источников импульсов в установках ЭИ является применение импульсных трансформаторов (ИТ). Оно главным образом преследует цель уменьшения габаритов установок за счет исключения многокаскадных ГИН, представляя накопитель энергии единичным элементом. Более того, практика показала, что в установках электроимпульсного бурения ИТ может быть размещен непосредственно в скважине перед забоем. В этом случае

решаются многие проблемы, связанные с передачей на забой импульсов высокого напряжения, причем не столько по причине деформации импульса, сколько из-за проблем с обеспечением электрической прочности передающей системы. Буровой став является одновременно и элементом технологической схемы, задающим направление буровому инструменту и используемым для промывки скважины с удалением с забоя продуктов разрушения, то есть он должен иметь соответствующие каналы для прокачки жидкости. В схеме с ИТ амплитуда канализируемого к забою импульса напряжения снижается с 300–400 до 40–50 кВ.

Опробованы несколько вариантов ИТ, отличающиеся схемой и типом материала магнитопровода. Тольяттинским филиалом ВЭИ по заданию КНЦ РАН разработан макетный 4-каскадный ИТ погружного типа с магнитопроводом из трансформаторной стали, предназначенный для установки бурения скважин с промывкой водой при буровом наконечнике диаметром 400 мм (рис. 6). Однако подобная схема генератора обладает тем недостатком, что при разряде накопительной емкости НБ (накопительной батареи) в нагрузку (R_n - C_n) после ее пробоя через ИТ предельная мощность импульса невелика вследствие высокого волнового сопротивления цепи разряда. По той же причине сечение железа сердечника ИТ имеет значительные размеры.

В НИИ электрофизической аппаратуры (НИИ ЭФА) им. Ефремова, г. Санкт-Петербург, по заданию КНЦ РАН был разработан однокаскадный ИТ, нагружаемый на контур обострения фронта высоковольтных импульсов с обостряющим конденсатором на напряжение 400 кВ. Для гашения циклов перезаряда обострителя была применена схема с дополнительной формирующей линией, подключаемой параллельно накопительной емкости с первичной стороны ИТ.

В разработках ТФ ВЭИ и НИИ ЭФА (рис. 7) удалось существенно уменьшить размеры генераторов импульсов, но с точки зрения минимизации размера и веса не устраивает использование в этих разработках магнитопроводов на железе. Решением является переход к использованию материалов с высокой магнитной проницаемостью, например ферритов. Достижимость заявленных целей подтверждается результатами опробования ИТ, разработанного НИИ высоких напряжений (НИИ ВН) (г. Томск) для бурения скважин диаметром 200 мм [3]. В этом ИТ применен импульсный трансформатор на ферритовой основе, размещаемый на забое скважины (рис. 8); при этом ферритовый сердечник создавал линию с нелинейным элементом в первичной цепи, а также служил сердечником трансформатора. Такая схема трансформатора дает возможность как преобразования амплитуды импульса, так и увеличения крутизны его фронта.

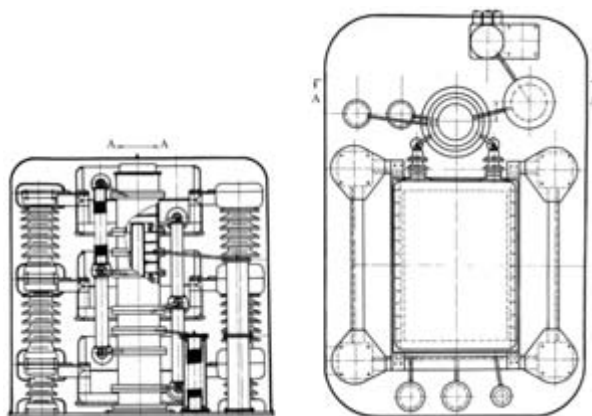


Рис. 5. Компоновка ГИНШ-300 (вид сбоку и вид сверху, электрическую схему см. на рис. 1)

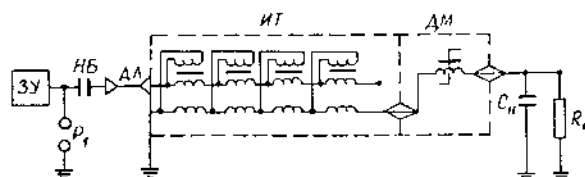


Рис. 6. Схема источника импульсов на основе каскадного импульсного трансформатора



Рис. 7. Источники импульсного напряжения по схеме ИТ, разработки ТФ ВЭИ (слева) и НИИ ЭФА (справа)

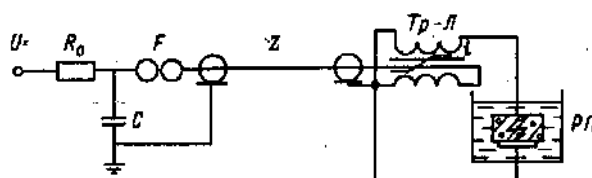


Рис. 8. Схема импульсного трансформатора на ферритовой основе

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭИ

В связи с оценкой перспектив промышленного использования электроимпульсных технологий наиболее острым вопросом был и частично остается ресурс работы конденсаторов и его удельные энергетические характеристики.

Экономическая эффективность ЭИ-технологий в определяющей степени зависит от ресурса работы конденсаторов. Стоимость конденсаторов составляет значительную, а в некоторых случаях и основную часть эксплуатационных

затрат. В первом приближении «ресурсный» критерий экономической целесообразности может быть определен следующими цифрами: измельчение рядовых руд и материалов, бурение и резание горных пород оправдывается при ресурсе работы конденсаторов порядка миллиарда (10^9) циклов «заряд – разряд»; бурение специальных скважин в крепких скальных породах, селективное измельчение и разупрочнение крупновкрапленных руд повышенной стоимости – при ресурсе в 100 миллионов (10^8) циклов; в специальных установках с ограниченной производительностью (геологические пробы, специальные материалы) – при ресурсе 10 миллионов (10^7) циклов [6].

В момент начала работ по электроимпульсным технологиям конденсаторов с требуемыми характеристиками не было. Выпускаемые конденсаторы были рассчитаны либо на режим работы при одиночных импульсах, либо на низкие разрядные токи при высоком декременте затухания в частотном режиме работы. При этом ресурс, не превышающий 10^6 – 10^7 импульсов (табл. 1), был явно недостаточен. Для проведения технологических исследований электроимпульсного разрушения с повышенной частотой следования (как правило, не более 25 в секунду) в генераторах импульсов конденсаторы приходилось использовать в режимах нагрузки по напряжению в 0,23–0,3 от номинального с соответствующим увеличением габаритов установок. За 40 лет исследований удалось на 3 порядка повысить ресурс работы конденсаторов. По техническим условиям Кольского научного центра РАН Серпуховским НПО «Конденсатор» были разработаны и изготовлены опытные партии конденсаторов ИМ-30×0,2, ИС-30×0,2 и ИМ-50×0,2. Техническим заданием предусматривался ресурс работы 10^8 импульсов при частоте следования импульсов 20 в секунду, разрядном токе 5 кА с декрементом затухания 2. В качестве пропиточного диэлектрика в конденсаторах ИМ-30×0,2, ИС-30×0,2 применены конденсаторное масло и дихлордифенил соответственно. Результаты испытаний и опыт эксплуатации опытной партии этих конденсаторов оказались неудовлетворительными (большей частью по причине качества пайки). Класс напряжения данных конденсаторов (30 кВ) не являлся оптимальным для ЭИТ, и дальнейшее участие КНЦ РАН в работе над этой серией конденсаторов по причине отсутствия финансового обеспечения было прекращено. Значительно более перспективной разработкой явился опытный конденсатор ИМ-50×0,2 (рис. 9). В ходе стендовых испытаний опытная партия конденсаторов в указанном номинальном режиме при непрерывной работе на частоте 20 имп./сек в течение 600 часов без каких-либо изменений успешно выдержала $4,3 \times 10^7$ импульсов. Однако массогабаритные параметры конденсатора невысоки, энергоемкость конденсаторов составляет 3,7 Дж/дм³.

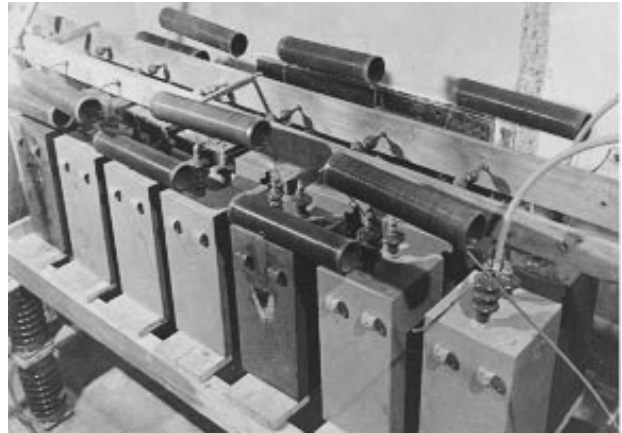


Рис. 9. Генератор импульсного напряжения на базе конденсаторов ИМ-50×0,2

Для существенного улучшения свойств конденсаторов необходимо снижение уровня потерь энергии в диэлектрике известным способом – применение комбинированной бумажно-пленочной изоляции. В проектных разработках ИИПТ НАН Украины унифицированных высоковольтных импульсных конденсаторов предусмотрен бумажно-пропиленовый диэлектрик с пропиткой касторовым маслом. Данные конденсаторы, спроектированные в габаритах конденсатора ИМН-100-0,1, что удобно для монтажа и обслуживания установки, имеют в 5–6 раз более высокую энергоемкость (табл. 2).

С учетом разработок других фирм современный уровень разработки конденсаторов для целей ЭИ-технологий по ресурсу оценивается как в высокой степени подготовленный к использованию для ресурса 10^7 циклов, как потенциально обеспеченный – для ресурса в 10^8 циклов и как принципиально возможный – для ресурса 10^9 циклов. Современная элементная база уже сейчас позволяет создать компактные установки ЭИ-технологий в спецприменениях с ограниченной производительностью. Дальнейшее совершенствование установок со стороны повышения их мощности последовательно вовлечет в производственное использование другие технологические направления способа.

ОБОСТРИТЕЛИ

При разработке ЭИ-технологий по условиям пожаробезопасности и по экономическим соображениям необходимо исходить из использования в качестве рабочей среды воды или растворов на нефтяной основе с высоким содержанием воды по типу эмульсий «вода в масле». В этом случае формирование импульсов напряжения с требуемыми для пробоя горной породы параметрами потребует использования генераторов по схеме обострения фронта высоковольтных импульсов, и обостряющую емкость необходимо рассчитывать на класс напряжения 300–500 кВ при величине емкости в интервале (1–5) мкФ

[8]. На экспериментальных установках ЭИТ различного назначения опробованы обострители $(1-10) \cdot 10^{-9}$ нФ на напряжение 400–600 кВ как специального исполнения (чаще в виде коаксиальной системы на глицерине), так и на основе промышленных типов компенсационных конденсаторов. Предпочтение следует отдать обострителям на основе жидкого диэлектрика с высокой диэлектрической постоянной (глицерин, вода), причем регламент эксплуатации обострителей должен предусматривать периодическое кондиционирование жидкого диэлектрика. Можно рассчитывать на облегченный режим работы обострителя с зарядом и разрядом в микросекундном диапазоне, но при реализации мер принудительного разряда обострителя в случае нештатной работы обостряющего разрядника или породоразрушающего устройства.

РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ИНДУКТИВНОСТИ ГИН

В качестве разделительных индуктивностей ГИН (величина 1–1,5 мкГн) можно ограничиться цилиндрическими катушками с однослойной намоткой на изоляционном каркасе с шагом и глубиной канавки не менее 5 мм и применением ферритовых стержней (для уменьшения размеров).

КОММУТИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

В настоящее время лучшим вариантом коммутаторов ГИН по эксплуатационным показателям являются вентилируемые разрядники с продувкой воздухом в герметичном, шумопоглощающем кожухе осесимметричного или коаксиального типа с синхронной регулируемой перестройкой величины промежутков. Для схем с импульсным трансформатором стадию опробования проходят газовые управляемые разрядники. В отдаленной перспективе рассматривается

твердотельная коммутация, уже апробированная в режимах высоковольтных (до 100 кВ) мало-мощных (порядка 1 Дж) импульсов [9].

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫХ УСТАНОВОК

Наряду с общими требованиями, предъявляемыми к электроустановкам, электроимпульсные установки должны быть выполнены с учетом обеспечения снижения до безопасного уровня наведенных потенциалов и токов утечки.

Наведенные потенциалы и токи утечки вызываются разрядным процессом в контуре генератора импульсов при наличии паразитных емкостных и индуктивных связей между разрядным контуром и находящимися поблизости электрическими цепями и токопроводящими конструкциями, при наличии гальванических связей между контуром разряда и заземленными металлоконструкциями. Наведенные в окружающем пространстве напряжения создают токи утечки, которые растекаются как по металлоконструкциям, так и непосредственно по земле. Форма импульсов тока утечки аналогична форме тока в разрядном контуре, а величина их пропорциональна наведенным потенциалам и убывает с увеличением расстояния от установки.

Наведенные потенциалы могут быть, прежде всего, причиной нестабильной работы самой установки, особенно при наличии магнитонасыщающихся элементов. Наведенные потенциалы могут представлять опасность для работы обслуживающего персонала, а также для различных электрических и электронных устройств. При использовании ЭИ-установок на горном предприятии наведенные потенциалы могут представлять опасность для ведения взрывных работ, вызывая непроизвольное срабатывание детонаторов.

Таблица 2

Характеристики импульсных конденсаторов

Тип конденсатора	Напряжение, кВ	Емкость, мкФ	Частота импульсов, Гц	Разрядный ток, кА	Декремент	Средний ресурс, имп.	Энергоемкость, Дж/дм ³	Изготовитель
КЭМ-50-1	50	1	2,2	20	10	10^7	4,7	ОЗ ПКБЭ
ИК-50-2×0,5	50	1	2,2	40	10	2×10^8	4,9	ОЗ ПКБЭ
ИК-50-2×2,5	50	5	0,5	30	10	3×10^6	23,0	ОЗ ПКБЭ
ИКТ-50-1	50	1	2	20	50	$7,5 \times 10^7$	19	з-д «Конденсатор»
ИК-50-2	50	2	0,03	16	10	5×10^6	37,8	з-д «Конденсатор»
ИКМ-50-3	50	3	0,05	250	1,5	$3,5 \times 10^4$	58	з-д «Конденсатор»
ИМН-100-0,1	100	0,1	200	2	—	10^8	55	
ИМ-50-0,2 (проектная разработка)	50	0,2	20	10	3	10^8	3,7	
УВИК (проектная разработка)	50	0,1	100		10	10^9	3–10	ОЗ ПКБЭ
	50	0,5	10		10	10^8	10–20	
	50	1,0	2		10	10^7	20–30	

Способы снижения наведенных потенциалов известны и могут быть полностью перенесены на установки ЭИТ. Необходимо, прежде всего, ослаблять паразитные связи между генератором высоковольтных импульсов и приемниками наводок. Снижение паразитных связей может быть достигнуто путем разноканального монтажа установок, экранирования источников и приемников наводок, а также установкой в низковольтных цепях развязывающих фильтров (разделительных трансформаторов в цепи питания контрольно-измерительной аппаратуры). Для монтажа вторичных цепей необходимо применять кабели и провода с металлическим экраном, максимально удалять низковольтные цепи от высоковольтного разрядного контура генератора, применять по возможности радиальное расположение кабельных трасс и размещать прямой и обратный провод в общем экране, повышать эффект экранирования низковольтных цепей их намоткой на ферромагнитные сердечники. Оболочки кабелей необходимо заземлять как на концах трасс, так и в возможно большем числе промежуточных точек, при этом все кабели, расположенные в одном канале, должны заземляться в общих точках. При подключении фильтров провода подключения конденсаторов должны иметь минимальную длину.

Большое значение в вопросе снижения наводок до допустимых существующими правилами норм играет правильное устройство заземляющего контура и подключение к нему нулевой точки разрядного контура. Разрядный контур должен соединяться с землей в одной опорной точке. Предпочтительно иметь разрядный контур, изолированный от защитного контура заземления. В случае необходимости в ближней зоне к этой точке могут быть установлены до-

полнительные заземлители для эффективного выравнивания нулевой точки разрядного контура с потенциалом земли.

Опыт экспериментальных работ по ЭИТ в условиях действующих предприятий показал достаточность указанных мероприятий по снижению уровня наведенных потенциалов и средств защиты от них для обеспечения электробезопасной эксплуатации установок ЭИТ на промышленных предприятиях, в рудниках и карьерах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электрофизическая наука разработала энергетически эффективный способ разрушения горных пород, позволяющий создать новый класс машин широкого спектра технологического применения – бурения скважин в крепких скальных породах, резания и поверхностной обработки массива, селективной дезинтеграции минерального сырья и отходов производства. Для обеспечения возможности реализации разработок в промышленном масштабе необходимо специализированное электротехническое оборудование известных электротехнике типов (трансформаторы, выпрямители, конденсаторы, коммутаторы), но к которому предъявляются требования повышенного ресурса и повышенной надежности в жестком динамическом режиме работы «заряд – разряд». Высоковольтное электроаппаратостроение для электро-разрядных технологий – сравнительно молодая отрасль электротехники. Имеющийся багаж технических идей по совершенствованию оборудования значителен, но реализован далеко не в полной мере. Поэтому следует ожидать технологического прорыва в этой отрасли, что несомненно даст импульс для дальнейшей практической реализации способа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев А. А., Воробьев Г. А., Завадовская Е. К. и др. Импульсный пробой и разрушение диэлектриков и горных пород. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1971. 225 с.
2. Котов Ю. А., Месяц Г. А., Филатов А. Л. Комплексная переработка пиритовых отходов горно-обогатительных комбинатов наносекундными импульсными воздействиями // ДАН. 2000. Т. 372. № 5. С. 654–656.
3. Кривоносенко А. В., Семкин Б. В. Генератор высоковольтных импульсов // ПТЭ. 1982. № 6. С. 73–75.
4. Курец В. И., Усов А. Ф., Цукерман В. А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 324 с.
5. Семкин Б. В., Усов А. Ф., Курец В. И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. 276 с.
6. Усов А. Ф. Перспективы технологий электроимпульсного разрушения горных пород и руд // Известия РАН, Энергетика. 2001. № 1. С. 54–62.
7. Усов А. Ф., Гладков В. С. Вопросы электротехнического обеспечения технологий электроимпульсного разрушения материалов источниками высоковольтных импульсов // Вестник НТУ ХПИ. 2004. Вып. 35. С. 143–154.
8. Усов А. Ф., Семкин Б. В., Зиновьев Н. Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. Л.: Наука. Ленинградское отд-ние, 1987. 189 с.
9. Усов А. Ф., Семкин Б. В., Зиновьев Н. Т. Переходные (электрические) процессы в установках электроимпульсной технологии. Л.: Наука, 1987. 179 с.

УДК 533.9

НИКОЛАЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ ЖАРИКОВ

инженер НОЦ «Плазма», Петрозаводский государственный университет

*nikolay.zharikov@mail.ru***АНДРЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ ПИСКУНОВ**

аспирант кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, НОЦ «Плазма», Петрозаводский государственный университет

*piskunov@plasma.karelia.ru***СЕРГЕЙ ФЕДОРОВИЧ ПОДРЯДЧИКОВ**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, НОЦ «Плазма», Петрозаводский государственный университет

*psf@ptz.ru***АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ СЕМЕНОВ**

инженер НОЦ «Плазма», Петрозаводский государственный университет

*alexsem26@yandex.ru***АНАТОЛИЙ ДИАМИДОВИЧ ХАХАЕВ**

доктор физико-математических наук, профессор, директор НОЦ «Плазма», Петрозаводский государственный университет

*alim@karelia.ru***АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ ЩЕРБИНА**

ведущий инженер, Петрозаводский государственный университет

dusty@plasma.karelia.ru

МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР И МИКРОЧАСТИЦ В КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЕ

В статье рассматриваются вопросы модификации плазменно-пылевых структур в тлеющем разряде низкого давления. Показаны изменения параметров структур в процессе их выращивания, варьирования величины разрядного тока. Рассмотрены возможности применения метода оптической диагностики высокого разрешения и системы машинного зрения для исследования характеристик движения отдельных частиц в структуре. С использованием методов атомно-силовой микроскопии установлена модификация поверхности полимерных частиц MF в плазме разряда.

Ключевые слова: комплексная плазма, тлеющий разряд, упорядоченные плазменно-пылевые структуры, диагностика, плазма, макрочастицы, модификация поверхности

Пылевая плазма [2], [3] представляет собой ионизированный газ, включающий частицы конденсированного вещества. Конденсированная фаза образуется в результате взаимодействия заряженных потоков плазменных частиц с поверхностью твердых тел или специально вводится в плазму извне. Теоретические расчеты равновесных свойств такой плазмы показывают, что при определенных условиях сильное межчастичное взаимодействие приводит к возникновению упорядоченной структуры [4], [5] в расположении макроскопических частиц, аналогичной структурам в жидкости или твердом теле. Взаимодействуя с плазменной средой, частицы конденсированной дисперсной фазы приоб-

ретают значительный электрический заряд [1] и уже в свою очередь влияют на свойства плазмы в области своей локализации. Степень упорядоченности пылевых плазменных структур в большей степени определяется плазменными условиями, а внутренние характеристики пылевого образования, такие как межчастичные расстояния, объем пылевого облака и, соответственно, количество частиц, вовлеченных в структуру, зависят от материала частиц и их размеров, сорта газа и разрядных условий.

Возникновение упорядоченной пылевой структуры в плазме газового разряда существенно усложняет физику процессов ввиду возникновения большого количества взаимодействий

пылевой компоненты с плазмой как электрической, так и неэлектрической природы. Поэтому проведение многофакторных экспериментов, включающих в себя одновременную регистрацию характеристик комплексной плазмы и пылевого образования, позволит развить представления о физике данного явления. Для диагностики объектов плазмы в лаборатории используется комплексный подход, связанный с применением широкого набора диагностических методов, таких как оптические, спектральные, машинное зрение, масс-спектрометрия, рентгеноструктурный анализ, атомная микроскопия, электронная микроскопия, корреляционный анализ, томография, параметрические воздействия, которые позволяют получать большой объем независимой информации об исследуемом объекте. В настоящей работе представлены исследования, связанные с:

- установлением закономерностей влияния атомно-молекулярного состава среды и, соответственно, плазменных условий, материала макрочастицы на характеристики упорядоченной пылевой структуры;
- изучением механизмов самоорганизации и формирования плазменно-пылевых структур и их характеристик;
- проведением анализа кинетики пылевых плазменных частиц в плазме газовых разрядов;
- изучением влияния взаимодействия плазмы с поверхностью полимерных макрочастиц.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения экспериментальных исследований была создана экспериментальная установка, конфигурация которой схематично представлена на рис. 1.

Установка состоит из следующих основных блоков:

1. Вакуумной системы и газоразрядной трубки, обеспечивающих необходимые вакуумные условия в исследовательском объеме, напуск плазмообразующего газа и возможность образования объекта исследования;
2. Системы питания газоразрядной трубки и элементов, формирующих сигналы о параметрах газового разряда;
3. Системы визуализации частиц и регистрации статических и динамических изображений пылевой структуры;
4. Системы спектральной диагностики;
5. Системы сбора данных и управления экспериментом.

Газоразрядная трубка, применявшаяся в экспериментальных исследованиях, представляет собой стеклянную цилиндрическую трубку (рис. 2) с впаянными в нее никелевыми (Ni) электродами, имеющими форму пустотелого цилиндра высотой и диаметром 25 мм. Внутри трубки установлены два контейнера с макрочастицами (1) (на рисунке показан только один) и фторопла-

стовым сужением (2), предназначенным для создания неоднородности (стратификации) положительного столба.

Система визуализации частиц (3) (рис. 1) предназначена для регистрации сформировавшихся после инъекции частиц в плазму газового разряда структуры. Данная система состоит из блока подсветки пылевого облака и блока регистрации его изображения.

Условия проведения экспериментов

Макрочастицы:

- полидисперсный порошок частиц Al_2O_3 (фракция от 1 до 60 мкм);
- полидисперсный порошок частиц Zn;
- монодисперсный меламинаформальдегид $D = (4.86 \pm 0.07)$ мкм.

Рабочие газы:

- спектрально чистый неон (99.99 %);
- спектрально чистый аргон (99.98 %).

Газовый разряд – стратифицированный тлеющий разряд постоянного тока.

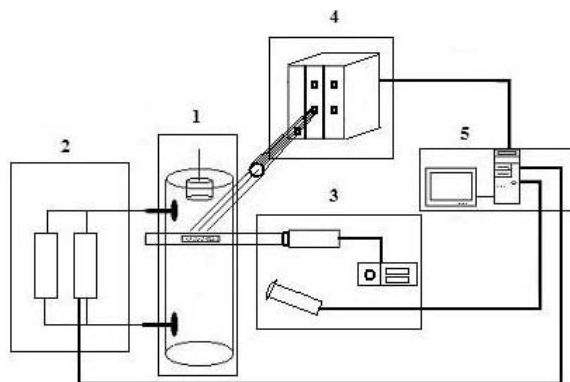


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

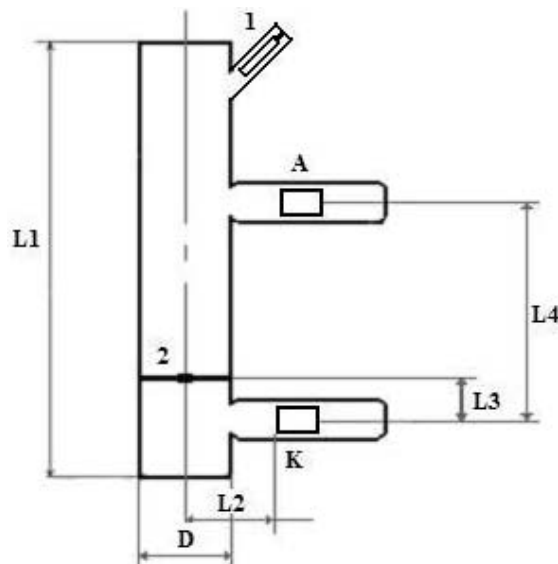


Рис. 2. Схема разрядной трубки:

$D = 28$ мм – внутренний диаметр трубки; $L1 = 500$ мм – длина разрядной трубки; межэлектродное расстояние $(L) = L4 + 2 \cdot L2 = 320 + 2 \cdot 60 = 440$ мм; $L3 = 20$ мм; K – катод, A – анод

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Исследование зависимости объема структуры от числа инъекций порошка макрочастиц в плазму разряда

Проведены исследования зависимости объема упорядоченных структур от количества инъекций порошка Al_2O_3 в аргоне и ксеноне при давлении $p = 100$ Па и разрядном токе $I = 1$ мА. Начиная с момента зажигания разряда с периодичностью в 1 минуту проводилась инъекция частиц в плазму (5-кратное встряхивание контейнера с макрочастицами). На рис. 3, 4 приведены изображения структур соответственно в аргоне и ксеноне после 1-й, 2-й и 20-й инъекций.

Во всех экспериментах количество воздействий на контейнер с макрочастицами всегда было постоянным и с равным усилием, поэтому предполагается относительное постоянство количества вбрасываемых частиц. Механизм образования и роста структуры во всех случаях был следующим: после первой инъекции формировалась небольшая структура, являющаяся центром кристаллизации (рис. 3а, 4а) для последующей достройки частиц. В большинстве случаев во время первой инъекции подавляющее число инжектируемых макрочастиц не удерживаются в наблюдаемой страте и падают на дно разрядной трубки. Лишь небольшое количество частиц организуются, формируя небольшую структуру. Эта структура образует ядро, вокруг которого при последующих инъекциях порошка достраиваются новые макрочастицы (рис. 3б, 4б). Было замечено, что независимо от начального количества инжектируемого порошка в плазму размер начальной структуры (ядра) всегда стабилен и имеет в каждом независимом эксперименте при одинаковых газоразрядных условиях (токе, давлении плазмообразующего газа) один и тот же объем (в пределах повторяемости начальных вакуумных условий). По мере роста пылевого образования число частиц, пролетающих мимо структуры и падающих на дно разрядной камеры, сокращается, при этом структура растет обычно как в аксиальном, так и в радиальном направлениях. Частицы, которые при данной конфигурации поля упорядоченной структуры и напряженности внешних полей пылевое образование не способно удержать, сбрасываются вниз.

Объем структуры в аргоне существенно превосходит объем пылевого образования в ксеноне. С ростом объемов структур в аргоне наблюдается постепенное объединение структур в разных стратах путем образования канала из макрочастиц (рис. 3с), который с увеличением количества инъекций растет вместе с объемами структур в радиальном направлении и объединяет две структуры в одну.

Дальнейшее продолжение инъекций частиц цинкового порошка позволило получить в аргоне при давлении газа $P = 80$ Па и токе $I = 0.6$ мА

структуры (рис. 5), которые обладали следующими свойствами:

- упорядоченная структура имеет форму конуса и занимает в пространстве объем до $V \sim 4500$ мм³;
- пылевое образование состоит из нитевидных структур;
- в основании структура практически полностью занимает все сечение токоведущего канала;
- в каждой страте газового разряда растет своя структура. Эти структуры по мере увеличения количества инъекций соединяются друг с другом образуя канал из частиц инжектируемого порошка, зависающих в промежутке между стратами. По этим каналам структуры обмениваются частицами, так что в центре канала макрочастицы движутся вверх, а по краям спускаются вниз.

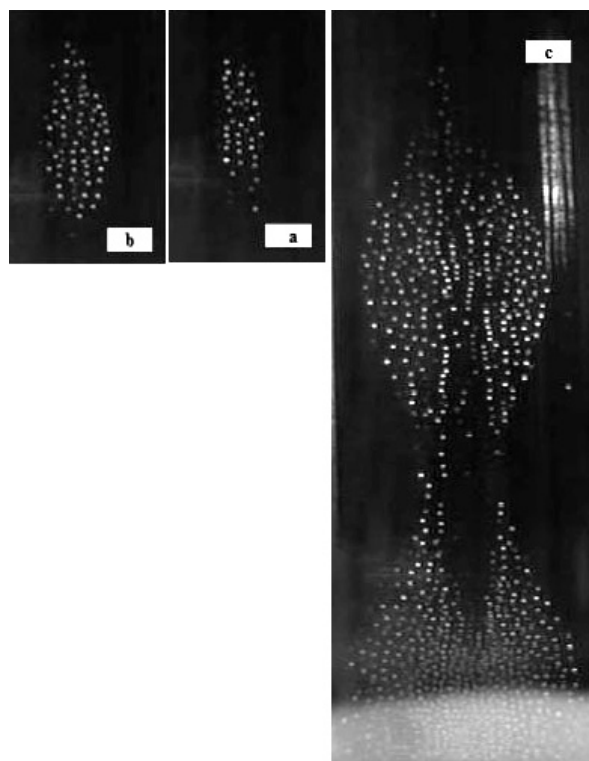


Рис. 3. Изображения пылевых образований в Аг после 1-й (а), 2-й (б) и 20-й (с) инъекций

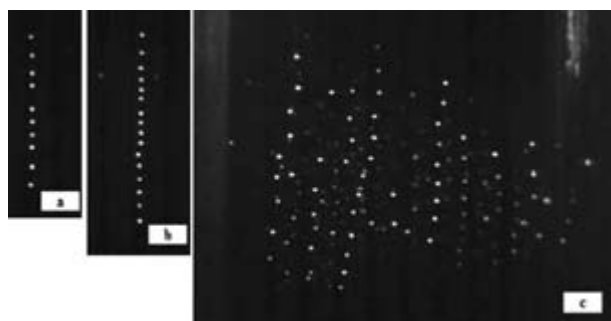


Рис. 4. Изображения пылевых образований в Хе после 1-й (а), 2-й (б) и 20-й (с) инъекций

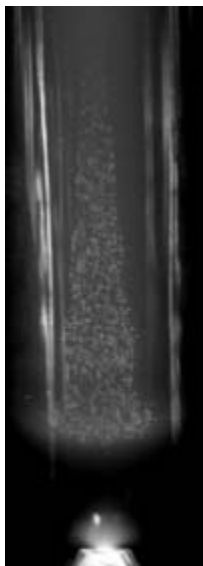


Рис. 5. Изображение пылевой структуры в аргоне

Таблица 1

Зависимость объемов структур от количества инъекций для систем Ne, Ar – Al_2O_3 , Zn

Газ	Ne	Ne	Ar	Ar
Макрочастицы	Al_2O_3	Zn	Al_2O_3	Zn
Объем структуры после 1-й инъекции ($мм^3$)	90	50	10	50
Объем структуры после 95-й инъекции ($мм^3$)	550*	220	55	450
Объем структуры после 1-й инъекции ($мм^3$)	–	–	10	50
Объем структуры после 95-й инъекции ($мм^3$)	–	–	450	370
Объем структуры после 1-й инъекции ($мм^3$)	30	20	–	–
Объем структуры после 95-й инъекции ($мм^3$)	900	550	–	–

Таблица 2

Зависимость величины среднего межчастичного расстояния по сечению структуры от рода газа и газоразрядных условий (частицы Al_2O_3)

Газ	Межчастичное расстояние, мкм					
	Ar				Ne	He
Давление, Па	P=80				P=80	P=80
Ток, мА	I=0.3	I=0.5	I=1.0	I=2.0	I=2.0	I=2.0
Среднее знач., мкм	170	180	210	330	140	70
±, мкм	10	10	20	20	20	20

Рассчитанные значения объемов структур после 1-й и 95-й инъекций порошка для конкретных систем макрочастица – газ приведены в табл. 1.

Для газов (Ne, Ar) скорость изменения объема пылевой структуры при малых токах ($I = 0.3, 0.5$ мА) значительно превышает изменение этого параметра при более высоком значении величины разрядного тока ($I = 2.0$ мА). Однако при данных газоразрядных условиях в процессе роста структуры разряд нестабилен и по мере ее увеличения, особенно в моменты инъекции час-

тиц в плазму, обычно гаснет еще на начальных этапах выращивания структуры.

2.2. Значения межчастичных расстояний

Определение значений межчастичных расстояний осуществлялось программно путем анализа сечений структуры, полученных с помощью системы «лазерного ножа». Видеокамера на основе ПЗС-структур фиксировала изображения частиц в сечении структуры после каждой 5-кратной инъекции макрочастиц в плазму. В программе настраивался фильтр яркости, позволяющий установить порог яркости рассеянного поверхностью частицы света и исключить слабо подсвеченные макрочастицы, которые попадают в зону свечения лазерного ножа вследствие их флуктуационных колебаний внутри структуры. Далее межчастичные расстояния усреднялись по всему ансамблю частиц в пределах сечения структуры. С ростом тока ($I = 0.3, 0.5, 1.0, 2.0$ мА) происходит увеличение подводимой к структуре теплоты, что ведет к ее разупорядочиванию и увеличению межчастичного расстояния (табл. 2).

2.3. Изучение пылевых структур с использованием оптики высокого разрешения

При использовании полидисперсных порошков макрочастиц, фракционный состав которых составляет от единиц до сотни микрон, для формирования упорядоченных пылевых структур возникает вопрос о конкретном размере частиц, из которых образована пылевая структура. В связи с этим требуют решения важные задачи определения размера макрочастиц в структуре пылевого образования, характеристик движения, например скорости вращения вокруг собственной оси, скорости движения и межчастичного расстояния, наличия коагуляции частиц.

Для решения поставленной задачи наблюдения с высоким оптическим разрешением отдельных макрочастиц, формирующих упорядоченное образование в плазме газового разряда, была собрана регистрирующая система, представленная на рис. 6.

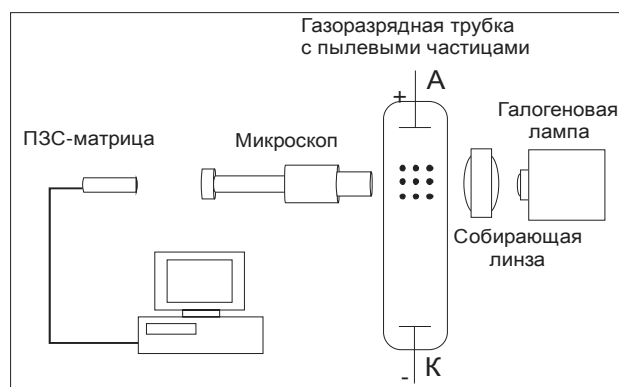


Рис. 6. Оптическая схема системы

Свет от галогеновой лампы, проходя сквозь трубку с пылевыми частицами, попадает в объектив микроскопа, который формирует изображение этих частиц на ПЗС (матрица) фотоприемнике. Собирающая линза перед кварцевой лампой фокусирует световое пятно непосредственно на плазменном кристалле, что улучшает уровень освещенности. Микроскоп, используемый в установке, был специально подобран для наблюдения за частицами внутри газоразрядной трубки. Рабочее расстояние используемого объектива микроскопа равно 18 мм, диаметр трубки $D = 37$ мм, ППО образуются в центре трубки. Видимое увеличение объектива – 15 $\times$ (объектив OM 15/0.3 92 004), окуляра – 15 $\times$, длина тубуса – 160 мм. Микроскоп используется как проекционная система. Изображение объекта рисуется в плоскости за окуляром, где на различных расстояниях относительно окуляра можно наблюдать действительное изображение объекта.

На рис. 7 приведено изображение частицы оксида алюминия, захваченной в нижней части сформированного упорядоченного пылевого образования. Ее форма вытянута и загнута, а размер составляет порядка 12 мкм $\times$ 20 мкм.

На рис. 8 приведено изображение частиц MF.

Анализ полученных изображений отдельных частиц в плазме позволил установить размеры макрочастиц КДФ, формирующих пылевое образование в конкретных плазменных условиях. Результаты исследования приведены в табл. 3.

Применение разработанного метода диагностики позволило увидеть в упорядоченной пылевой структуре отдельные макрочастицы, оценить размеры и форму частиц из полидисперсной фракции, удерживаемых в образовании КДФ, оценить межчастичные расстояния и область колебания около положения равновесия. Кроме того, данный метод позволяет обнаружить наличие коагуляции частиц, что существенно изменяет размеры, форму, величину заряда составной макрочастицы по сравнению с предполагаемыми условиями в отсутствие коагуляции.

Отдельное направление применения данного метода может заключаться в анализе собственной частоты вращения частиц, однако для проведения такого рода исследований требуется использование высокоскоростных регистрирующих устройств.

2.4. Исследование закономерностей движения макрочастиц в плазме газового разряда

Очень часто необходимо уметь создавать стабильные пылевые структуры, которые существуют, например, в стратах тлеющего разряда постоянного тока, и удерживать в них макрочастицы достаточно длительное время (несколько часов), чтобы выполнять определенные технологические операции, например напыление.

Изменяя характеристики разряда, можно управлять плотностью макрочастиц в пылевой структуре и ее размером. Уменьшая кинетиче-

скую энергию движения макрочастиц, можно стабилизировать и изменять размеры области локализации движения отдельных макрочастиц. Область существования устойчивых структур в наших условиях ограничивалась разрядными токами $I = 0.1\text{--}4.0$ мА и давлениями плазмообразующего газа $p = 30\text{--}120$ Па.

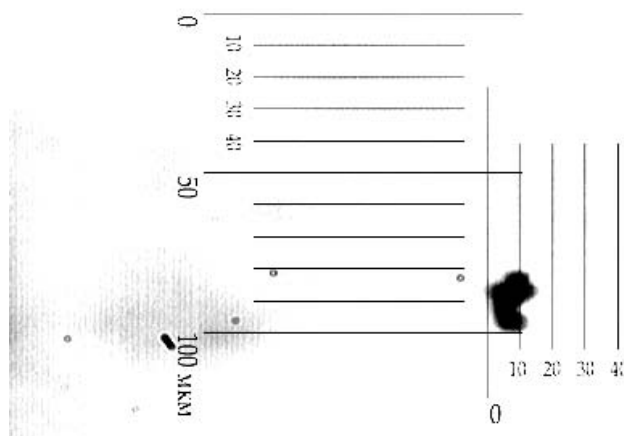


Рис. 7. Изображение отдельной частицы Al_2O_3 в структуре пылевого образования

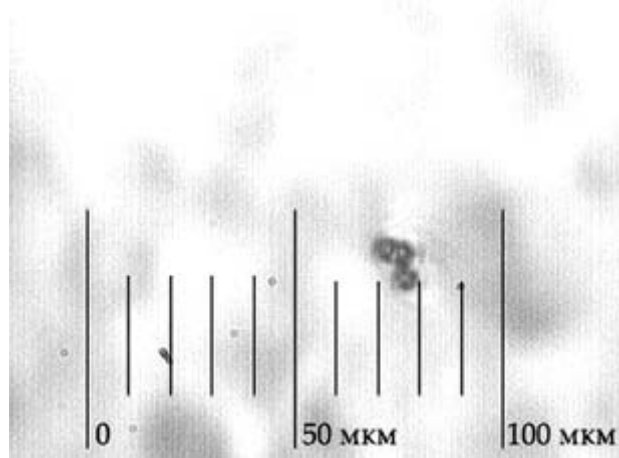


Рис. 8. Изображение трех коагулировавших частиц MF в структуре пылевого образования: $I = 0.85$ мА, $U = 590$ В, $P = 45$ Па

Таблица 3

Характеристики объекта наблюдения			
№	Критерий	MF (4.86 ± 0.07 мкм)	Al_2O_3
1	Размер	4.61 ± 0.44 мкм	$(7.5 \div 12.5) \pm 0.3$ мкм
2	Форма	Сферическая; коагулировавшие частицы	Асферическая, вытянута и загнута
3	Межчастичное расстояние	320–460 мкм	410–530 мкм
4	Область колебаний	30–40 мкм	100–120 мкм

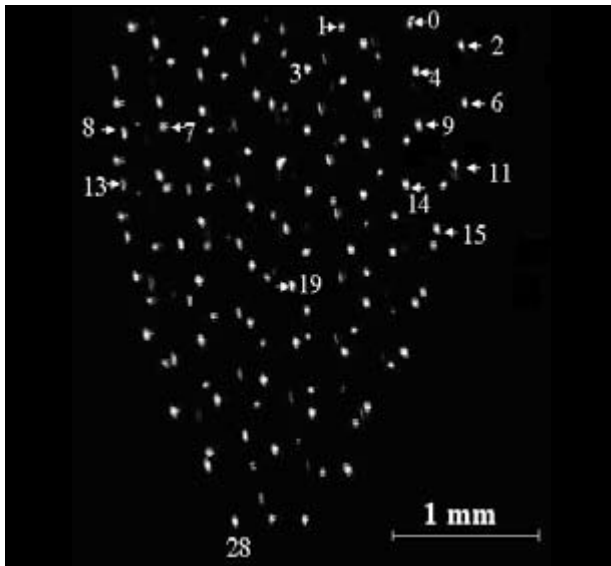
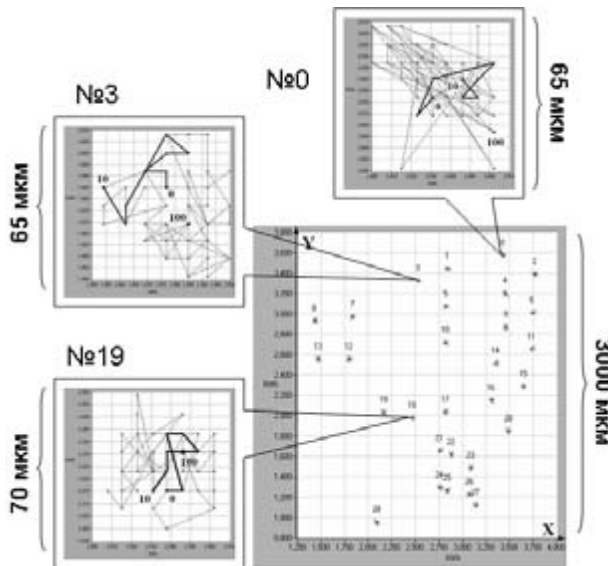


Рис. 9. Изображение структуры

Рис. 10. Восстановленные траектории макрочастиц:
($I = 0.6 \text{ mA}$, $p = 0.3 \text{ Torr}$)

Контроль за состоянием структуры проводился с помощью системы машинного зрения (СМЗ), построенной на основе технологии IMAQ Vision. Функция СМЗ заключается в том, чтобы фиксировать видеоизображение и определять положение (координаты) отдельных объектов (макрочастиц).

В данном эксперименте исследовалось результирующее влияние условий на поведение коллектива макрочастиц в упорядоченных плазменно-пылевых структурах в отсутствие специфических внешних воздействий.

Регистрация макрочастиц в сечении плазменно-пылевого образования осуществляется ПЗС-камерой стандарта PAL, платой видеозахвата IMAQ-1411, которая оцифровывает изображение, формирует последовательность кадров

(цифровых изображений) и в реальном режиме времени обрабатывается с помощью компьютера: реализует алгоритм распознавания макрочастиц на изображениях (рис. 9).

На рис. 9 приведено изображение пылевой плазменной структуры, полученной в эксперименте. Система захвата изображения анализирует объект, фильтрует изображение и присваивает уникальный номер каждой частице в пределах выделенной зоны наблюдения. В связи с этим существуют следующие основные факторы, которые ограничивают применимость системы:

- частота следования видеок кадров должна быть как минимум в два раза больше частоты, с которой макрочастица изменяет траекторию своего движения (временное разрешение);
- расстояния между макрочастицами должны превышать амплитуды их тепловых флуктуаций (пространственное разрешение);
- чувствительность и динамический диапазон приемника видеокамеры (ПЗС-матрицы): засветка/недостаток рассеянного частицей света;
- вычисления останавливаются, если изменяется исходное количество частиц в наблюдаемой системе.

Результаты программного восстановления структуры и траектории движения отдельных частиц приведены на рис. 10. Участок, обозначенный черным цветом, – это последовательные смещения макрочастицы за 0.4 с, красным – за 4 с. Числа на самой траектории обозначают номер кадра (или момент времени), когда было зафиксировано положение макрочастицы от начала наблюдения. Хорошо видно, что траектории локализованы в некоторой ограниченной области пространства (для данных условий она составляет 60 мкм по горизонтали и 70 мкм по вертикали); при этом соседние не пересекаются друг с другом.

Повторяемость получения одних и тех же пылевых структур в разных экспериментах может быть гарантирована идентичностью числа встряхиваний за один эксперимент. Проводились три серии встряхиваний по три в каждой, что нивелирует разброс в количестве макрочастиц, выпадающих каждый раз из контейнера. Таким образом, можно считать, что каждый раз получается одно и то же пылевое образование.

Макрочастицы, находящиеся в плазме, совершают непрерывное механическое движение. Траектория движения каждой такой макрочастицы в течение времени наблюдения в пространстве в общем случае обусловлена результирующим действием сил, которые определяют динамику, а также кинетические характеристики ее движения.

Траектория частицы за время наблюдения $\Delta t = t_k - t_n$ представляет собой ломаную линию (рис. 11). Ломаная траектория получается путем соединения точек местоположения макрочастицы в последовательные моменты времени отрезками прямых. Ось Y направлена вдоль оси трубки от катода к аноду, ось X – в радиальном на-

правлении от оси трубки к ее стенке. Положения частицы фиксируются последовательно через равные промежутки времени dt , соответствующие частоте кадров видеокамеры (25 кадров/с). Таким образом, зная смещение ds частицы из каждого $t(i)$ положения, можно определять средние скорости, с которыми происходит это смещение. За время наблюдения получится набор скоростей частицы в процессе ее движения, который можно представить в виде гистограммы распределения скоростей.

Гистограмма скоростей каждой частицы по времени имеет вид, подобный приведенному на рис. 12, где каждой возможной скорости частицы v_i в течение времени наблюдения Δt можно поставить в соответствие величину, показывающую значение скорости смещения макрочастицы N_i относительно $N_{\max}$.

Величина среднего значения скорости определится как

$$V_{cp} = \left(\sum_i (v_i \cdot N_i) \right) \cdot N_{\max}^{-1};$$

S_{vcp}^2 – дисперсия средней скорости частицы.

Таким образом, для каждой точки (p, I) можно составить таблицу параметров нормально распределенных величин $[V_{cp}, S_{vcp}^2]$, причем размер всех выборок одинаков, то есть за каждой частицей наблюдение велось одинаковое время.

Экспериментально установлено наличие зависимости скорости движения макрочастиц от давления плазмообразующего газа и разрядного тока при прочих равных условиях. Уменьшение скорости с увеличением давления обусловлено тем, что плотность частиц газа возрастает (температура газа остается неизменной); следовательно, частота столкновений макрочастицы с частицами газа также возрастает (рис. 13).

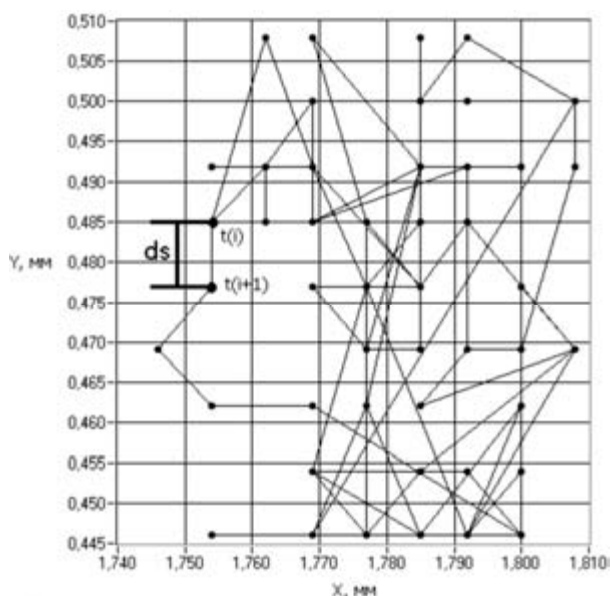


Рис. 11. Траектория отдельной макрочастицы

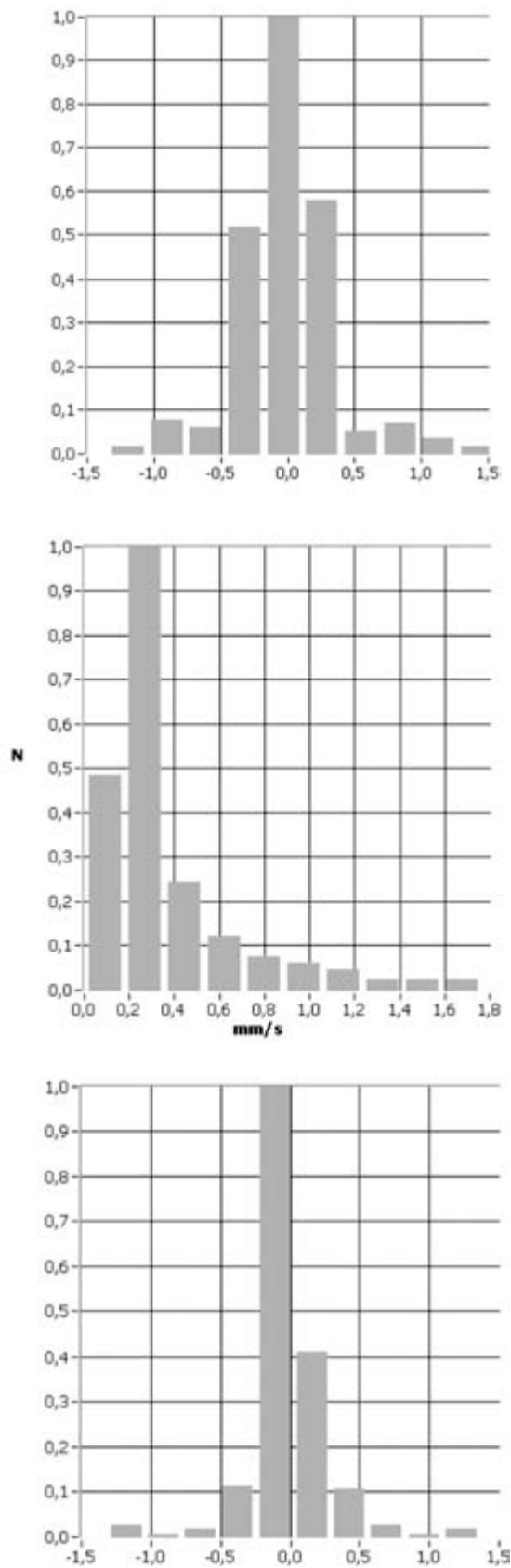


Рис. 12. Гистограмма функции распределения по скоростям движения одной макрочастицы (в течение $\Delta t = 4$ с)

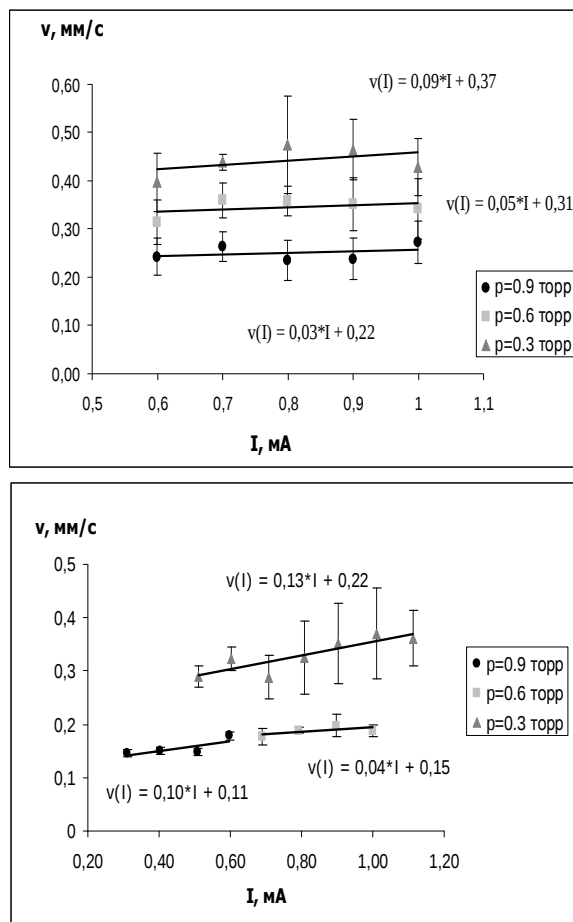


Рис. 13. Зависимость средней скорости движения макрочастиц от тока разряда в Ne (верхний) и Ar (нижний)

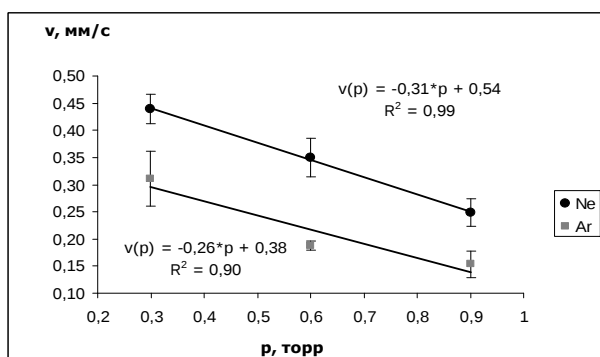


Рис. 14. Зависимость средней скорости движения макрочастиц от давления плазмообразующего инертного газа

Таким образом, рассеяние энергии макрочастицы на плазменных частицах увеличивается. Это можно эффективно использовать для «охлаждения» макрочастиц в структуре и их стабилизации.

Управление структурой с помощью изменения давления плазмообразующего газа гораздо

эффективнее, но практически для замкнутых объемов оно реализуется плохо. В этом случае можно использовать зависимость скорости движения от разрядного тока (рис. 14).

2.5. Взаимодействие компонентов плазмы с материалом макрочастиц

Основная трудность изучения воздействия компонентов плазмы на поверхность частиц, составляющих упорядоченную плазменно-пылевую структуру, заключается в отсутствии возможности анализа данного воздействия непосредственно в плазме. Известные оптические методы сегодня не способны решить эту задачу. В данном исследовании предложена методика, призванная получить новые достоверные и объективные данные о формах возможного существования частиц КДФ в комплексной плазме и их модификации при взаимодействии с компонентами этой плазмы, включая взаимодействие между собой.

Методика экспериментального исследования заключалась в следующем:

1. Создавался устойчивый «плазменный кристалл»;
2. В период его существования за ним велось видеонаблюдение;
3. Производилось извлечение частиц, «проэкспонированных» в плазме;
4. Производилось электронно-микроскопическое исследование формы частиц до и после пребывания в плазме с помощью микроскопа СМ 20.2 и детальное исследование изменений структуры приповерхностного слоя с помощью атомно-силового микроскопа СММ-2000.

В ходе экспериментов внутри газоразрядной трубки поддерживался стационарный тлеющий разряд в неоне (спектрально чистый неон) при давлении 65 Па и токе 1 мА. Для формирования упорядоченных структур использовались монодисперсные полимерные сферические частицы меламинформальдегида (MF-R) с аттестованными размерами 4.86 ± 0.07 мкм.

В настоящий момент не представляется возможным извлечь частицы из плазменного кристалла в момент горения разряда, поэтому исследованию подвергались те частицы, которые удалось захватить после выключения разряда с помощью специальной улавливающей системы. Были проведены три серии экспериментов с различным временем экспозиции (10, 20, 40 мин) частиц в плазме тлеющего разряда. Далее поверхностный слой частиц, захваченных описанным выше способом, подвергался анализу, который проводился на растровом электронном микроскопе СМ 20.2 и атомно-силового микроскопе СММ-2000. Изображения поверхности макрочастиц после различной временной экспозиции в плазме приведены на рис. 15, 16, 17, 18.

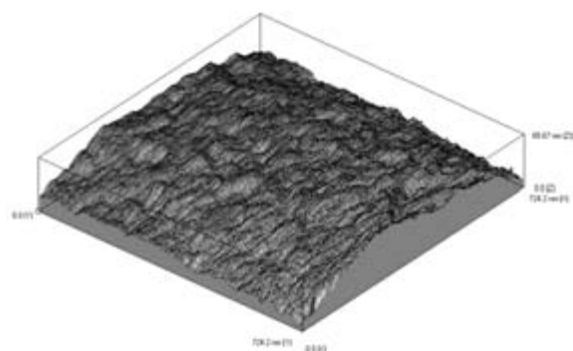


Рис. 15. Изображение поверхности макрочастицы (724 × 724 нм) до помещения в плазму

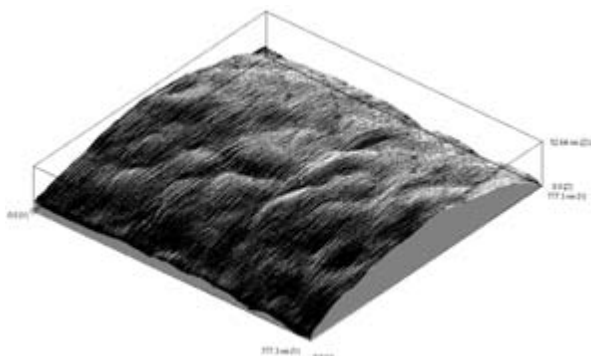


Рис. 16. Изображение поверхности макрочастицы (777 × 777 нм) после 10 мин в плазме

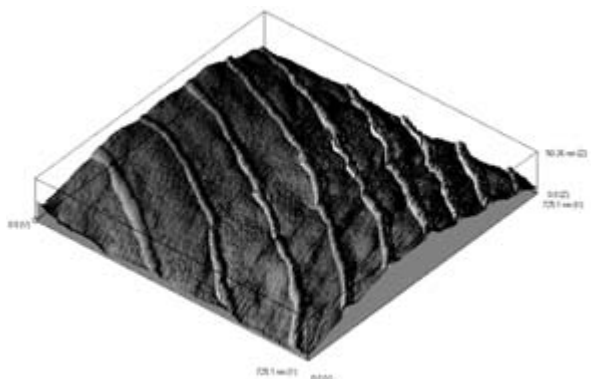


Рис. 17. Изображение поверхности макрочастицы (725 × 725 нм) после 20 мин в плазме

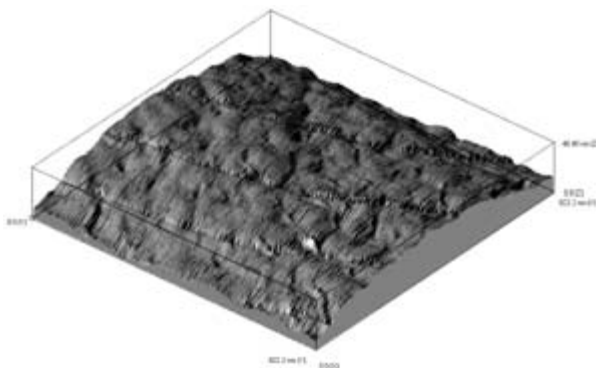
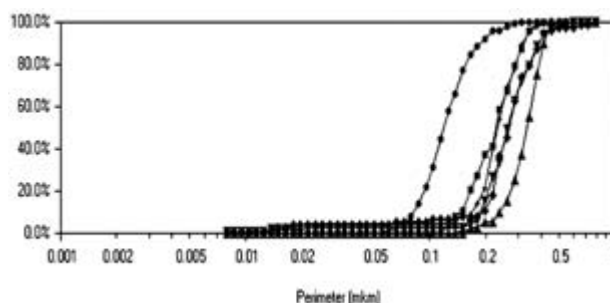


Рис. 18. Изображение поверхности макрочастицы (822 × 822 нм) после 40 мин в плазме



Name	
■	Частица (1,417 × 1,417 мкм) после 10м
●	Частица (1,403×1,403 мкм) до плазмы
▲	Частица (1,844 × 1,844 мкм) после 20м
▼	Частица (1,555 × 1,555 мкм) после 40м
◆	Частица (1,800 × 1,800 мкм) после 40м
+	Частица (1,861 × 1,861 мкм) после 40м

Рис. 19. Интегральная кривая гранулометрического состава

В результате данных исследований были выявлены следующие различия в характере поверхностей частиц до помещения в плазму и после извлечения из нее:

1. С увеличением времени экспозиции частиц в плазме увеличился размер микронеровностей поверхности, обусловленных глобулярным строением «тела» макрочастицы;
2. На образцах частиц с временами экспозиции 20 и 40 мин на поверхности отчетливо видно наличие возрастающих углублений (каверн), связанных с ее деструкцией под действием компонентов плазмы;
3. Обнаружены особенности структуры поверхности макрочастиц в виде эквидистантных регулярных полос, проходящих через всю поверхность частицы, которые становятся более заметными при увеличении времени экспонирования частицы в разряде. Их наличие связано, очевидно, с технологией производства частиц.

При помощи программных средств обработки полученных изображений был произведен морфологический анализ поверхности частиц, извлеченных из плазмы. За измеряемую величину бралось значение периметра поверхностных глобул частицы. Также морфологический анализ поверхностных глобул проводился у частиц, не находившихся в плазме. В результате по средним значениям распределения периметра поверхностных глобул для набора частиц, не погруженных в плазму, и для частиц, извлеченных из плазмы, были построены графики (рис. 19).

Из графиков распределения отчетливо видно, что периметр поверхностных глобул у частиц, извлеченных из плазмы с временами экспозиции 10, 20, 40 мин, увеличился на 100–300 нм по сравнению с частицами, которые не были погружены в плазму. Вместе с тем средняя высота поверхностных глобул у частиц, извлеченных из плазмы, уменьшилась на 5–20 нм, то есть они

стали более приплюснутыми сверху и одновременно увеличились в размерах по периметру. Все это говорит о том, что условия экспонирования приводят к заметной модификации поверхностной и внутренней структуры макрочастиц в разряде и могут повлиять на физико-химические характеристики среды упорядоченных плазменно-пылевых структур, на создание наноразмерных фрагментов вещества макрочастиц, а также на характеристики процессов зарядки, адсорбции и десорбции для погруженных в плазму частиц конденсированной дисперсной фазы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования и представленные выше экспериментальные данные показывают следующее:

1. Изменение физико-химических свойств системы макрочастица – газ приводит к существ-

венному изменению характеристик (таких как межчастичное расстояние, форма, объем, вид структуры) образующихся плазменно-пылевых образований.

2. Рассматривать пылевые структуры как объекты, состоящие из отдельных идеализированных макрочастиц определенного размера, не совсем корректно. Наличие процесса коагуляции приводит к образованию многочастичных комплексов с зарядовым числом и размерами, значительно превышающими расчетные.
3. Условия экспонирования приводят к заметной модификации поверхностной структуры макрочастиц в разряде и могут повлиять на физико-химические характеристики среды упорядоченных плазменно-пылевых структур, а также на характеристики процессов зарядки, адсорбции и десорбции для погруженных в плазму частиц конденсированной дисперсной фазы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Липаев А. М., Молотков В. И., Неведов А. П. и др. Упорядоченные структуры в неидеальной пылевой плазме тлеющего разряда // ЖЭТФ. 1997. Т. 112, вып. 6(12). С. 2030–2044.
2. Ichimaru S. Strongly Coupled Plasmas: High-Density Classical Plasmas and Degenerate Electron Liquids // Rev. Mod. Phys. 1982. V. 54. P. 1017–1059.
3. Ikezi H. Coulomb Solid of Small Particles in Plasmas // Phys. Fluids. 1986. V. 29. P. 1764–1766.
4. Fortov V. E., Nefedov A. P., Torchinskii V. M. Crystallization of a dusty plasma in the positive column of a glow discharge // JETP Lett. 1996. V. 64. № 2. P. 92–98.
5. Molotkov V. I., Nefedov A. P., Pustyl'nik M. Yu. Liquid Plasma Crystal: Coulomb Crystallization of Cylindrical Macroscopic Grains in a Gas-Discharge Plasma // JETP Lett. 2000. V. 71. № 3. P. 102–105.

УДК 821.161.1'0.09

СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ ГРИППА

кандидат географических наук, доцент кафедры географии естественно-географического факультета, ректор, Карельская государственная педагогическая академия
gsp@kspu.karelia.ru

СЕРГЕЙ БОРИСОВИЧ ПОТАХИН

доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой географии естественно-географического факультета, Карельская государственная педагогическая академия
potakhin@kspu.karelia.ru

Рец. на кн.: Низовцев В. А., Постников А. В., Снытко В. А., Фролова Н. Л., Чеснов В. М., Широков Р. С., Широкова В. А. Исторические водные пути Севера России (XVII–XX вв.) и их роль в изменении экологической обстановки. Экспедиционные исследования: состояние, итоги, перспективы М.: Типография «Парадиз», 2009. 298 с.

«Возделывать географию России». Такую цель в 1845 году поставили перед собой и будущими сподвижниками основатели Русского географического общества (РГО). Ф. П. Литке, К. И. Арсеньев, Ф. П. Врангель, В. И. Даль, К. М. Берг и ряд других видных научных и политических деятелей России явились организаторами РГО. Первые экспедиции общества связаны с именами П. П. Семёнова-Тян-Шанского, Н. А. Северцова, И. Д. Черского, Н. М. Пржевальского, И. С. Полякова...

Славные традиции одного из старейших географических обществ поддерживаются и сегодня. Ярким примером являются экспедиции 2003–2008 годов по изучению водных путей Европейского Севера, организованные действительными членами РГО, сотрудниками Института истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова и МГУ при содействии РФФИ и гранта Президента РФ (научный руководитель проектов – доктор географических наук, профессор А. В. Постников). Итогом исследования стала монография «Исторические водные пути Севера России (XVII–XX вв.) и их роль в изменении экологической обстановки». Авторы называют свою работу опытом исторического моделирования. Главная задача, поставленная перед научным коллективом, – не просто пройти водными путями Европейского Севера, а изучить их комплексно, во взаимодействии истории и географии. «География – это история в пространстве, а история – это география во времени», – этот постулат присутствует на каждой странице книги.

Исследователи не дублировали путешествия, применяя старинные средства передвижения. Подобный опыт есть у российских, украинских, литовских, британских, финских, польских и германских ученых. И путешествия Тура Хейердала, без всяких сомнений, стали примером подобных научных экспериментов. В данном направлении проводятся многочисленные экспедиции, печатаются книги. Примером может служить монография «Историко-географические путешествия по Русскому Северу» (Зелюткина Л. О.,

Коростелев Е. М., Севастьянов Д. В. Историко-географические путешествия по Русскому Северу. СПб., 2010), написанная сотрудниками Ленинградского областного педагогического университета им. А. С. Пушкина и СПбГУ, которая, нужно признать, во многом уступает рецензируемому изданию.

На современных средствах передвижения московские исследователи прошли водные магистрали прошлого, заранее ознакомившись с огромным количеством архивных и историко-литературных источников (фонды Российского государственного исторического архива, Российского государственного архива древних актов и др.), и провели комплексные историко-географические описания природных и культурных объектов.

Первая глава монографии – исторический обзор водных путей Севера России, их создания и состояния. В последующих главах охарактеризованы памятники истории и техники Соловецкого архипелага, Белозерско-Онежский и Северо-Двинский водные пути. При описании Соловецкого архипелага приведена подробная характеристика ландшафтной структуры островов, особенностей монастырского природопользования, описаны памятники гидротехники: Соловецкий водопровод, озерно-канальная система. Характеристика Белозерско-Онежского водного пути включает подробнейшее описание Лаче-Кубенского водного соединения, оснащенное картографическими материалами и фотографиями памятников науки и техники из фондов Каргопольского государственного историко-архитектурного художественного музея-заповедника. Северо-Двинская шлюзовая артерия представлена как потенциальный туристско-рекреационный объект. Авторами подробно описано природное и культурное наследие региона, а также Опокский гидроузел и соляные варницы Тотьмы и Сольвычегодска. Однако, на наш взгляд, теоретические рассуждения, касающиеся понятия «культурный ландшафт», должны были быть во введении.

Фундаментальностью отличаются гидролого-гидрохимические материалы, представленные в каждой главе монографии. По многим водным объектам приведены данные по морфологии водоемов, гидрологическому режиму, гидрохимическим особенностям объектов.

Рецензируемое издание украшают сотни современных черно-белых и цветных фотографий, картосхемы, фотокопии архивных документов, информационные карты памятников, гидрографические и гидрологические диаграммы и графики.

Стоит отметить, что при проведении «Комплексной экспедиции по изучению исторических водных путей Севера России» (такое обобщенное название предлагают сами исполнители исследовательских работ) применялись методики и методы, которые представляются не только новыми (современными), но и являющимися хорошей основой для перспективных исследований. Накопленный в результате комплексных изысканий полевой материал создает великолепный задел для различных исследовательских тем и обобщений. Только перечисление всех видов полевых и камеральных работ, а также полученных результатов занимает в книге полторы страницы.

Особую ценность экспедиционные материалы представляют еще и потому, что они обрабатывались и сохранялись участниками проекта на современных носителях информации в цифровом виде, что создает особые условия для их дальнейшего использования в контексте историко-географических, экологических, рекреационно-туристических и других направлений трактовки сведений по историческим водным путям. Создание единой геоинформационной базы, включающей в себя паспортизированные гидротехнические объекты и сооружения, уникальные природные образования и комплекс гидрохимических характеристик, а также собственно водные пути, является важнейшим результатом

Комплексной экспедиции и перспективным материалом для дальнейшей работы по различным направлениям исследования на достаточно длительный период времени. Данная книга по своему объему информации и жанру вполне может быть признана справочной литературой, но, естественно, не ранга рекламного проспекта. Это солидное научно-информационное издание. При всей своей общей логической структуре и стройности изложения каждый раздел книги может использоваться отдельно как энциклопедическая статья, справочник или путеводитель.

Авторы книги ставят перед общественностью и государственными органами важный вопрос о включении исторических водных путей в Единый государственный реестр охраняемых объектов историко-культурного наследия. Действительно, несмотря на наличие на территории России таких уникальных историко-географических объектов, не создано ни одного музея-заповедника или охраняемых территорий иного статуса, имеющих не площадную, а линейную пространственную структуру. Такие охраняемые государством объекты имеются в Финляндии, Франции, Германии, Великобритании и т. д. Правительство РФ, понимая всю полноту проблемы, ставит задачу использования внутренних водных путей не только перед исследователями, но и перед хозяйствующими субъектами. В рецензируемой книге не просто декларируется позиция исследователей, но и определяются конкретные маршруты для туристских групп.

Представленная книга является довольно оригинальным печатным произведением, напоминающим географическую модель шедевров конца XVIII – начала XX века с их информативностью и темпами издания: путешествие – монография. Кажется очевидным, что подобные научные произведения – пример для историко-географических публикаций, направленных на пропаганду «возделывания географии России».

ХРОНИКА

■ 16–17 февраля 2010 года в ПетрГУ прошла V научно-методическая конференция, посвященная 70-летию Петрозаводского государственного университета, «Университеты в образовательном пространстве региона: опыт, традиции и инновации».

На ставшей традиционной конференции все-сторонне обсуждалась роль вузов как системообразующих элементов региональной образовательной среды в условиях развивающейся реформы образования в Российской Федерации. Особое место в работе конференции заняли вопросы методики и качества преподавания в высшей школе, внедрения инновационных методов, средств и форм в образовательный процесс

вуза, а также вопросы психологии и педагогики высшего образования. На открытии конференции ректорам университетов г. Оулу Лаури Лайюнену, Восточной Финляндии Пертту Вартиайнену, а также профессору Университета Восточной Финляндии Матти Ууситупе, до января 2010 года являвшемуся ректором Университета г. Куопио, были вручены дипломы Почетного доктора ПетрГУ.

■ 19–23 апреля 2010 года в ПетрГУ проходила 62-я научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых.

На 99 секциях 14 факультетов было представлено 979 докладов. В работе конференции приняли участие 3849 студентов, 581 преподаватель, 198 гостей. В этом году на секциях конференции выступали с докладами клинические ординаторы, аспиранты, студенты Карельской педагогической академии, Петрозаводского базового медицинского колледжа, других вузов России, Финляндии.

Исторический факультет посвятил одну из секций 65-летию Победы советского народа в Великой Отечественной войне. Были представлены доклады о партизанском движении в Карелии, о финских концентрационных лагерях 1941–1944 годов для советских военнопленных в Карелии.

В рамках конференции состоялся II этап по отбору участников Программы «УМНИК».

■ 17–18 мая в ПетрГУ проходила Восьмая всероссийская конференция «Преподавание информационных технологий в Российской Федерации».

Конференция проводится Ассоциацией предприятий компьютерных и информационных технологий (АП КИТ) – крупнейшей ассоциацией, объединяющей более 80 успешных российских и зарубежных ИТ-компаний.

Конференция организована при содействии Правительства РК и ПетрГУ и приурочена к 90-летию карельской государственности и 70-летию университета. Исполнительный директор АП КИТ Н. В. Комлев подчеркнул, что конференция посвящена обсуждению вопросов преподавания информационных технологий и актуальным российским тенденциям в формировании кадрового потенциала для отечественной ИТ-индустрии. Это также площадка для продвижения новых технологических трендов, новых идей и новых методологий преподавания ИТ-дисциплин. Петрозаводск стал победителем в конкурсе среди пяти городов РФ, претендующих на проведение этой конференции. В рамках конференции работали секции: «Роль исследовательских университетов в подго-

товке ИТ-специалистов мирового уровня», «Вопросы школьного ИТ-образования. Опыт, проблемы, перспективы», «Содержание и методология конкретных дисциплин и курсов подготовки ИТ-специалистов. Опыт использования современных технологий в преподавании ИТ-дисциплин», «Вопросы интеллектуальной собственности и роль открытых технологий в ИТ-образовании», «Инновационный потенциал университетов в области информационных технологий. Новые формы взаимодействия между вузами и индустрией», «Фундаментальная и прикладная компоненты ИТ-образования», «Авторизованное обучение, сертификация преподавателей и студентов. ИТ-образование как бизнес».

Во время конференции проводились мастер-классы, круглые столы, панельные дискуссии. Посмотреть открытие конференции смогли в режиме он-лайн не только в городах Карелии, но и в Краснодаре, Томске, Москве, Санкт-Петербурге и других.

■ 26 мая 2010 года директор Научно-образовательного центра по фундаментальным проблемам приложений физики низкотемпературной плазмы ПетрГУ (НОЦ «Плазма»), профессор физико-технического факультета А. Д. Хахаев награжден золотым знаком «Ученый года», а НОЦ «Плазма» признан лауреатом в конкурсе «100 лучших организаций России. Наука. Инновации. Научные разработки».

■ 3 июня 2010 года стартовал третий этап международного проекта «Марс-500».

Наряду с авторитетными научно-исследовательскими центрами мира в этом проекте принимает участие ПетрГУ в лице профессора, доктора медицинских наук А. Ю. Мейгала, который приглашен в качестве высокопрофессионального специалиста для проведения электромиогра-

фических исследований по отработке профилактических мер будущей марсианской экспедиции. Участие профессора ПетрГУ в проекте мирового уровня подтверждает сильную сторону научных исследований и разработок, проводимых в нашем университете.

■ 22–25 июня 2010 года состоялась II Международная научно-практическая конференция «Деревянное зодчество как феномен национальной культуры».

Конференция организована Министерством культуры и по связям с общественностью РК, ПетрГУ и Университетом Флоренции. Основная тема – сохранение культурного наследия Русского Севера. Научный руководитель конференции, профессор кафедры архитектуры, строительных конструкций и геотехники ПетрГУ, доктор наук В. П. Орфинский в своем выступлении подчеркнул, что «патриотизм, как и всякая любовь, должен быть действительно конкретным. Нельзя любить нечто, не имеющее своего лица. Сохранение этого лица – задача сохранения нашей национальной идентичности». В конференции приняли участие более 100 человек – представители Ми-

нистерства культуры и по связям с общественностью РК, Российской Академии архитектуры и строительных наук, Научно-исследовательского института теоретических проблем народного деревянного зодчества ПетрГУ, историки архитектуры, архитекторы-реставраторы, инженеры, руководители и сотрудники музеев, представители государственных органов охраны объектов культурного наследия из Москвы, Санкт-Петербурга, Великого Новгорода, Пскова, Вологды, Томска, Мурманска, Архангельска, Кириллова, а также исследователи и реставраторы из Финляндии, Швеции, Норвегии, Польши, Италии, Испании, Турции, Японии, Канады, Великобритании.



2 июня 2010 года исполнилось 60 лет доктору медицинских наук, профессору, заведующему кафедрой акушерства и гинекологии медицинского факультета ПетрГУ *Елене Георгиевне Гуменюк.*

ЕЛЕНА ГЕОРГИЕВНА ГУМЕНЮК К 60-летию со дня рождения

Елена Георгиевна Гуменюк родилась 2 июня 1950 года в г. Петрозаводске в семье служащих. После окончания средней школы № 30 поступила на медицинский факультет Петрозаводского университета, в 1975–1976 годах проходила интернатуру на базе родильного дома № 2. В течение четырех лет Елена Георгиевна возглавляла акушерско-гинекологическую службу в Муезерском районе Карелии. С 1980 по 1982 год училась в клинической ординатуре на кафедре акушерства и гинекологии медицинского факультета Петрозаводского университета. После окончания ординатуры работала врачом родильного дома № 2, одновременно училась в аспирантуре, которую закончила досрочно в 1985 году. После защиты кандидатской диссертации на тему «Прогнозирование риска возникновения гинекологических заболеваний в зависимости от течения периода полового созревания» (Москва, 1985) работала вначале ассистентом, а с 1995 по 1999 год – доцентом кафедры. В 1999 году защитила докторскую диссертацию на тему «Клинико-патогенетический подход к терапии дисфункциональных маточных кровотечений в перименопаузе» (Москва, 1999) и была избрана на должность заведующего кафедрой акушерства и гинекологии.

Е. Г. Гуменюк проявила себя как высококвалифицированный клиницист, научный работник, педагог и организатор. Она руководит научно-исследовательской работой сотрудников кафедры, аспирантов и соискателей.

Е. Г. Гуменюк – заместитель декана медицинского факультета по научной работе и постдипломному образованию, член Диссертационного совета, член Научно-технического совета. Она является организатором и председателем Карельской ассоциации врачей-акушеров-гинекологов, заместителем председателя аттестационной комиссии при Министерстве здравоохранения Республики Карелия, членом комиссии родовспоможения.

Елена Георгиевна организовала и в течение 11 лет проводит на базе кафедры сертификационный цикл повышения квалификации для врачей-акушеров-гинекологов.

За свою работу Е. Г. Гуменюк награждена Почетной грамотой Министерства образования РФ. Имеет звание заслуженного врача РК, ветерана труда РФ.

Поздравляем Елену Георгиевну с юбилеем, желаем ей успехов и научных достижений, а ее кафедре – дальнейшего развития!

ЕДИНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К РУКОПИСЯМ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ В ЖУРНАЛ

Публикации в журнале подлежат статьи, ранее не печатавшиеся в других изданиях.

Статья предоставляется в распечатанном виде на бумаге формата А4 (в двух экземплярах) и в электронном виде, на носителе или вложением в электронное письмо на адрес редакции журнала. Печатная версия статьи подписывается всеми авторами.

Статья набирается в текстовом редакторе Microsoft Word и сохраняется с расширением .doc. Объем оригинальной и обзорной статьи как правило не должен превышать 1 печатный лист, кратких сообщений – до 5 страниц, отчетов о конференциях и рецензий на книги – до 3 страниц. Поля: верхнее и нижнее – 2 см, правое и левое – 3 см. Абзацный отступ – 0,5 см. Шрифт: Times New Roman, размер – 14 пунктов, аннотация, список литературы – 12 пт, межстрочный интервал – полуторный. Нумерация страниц – справа внизу страницы.

Статья должна состоять из следующих элементов: названию статьи должен предшествовать индекс универсальной десятичной классификации (УДК) в левом верхнем углу. Далее через 1 интервал – название статьи жирным шрифтом заглавными буквами, название должно быть по возможности кратким, точно отражающим содержание статьи. Точка в конце названия статьи не ставится. Сведения об авторе (имя, отчество, фамилия автора (-ов) полностью; ученая степень и звание; место работы: вуз, факультет, кафедра; должность; электронный адрес и контактные телефоны). Аннотация (объемом 6–8 строк) на русском и английском языках, перед ней – название статьи и фамилия (-ии) автора (-ов) также на двух языках; ключевые слова от 3 до 8 слов (или словосочетаний, несущих в тексте основную смысловую нагрузку) также на двух языках. Все перечисленные элементы статьи отделяются друг от друга пустой строкой и печатаются без абзацного отступа через 1 интервал.

Основной материал статьи и цитат, приводимых в статье, должен быть тщательно выверен автором. Сокращения слов не допускается, кроме общепринятых сокращений химических и математических величин и терминов. Размерность всех физических величин следует указывать в системе единиц СИ.

Список литературы, примечания, комментарии и пояснения по тексту статьи даются в виде концевых сносок. Список литературы должен быть напечатан через одинарный интервал, на отдельном листе. Цитируемая в статье литература (автор, название, место, издательство, год издания

и страницы (от и до или количество)) приводится в алфавитном порядке в виде списка в конце статьи (сначала отечественные, затем зарубежные. Фамилии иностранных авторов приводятся в оригинальной транскрипции). В тексте статьи ссылка на источник делается путем указания в квадратных скобках порядкового номера цитируемой книги или статьи, через точку с запятой – цитируемых страниц, если это необходимо. В книгах иностранных авторов, изданных на русском языке, после заглавия книги через двоеточие указывают, с какого языка сделан перевод. Выходные данные по статьям из журналов и сборников указывают в следующем порядке: фамилия (-ии) автора (-ов) с инициалами, название статьи, через две косые черты – название журнала (год, том, номер, страницы (от и до) или сборника (место издания, год, страницы (от и до))). По авторефератам – фамилия, инициалы, полное название автореферата, после которого ставят двоеточие и указывают, на соискание какой степени и в какой области науки защищена диссертация, место издания, год, страницы.

Таблицы – каждая печатается на отдельной странице, нумеруется соответственно первому упоминанию ее в тексте и снабжается заголовком. Таблицы должны быть предоставлены в текстовом редакторе Microsoft Word (формат .doc). В тексте следует указать место таблицы и ее порядковый номер.

Иллюстрации (рисунки, фотографии, схемы, диаграммы) нумеруются, снабжаются подписями и представляются в виде отдельных растровых файлов (в формате .tif, .jpeg), а в тексте рукописи указывается место, где они должны быть размещены. Для оригиналов (бумажная версия) на обороте каждой иллюстрации ставится номер рисунка, фамилия автора и пометка «верх», «низ». Каждый рисунок должен иметь название и объяснение всех кривых, цифр, букв и прочих условных обозначений, размещенных под ним. В тексте статьи должна быть ссылка на конкретный рисунок, например (рис. 1).

Статьи, поступившие в редакцию, обязательно рецензируются. Если у рецензентов возникают вопросы, статья возвращается на доработку. Редакция оставляет за собой право внесения редакторских изменений в текст, не искажающих смысла статьи.

Материалы, не соответствующие предъявленным требованиям, к рассмотрению не принимаются.

Решение о публикации принимается редакционной коллегией журнала.

CONTENTS

BIOLOGY

Ivanter E. V., Kukhareva A. V.

REPRODUCTIVE FEATURES AND POPULATION STRUCTURE OF NORTHERN BIRCH MOUSE (*SICISTA BETOLINA* PALL.) IN NORTHERN BORDER REGIONS OF KARELIA

Summary: Reproductive features and population structure of the northern birch mouse *Sicista betolina* Pall. in the northern border regions of Karelia are characterized based on the long-term studies (1959–2009). Adult species breed from June to early August: 1 pack out of 3–11 packs. Animalcules of one-year-old make up 53 %, two-year-old ones make up 11 %, three-year-old ones make up 2 % and four-year-old and older species make up 1 % of the whole population.

Key words: Northern birch mouse, population, reproduction features, fertility, population structure8

Bolotnikova O. I., Mikhailova N. P., Ginak A. I., Nemova N. N.

AERATION EFFECT OF D -XYLOSE BIOCONVERSION ON ETHANOL AND XYLITOL BY YEAST *PACHYSOLEN TANNOPHILUS*

Summary: The effect of oxygen transfer rate (OTR, $\text{mM l}^{-1} \text{h}^{-1}$) on xylitol and ethanol production by the yeast *Pachysolen tannophilus* Y-1532 was studied. The highest xylitol and ethanol yield coefficient ($Y_{p/s}$) was obtained under 2,0–5,0 $\text{mM l}^{-1} \text{h}^{-1}$ and 5,0–8,0 $\text{mM l}^{-1} \text{h}^{-1}$, respectively. The role of oxygen on the NADH/NADP⁺ imbalance formation and its influence on the xylitol and ethanol production by the yeast are discussed.

Key words: Aeration, yeast *P. tannophilus*, D-xylose, xylitol, ethanol14

Borvinskaya E. V., Smirnov L. P.

SOME METHODIC ASPECTS OF GLUTATHIONE S-TRANSFERASE ACTIVITY MEASUREMENT IN FISH TISSUES

Summary: Accurate dilution of protein extracts was shown to be important for the determination of the fish glutathione S-transferase activity via spectrophotometry. The dilution rate varies in different fish species and fish tissues.

Key words: Glutathione S-transferase, determination of activity, dilution19

Ryzhkov L. P., Kuritzin A. E.

WHITEFISH POPULATION (*COREGONUS LAVARETUS* L. (Linnaeus, 1758)) IN WATER RESERVOIRS OF CENTRAL KARELIA

Summary: Morphological and biological characteristics of whitefish population in the water reservoirs (lakes Segozero, Elmosero, Lindozero, rivers Segezha and Elma) of Central Karelia are studied. It is established that they belong to the integrated form of *Coregonus lavaretus* L. Five ecological forms, which differ in consistent signs and biological features, are identified and described.

Key words: Whitefish, plastic signs, meristics signs, body length, body mass, correlation index22

MEDICINE

Varlamova T. V., Dorshakova N. V., Karapetyan T. A.

SPECIFIC REGIONAL FEATURES OF TYPE I DIABETES DEVELOPMENT IN CHILDREN OF KARELIAN REPUBLIC

Summary: A genetic research of 2544 healthy newborns in Karelian Republic is carried out. HLA positive children make up 17 % of the examined newborns. Children with aggravated heredity diabetes make up 25 % from 204 children with type 1 diabetes. Cases with virus induced diabetes make up 25 %, vaccination caused diabetes makes up 4 %, and cases with stress-induced diabetes make up 3 %. In the anamnesis, 64 % of the newborns during the first year of their life received protein enriched and cow protein mixtures or unskimmed cow milk.

Key words: Type I diabetes, epidemiology, HLA system, breast feeding27

Markelov Yu. M., Vyazovaya A. A., Zhuravlev V. Yu., Marjyandyshv A. O.

GENOTYPIC FEATURES OF MULTIDRUG-RESISTANT TUBERCULOSIS MYCOBACTERIA IN KARELIA

Summary: Using molecular-genetic methods 119 strains were studied (54 strains with multidrug resistance (MDR), 40 drug-sensitive stains, and 25 plural drug-resistant strains). The absolute majority of the strains with MDR (90, 9 %) and a half of the strains with plural drug resistance, occurring on the territory of Karelia, belong to the genetic family of Beijing. The fact that most of the MDR strains of Beijing family are resistant to Rifampicin can be explained by the mutation of 531 TCG → TTG gene *rpoB* which conditions high resistance level to Rifampicin and cross-resistance to Rifabutin. The presented data demonstrate epidemic danger of MDR strains of Beijing genotype occurring on the territory of Karelia.

Key words: Tuberculoses with multidrug resistance (MDR), genotype of mycobacterium tuberculoses, Beijing31

Simakova M. A., Trofimov V. I., Mironova Zh. A., Iantchina E. D., Dubina M. V.

ASSOCIATION OF MDR I POLIMORPHISM C3435T WITH BRONCHIAL ASTHMA SEVERITY

Summary: P-glycoprotein-170 (Pgp-170), an efflux transporter, is encoded by multidrug-resistant gene (MDR1). The objective of this study is to estimate the frequency of occurrence of MDR1 gene polymorphism C3435T in patients with BA. We identified significant association of MDR1 gene polymorphism (C3435T) with severe bronchial asthma and reduced sensitivity to inhalation with glucocorticosteroids.

Key words: Pharmacogenetics, bronchial asthma, MDR1 gene, glucocorticosteroids34

Yuryan A. O., Meltser R. I.

TREATMENT FEATURES OF PERTROCHANTERIC FRACTURES OF FEMORAL BONE IN SENIOR AGE PATIENT GROUP

Summary: The article addresses biomechanical aspects of the causal relationship between the structure and function of trochanter in proximal femoral fractures. The results received in the problem-solution process via biomechanical methods indicate the need to restore and fix lesser trochanter in the correct anatomic position.

Key words: Biomechanics, pertrochanteric fractures, stability of osteosynthesis, mathematical modelling38

AGRICULTURE

Tsarev A. P.

GLOBAL EXPERIENCE IN FOREST CULTIVATION

Summary: A review of the forest cultivation problem in the world and in our country is presented. The advantages and drawbacks of the forest cultivation are analyzed. Results on the forest regeneration for coniferous and deciduous species received both abroad and in Russia are introduced. It is shown that forest plantation development is one of the forward-looking ways to compensate for wood deficiency.

Key words: Coniferous, deciduous, fast growing species, poplars, raw material base, willows, wood plantations42

ENGINEERING SCIENCE

Ajukaev R. I., Grafova E. O.

ENGINEERING DECISIONS OF ECOLOGICAL SAFETY FOR MOTORWAYS RECONSTRUCTION WITHIN BOUNDARIES OF WATER PROTECTION ZONES

Summary: Functioning motorways, which cross water protection zones, require incorporation of clean up procedures from oil products and suspended substances contained in rainfall and snow-melt waters. Characteristic features of the country road sites do not permit any use of typical purification and treatment facilities. The new technology and design for local waste treatment facilities are offered.

Key words: Country water protection zones, oil products sorption, purification49

Aleshina L. A., Lyukhanova I. V.

X-RAY STUDIES OF WATER INTERACTION WITH CELLULOSE

Summary: The X-ray study of the cellulose swelling in the water is conducted. It is shown that water permeates the capillary-porous structure and amorphous components of the cellulose. It leads to the decrease of the reciprocal disorientation angle of the molecules.

Key words: X-ray study, cellulose, swelling in water55

Shapiro V. Yu., Grigorev I. V., Lepilin D. V., Zhukova A. I.

MODELING OF SOIL CONSOLIDATION CONSISTENT WITH TRAIL TRACTORS ROUTE CHANGE

Summary: The article introduces a model of volumetric soil consolidation by trail tractors. The model is instrumental in predicting a degree of soil consolidation in strips adjoining the skid. The model is consistent with the trail tractors' route change.

Key words: Skidding, soil consolidation, route, route change61

PHYSICS AND MATHEMATICS

Klyukina E. A., Dzyubuk I. M.

MATHEMATICAL AND STATISTICAL ANALYSIS OF RESEARCH DATA ON RUFF INHABITING LAKHTINSKAYA GUBA OF ONEGO LAKE

Summary: The article introduces the mathematical and statistical data analysis on the following morpho-physiological parameters of the ruff inhabiting Lakhtinskaya Guba of Onego Lake: age, weight, length, fatness, gender, internal organ indexes. High indicators of the weight, size and fatness evidence of the favorable dwelling conditions for the fish in Lakhtinskaya Guba.

Key words: Data analysis, the morpho-physiological parameters, ruff, Onego lake, sample, comparison of two independent samples, component analysis65

Berezina O. Ya., Kazakova E. L., Pergament A. L., Sergeeva O. V.

MODIFICATION OF ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF THIN HYDRATED VANADIC OXIDE FILMS UNDER DOPING WITH HYDROGEN AND TUNGSTEN

Summary: The effect of doping with H and W on the properties of V_2O_5 and VO_2 films derived from V_2O_5 gel was studied. It is shown that under cathodic polarization the $V_2O_5 \cdot nH_2O$ films turn from brownish-yellow to red. This internal electrochromic effect is caused by the redistribution of hydrogen ions inside the films. It is demonstrated that for W-doped VO_2 films the substitution of V^{4+} ions by W^{6+} results in a decrease of the metal–insulator transition temperature.

Key words: Vanadium oxide, doping, electrochromic effect, metal–insulator transition77

All-Russian seminar for young scientists “Problems and applications of the electrocharged processing in the industry of nanomaterials and nanosystems”

Belashev B. Z.

NANOMETROLOGY

Summary: Internet sources and research materials were used to describe modern approaches toward nanometrology. The reference system based on the atomic-powered microscope and laser interferometric device, method of terahertz spectroscopy of nanoobjects, new optical microscopes registering integral response of the object are considered.

Key words: Nanometrology, method of terahertz spectroscopy, new optical microscopes, integral response of the object86

Borodulin V. V., Usov A. F.

PROBLEMS OF ELECTROTECHNICAL EQUIPMENT DEVELOPMENT FOR ELECTRIC PULSE DISINTEGRATION DEVICES

Summary: The improvement problem for technical characteristics of the electric pulse disintegration devices is analyzed. Following different paths, the comparison of disintegration devices with specific parameters and comparison of electrical equipment on different elemental base is presented.

Key words: Electric pulse destruction of materials, high-voltage pulse generators, pulse capacitors90

Zharikov N. E., Piskunov A. A., Podryadchikov S. F., Khakhaev A. D., Scherbina A. I.

DUSTY STRUCTURE AND MACROPARTICLE PROPERTIES MODIFICATION IN COMPLEX PLASMA

Summary: The article discusses the problems of dusty structure modification in glow discharge plasma. The experiment showed changes in structure parameters during the processes of dusty cloud growth and discharge current variation. The possibilities of using high-definition optical diagnostics as well as machine vision system for the study of macroparticle kinetics are presented. Via atomic force microscopy (AFM) modification of polymeric (MF) macroparticle in plasma is established.

Key words: Complex plasma, glow discharge, ordered dusty structures, diagnostics, plasma, macroparticles, surface modification99

REVIEWS

Grippa S. P., Potakhin S. B.

The book review: *Nizovtsev V. A., Postnikov A. V., Snitko V. A., Frolova N. L., Chesnov V. M., Shirokov R. S., Shirokova V. A. Historic Water Ways of the Russian North (XVII–XX) and Their Role in the Change of Ecological Environment. Field Work: Condition, Results, Perspectives*109

SCIENTIFIC INFORMATION111

JUBILATION

To the 60th Birthday anniversary of E. G. Gumenyuk113

INFO FOR THE AUTHORS114

РОССИЙСКИЙ ИНДЕКС НАУЧНОГО ЦИТИРОВАНИЯ: инструмент для оценки научной деятельности и механизм продвижения научных журналов

Во всем мире одним из ключевых показателей для оценки работы отдельных исследователей и научных коллективов, влияния на развитие науки, определения качества исследований служит индекс цитирования авторов и импакт-фактор журнала (как средний показатель цитируемости его авторов). Величина индекса цитирования определяется количеством ссылок на публикацию автора в других источниках. Для корректного определения значимости научных трудов важно не только количество ссылок, но и качество самих ссылок. На статью может ссылаться авторитетное издание или популярный иллюстрированный еженедельник. Значимость таких ссылок разная. Для решения проблемы определения значимости периодического издания разработан свой индекс цитирования – импакт-фактор. В индексе цитирования заинтересованы все те, кто имеет отношение к науке и образованию: 1) Ученые с помощью индекса цитирования отслеживают текущую актуальную библиографию работ по своей тематике. 2) Чиновники, учитывая индексы цитирования, принимают решение о выделении финансовой поддержки для исследовательской деятельности отдельного ученого или научного коллектива. 3) Администраторы университетов и институтов на основании показателей цитирования и объема опубликованных работ определяют размеры финансового вознаграждения своих сотрудников. 4) Издатели научной литературы, используя импакт-факторы журналов, оценивают качество изданий, их авторитет и востребованность как научного продукта.

Федеральное агентство по науке и инновациям Министерства образования и науки РФ и Научная электронная библиотека занимаются реализацией проекта «Разработка системы статистического анализа российской науки на основе данных российского индекса научного цитирования (РИНЦ)». РИНЦ – это специализированная база данных по российским научным периодическим изданиям, создаваемая на основе индексирования библиографических описаний статей, аннотаций или рефератов, а также пристатейных ссылок цитируемой литературы. База оснащена мощной поисковой системой, способной реализовать поисковые запросы различной сложности. Благодаря этому продукту можно получать точные данные по индексу цитирования авторов и импакт-факторам журналов.

**ЖУРНАЛ «УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ПЕТРОЗАВОДСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА» ВКЛЮЧЕН
В РОССИЙСКИЙ ИНДЕКС НАУЧНОГО ЦИТИРОВАНИЯ
(РИНЦ) В ИЮЛЕ 2008 ГОДА.**

ПОДПИСАТЬСЯ НА СЕРИЮ «ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ
НАУКИ» МОЖНО ПО КАТАЛОГУ ИЗДАНИЙ ОРГАНОВ НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ АГЕНТСТВА «РОСПЕЧАТЬ»
(ИНДЕКС 66093)