ISSN 1998-1643

Министерство образования и науки
Российской Федерации

Научный журнал

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ПЕТРОЗАВОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

(продолжение журнала 1947–1975 гг.)

№ 6 (127). Сентябрь, 2012

Серия: Естественные и технические науки

Главный редактор
А. В. Воронин, доктор технических наук, профессор

Зам. главного редактора
В. Б. Акулов, доктор экономических наук, профессор
Э. К. Зильбер, доктор медицинских наук, профессор
Э. В. Ивантер, доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН
И. Р. Шегельман, доктор технических наук, профессор

Ответственный секретарь журнала
Н. В. Ровенко, кандидат филологических наук

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

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

uchzap.petrsu.ru

© ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ)», 2012

Редакционный совет

В. Н. БОЛЬШАКОВ
доктор биологических наук,
профессор, академик РАН (Екатеринбург)

И. П. ДУДАНОВ
доктор медицинских наук, профессор,
член-корреспондент РАМН (Петрозаводск)

В. Н. ЗАХАРОВ
доктор филологических наук,
профессор (Москва)

А. С. ИСАЕВ
доктор биологических наук,
профессор, академик РАН (Москва)

МАРЕК ВОХОЗКА
доктор экономических наук
(Чешские Будейовицы, Чешская Республика)

Н. Н. МЕЛЬНИКОВ
доктор технических наук,
профессор, академик РАН (Апатиты)

И. И. МУЛЛОНЕН
доктор филологических наук,
профессор (Петрозаводск)

В. П. ОРФИНСКИЙ
доктор архитектуры, профессор,
действительный член Российской академии
архитектуры и строительных наук (Петрозаводск)

ПААВО ПЕЛКОНЕН
доктор технических наук,
профессор (Йоенсуу, Финляндия)

И. В. РОМАНОВСКИЙ
доктор физико-математических наук,
профессор (Санкт-Петербург)

Е. С. СЕНЯВСКАЯ
доктор исторических наук, профессор (Москва)

СУЛКАЛА ВУОККО ХЕЛЕНА
доктор философии, профессор
(Оулу, Финляндия)

Л. Н. ТИМОФЕЕВА
доктор политических наук, профессор (Москва)

А. Ф. ТИТОВ
доктор биологических наук, профессор,
член-корреспондент РАН (Петрозаводск)

МИЛОСАВ Ж. ЧАРКИЧ
ведущий профессор Сербской
Академии наук и искусств (Белград, Сербия)

Р. М. ЮСУПОВ
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАН (Санкт-Петербург)

Редакционная коллегия серии
«Естественные и технические науки»

А. Е. БОЛГОВ
доктор сельскохозяйственных наук,
профессор (Петрозаводск)

В. В. ВАПИРОВ
доктор химических наук, профессор (Петрозаводск)

Е. Ф. МАРКОВСКАЯ
доктор биологических наук, профессор (Петрозаводск)

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

В. И. ПАТЯКИН
доктор технических наук, профессор (Санкт-Петербург)

Е. И. РАТЬКОВА
ответственный секретарь серии (Петрозаводск)

А. А. РОГОВ
доктор технических наук, профессор (Петрозаводск)

В. И. СЫСУН
доктор физико-математических наук,
профессор (Петрозаводск)

В. С. СЮНЁВ
доктор технических наук,
профессор (Петрозаводск)

В. В. ЩИПЦОВ
доктор геолого-минералогических наук,
профессор (Петрозаводск)

ISSN 1998-1643

Ministry of Education and Science
of the Russian Federation

Scientific Journal

PROCEEDINGS OF PETROZAVODSK STATE UNIVERSITY

(following up 1947–1975)

№ 6 (127). September, 2012

Natural & Engineering Sciences

Chief Editor
Anatoly V. Voronin, Doctor of Technical Sciences, Professor

Chief Deputy Editor
Vladimir B. Akulov, Doctor of Economic Sciences, Professor
Elmira K. Zilber, Doctor of Medical Sciences, Professor
Ernest V. Ivanter, Doctor of Biological Sciences, Professor, The RAS Corresponding Member
Il'ya R. Shegelman, Doctor of Technical Sciences, Professor

Executive Secretary
Nadezhda V. Rovenko, Candidate of Philological Sciences

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

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

uchzap.petrsu.ru

© FBSEI «Petrozavodsk State University (PetrSU)», 2012

Editorial Council

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

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

V. ZAKHAROV
Doctor of Philological Sciences,
Professor (Moscow)

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

MAREK VOCHOZKA
Doctor of Economic Sciences
(Ceske Budejovice, Czech Republic)

N. MEL'NIKOV
Doctor of Technical Sciences,
Professor, the RAS Member (Apatiti)

I. MULLONEN
Doctor of Philological Sciences,
Professor (Petrozavodsk)

V. ORPHINSKY
Doctor of Archtecture, Professor,
Full Member of Russian Academy
of Architectural Sciences (Petrozavodsk)

PAAVO PELKONEN
Doctor of Technical Sciences,
Professor (Joensuu, Finland)

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

E. SENYAVSKAYA
Doctor of Historical Sciences, Professor (Moscow)

HELENA SULKALA
Doctor of Philosophy,
Professor (Oulu, Finland)

L. TIMOFEEVA
Doctor of Political Sciences, Professor (Moscow)

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

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

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

Editorial Board of the Series
"Natural & Engineering Sciences"

A. BOLGOV
Doctor of Agricultural Sciences,
Professor (Petrozavodsk)

V. VAPIROV
Doctor of Chemistry, Professor (Petrozavodsk)

E. MARKOVSKAYA
Doctor of Biological Sciences, Professor (Petrozavodsk)

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

V. PATYAKIN
Doctor of Technical Sciences, Professor (St. Petersburg)

E. RAT'KOVA
Series Executive Secretary (Petrozavodsk)

A. ROGOV
Doctor of Technical Sciences, Professor (Petrozavodsk)

V. SISUN
Doctor of Physical-Mathematical Sciences,
Professor (Petrozavodsk)

V. SYUNEV
Doctor of Technical Sciences,
Professor (Petrozavodsk)

V. SCHIPTSOV
Doctor of Geological-Mineralogical Sciences,
Professor (Petrozavodsk)

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЯ

Суховская И. В., Смирнов Л. П., Немова Н. Н., Осташкова В. В.
Влияние нитрата ртути на состав низкомолекулярных петидов тканей крыс 7

Лукин А. А., Щуров И. Л., Широков В. А., Бабий А. А., Иванов С. И.
Рыбное сообщество Онежского озера в условиях интенсивного промысла 12

Медведева М. В., Федорец Н. Г., Ильинов А. А., Раевский Б. В., Рудковская О. А.
Морфологические и химические свойства почв генетических резерватов Северного Приладожья 20

Горбач В. В.
Внутрипопуляционная изменчивость элементов рисунка на крыльях глазка цветочного *Aphantopus hyperantus* (Lepidoptera, Satyridae) 27

Толмачева Е. Л.
Питание серебристой чайки (Larus Argentatus Pontopp.) Кандалакшского залива Белого моря 32

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

Барсукова Е. Ю., Горанский А. И., Виноградова И. А.
Осмо- и ионорегулирующая функции почек у молодых крыс в условиях повышенной освещенности. 35

Вапиров В. В., Шубина М. Э., Шубин И. В., Венскович А. А.
Селен: актуальные медицинские, эпидемиологические и экологические проблемы Республики Карелия 40

Верховод А. Ю., Баракат М. Ф., Мельцер Р. И., Лозовик И. П.
Современная динамика представлений об оперативном лечении переломов группы С у больных с политравмой 44

Усенко Г. А., Усенко А. Г., Васендин Д. В., Машков С. В., Величко Н. П., Нищета О. В., Козырева Т. Ю., Шустер Г. С.
Особенности потребления и использования кислорода организмом больных ишемической болезнью сердца в дни магнитных бурь в зависимости от психосоматического статуса. 49

Щеглов Э. А., Везикова Н. Н.
Эффективность хирургического лечения варикозной болезни у пациентов с хронической венозной недостаточностью в сочетании с гонартрозом. 55

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

Карпечко А. Ю.
Особенности адаптации активной части корневой системы древостоя после разреживания. 59

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Афоничев Д. Н., Васильев В. В., Папонов Н. Н.
Самотормозящийся плот с хвостовыми раздвижными секциями 62

Григорьев И. В., Шапиро В. Я., Рудов М. Е., Никифорова А. И.
Математическая модель уплотнения почвы комлями пачки хлыстов при их трелевке 65

Сюнёв В. С., Ратькова Е. И.
Методика прогнозирования воздействия лесозаготовительных машин на почвогрунты в межсезонные периоды. 70

Рочев А. А.
О расчете на изгиб неупругих составных пластинок 75

Ягнюк Б. Н.
Key number parameters for evaluation of buildings energy efficiency 78

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Андреев В. П.
Гибридизация атомов азота в анилинах и их молекулярных комплексах с v-акцепторами 82

Пергамент А. Л., Стефанович Г. Б., Андреев В. Н., Болдин П. А.
Электронные неустойчивости в кристаллах соединений переходных металлов 87

Кужаков П. В., Каманина Н. В.
Исследование влияния результата наноструктурирования поверхности на спектр отражения и микротвердость KBr и BaF_2 . . . 99

Мелех Н. В., Алешина Л. А.
Уточнение атомной структуры порошковой целлобиозы методом Ритвельда 101

Воронин А. В., Кузнецов В. А., Шабаев А. И., Спиричев М. В., Вилаев Д. Г.
Алгоритм расчета химического равновесия на основе минимизации энергии Гиббса 106

Кириллов А. Н., Смирнов Н. В.
Моделирование динамики малого предприятия и оптимальная схема кредитования 110

Талбонен А. Н., Рогов А. А.
Модели и методы поиска людей на фотографиях из исторического альбома 113

Юбилеи
К 60-летию Г. С. Антипиной
К 50-летию Н. В. Медведева. 118

Научная информация. 119

Информация для авторов 120

Contents 121

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

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

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ РАН

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

Требования к оформлению статей см.:
http://uchzap.petrsu.ru/files/reg.pdf

Учредитель: ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет»

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

Подписано в печать 19.09.2012. Формат 60x90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
10 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. (1-й завод – 170 экз.) Изд. № 208.

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

Сентябрь, № 6 **Биология** **2012**

УДК 546.49:577.112:599.323.4

ИРИНА ВИКТОРОВНА СУХОВСКАЯ
кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории экологической биохимии Института биологии, Карельский научный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
sukhovska@krc.karelia.ru

ЛЕВ ПАВЛОВИЧ СМИРНОВ
доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологической биохимии Института биологии, Карельский научный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
levps@rambler.ru

НИНА НИКОЛАЕВНА НЕМОВА
доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор Института биологии, Карельский научный центр РАН, заведующий кафедрой молекулярной биологии, биологической и органической химии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
nemova@krc.karelia.ru

ВАЛЕНТИНА ВИКТОРОВНА ОСТАШКОВА
кандидат биологических наук, доцент кафедры молекулярной биологии, биологической и органической химии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
sukhovskaya@inbox.ru

ВЛИЯНИЕ НИТРАТА РТУТИ НА СОСТАВ НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ПЕПТИДОВ ТКАНЕЙ КРЫС*

Методом жидкостной хроматографии низкого давления исследовали состав низкомолекулярных пептидов печени, почек и мускулатуры крыс, которым ежедневно вводили в корм нитрат ртути в течение 14 и 30 дней. Изменения обнаружены во всех исследованных органах животных. Выявлены половые отличия в реакции крыс на интоксикацию нитратом ртути.

Ключевые слова: низкомолекулярные пептиды, ртуть, жидкостная хроматография низкого давления

Двухвалентные тяжелые металлы – это группа ядовитых веществ, играющих заметную роль в техногенном загрязнении окружающей среды и оказывающих повреждающее действие на сочленов той или иной экосистемы [7]. В этой группе токсикантов ртуть занимает одно из ведущих мест. В результате усиливающейся индустриальной деятельности все большие количества ртути поступают в окружающую среду, поэтому становится очевидной необходимость углубленного исследования механизмов защиты у животных организмов от токсического воздействия этого элемента. Процессы биоаккумуляции и уровень интоксикации ртутью зависят от физиологического состояния организма, концентрации металла и формы (ионная или метилированная), в которой он попадает в организм. Несмотря на то что исследования по влиянию ртути на организм проводятся достаточно давно [9], [10], молекулярные механизмы ответной реакции животных до настоящего времени до конца не ясны.

Известно, что химические соединения различной природы, попавшие в организм животных, стимулируют синтез низкомолекулярных металлсвязывающих белков, классифицируемых как металлотионеины (МТ) [4], [6], [11]. Имеются отдельные сведения о том, что в тканях некоторых позвоночных, например в печени рыб, наряду с металлотионеинами существуют, а у подвергшихся действию тяжелых металлов и других чужеродных соединений активно образуются олигопептиды с меньшими, чем у МТ, молекулярными массами [1], [12]. Аналогичных данных по теплокровным позвоночным в доступной нам литературе не обнаружено. Целью настоящей работы было изучение качественных и количественных изменений состава низкомолекулярных пептидов в разных тканях крыс в процессе накопления ртути.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проведены на белых беспородных крысах весом 250 г. В первой серии экспериментов животные были разделены на три группы по 10 крыс в каждой. Крысам первой группы добавляли в корм нитрат ртути $Hg(NO_3)_2$ по 100 мкг/голову в пересчете на катион ежедневно в течение 14 суток. Животные второй группы получали $Hg(NO_3)_2$ в том же количестве в течение 30 суток, третья группа содержалась

© Суховская И. В., Смирнов Л. П., Немова Н. Н., Осташкова В. В., 2012

на обычном рационе (контроль). Во втором эксперименте крысы были разделены на четыре группы: первая группа была сформирована из самцов, вторая из самок (по 5 особей). Животные получали с кормом $Hg(NO_3)_2$ по 100 мкг/голову в течение 30 суток. Третья и четвертая группы, в которые входили соответственно самцы и самки, были контрольными и действию ртути не подвергались. По окончании эксперимента животных декапитировали под наркозом, извлекали печень, почки, скелетные мышцы и брали навески по 0,5 г ткани. Пробы до эксперимента хранили при температуре -18 °С.

Замороженный образец ткани измельчали в фарфоровой ступке, добавляли 0,15М раствор NaCl в соотношении 1:10 и гомогенизировали в гомогенизаторе Поттера – Эльвейэма с охлаждением в течение 1 мин. Гомогенат центрифугировали (31000 g, 15 мин.) на микроцентрифуге 320а (Польша). Фракционный состав низкомолекулярных пептидов определяли в супернатанте. Для хроматографического разделения использовали стандартный набор оборудования фирмы LKB (Швеция). Колонку (К16 х 70) наполняли гелем Toyopearl TSK HW-40S (Sigma) и уравновешивали 0,15М раствором NaCl. Образец объемом 0,8–1,0 мл элюировали в нисходящем потоке со средней скоростью 43,2 мл/ч. Выходящие с колонки полипептидные фракции регистрировали на UV-абсорбциометре при длине волны 254 нм и собирали на коллекторе фракций «UltoRac-7000» (Швеция). Для калибровки колонки использовали пептиды с разными молекулярными массами (Мм) – окситоцин (1 кДа), α- и β-цепи инсулина (2,5 и 3,5 кДа), а также интактный инсулин (6 кДа).

Полученные фракции исследовали на спектрофотометре СФ-2000 (Германия) путем регистрации их спектров поглощения в диапазоне длин волн от 200 до 300 нм. Длина оптического пути кювет – 1 см.

Количественную оценку фракционного состава проводили по измерению оптической плотности при длинах волн 210 (пептидные связи) [2] и 250 нм (-S-R-связи). Результаты анализа представлены графически в виде реконструированных хроматограмм, построенных по этим значениям.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Низкомолекулярные пептиды (НМП) печени крыс всех исследованных групп в диапазоне Мм 2–9 кДа разделялись на 5 фракций (рис. 1А). Концентрация пептидов во всех фракциях у опытных крыс на 14-е сутки уменьшалась в 2,5–13 раз по сравнению с контролем. Эти значения не изменялись до конца эксперимента (30 дней). Исключение составили пептиды с Мм 1,5 и 2,7 кДа, доля которых увеличилась в 1,5 и 1,4 раза соответственно при 30-дневном воздействии.

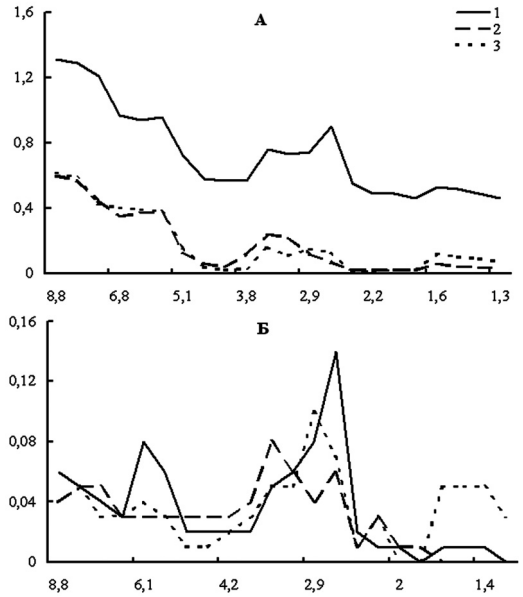


Рис. 1. Влияние нитрата ртути на фракционный состав низкомолекулярных пептидов печени крыс: 1 – контроль; 2 – 14 суток; 3 – 30 суток; по оси ординат – экстинкция при 207 нм (А), 250 нм (Б); по оси абсцисс – молекулярные массы пептидных фракций, кДа

В составе НМП печени обнаружено 5 фракций, оптически активных при 250 нм (рис. 1Б). Динамика количественных изменений этих фракций отличалась от таковой во фракциях общих пептидов. Так, на 14-е сутки у опытных крыс наблюдали снижение уровня пептидов с Мм 6,1, 2,9 и 2,7 кДа в 2,7, 2 и 2,3 раза соответственно, а во фракции 3,5 кДа отмечен их рост в 1,6 раза. Затем на 30-е сутки концентрация пептидов с Мм 6,1 и 2,9 кДа возросла по отношению к таковой в 14-суточном эксперименте в 1,3 и 2,5 раза соответственно. Кроме этого, уровень пептидов с Мм 2,9 кДа в 1,3 раза превысил контрольные значения.

На рис. 2А представлены хроматограммы НМП почек контрольной и опытных групп крыс, построенные по данным экстинкции при 207 нм. Выявлено шесть фракций с Мм 1,5–8 кДа. На 14-е сутки в почках опытной группы увеличивалось количество НМП в диапазоне Мм 1,5–3,6 кДа, наиболее заметное во фракциях 1,5, 2,0 и 2,7 кДа (1,6, 2,1 и 2,1 раза соответственно). Рост концентрации пептидов продолжался до 30-х суток практически во всех фракциях, но наиболее существенным он был во фракциях 2,0 и 5,1 кДа (в 2,6–2,8 раза выше контрольных значений).

Наибольшее количество пептидов, оптически активных при 250 нм, в почках контрольных крыс выявлено в диапазоне молекулярных масс 2,5–5,1 кДа (рис. 2Б). Поступление нитрата ртути в организм крыс привело к существенному количественному перераспределению во фракциях. Так, на 14-е сутки эксперимента наблюдался резкий рост концентрации пептидов

во фракциях 6,1, 3,8, 2,7, 2,0 и 1,5 кДа в 1,7–6,3 раза. Затем на 30-е сутки уровень пептидов с Мм 6,1, 2,7, 1,5 кДа снизился почти до контрольных значений, только во фракции 2 кДа произошло дальнейшее увеличение доли пептидов в 1,4 раза по сравнению с данными 14-суточного опыта и в 9 раз относительно контроля.

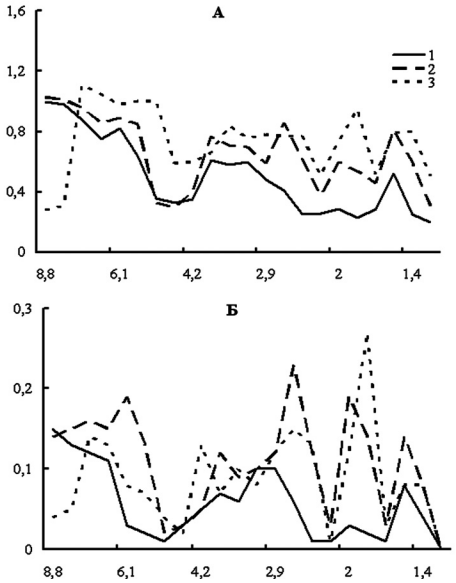


Рис. 2. Влияние нитрата ртути на фракционный состав низкомолекулярных пептидов почек крыс: 1 – контроль; 2 – 14 суток; 3 – 30 суток; по оси ординат – экстинкция при 207 нм (А), 250 нм (Б); по оси абсцисс – молекулярные массы пептидных фракций, кДа

В мышцах крыс в контроле выявлены три фракции (3,2, 4,2 и 6,8 кДа), при этом наибольшая концентрация пептидов отмечена во фракциях 4,2 и 6,8 кДа (рис. 3А). В период токсического воздействия нитрата ртути на 14-е сутки выявлено увеличение концентрации пептидов во всех фракциях, достигшее максимального значения во фракции 3,2 кДа (в 12 раз) по сравнению с контролем. В более тяжелой фракции (6,8 кДа) на 30-е сутки произошло уменьшение доли этих пептидов ниже уровня контрольных значений.

По поглощению при 250 нм в составе НМП мускулатуры выявлены четыре фракции, Мм которых определены как 2,3, 3,2, 4,2 и 6,8 кДа (рис. 3Б). У крыс, подвергнутых воздействию нитрата ртути, на 14-е сутки обнаружено увеличение концентрации пептидов с Мм 2,2, 3,2 и 6,8 кДа в 10,0, 13,0 и 2,0 раза. К концу эксперимента (на 30-е сутки) произошло снижение доли пептидов с Мм 6,8 кДа в 1,8 раза относительно контрольных значений и в 3,7 раза относительно 14-суточного эксперимента. Уровень же НМ пептидов с Мм 3,2 кДа практически не изменился. На протяжении всего эксперимента концентрация пептидов с Мм 4,2 кДа в опытных группах не отличалась от контрольных значений.

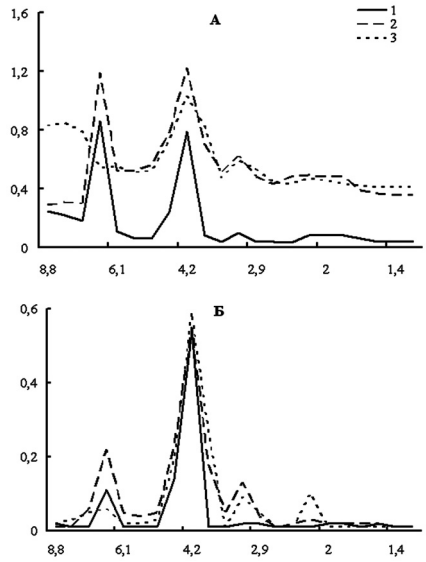


Рис. 3. Влияние нитрата ртути на фракционный состав низкомолекулярных пептидов мускулатуры крыс: 1 – контроль; 2 – 14 суток; 3 – 30 суток; по оси ординат – экстинкция при 207 нм (А), 250 нм (Б); по оси абсцисс – молекулярные массы пептидных фракций, кДа

Анализ состава НМП, оптически активных при 250 нм, печени крыс разного пола показал, что у самцов контрольной группы НМП разделялись на восемь фракций с Мм 1,5–5,6 кДа (рис. 4Б). Наибольшая концентрация отмечена для пептидов с Мм 1,5 и 1,6 кДа. В опытной группе, подвергшейся хронической интоксикации нитратом ртути, на 30-е сутки эксперимента обнаружено значительное снижение концентрации пептидов во всех фракциях.

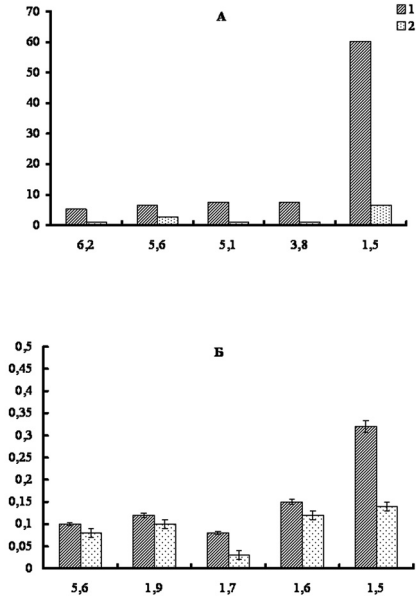


Рис. 4. Влияние нитрата ртути на фракционный состав низкомолекулярных пептидов печени самцов крыс: 1 – контроль; 2 – 30 суток (опыт); по оси ординат – экстинкция при 207 нм (А), 250 нм (Б); по оси абсцисс – молекулярные массы пептидных фракций, кДа

Качественный фракционный состав пептидов печени контрольной группы самок был сходен с таковым самцов, но имелись количественные различия (рис. 5А). Практически во всех фракциях концентрация пептидов в печени у самок была выше, чем у самцов.

Известно, что двухвалентные катионы ртути, поступающие в организм крыс через желудочно-кишечный тракт, на начальных этапах интоксикации абсорбируются им не более, чем на 20 %. Уровень абсорбции при продолжительной интоксикации может снижаться до 5 % [9]. Кроме того, в этой же работе приведены данные о том, что у добровольцев, перорально получавших белковосвязанный нитрат ртути, только 15 % дозы задерживалось в организме. Остальные 85 % экскретировались на следующий день. С другой стороны, еще в 1928 году было обнаружено [3], что продолжительное применение каломели (катион Hg^+) в лечебных целях может приводить к интоксикации.

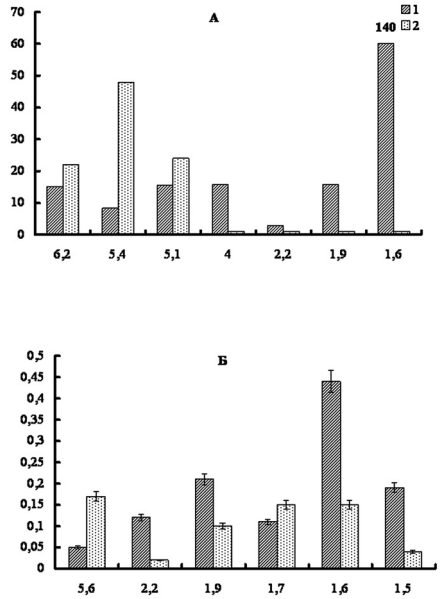


Рис. 5. Влияние нитрата ртути на фракционный состав низкомолекулярных пептидов печени самок крыс: 1 – контроль; 2 – 30 суток (опыт); по оси ординат – экстинкция при 207 нм (А), 250 нм (Б); по оси абсцисс – молекулярные массы пептидных фракций, кДа

Проведенные нами эксперименты показали, что количественные изменения в составе НМП печени при хроническом отравлении нитратом ртути наблюдались уже на 14-й день эксперимента и сохранялись на 30-е сутки. Можно предположить, что на начальном этапе накопления катионы Hg2+ оказывали токсическое действие на белковый метаболизм, что выразилось в снижении количества пептидов во всех фракциях. Вероятный механизм этого процесса заключается в том, что ионы двухвалентной ртути по сравнению с другими двухвалентными катионами обладают максимальным сродством к сульфгидрильным группам [13], [14]. Атакуя -S-H- и -S-S-связи, ртуть может блокировать работу ферментов, как белкового синтеза, так и протеолиза. Тем не менее на фоне снижения общего уровня пептидов наблюдалось увеличение концентрации соединений, оптически активных при 250 нм (обогащенных сульфгидрильными группами). Данный факт может свидетельствовать о том, что ежедневное добавление в корм крысам нитрата ртути в дозе 100 мкг на голову в течение 30 дней не приводило к подавлению механизмов детоксикации в печени до критического уровня. Показано, что в печени задерживается не более 8 % ртути, поступающей в организм. Подавляющая часть ртути локализуется в почках, где ее концентрация может в 78 раз превышать таковую в печени [5], [8]. Это согласуется с нашими данными о том, что наибольшие изменения в составе НМП обнаружены именно в почках. Существенный рост концентрации пептидов в самых низкомолекулярных фракциях может свидетельствовать об усилении катаболизма белков и развитии воспалительного процесса в этих органах. Динамика количественных изменений пептидов, поглощающих при 250 нм, дает возможность предполагать, что увеличение доли этих пептидов в течение первых 14 дней связано с активизацией процессов детоксикации, которые к 30-му дню частично ингибируются в результате непрерывного поступления нитрата ртути в организм.

Состав НМП в мышечной ткани в значительно меньшей степени, чем в тканях печени и почек, изменяется при интоксикации нитратом ртути. Одной из причин может быть то, что скелетная мускулатура узко специализирована и имеет специфическое строение. Она предназначена преимущественно для выполнения сократительной функции и поэтому по разнообразию белкового и пептидного состава уступает печени и почкам. Вероятно, обнаруженные изменения в составе низкомолекулярных пептидов связаны не только с белковым метаболизмом мышечной ткани крыс, но и, учитывая связь мускулатуры с другими органами через кровеносную систему, косвенно свидетельствуют об изменениях, происходящих в других тканях, например в печени и почках.

Сравнительный анализ состава низкомолекулярных пептидов печени крыс разного пола показал, что динамика количественных изменений при качественной идентичности зависела от сексуальной принадлежности исследованных животных (рис. 4, 5). Уменьшение концентрации пептидов, происходящее при хронической 30-суточной интоксикации нитратом ртути, у самцов было значительно более существенным. Эти результаты могут указывать на более высокую активность процессов детоксикации с участием НМП в печени самок по сравнению с самцами,

что, вероятно, свидетельствует о более высокой устойчивости самок к хронической интоксикации ионами ртути.

Таким образом, при хронической интоксикации нитратом ртути качественных изменений в составе НМП печени, почек и мускулатуры крыс не выявлено. Количественные трансформации во фракциях НМП обнаружены во всех исследованных тканях уже на 14-е сутки эксперимента. Вариабельность состава НМП возрастает от мышц к почкам. Полученные результаты подтверждают факт, что почки служат специфической мишенью для катиона двухвалентной ртути.

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 08-04-01140-а, программы Президента РФ «Ведущие научные школы России» НШ № 3731.2010.4, Программы ОБН РАН «Биологические ресурсы России» на 2009–2010 гг. и Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов Л. П., Кирилюк С. Д. Влияние загрязнения окружающей среды на фракционный состав низкомолекулярных пептидов из различных тканей сигов // Известия АН. Сер. биологическая. 1994. № 4. С. 617–622.
2. Суховская И. В., Борвинская Е. В., Смирнов Л. П. Сравнительный анализ методов определения концентрации белка – спектрофотометрии в диапазоне 200–220 нм и по Брэдфорд // Труды Карельского научного центра РАН. 2010. № 2. С. 68–71.
3. Almkvist J. Quecksilberchadigungen. In Handbuch der Haut- und Geschelechtskrankheiten. Jadassohn J. Ed. Springer Verlag, Berlin. 1928. Vol. 18. P. 178–188.
4. Eddins D., Petro A., Pollard N., Freedman J. H., Levin E. D. Mercury-induced cognitive impairment in metallothionein-1/2 null mice // Neurotoxicol Teratol. 2008. Vol. 30(2). P. 88–95.
5. Ghorbe F., Boujelbene M., Makni-Ayadi F., Guermazi F., Kammoun A., Murat J., Croute F., Soleilhavoup J. P., El-Feki A. Effect of chronic lead exposure on kidney function in male and female rats: determination of a lead exposure biomarker // Arch. Physiol. Biochem. 2001. Vol. 109(5). P. 457–63.
6. Hamer D. H. Metallothionein // Ann. Rev. Biochem. 1986. Vol. 55. P. 913–951.
7. IPCS, International Programme on Chemical Safety Cd. // Environmental Health Criteria, World Health Organization. Geneva, 1992. 134 p.
8. Lee Y. H., Shaikh Z. A., Tohyama C. Urinary metallothionein and tissue metal levels of rats injected with cadmium, mercury, lead, copper or zinc // Toxicology. 1983. Vol. 27. P. 337–345.
9. Mercury in the Environment / Eds. L. Friberg, J. Vostal. Cleveland: CRC Press, 1972. 215 p.
10. Saniewska D., Beldowska M., Beldowski J., Saniewski M., Kwaśniak J., Falkowska L. Distribution of mercury in different environmental compartments in the aquatic ecosystem of the coastal zone of the Southern Baltic Sea // J. Environ. Sci. (China). 2010. Vol. 22(8). P. 1144–1150.
11. Santarelli L., Bracci M., Mocchegiani E. Influence of mercury on thymulin production: metallothioneins role // G. Ital. Med. Lav. Ergon. 2005. Vol. 27(3). P. 335–338.
12. Takeda H., Shimuzu C. Existence of the metallothionein-like protein in various fish tissues // Bull. of Jap. Soc. Sci. Fish. 1982. Vol. 48. № 5. P. 711–715.
13. Viarengo A. Heavy metal cytotoxicity in marine organisms: effects on Ca2+ homeostasis and possible alteration of signal transduction pathways // Adv. Comp. Environ. Physiol. 1994. Vol. 20. P. 85–110.
14. Viarengo A., Nott J. Mechanism of heavy metal cation homeostasis in marine invertebrates // Comp. Biochem. Physiol. C Comp. Pharmacol. Toxicol. 1993. Vol. 104. P. 355–372.

Сентябрь, № 6 **Биология** **2012**

УДК 574.52

АНАТОЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ЛУКИН
доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера, Кольский научный центр РАН (Апатиты, Российская Федерация)
alukin@sampo.ru

ИГОРЬ ЛЬВОВИЧ ЩУРОВ
кандидат биологических наук, заведующий лабораторией популяционной экологии лососевых рыб, Северный научно-исследовательский институт рыбного хозяйства, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
shurov@research.karelia.ru

ВЯЧЕСЛАВ АНАТОЛЬЕВИЧ ШИРОКОВ
заместитель директора по научной работе, Северный научно-исследовательский институт рыбного хозяйства, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
shirokov@research.karelia.ru

АНАТОЛИЙ АНДРЕЕВИЧ БАБИЙ
кандидат биологических наук, заведующий лабораторией сырьевых ресурсов и прогнозирования, Северный научно-исследовательский институт рыбного хозяйства, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
ababiy@research.karelia.ru

СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ ИВАНОВ
заместитель директора по международным связям, Северный научно-исследовательский институт рыбного хозяйства, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
ivanov@research.karelia.ru

РЫБНОЕ СООБЩЕСТВО ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ПРОМЫСЛА*

Рассмотрено влияние промысла на состояние рыбного сообщества Онежского озера за последние 70 лет. Произошло снижение уловов лососевых и сиговых (сиг). Вылов ряпушки, корюшки, налима, судака подвержен значительным колебаниям, а запас окуневых и карповых рыб недоиспользуется. Решение существенной части проблем, стоящих сегодня перед рыбной отраслью, связано прежде всего с разработкой нормативно-правовой базы.

Ключевые слова: промысел, рыбное сообщество, динамика уловов, нормативно-правовая база

Добыча биоресурсов является одним из видов антропогенного воздействия на природные системы, и уже сейчас приходится признать, что уровень этой нагрузки зачастую приводит к сокращению численности многих видов. Это положение в полной мере относится к промыслу рыбы. При этом очень часто не учитывается пресс нелегального лова, который является мощным фактором, оказывающим значительное влияние на состояние всех без исключения популяций рыб. Например, неучтенный вылов лосося может достигать 80 % от регистрируемого официальной статистикой, но нередко бывает значительно больше [1]. Тем не менее статистика уловов позволяет проследить и оценить изменения, происходящие в рыбной части сообщества. С этой точки зрения Онежское озеро – второй по величине пресноводный водоем Европы – как нельзя лучше подходит в качестве модельного объекта для наблюдения подобных изменений в связи с тем, что статистика вылова рыб в водоеме имеет длительный временной период, более 70 лет.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Онежское озеро расположено в зоне Европейского Севера России, между 60º53' и 34º55' с. ш., 34º13' и 36º28' в. д. Общая длина береговой линии озера составляет 1810 км. Преобладающие глубины – от 20 до 60 м, на долю которых приходится 57 % площади озера. Большая часть объема (85,5 %) приходится на участки с глубинами до 40 м, которые являются основными для рыбного хозяйства. Их общая площадь равна 6525,7 км^2, что свидетельствует о большом рыбохозяйственном потенциале Онежского озера.

В основу работы положены архивные данные, материалы многолетних ихтиологических исследований (с 1982 года по настоящее время),

© Лукин А. А., Щуров И. Л., Широков В. А., Бабий А. А., Иванов С. И., 2012

собранные во время экспедиций, проверок промысловых бригад и рыбаков-любителей совместно с сотрудниками управления «Карелрыбвод» и данные рыбопромысловой статистики.

В научных экспедициях обловы рыбы проводили тралом (разноглубинный трал 30/152 м и придонный балтийский) и набором ставных жаберных сетей из нейлонового монофиламента со стандартной длиной 25 м, высотой 1,5 м и размером ячеи 10, 12,5, 16, 22, 25, 30, 35, 38 и 45 мм, что обеспечивает вылов рыбы длиной от 5 см. При проверке промысловых бригад, рыбаков-любителей и изъятии браконьерских сетей проводились массовые промеры размерно-весовых показателей рыб и отбиралась чешуя для определения возраста.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Учет результатов рыбопромысловой деятельности в озере в разные периоды проводился различными способами, которые отличались уровнем достоверности. До 1930-х годов оценка объемов вылова проводилась расчетным способом, по опросам рыбаков. По мере централизации рыболовства с 1930-х годов учет вылова стал базироваться на отчетах организаций (колхозов, гослова и второстепенных заготовителей). В связи с этим постепенно улучшалось качество официальной статистики. В табл. 1 представлена динамика вылова промысловых видов рыб по данным рыбохозяйственных и контролирующих организаций. Эти показатели относятся ко всему Онежскому озеру, в величину вылова включены уловы всех пользователей.

Общеизвестно, что величина улова косвенным образом может отражать уровень промысловых запасов объекта при условии стабильности промыслового усилия и селективности промысла в течение ряда лет наблюдений [21]. В то же время промысел сам активно влияет на состояние запасов рыб и выступает основным и прямым элементом для управления запасами рыб в водоемах.

Данные табл. 1 отражают величины вылова промысловых видов рыб Онежского озера в разные периоды рыболовства. На протяжении истории добычи использовались различные орудия лова, что диктует весьма осторожную оценку при сравнении многолетних и межгодовых результатов промысла. Однако эти данные косвенно являются основанием для оценки состояния запасов рыб и прогноза для их наиболее эффективной эксплуатации.

Таблица 1

Динамика общего вылова промысловых видов рыб в Онежском озере (данные Карелрыбвода, Россельхознадзора и Северо-Западного территориального управления по рыболовству)

Вид	Среднегодовой вылов, т														
	1930	1935–1938	1947–1950	1951–1955	1956–1960	1961–1965	1966–1970	1971–1975	1976–1980	1981–1985	1986–1990	1991–1995	1996–2000	2001–2006	2007–2010
Лосось	27,2	13,1*	22,1	23,1	17,5	9,5	5,1	12,8	12,9	10,8	11,4	4,5	1,0	1,0	4,5
Палия	12,6	2,5	12,4	16,9	8,9	8,5	6,8	3,9	5,7	4,7	3,5	0,4	1,6	2,9	4,3
Форель	–	–	2,2	0,6	1,4	0,4	0,5	0,3	0,1	0,3	0,5	–	0,1	0,5	0,2
Хариус	6,8	–	0,6	0,1	0,5	0,1	–	–	0,2	0,1	–	–	–	–	–
Сиг	142,8	48,5	88,6	123,2	56,9	56,6	54,7	88,1	101,0	94,3	115,8	51,2	33,3	54,7	19,8
Килец	–	–	–	–	–	–	–	0,4	1,5	1,2	2,6	0,6	–	–	0,0
Ряпушка	326,2	849,6	612,5	735,5	570,8	582,6	800,1	511,5	725,0	614,8	841,8	328,1	309,0	375,8	453,4
Корюшка	310,2	291,8	553,1	696,5	860,0	783,6	733,2	804,7	860,0	983,5	1307,8	753,8	595,0	1338,7	1116,6
Щука	109,6	78,2	31,1	51,5	46,3	29,4	16,0	12,7	15,4	13,1	32,2	6,7	2,2	13,7	24,0
Лещ	30,5	–	23,7	54,3	50,0	31,3	19,9	35,6	38,6	31,5	26,3	8,1	13,3	40,7	50,4
Плотва	63,5	–	77,2	93,0	90,0	52,5	63,4	75,2	46,9	44,6	71,8	24,6	10,5	36,8	45,1
Язь	–	–	1,2	2,7	1,7	0,7	0,6	0,6	1,4	0,4	0,5	–	–	–	–
Густера	–	–	–	–	–	–	–	–	0,4	–	–	–	–	–	0,6
Уклея	–	–	–	20,0	41,4	23,1	28,6	29,5	23,9	23,6	60,7	31,1	–	–	–
Судак	28,1	34,6	91,3	79,5	58,6	46,5	43,2	48,6	41,9	32,7	41,1	17,5	10,9	24,5	23,5
Окунь	102,2	105,7	46,8	88,4	85,3	51,1	60,1	73,3	56,9	59,6	87,7	24,9	17,7	73,6	111,9
Ерш	39,7	59,6	70,8	65,8	76,0	27,8	39,1	47,6	53,9	38,4	49,5	17,1	8,5	35,2	53,4
Налим	109,9	73	89,6	146,6	72,3	86,8	80,4	136,6	118,3	134,6	94,8	57,5	47,3	84,9	92,4
Колюшка	–	–	–	20,0	41,4	23,1	28,6	29,5	23,9	54,4	49,5	17,1	10,6	14,9	32,8

* +форель.

Величины общего улова, вылов конкретного промыслового вида и их динамика тесно связаны с несколькими факторами. Одни факторы зависят от рыбохозяйственной деятельности человека, другие от нее не зависят и относятся к природным. В первой группе основными факторами являются: а) интенсивность промысла (промысловое усилие на единицу площади); б) промысловое усилие (число орудий лова, используемых в течение определенного времени, – накопленное за год промысловое усилие); в) величина допустимого улова; г) уровень технической оснащенности рыболовства; д) правила рыболовства; е) техногенное воздействие и социально-экономическая политика; ж) спрос на рынке; з) инфраструктура в бассейне водоема и пр.

Во второй группе факторов основными выступают: а) величины и состояние промыслового запаса; б) гидрологические условия водоема; в) гидрометеорологические условия в период ведения промысла; г) непредсказуемые природные аномалии на водоеме и др.

В практике рыболовства существует деление рыб на крупный и мелкий частик (табл. 2), что определяется величиной ячеи сетных орудий лова, используемых в промысле. Так, для крупного частика (щуки, леща, налима, язя, крупного окуня, карпа и др.) используют ставные сети с шагом ячеи от 32 до 70 мм, для мелкого частика (мелкий окунь, плотва, елец, ерш и др.) – от 10 до 24 мм. С нашей точки зрения, частик, частиковые рыбы – собирательный и неточный рыбохозяйственный термин, которым обозначают менее ценные виды рыб, чем, например, осетровые, лососевые, сиговые. В то же время в статистику уловов рыб на Онежском озере в графу «крупный частик» были включены сиговые рыбы (сиг), ценность которых значительно превосходит ценность леща или крупного окуня.

Таблица 2

Динамика удельного веса (%) хозяйственно значимых групп рыб в уловах Онежского озера

Группа	1935–1938	1951–1955	1961–1965	1976–1980	1986–1990	1996–2000	2001–2006	2007–2010
Лососевые	0,9	1,8	1,0	0,9	0,5	0,2	0,2	0,4
Крупный частик	12,8	20,6	13,9	14,9	11,2	10,1	10,4	14,9
Мелкий частик	9,1	12,9	9,8	9,7	11,4	4,5	7,6	6,5
Ряпушка	46,6	33,2	32,1	34,1	30,1	29,1	17,9	23,3
Корюшка	16,0	31,4	43,2	40,4	46,7	56,1	63,8	54,9

Анализ динамики видового состава и величин общих уловов приводится нами ниже для периода с 1935 по 2010 год.

Лосось Salmo salar m. sebago (Girard) является ценнейшей промысловой рыбой Онежского озера, однако удельный вес лосося в общих уловах всегда был невелик (в последние 50 лет он не превышал 1,7 % от общего годового улова). В 1995 году онежский лосось занесен в Красную книгу Республики Карелия, а в 1999-м – в Красную книгу РФ по 2-й категории. С 2005 года к промысловому использованию разрешена только популяция р. Шуи. Ведущее положение в уловах всегда занимал наиболее многочисленный лосось р. Шуи, современная численность которого поддерживается на промысловом уровне за счет заводского воспроизводства. Еще 15–20 лет назад его вылов достигал приблизительно 10 т и составлял до 75 % всех уловов лосося по озеру. Численность его нерестового стада в этот период оценивалась в пределах 1300–2100 особей [5], [10].

На втором месте по величине запасов находится лосось р. Водлы. В XIX веке в Водлинском промысловом районе (р. Водла и Шальская губа) вылавливали до 6,5 т лосося [8]. Значительную товарную продукцию он давал и в прошлом столетии: 5,2 т (1932 год), 4 т (1953 год), 3,1 т (1976 год). К середине 1990-х годов уловы водлинского лосося, как и общие уловы лосося по озеру, резко уменьшились.

Уловы лосося р. Андома в довоенный период доходили до 750 экз., или 3 т за сезон [7]. Максимальный улов в послевоенные годы (1952) составил 2,5 т [3]. Современная численность андомского нерестового стада лосося не превышает и сотни особей [4].

Уловы лосося всегда были подвержены очень значительным колебаниям (табл. 3). Судя по всему, в силу своей высокой стоимости, реальный вылов лосося всегда замалчивался рыбаками. Проведенные нами исследования убедительно доказывают, что неофициальный лов лосося на всей акватории Онежского озера достигает приблизительно 100 т [4].

Таблица 3

Статистика вылова онежского лосося за последние 100 лет [9], данные Карелрыбвода, Россельхознадзора и Северо-Западного территориального управления по рыболовству

Год	1875	1880	1883	1895	1930	1935	1945	1955	1960	1965
Вылов, т	16,9	18,4	22,0	100	27,2	8,6	28,0	20,4	17,0	9,3
Год	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	
Вылов, т	3,3	16,0	14,9	12,6	6,1	0,97	3,9	0,005	4,5	

Палия Salvelinus lepechini (Gmelin) наряду с озерным лососем является ценнейшей промысловой рыбой на Онежском озере. В конце XIX века товарный вылов онежской палии оценивался, по данным Н. Н. Пушкарева [19], в объеме не менее 68 т. Однако уже в начале 30-х годов прошлого века уловы палии снизились в 15 раз, составив порядка 4,5 т, что связывали с прекращением специального промысла палии из-за высокой паразитарной инвазии [23]. В послевоенные годы наибольшие уловы палии приходились на первую половину 1950-х годов (среднегодовой вылов в 1950–1954 годах составил 19,5 т, или 0,9 % от общего улова рыбы по озеру, максимальный вылов – 27,2 т, или 1,3 % всего годового улова, зарегистрирован в 1953 году). До конца 1980-х годов уловы палии держались в пределах нескольких тонн, позднее учтенный вылов не достигал и 1 т. Подавляющая часть вылова палии (свыше 90 %) всегда приходилась на акваторию карельской части водоема. С прекращением организованного промысла уловы палии существенно упали, но нужно учитывать, что статистикой фиксируется лишь малая часть реальной добычи. Однако, как видно из приведенной статистики, в последние годы заготовители демонстрируют бóльшую открытость и начинают показывать уловы палии (табл. 4).

Таблица 4

Статистика вылова палии за последние 100 лет в Онежском озере [23], данные Карелрыбвода, Россельхознадзора и Северо-Западного территориального управления по рыболовству

Год	1895	1930	1935	1945	1955	1965	1975	1985
Вылов, т	68	12,6	4,5	23,0	9,9	9,1	3,0	3,1
Год	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Вылов, т	1,7	1,8	2,2	2,9	3,7	3,5	2,2	7,6

Озерная форель (кумжа) Salmo trutta trutta (L.). Озерная форель, которую ранее относили к промысловым объектам, с 1994 года занесена в Красную книгу РФ, и поэтому выведена из объектов рыболовства. Подобно лососю, она образует локальные стада, но, в отличие от лосося, способна нереститься не только в крупных (Шуя, Водла, Андома и др.), но и в малых реках и ручьях [22], [24]. Уловы озерной форели в годы государственного промышленного лова были незначительны. За последние 50 лет (до 1990 года) заявленный вылов был в пределах 0,1–4,9 т (в среднем 0,51 т), наибольший улов – 4,9 т в 1950 году. Вылавливалась форель теми же орудиями лова, что и лосось. Основными районами промысла были Петрозаводская губа, Толвуйско-Кузарандское и Пялемское Онего (54–98 % улова). Это весьма ценный объект как для рыболовства, так и для рыбоводства, требующий поддержания численности популяции за счет искусственного воспроизводства.

Ряпушка Coregonus albula (L.) – второй по величине уловов вид в сырьевой базе рыболовства. Среди двух экологических форм – обычных размеров и более крупной (килец) – доминирующее положение занимает более мелкая форма [2]. Уловы кильца весьма ограничены и колеблются в пределах от 1 до 5 т. Чаще всего килец попадается в прилове с другими видами.

Ряпушка в большей мере привязана к эпилимнической зоне (менее глубоководной). Для ее лова в прибрежной зоне используют мережи и невода, а в пелагиали – ставные сети и разноглубинные тралы. Доля ряпушки в общем улове составляет от 17 до 50 %, абсолютная величина улова в разные годы колебалась от 376 до 1163 т. С 1975 года был введен лимит (квота) на вылов ряпушки в озере, то есть вылов стал ограничиваться величинами допустимого улова. Из динамики величин улова и запасов (данные тралово-акустических съемок) следует, что величина запаса ряпушки более устойчива, чем корюшки. Наиболее высокоурожайными поколениями были 1957, 1961, 1964, 1965, 1973, 1980 годы (вылов колебался от 729 до 1109 т). Низкоурожайными являлись поколения 1959, 1962, 1969, 1971–1973, 1976, 1978, 1981 годов (колебания вылова – 200–363 т) [12]. Повышение среднегодовой температуры с 1999 года привело к продолжительным теплым осенним периодам, и ряпушка в основных промысловых районах в массе стала нереститься на глубинах 18–25 м, что затруднило ее облов ставными неводами и привело к снижению величины общего вылова.

Особенностью динамики запасов массовых планктофагов, корюшки и ряпушки, является разнофазная направленность их численности, что косвенно отражается на абсолютных (табл. 2) и удельных величинах уловов. Это связано с их разными пищевыми спектрами. Корюшка в большей мере питается в глубоководной (метагиполимнической) части, а ряпушка – в более мелководной (эпилимнической). Межгодовые и многолетние колебания термических условий способствуют повышению продуктивности то эпилимнического (в теплые годы), то метагиполимнического зоопланктона. Это является основной причиной разнофазных колебаний численности ряпушки и корюшки в Онежском озере [14].

Сиг Coregonus lavaretus (L.). В озере сиг образует 9 экологических форм, из которых промысловое значение еще 50 лет назад имели: из озерных – сиг-лудога и ямный, из озерно-речных – водлинский и шуйский [20]. Эти формы определяли общий вылов сига по водоему. При этом промысел базируется на запасах озерных сигов, составляя до 90 % от общего улова по водоему, и лишь 10 % приходится на проходные формы. Однако достаточно сложно составить представление об общем объеме вылова сигов в середине XIX – начале XX века, так как все сведения по вылову приводятся для отдельных районов озера. Так, Н. Я. Данилевский [8] говорит о вылове 80 тыс. сигов только в устье р. Водлы, что составляет «с лишком 3000 пуд», или приблизительно 48 т. Речь здесь идет исключительно о товарной рыбе, вывозимой за пределы района добычи. В 1895–1900 годах в Шальской губе, включая р. Водлу, вылавливалось около 46 тыс. экз. сигов [19]. В этот же период на акватории средней части Онежского озера рыбаками Кижского архипелага и д. Ялгубы добывалось приблизительно 6150 пудов сига, или 98,4 т, а в устье р. Суны приблизительно 35–40 возов сига, что составляет 1140–1290 пудов, или 18,5–21,5 т. Приводятся наиболее продуктивные места лова. Так, например, в истоке р. Свири и прилегающей акватории уловы сига в этот же период (1895 год) составляли приблизительно 1,6 т [19]. Тем не менее общий вылов сигов, исходя из приведенных показателей по всему озеру, мог колебаться в пределах 220–240 т.

Анализ наиболее продуктивного по объемам вылова района (Шальская губа, включая р. Водлу) в 1926–1932 годах демонстрирует, во-первых, заметное снижение, во-вторых, значительные колебания в уловах сига [23]. Максимальный вылов отмечен в 1927 году. Он составил 31,2 т, минимальный – 7,2 т – наблюдался в 1932 году,

то есть улов сигов за тридцатилетний период уменьшился в 3,8–16 раз.

Среднемноголетний вылов сига в 60–80-х годах прошлого века в границах Карелии составил 56 т, в границах Вологодской и Ленинградской областей – 27 т, в целом по водоему – 83,0 т. Максимальные уловы в озере отмечены в 1986–1989 годах, падение уловов сига в водоеме наблюдается с 1990 года. Уменьшение фактического улова сига объясняется прежде всего ухудшением естественного воспроизводства и сокращением запасов данного вида (особенно проходных форм) в связи с возросшей промысловой нагрузкой, в первую очередь из-за нелегального сетного лова.

Анализ многолетней возрастной структуры уловов сига по всему Онежскому озеру (в траловых уловах сиги представлены в основном сиг-лудогой) показал, что процент взрослых групп, составляющих «остаток» в промысловом стаде (от 6+ лет и старше), равен 30–40 %. В промысловых сетных уловах сиг-лудога представлен в последние годы особями в возрасте от 4+ до 13+ лет. Основу промысловых уловов составляют особи четырех возрастных групп – от 5+ до 8+ лет, на долю которых приходится в среднем 89,5 %. Модальной возрастной группой являются семи-восьмилетки (6+–7+). Средние длина и вес внутри отдельных возрастных классов по годам могут колебаться довольно существенно. Преобладание средних показателей длины и массы тела практически во всех возрастных группах в промысловых уловах объясняется селективностью орудий лова (сетей).

Оптимальный вылов сига в северо-восточной части Онежского озера для половозрелой части популяции с возрастной группой 5+ (шесть) и приловом возрастной группы 4+ (пять) лет оценивается величиной 19,5–20,5 т. Соответствующие расчеты по сигу-лудоге других промысловых районов показали, что его вылов в южной части озера биологически допустим в объеме 8–10 т, в Центральном и Малом Онего – 4–5 т, в Большом Онего – до 4 т.

В начале XXI века вылов сига колебался от 37,1 до 14,3 т, и следует признать, что промысловый запас сига продолжает снижаться. Биологические показатели озерных сигов в период 1985–2006 годов указывают на омоложение популяции, снижение доли в уловах старшевозрастных и крупных особей. Сейчас вряд ли можно насчитать 19–22 сига в пуде, как это было в начале XX века [19]. При средней навеске 380–420 г таких сигов на пуд будет 38–42 экз. Это результат интенсивного и селективного слабоконтролируемого сетного промысла последних 20 лет.

Запасы сига можно увеличить через оптимизацию промыслового усилия по видам рыболовства и районам лова, а также рекультивацию его нерестовых рек и запрета на любой его речной промысел.

Корюшка Osmerus eperlanus (L.) – самый массовый, относительно короткоцикловый и пелагический вид с удельным весом в общем улове от 16 до 65 % (табл. 2). Анализ абсолютной величины улова за многолетний период показывает высокую вариабельность ее уловов – от 290 до 1450 т. Корюшка во время нереста является объектом массового прибрежного промысла мережами, ставными неводами. Ее добыча во время нагула (пищевые миграции) ведется с помощью разноглубинного трала. Межгодовая величина уловов корюшки колеблется в широких пределах, что свойственно данному виду. Тем не менее четко просматривается тренд на рост абсолютных и удельных уловов, особенно после 1980-х годов. На это указывает и увеличение ее запасов, определенное с помощью прямого метода – эхометрической и траловой съемок [16], [17], [18].

Хариус Thymallus thymallus (L.) – является видом, довольно широко распространенным в бассейне Онежского озера, но в промысле он имеет лишь второстепенное значение. Наиболее высокий вылов хариуса в послевоенные годы приходился на конец 1940-х годов, причем максимальный улов составил 1,4 т (0,1 % от всего улова рыбы по озеру), зарегистрирован в 1948 году. В последующие годы вылов хариуса не превышал и 0,7 т, стабильно сохраняясь в период с 1950 по 1960 год на среднем уровне 0,5 т. В статистике уловов он фигурировал далеко не каждый год. Нет этих данных и за период 2001–2010 годов. Причины низких объемов добычи хариуса в Онежском озере объясняются прежде всего организационной стороной дела. Специализированного промысла хариуса на водоеме не существует даже в нерестовый период, то есть во время его значительных концентраций, в другие же периоды промысел направлен на вылов прежде всего массовых ценных видов рыб (лосося, сига, ряпушки, судака, леща).

Налим Lota lota (L.). По значимости запасов и в общем улове рыбы по озеру налим устойчиво занимает третье место, а в группе хищных видов – первое, и часто его уловы (в среднем 103 т, максимально до 200 т в конце 1980-х годов) превышают суммарный вылов всех хищных рыб в озере. В озере имеются две экологические формы – озерная (относительно мелкая) и озерно-речная, заходящая на нерест в крупные реки бассейна озера. Если рассматривать рост налима разных экологических форм, то в промысловых уловах нерестового стада р. Водлы (озерно-речная форма) его средняя длина и масса составляют соответственно 72 см и 4,2 кг. Озерная форма существенно меньше, ее показатели 51 см и 1,0 кг [6]. Основная часть жизни налима проходит в нагульном водоеме (озере), где его ловят в течение всего года.

Анализ динамики уловов налима за 50-летний период показал, что общий вылов относительно стабилен и по десятилетиям в среднем составил: 1940-е годы – 87 т, 1950-е – 106 т, 1960-е – 78,2 т, 1970-е – 125 т, 1980-е – 160 т, 1990-е – 104 т, 2001–2006 – 85 т, 2007–2010 годы – 92,4 т. Важное рыбохозяйственное значение и заметная роль в экосистеме озера принадлежат озерно-речному налиму р. Водлы [6]. Доля этой формы налима в общем улове по озеру ранее достигала 20–50 %. Запасы и уловы налима достаточно стабильны, колебания уловов связаны прежде всего с интенсивностью промысла и спросом на рынке (1991–2010 годы).

Судак Stizostedion lucioperca (L.). В озере образует одну из наиболее северных популяций с промысловыми, относительно невысокими величинами запаса. Тем не менее судак входит в группу 6 видов рыб, наиболее эксплуатируемых всеми видами промысла. Судак распространен по всей акватории озера, и весь его жизненный цикл проходит в пределах озера. Основная масса этой рыбы вылавливается в северо-восточной части озера, где судак встречается в наибольших количествах как во время нереста, так и во время нагула. Максимальные уловы отмечаются обычно в мае – июне, во время образования преднерестовых концентраций, и осенью (сентябрь – декабрь).

Максимальная добыча судака за весь период промысла составляла 103,4 т (1954 год). С середины 50-х годов и до 1990 года вылов находился в пределах 30–60 т, в среднем 44 т, а в 1991–2010 годах колебался от 16 до 33 т. Скорее всего, снижение уловов обусловлено неполным учетом улова. После наибольших уловов середины 1950-х годов уловы судака были относительно стабильны, с небольшим снижением вылова в начале XXI века. С 1975 года в целях охраны и рационального использования запасов судака был введен лимит на его вылов (допустимый улов). Разрешенный размер судака при его промысле – 40 см.

По мнению Л. А. Кудерского и соавторов [11], основным фактором, обусловливающим пониженную численность популяции судака в озере, является недостаточная обеспеченность его молоди рыбными кормами в период перехода с нектобентосного на хищное питание. В современных условиях заметное влияние на численность судака в озере оказывает нелегальный промысел в Челмужской губе в преднерестовый и нерестовый периоды.

Лещ Abramis brama (L.). В таком холодноводном и глубоководном водоеме, как Онежское озеро, лещ не имеет высокой численности, его уловы сравнимы с уловами судака. Достаточно плотные концентрации лещ образует в период нереста в мелководных участках озера в северо-восточной и центральной частях, в северо-западных губах (Кондопожская, Уницкая, Великая), в южной части озера.

Промысел леща ведется с помощью ставных неводов, мереж и ставных крупноячейных сетей. Основная часть улова приходится на июнь – июль и октябрь – ноябрь. Наибольший вылов (95 т) получен в 1954 году, далее до 1991 года уловы колебались от 16 и до 65 т (в среднем 34 т). В рыночный период уловы снизились из-за отсутствия его специализированного лова. В промысловых уловах размеры леща колеблются в широких пределах – от 25 до 52 см. Для леща существует промысловая мера в 30 см.

Динамика многолетних уловов, величина запаса в период 1980–2010 годов и биологические показатели отражают удовлетворительное промысловое состояние леща в последние десятилетия.

Щука Esox lucius (L.). В рыбном промысле щука присутствует в качестве прилова в крупноячейные и мелкоячейные ставные невода, мережи и сети. Статистические уловы щуки по объемам невелики и составляют в среднем за десятилетия: 1950-е годы – 48 т (максимальный улов за период наблюдений – 82 т, 1956 год), 1960-е – 43 т, 1970-е – 14 т, 1980-е – 28 т, 1990-е – 3 т, 2001–2006 – 13,7 т, 2007–2010 годы – 24,0 т. Удельный вес щуки в уловах в среднем около 1,1 %. Невысокие уловы щуки обусловлены тем, что эта рыба обитает преимущественно в участках водоема с зарослями высшей водной растительности, которые в Онежском озере занимают незначительные площади. В озере отсутствует ее специализированный промысел. Запасы щуки в озере можно оценить как удовлетворительные.

Группа «мелкий частик». Включает такие виды, как плотва, окунь, ерш, густера, уклея, колюшка и мелкоразмерные особи данных видов. Около 50 % улова в группе «мелкий частик» приходится на окуня и плотву. Доля этой группы в общем улове достаточно устойчива и зависит от спроса и государственной рыбохозяйственной политики. Ее удельный вес повышался в периоды интенсивного промыслового усилия (1951–1955, 1971–1980 годы) и государственных планов на рыбодобычу. До 1990 года доля группы находилась в рамках 8–16 % (в среднем 11,8 %), а общий улов колебался от 175 до 335 т (в среднем 253 т). С началом рыночных отношений вылов мелкого частика уменьшился с 12 до 4,5–8 % (до 100–150 т), что обусловлено снижением рыночного спроса.

Представители группы «мелкий частик» в силу своих биологических особенностей (короткий жизненный цикл, высокая воспроизводительная способность, толерантность к условиям среды обитания) обладают высоким продукционным потенциалом. В ресурсном плане запасы и сырьевая база данной группы высоки, но используются достаточно слабо. В целом это резерв ресурсной базы озера, за счет кото-

рого может быть увеличен общий вылов рыбы. Проблема состоит в том, что в современных социально-экономических условиях мелкий частик пользуется низким спросом у рыбаков из-за невысокого товарного качества и трудностей сбыта на рынке.

Окунь Perca fluviatilis (L.). Окунь встречается практически повсеместно и приобретает все большую роль в практике любительского рыболовства. Он особенно многочислен в северо-восточной части озера, за один час траления донным тралом его доля составила в среднем 24 кг, или 32 % от веса всего улова, в южной части – 11 кг, или 13 %, в Большом Онего – 7 кг, или 10 %, в Малом Онего – 3,6 кг, или 4 %. Специализированного промысла окуня на Онежском озере не ведется. Он ловится преимущественно ставными неводами, устанавливаемыми для ловли ряпушки и корюшки. Учтенные уловы окуня (без категории «мелкий частик») колебались от 84,9 т в 1955 году до 2,1 т в 1992 году, более половины всего вылова приходится на северо-западную часть озера. Значительная часть выловленного окуня попадает в категорию «мелкий частик», где эта рыба составляет 21 % от общего веса этой группы. В промысловых уловах (ставные невода) окунь представлен особями 3+–15+ лет, масса тела колеблется от 2 до 650 г, средний вес – 134 г. Основную часть составляют рыбы 6 возрастных групп от 4 до 9 лет, почти 60 % от численности улова и 40 % от его общего веса составляют пятишестилетки. Согласно расчетам СевНИИРХ, численность промысловой части популяции составляет 3793 экз., биомасса – 550 т, продукция – 150 т. Предполагается наиболее рациональным ежегодно изымать порядка 120 тонн, при условии, что в промысловую эксплуатацию должны вступать рыбы в возрасте пяти лет (длина тела – 15–16 см, масса – 60–80 г).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ доступных статистических данных промысла показывает, что основу уловов в Онежском озере составляют 10–12 видов. К главным относятся (по мере снижения их доли в улове): европейская корюшка, европейская ряпушка, налим, сиг, судак, лещ, окунь, плотва, щука, ерш. Вылов лосося, кумжи, палии и хариуса в конце 1980-х годов (последние годы государственного промысла) составлял около 0,5 % в общем улове. С 1990 года официальная статистика вылова этих видов отсутствует в связи с запретом на промысел, хотя нелегальный лов этих видов продолжался.

В целом промысловый улов на протяжении всего периода наблюдений базируется на вылове ряпушки, корюшки (50–85 %) и прочих видов (50–15 %). Анализ многолетней промысловой статистики показывает, что некоторые виды (сиг, судак, ряпушка, корюшка) используются промыслом достаточно интенсивно, в отдельные годы их вылов превышал величину допустимого улова (ОДУ). В конце 1990-х годов чрезмерно эксплуатировались запасы корюшки и ряпушки. Реальный улов корюшки в среднем на 20–30 %, а ряпушки на 30–50 % выше статистической величины вылова. В то же время, такие виды, как плотва, окунь и другие, недоиспользуются промыслом.

Таким образом, в современных рыночных условиях промысел в первую очередь направлен на добычу наиболее ценных видов в рыбном сообществе, таких как лосось, палия, сиг, судак, что приводит к снижению численности этих видов. Социальные и экономические проблемы в обществе (в первую очередь безработица), особенно в прилегающих к озеру районах, вызывают усиление нелегального промысла (браконьерство), что еще в большей степени сокращает численность ценных промысловых видов. Нам кажется, в основе этих проблем лежит и бесконечное реформирование природоохранных органов, и отсутствие четкого управления рыбохозяйственной отраслью и эффективного контроля за использованием рыбных ресурсов, особенно в последние 20 лет.

Решение существенной части проблем, стоящих сегодня перед рыбной отраслью, связано прежде всего с разработкой нормативно-правовой базы, на основе которой возможно построение эффективной в экологическом и экономическом отношении системы управления водными биоресурсами. Однако попытки совершенствования действующего законодательства зачастую оказываются неэффективны, поскольку не учитывают исторических и социальных факторов, современного состояния биоресурсов [13]. Существующее законодательство еще далеко от совершенства. Неурегулированность ряда отношений, отсутствие оперативных механизмов управления, спорный характер норм не способствуют сохранению и воспроизводству водных биологических ресурсов, тормозят развитие рыбной отрасли, заставляя рыбодобывающие организации нарушать закон, изначально призванный защищать интересы промысловиков и рыболовов-любителей.

Базовые критерии устойчивого управления водными объектами и их ресурсами должны включать: а) сохранение качества вод; б) поддержание продукционной способности водных экосистем; в) поддержание жизнеспособности водных экосистем в условиях негативных антропогенных и природных воздействий; г) сохранение биоло-гического разнообразия; д) поддержание и расширение множественных социально-экономических выгод для удовлетворения общественных нужд; е) юридические, организационные и экономические рамки для сохранения и устойчивого управления водными объектами.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлантический лосось / Под ред. Р. В. Казакова. СПб.: Наука, 1998. С. 335–383.
2. Бабий А. А., Сергеева Т. И. Крупная ряпушка – килец Coregonus albula Онежского озера // Вопросы ихтиологии. 2003. Т. 43. № 3. С. 345–351.
3. Беляева К. И. Оз. Чужмозеро // Озера Карелии. Петрозаводск, 1959. С. 339–347.
4. Биоресурсы Онежского озера. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2008. С. 98–115.
5. Валетов В. А. Лосось Ладожского озера (биология, воспроизводство). Петрозаводск, 1999. 90 с.
6. Веденеев В. П., Бабий А. А., Петрова Л. П. Биологическое состояние нерестового стада озерно-речного налима Lota lota реки Водла (Онежское озеро) // Вопросы ихтиологии. 2003. Т. 43. № 3. С. 361–366.
7. Вещезеров В. В. Рыболовство южной и юго-восточной части Онежского озера // Известия Ленинградского научно-исследовательского ихтиологического института. 1931. Т. XII. Вып. 1. С. 12–34.
8. Данилевский Н. Я. Исследования о состоянии рыболовства в России. СПб., 1875. Т. IV. Вып. 1. С. 40–88.
9. Китаев С. П. Рыбы Онежского озера (история, организация мониторинговых исследований) // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. «Б». Вып. 1. Петрозаводск, 1999. С. 120–125.
10. Костылев Ю. В., Валетов В. А., Ермолаев Г. И. Экономические основы повышения эффективности воспроизводства озерного лосося в Карельской АССР // Вопросы естественного воспроизводства и морфологические особенности онтогенеза озерного лосося при искусственном разведении. Мурманск, 1980. С. 3–28.
11. Кудерский Л. А., Александрова Т. Н., Гуляева А. М. Биология судака Онежского озера // Сб. науч. трудов ГосНИОРХ. 1984. Вып. 216. С. 11–35.
12. Кутузов А. М., Сергеева И. И., Верещагин Ю. А. О коррелятивных связях корюшки и ряпушки Онежского озера со структурой и факторами среды // Сб. науч. тр. ГосНИОРХ. Вып. 316. Л., 1990. С. 97–105.
13. Лукин А. А., Глибко О. Я. Оптимизация системы управления рыбным хозяйством на внутренних водоемах как способ сохранения водных биоресурсов // Рыбное хозяйство. № 4. 2009. С. 96–99.
14. Николаев И. Н. Экологическая гетерогенность зоопланктона Онежского озера и ее значение в динамике численности основных планктофагов этого водоема – ряпушки и корюшки // Сб. науч. тр. ГосНИОРХ. Вып. 205. Л., 1983. С. 67–79.
15. Новиков И. И. Рыбные промыслы озерных и речных водоемов Карелии // Рыбное хозяйство Карелии. Вып. IV. Л., 1937. С. 81–186.
16. Отчет по НИР: «Разработка биологического обоснования режима рыболовства во внутренних водоемах Карелии». Петрозаводск: СевНИИРХ, 2001. (Рук. – Петрова Л. П.)
17. Отчет по НИР: Разработать прогноз ОДУ объектов промышленного рыболовства и определить производство рыбы в 2003 г. в пресноводных водоемах зоны ответственности СевНИИРХ. Петрозаводск: СевНИИРХ, 2002. (Рук. – Бабий А. А.)
18. Отчет по НИР: Разработать прогноз ОДУ объектов промышленного рыболовства и определить производство рыбы в 2004 г. в пресноводных водоемах зоны ответственности СевНИИРХ. Петрозаводск: СевНИИРХ, 2003. (Рук. – Бабий А. А.)
19. Пушкарев Н. Н. Рыболовство на Онежском озере: Отчет Министерства земледелия и государственного имущества. СПб., 1900. 260 с.
20. Решетников Ю. С., Лукин А. А. Современное состояние разнообразия сиговых рыб Онежского озера и проблемы определения их видовой принадлежности // Вопросы ихтиологии. 2006. Т. 46. № 6. С. 732–746.
21. Рикер У. Е. Методы оценки и интерпретации биологических показателей популяций рыб. М.: Пищ. пром-сть, 1979. 408 с.
22. Рыжков Л. П. Биология озерно-речной форели Онежского озера и перспективы ее рыбохозяйственного использования // Биологические основы рационального использования рыбных ресурсов Онежского озера и повышения его рыбопродуктивности. Л., 1984. С. 60–68.
23. Смирнов А. Ф. Палия Онежского озера. Биология, промысел, разведение // Рыбное хозяйство Карелии. Петрозаводск, 1933. Вып. 2. С. 24–29.
24. Смирнов А. Ф. Рыбы (Онежского озера) // Онежское озеро. Петрозаводск: Карелия, 1975. С. 74–114.

Сентябрь, № 6 **Биология** **2012**

УДК 630*114.41+630*114.3+630*114.2(470.22)

МАРИЯ ВЛАДИМИРОВНА МЕДВЕДЕВА
кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, доцент Института леса, Карельский научный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
mariamed@krc.karelia.ru

НАТАЛЬЯ ГЛЕБОВНА ФЕДОРЕЦ
доктор сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией Института леса, Карельский научный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
fedorets@krc.karelia.ru

АЛЕКСЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ ИЛЬИНОВ
кандидат биологических наук, научный сотрудник Института леса, Карельский научный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
ialexa33@mail.ru

БОРИС ВЛАДИМИРОВИЧ РАЕВСКИЙ
кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института леса, Карельский научный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
raevski@drevlanka.ru

ОКСАНА АЛЕКСЕЕВНА РУДКОВСКАЯ
кандидат биологических наук, младший научный сотрудник Института леса, Карельский научный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
molinia@mail.ru

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕЗЕРВАТОВ СЕВЕРНОГО ПРИЛАДОЖЬЯ*

В статье приводятся результаты исследования морфологических и химических свойств почв еловых генетических резерватов Северного Приладожья. Показано, что ведущими почвообразовательными процессами для них являются буроземообразование, глееобразование, торфообразование. Полученные данные могут быть использованы при проведении долгосрочного мониторинга почв, сформировавшихся в еловых древостоях.

Ключевые слова: Северное Приладожье, еловые генетические резерваты, морфологические и химические свойства почв

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с ростом антропогенного воздействия на лесные экосистемы актуальной является проблема сохранения такой уникальной природной территории, как Северное Приладожье. Сокращение площади лесов на данной территории приводит к уничтожению генофонда ценных растений и снижению ее биоресурсного потенциала. Как известно, почвы определяют продуктивность, динамику роста и развития, устойчивое функционирование фитоценозов [6], [11]. Они формируют прямо или опосредованно систему биохимических циклов элементов. Почвы малонарушенных лесных экосистем могут служить хорошим индикатором происходящих изменений в природе на современном этапе ее развития. В этой связи необходимы комплексные исследования почв лесных экосистем данного района.

Одним из важных инструментов сохранения биоразнообразия на внутривидовом уровне является создание генетических резерватов. Они позволяют «изъять» из хозяйственной деятельности почвы на относительно небольших участках естественных популяций основных лесообразующих пород. Почвы генетических резерватов не будут испытывать антропогенных нагрузок и поэтому могут использоваться при мониторинговых исследованиях [4], [8], [9]. В настоящее время общая площадь генетических резерватов в Карелии составляет более 6000 га. Среди них особое место занимают еловые генетические резерваты, расположенные в районе Карельского Приладожья. Однако если характеристике почв лесных биогеоценозов этого района посвящено достаточно много работ [5], [6], [7], то сведения о почвах генетических резерватов отсутствуют. Цель настоящего исследования заключалась в изучении свойств лесных почв еловых генетических резерватов Северного Приладожья и предусматривала решение следующих задач: 1) выполнить морфологическое описание почв под еловыми древостоями; 2) выявить наиболее типичные для данных участков почвы, исследовать их химические свойства; 3) дать характеристику биологической активности изучаемых почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Район исследований расположен в северной части Приладожья Карелии и охватывает участок

© Медведева М. В., Федорец Н. Г., Ильинов А. А., Раевский Б. В., Рудковская О. А., 2012

выступов архейского основания. Интенсивная деятельность ледника стала причиной формирования каменистых осыпей, россыпей, скалистых обнажений, покрытых растительностью. Рельеф местности – грядово-холмистый; грядовый; его большая пересеченность и сложность развития способствовали формированию контрастных по увлажнению условий, гетерогенности свойств почв, пестроты почвенного покрова. На данной территории в почвообразовании участвуют как коренные породы, так и четвертичные отложения. Валунно-галечная морена, сложенная суглинками и обломками гранитов, в отдельных местах оказывается смытой, при этом обнажается кристаллическая порода. Последняя выступает как почвообразующая и подстилающая порода.

Изучаемый район по агроклиматическому районированию относится к южному, число дней со снежным покровом составляет 135–145. По условиям теплообеспеченности почв район является умеренно теплым, средняя температура почв в июле 16,6–17,5 °С [2].

Постоянные пробные площади (ППП) № 7 и 8 были заложены в Сортавальском и Хелюльском участковых лесничествах Сортавальского центрального лесничества, где расположены еловые генетические резерваты (№ 6 и 8). Их размер составлял 980 и 391,1 га соответственно. По таксационным описаниям и плану лесонасаждений подбирались наиболее типичные для данных резерватов еловые выделы. При закладке ППП соблюдался принцип единства условий местопроизрастания, типа леса, происхождения и возрастной структуры, однородности состава и полноты древостоя. Размеры ППП определялись наличием не менее 200–250 деревьев основного элемента леса. Площадь каждой пробной площади составляла 0,4 га. Обработка первичных материалов по пробным площадям велась общепринятыми в лесной таксации методами. Таксационная характеристика древостоя приводится в табл. 1. На основании анализа структуры древостоев на заложенных пробных площадях можно заключить, что история их возникновения имеет ряд сходных черт. Более 120 лет назад изучаемые свободные от леса территории заселялись породами-пионерами: сосной, березой и осиной. По мере развития древостоя началось массовое естественное возобновление ели. На момент исследования отмечено абсолютное преобладание поколения ели в возрасте 81–120 лет, идет формирование второго ее поколения, завершается процесс выпадения из состава древостоя березы и осины. В настоящее время практически все леса данного района являются антропогенно нарушенными и представляют собой сукцессионные варианты сообществ, находящихся в нестабильном состоянии.

На каждой пробной площади был выявлен видовой состав сосудистых растений, выделены микрогруппировки (парцеллы). На исследуемых пробных площадях отмечен высокий уровень видового богатства напочвенного покрова, что в целом характерно для Приладожского флористического района [10]. Как известно, мозаичность напочвенного покрова отражает неоднородность свойств почв, что и использовалось при выборе участков для закладки разрезов. Основным методом исследования опорных разрезов был традиционный морфологический анализ вертикального профиля почв, для более детального анализа почвенного покрова делали прикопки. Из всего разнообразия типов почв, выявленных на данных участках, для анализа были выбраны пять наиболее типичных, встречающихся на обоих пробных площадях (ПП 7 и ПП 8). Таксономическая принадлежность почв устанавливалась в соответствии с региональной классификацией [5], [11]. Для определения химических свойств почв отбирали образцы из почвенных разрезов. В отобранных образцах определяли кислотность и содержание химических элементов в аналитической лаборатории Института леса КарНЦ РАН по общепринятым методам [1].

Таблица 1

Таксационная характеристика древостоя исследуемых пробных площадей

Показатель	Пробные площади / район расположения	
	№ 7 / Сортавала	№ 8 / Хелюля
Общий состав	5,3Е 1,2С 3,4Б 0,1Ос	9,1Е 0,3С 0,3Б 0,4Ос
Возрастная структура еловой части	5Е100 0,3Е60	8,8Е1000,3Е60
Тип леса	черничный	черничный
Средний возраст, лет	100	100
Средний диаметр, см	22	29
Средняя высота, м	21	24
Запас, м³/га	443	404
Число стволов, шт./га	928	632
Относительная полнота	1,2	0,95
Бонитет	III	II
Подрост	10Е (300 шт./га)	9Е (2100 шт./га), 1Б (200 шт./га)
Подлесок	нет	рябина, ольха серая

РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе комплексных исследований было установлено, что на исследуемых участках преобладающими типами почвообразовательных процессов являются буроземообразо-

вание, глееобразование и торфообразование. Торфонакопление приурочено к понижениям между грядами, блюдцеобразным западинкам, а также к местам выхода коренных пород. Процессы микробной трансформации органического вещества в данных почвах заторможены, вследствие чего происходит накопление торфа. Валунно-галечная морена, сложенная суглинками, подпирается кристаллическими породами и периодически подтопляется, что создает господство восстановительных условий и предпосылки к развитию глееобразования. Особо необходимо подчеркнуть, что в данных почвах проявляются процессы буроземообразования, которые обусловлены благоприятным сочетанием тепла, влаги, богатством материнских почвообразующих пород щелочными и щелочноземельными металлами. Немаловажная роль при этом принадлежит микробиоте, которая активно участвует в деструкционных процессах. На исследуемой территории специфические условия почвообразования (более теплый климат, распространение суглинистой морены, бедной кремнеземом и обогащенной щелочноземельными металлами, достаточно высокий микробиально-биохимический потенциал почв) не способствуют развитию подзолообразовательного процесса [3]. Поэтому можно говорить, что для данной местности буроземы и подбуры являются интразональным типом почв.

Были исследованы пять наиболее типичных для изучаемых пробных площадей типов почв. Три разреза (органогенная примитивная, торфяно-болотная и подбур) характеризуют почвы, сформировавшиеся на скальном основании. Два разреза характеризуют почвы, сформировавшиеся на суглинистой морене, – бурозем грубогумусный и торфяно-глеевая переходная (рис. 1). Степень развития профиля лесных почв определяется местоположением на элементах рельефа. Согласно морфологическому описанию, органогенная примитивная и торфяно-болотная почвы характеризуются укороченным профилем, резкая граница между переходами отсутствует, переход между ними постепенный. Профили бурозема грубогумусного и подбура более дифференцированы по цвету, структуре, при этом границы между горизонтами заметнее.

Рис. 1. Морфологическое строение почв генетических резерватов Приладожья

Пробная площадь № 7 (резерват № 6, Сортавальское лесничество, квартал 150, выдел 3) расположена на пологом южном склоне скальной гряды, перекрытой моренными отложениями. Для данного участка характерна высокая завалуненность. Тип леса – ельник черничный. В напочвенном покрове зарегистрированы 27 видов сосудистых растений. Помимо черники, играющей основную роль в составе травяно-кустарничкового яруса, обильны вейник тростниковый, ландыш майский, майник двулистный и костяника каменистая. Здесь отмечено произрастание пяти видов растений, являющихся элементами южной тайги и широколиственных лесов. Моховой ярус образован преимущественно зелеными мхами, среди которых доминирует плеврициум Шребера. Значения общего проективного покрытия травяно-кустарничкового и мохового ярусов одинаковы и равны 30 %.

Бурозем грубогумусный типичный на суглинистой морене

Данный разрез заложен в ландышево-кислично-черничной парцелле, в пределах которой отмечено наибольшее значение проективного покрытия кислицы (10 %) по сравнению с остальными парцеллами, выделенными на данной ППП. Профиль почвы по окраске однороден, разделение на горизонты затруднено (рис. 1). Мощность подстилок отражает формы микрорельефа, поэтому ее изменения ясно выражены. Дифференциация нижней части профиля на горизонты затруднена.

A_0` 0–1 см. Лесная подстилка, бурая (10 YR 3/3), рыхлая, слабо разложившаяся, состоит из опада ели, шишек, мхов, разнотравья, отмерших веток и листьев кустарничков, горизонт густо пронизан корнями кустарничков, сухой, переход в нижележащий горизонт постепенный.

A_0`` 1–2(4) см. Лесная подстилка, темно-коричневая (10 YR 2/2), уплотнена, среднеразложившаяся, состоит из опада растений, хвои ели, шишек, древесины, веток, мхов, разнотравья, густо пронизана мелкими и средними корнями кустарничков, горизонт сухой, граница перехода ясная.

A_0``` 2(4)–4(6) см. Лесная подстилка, темно-коричневая (10 YR 2/1), хорошо разложившаяся, опад растений утратил анатомическое строение, более плотная, чем вышележащий горизонт, слоистая, густо пронизана корнями, горизонт свежий, переход по структуре ясный.

A_1 4(6)–15(20) см. Грубогумусный перегнойный горизонт, темно-серый с коричневым оттенком (10 YR ¾), переход постепенный, свежий, рыхлое сложение, ореховатая структура, хорошо оструктурен, структурные агрегаты слабо цементированы, однородный по цвету и структуре, легкий суглинок, насыщенность корнями средняя, встречаются крупные корни ели, переход постепенный по цвету и плотности.

Bfm – 15(20)–21(25) см. Яркой охристо-бурой или коричнево-бурой окраски (7,5 YR 3/3), свежий, рыхлый, ореховатой структуры, встречаются крупные корни ели, под корнями деревьев отмечены включения части одного горизонта в массу другого, по граням структурных отдельностей отмечены органо-минеральные пленки, легкий суглинок, переход в нижележащий горизонт постепенный по цвету, линия перехода волнистая.

B_2 21(25)–31(36) см. Серо-коричневый (2,5 YR 5/4), несколько светлее вышележащего горизонта, свежий, более плотный, чем горизонт Bfm, зернистой структуры, легкий суглинок, по ходу корней обнаруживается темно-коричневый органический материал.

BC 31(36)–40(45) см. Переходный к почвообразующей породе, темно-серого цвета (2,5 Y 5/2), свежий, более плотный, чем вышележащий горизонт, имеются мелкие корни, комковато-ореховая структура, переход постепенный по цвету, волнистый.

C 40(45) см и глубже. Почвообразующая порода, серого цвета (2,5 Y 5/2), менее рыхлый, влажный, суглинистая морена, с включением плохо окатанного гравийно-галечно-валунного материала, с прослоями и линзами песка.

Органогенная примитивная на скальном основании

Разрез заложен на выходах коренных пород. Маломощная, хорошо минерализованная лесная подстилка расположена на тонком слое органо-минерального субстрата. Мощность почвенного слоя зависит от микрорельефа. Данный разрез приурочен к мертвопокровной парцелле (суммарное проективное покрытие травяно-кустарничкового и мохового ярусов не превышает 5 %).

A_0 0–2(5) см. Лесная подстилка, бурая (10 YR 2/2), хорошо разложившаяся, состоящая из опада хвои ели, шишек, древесины, веток, мхов, разнотравья, горизонт сухой, рыхлый, насыщен корнями кустарничков, переход в следующий горизонт постепенный, отмечено наличие углей.

A_1 2(5)–4(7) см. Перегнойно-гумусовый горизонт, темно-бурый (10 YR 2/1), сухой, рыхлый, отмечено скопление мелкозема, образованного при выветривании почвообразующих пород, пространство между минеральными частицами заполнено органическим веществом.

R 4(7) и глубже. Коренная порода, гранитный пегматит.

Торфяно-болотная на скальном основании

Разрез заложен в микропонижении. Почвы приурочены к пятнам сфагнума – индикатора избыточного застойного увлажнения.

A_0T` 0–5(7) см. Оторфованная лесная подстилка, неоднородная по цвету, преобладает соломенно-желтая окраска (5Y 5/4 + 10 YR 3/3), фрагментарно темно-бурая, состоит из живых или слаборазложившихся сфагновых мхов с обильной примесью опада древесных растений, кустарничков черники, можжевельника, горизонт свежий, рыхлый, много корней растений.

A_0T`` 5(7)–10(12) см. Оторфованная лесная подстилка, более однородная по цвету, светло-бурая (10 YR 3/3), состоит из растительных остатков, хорошо сохранивших свою форму, горизонт рыхлый, более плотный, чем вышележащий, густо пронизан корнями кустарничков, постепенный переход в нижележащий горизонт по цвету, плотности, степени разложения растительного материала.

A_0T``` 10(12)–16(20) см. Оторфованная лесная подстилка темно-коричневого цвета (10 YR 2/2), остатки растений утрачивают анатомическое строение, влажный, уплотнен, более плотный, чем вышележащий горизонт, слоистый, густо пронизан корнями растений.

A_0A_1 16(20)–22(25) см. Черного цвета (10 YR 3/1), влажный, более плотный, чем подстилка, пронизан корнями, много мелких камней.

R 22(25) см и глубже. Коренная порода – граниты.

Пробная площадь № 8 (Хелюльское лесничество, квартал 53, выдел 19) расположена на пологом западном склоне скальной гряды, перекрытой моренными отложениями. Тип леса – ельник черничный влажный. В напочвенном покрове выявлены 29 видов сосудистых растений, три из которых являются представителями южнотаежных лесов. Доминирует черника, обильны майник двулистный, вейник тростниковый и луговик извилистый. Доминантом мохового яруса, представленного главным образом зелеными мхами, является плевроциум Шребера. Общее проективное покрытие травяно-кус-

тарничкового и мохового ярусов составляет 45 и 70 % соответственно.

Подбур среднемощный грубогумусный на скальном основании

Разрез заложен в черничной парцелле, занимающей наибольшую поверхность пробной площади.

A_0` 0–0,5(1) см. Лесная подстилка бурых тонов (10 YR 3/3), слаборазложившаяся, состоит из остатков хвои ели, разнотравья, шишек, веток, мхов, не утративших анатомического строения, темно-коричневая, сухая, рыхлая, бесструктурная, густо пронизана корнями кустарничков, переход по плотности и степени разложения растительного материала постепенный.

A_0`` 0,5(1)–3(5) см. Лесная подстилка, темно-коричневая (10 YR 3/1), хорошо разложившаяся, растения утратили морфологическое строение, уплотнена, сухая, густо пронизана корнями.

A_1hBfm 3(5)–12(14) см. Темно-коричневый (10 YR 2/1), местами коричневатый с буровато-охристыми пятнами, насыщенность корнями средняя, сухой, плотный, комковатой структуры, переход по цвету и плотности постепенный.

Bfm 12(14)–17(19) см. Переходный горизонт, окрашен неоднородно, преобладает окраска буровато-темно-серая, местами охристо-коричневая (7,5 YR 3/2), сухой, более плотный, чем вышележащий горизонт, есть корни, комковатой структуры, постепенный переход по плотности.

BC 17(19)–20(21) см. Минеральный горизонт, темно-серый (2,5 Y 4/2), более однородный по окраске, чем вышележащий, свежий, плотный, суглинистый, много мелких камней.

R 20(21) и глубже. Материнская порода – гранит.

Торфяно-глеевая переходная на суглинистой морене

Разрез заложен в блюдцеобразной впадине, папоротниково-сфагновой парцелле. Моховой ярус имеет стопроцентное проективное покрытие и сложен преимущественно видами рода *Sphagnum*. При достаточно высоком уровне видового богатства сосудистых растений (15 видов) общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса незначительно и составляет не более 10 %.

T_0 0–0,8(2) см. Очес из плохо разложившихся сфагновых мхов, светло-желтый (5Y 5/4), окраска однородная, свежий, рыхлый, пронизан корнями, переход, ясный по цвету, степени разложения.

T_1 0,8(2)–4(7) см. Торфяный, более темный, чем вышележащий, темно-бурый (2,5 Y 4/4), свежий, рыхлый, более плотный, чем предыдущий, густо пронизан корнями, среднеразложившийся, переход, ясный по цвету и плотности.

Тп 4(7)–12(15) см. Торфяно-перегнойный, темно-бурый (2,5 Y 4/4), влажный, более плотный, чем вышележащий, остатки растений утратили анатомическое строение, встречаются угли, крупные корни, постепенный переход по цвету.

Bhg 12(15)–22(25) см. Серо-коричневый (2,5 Y 3/2), неравномерно окрашенный, глеевый минеральный горизонт, пропитан органическим веществом, в нижней части встречаются единичные корни ели, суглинистый, влажный, комковатой структуры, слоистый, постепенный переход по цвету.

G 22(25)–40 см. Почвообразующая порода, суглинистая морена с валунами, от темно-серой до голубовато-сизой окраски (2,5 Y 4/3), влажный, уплотнен, суглинистый, встречаются железистые прожилки и ржавые расплывчатые пятна, корней нет.

C 40 см и глубже. Почвообразующая порода, серого цвета (2,5 Y 5/2), суглинистая морена, с включением плохо окатанного гравийно-галечно-валунного материала, с прослоями и линзами песка.

Для диагностики почв, помимо морфологического описания профилей, исследовали физические и физико-химические свойства (табл. 2). Плотность почв является одним из факторов, определяющих проникновение корней в почвенную толщу. Результаты исследования показали, что плотность почв верхних горизонтов до глубины 10–15 см ниже (0,63–0,69 г/см^3), чем в более глубоких горизонтах почв. Более низкие значения данного показателя в верхней части профиля обусловлены обогащенностью органическим веществом и развитием корневой системы древесных растений. Показатели плотности на глубине более 40 см на всех участках были одинаковыми (1,1 г/см^3).

Все исследуемые почвы достаточно кислые, значения pH изменяются с глубиной в пределах 2,5–4,2 (табл. 2). Наиболее низкие значения pH отмечены для органогенных горизонтов подстилки, состоящих из опада хвойных растений, находящегося на разных стадиях разложения.

Зольность органогенного горизонта исследуемых почв меняется в широком диапазоне. В почвах гидроморфного ряда (торфяно-болотная и торфяно-глеевая) биогенное накопление минеральных элементов низкое, содержание золы меньше 7 % (рис. 2). На наш взгляд, высокое содержание золы (до 18 %) в A_0 горизонте примитивных почв, сформировавшихся на скальном основании, обусловлено вкраплениями минеральных частичек почвообразующей породы, механические элементы которой способны заполнять пустоты, образующиеся в лесной подстилке. Подстилки буроземов накапливают до 30 % золы, что свидетельствует о богатстве почв элементами минерального питания растений. В данных горизонтах почв формируются достаточно благоприятные трофические условия для развития микробиоты: высокое содержание неорганических соединений и достаточная обеспе-

ченность органическими веществами, доступными для микробиоты.

Биологический круговорот элементов-биогенов (C, N) в почвенном профиле находится в тесной взаимосвязи с направленностью трансформации органического вещества. Интенсивность круговорота данных веществ максимальна в верхнем органогенном горизонте почв – лесной подстилке. Именно здесь выявлено наибольшее содержание C и N. При этом самые благоприятные трофические условия для подстилочных деструкторов формируются при отношении C/N, равном 25, что наблюдали в почвах с выраженным процессом буроземообразования (рис. 2).

Таблица 2

Химические показатели почв еловых древостоев генетических резерватов Северного Приладожья

Горизонт	Плотность, г/см³	pHKCl	C	N	C/N	P	K	S	Fe	Ca	Mg
			%			%			мг/кг		
ПП7. Органогенная примитивная на скальном основании											
A0	*	3,8	40,51	3,91	10,40	0,17	0,11	0,18	1740	6380	669
A1	*	3,7	33,05	1,48	22,30	0,18	0,10	0,19	3850	3580	566
Бурозем грубогумусный типичный на суглинистой морене											
A0	*	3,4	33,21	1,30	25,55	0,11	0,12	0,21	3705	3661	844
A1	0,49	3,7	14,25	0,41	34,70	0,10	0,11	0,06	8560	1120	940
Bfm	0,69	4,0	4,26	0,20	21,30	0,10	0,13	0,05	9130	1570	1070
B2	0,86	4,4	2,50	0,16	15,60	0,10	0,15	0,05	8520	876	572
BC	0,98	4,2	1,56	0,04	3,90	0,07	0,08	0,03	7100	1610	859
C	1,12	4,2	1,04	0,03		0,07	0,08	0,03	2730	486	238
Торфяно-болотная на скальном основании											
AOT`	*	2,6	45,46	1,02	44,50	0,12	0,10	0,07	199	2340	366
AOT``	*	2,5	42,88	1,09	39,30	0,12	0,08	0,11	595	4480	831
AOT```	*	2,5	29,70	0,86	34,50	0,14	0,06	0,09	3540	1640	425
AOA1	0,13	3,1	8,69	0,49	17,70	0,16	0,11	0,03	6310	2680	700
ПП8. Подбур среднемощный грубогумусный на скальном основании											
A0	*	3,0	47,6	2,0	23,80	0,20	0,16	0,21	1409	3845	302
AlhBfm	0,23	3,5	12,39	0,38	32,60	0,13	0,08	0,07	5400	2760	584
Bfm	0,66	3,7	6,53	0,13	50,20	0,10	0,06	0,04	7620	220	92
BC	0,97	3,8	2,71	0,22	12,30	0,08	0,06	0,02	1560	247	105
Торфяно-глеевая переходная на суглинистой морене											
TO	*	2,8	42,06	0,97	43,40	0,13	0,18	0,08	701	4010	872
T1	*	2,9	40,19	1,43	28,10	0,14	0,13	0,15	1110	1780	697
Tn	0,08	3,3	19,05	0,97	19,60	0,15	0,11	0,13	*	335	98
Bhg	0,63	3,6	5,31	0,24	22,10	0,10	0,13	0,04	7460	144	67
G	0,93	4,0	2,12	0,13	16,30	0,10	0,08	0,04	8350	203	76
C	1,11	4,0	3,06	0,13	23,53	0,08	0,15	0,04	7920	1460	982

* Примечание. – не определяли.

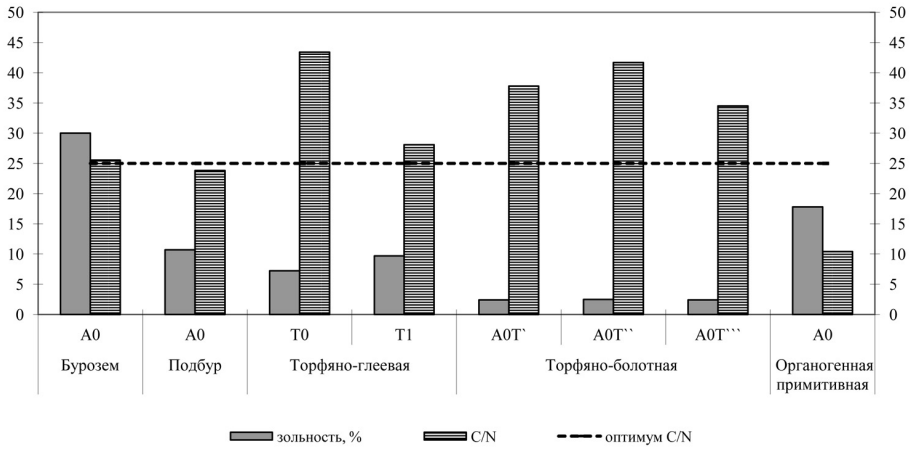


Рис. 2. Химические свойства изучаемых почв генетических резерватов

Содержание фосфора и калия в изучаемых почвах уменьшается по профилю почв достаточно равномерно: биогенная аккумуляция отмечена в лесной подстилке, с глубиной их содержание снижается.

Согласно полученным данным, в лесной подстилке накапливается больше серы, чем в минеральных горизонтах. Ее участие в процессах почвообразования достаточно велико: являясь составной и неотъемлемой частью различных органических соединений, прежде всего аминокислот, она прямо и косвенно влияет на весь ход почвообразовательного процесса.

В процессе микробной трансформации органического вещества в почвенную толщу в большом объеме поступают органические кислоты, нейтрализация которых происходит при участии кальция и магния. Для данной пары элементов прослеживается четкая тенденция их биогенного закрепления в верхнем горизонте почв и постепенное снижение содержания с глубиной.

Железо поступает в экосистему преимущественно в составе неорганических и органоминеральных соединений, активно вовлекается в природный круговорот веществ. Его распределение по почвенному профилю достаточно равномерное: наименьшее содержание железа приурочено к верхнему горизонту почв, с глубиной его содержание возрастает. Последнее хорошо отражает тесную взаимосвязь с материнской почвообразующей породой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили выявить тенденции почвообразовательных процессов при формировании типичных для Приладожья ельников черничных. Было установлено, что почвенный покров изучаемых территорий характеризуется достаточной сложностью, большим разнообразием и контрастностью свойств. Различные типы почвообразования – торфонакопление, глееобразование, буроземообразование – являются одной из основных особенностей почв исследованных генетических резерватов Северного Приладожья. Их проявление зависит от сочетания факторов почвообразования, а также возраста почв. Многочисленные вариации почвообразующих процессов закономерно ведут к образованию лесных почв с достаточно высоким уровнем плодородия, что способствует формированию высокопродуктивных еловых древостоев.

Полученные данные по почвам еловых резерватов в данном специфическом по природным особенностям районе Карелии могут использоваться при мониторинге лесных экосистем и выделении уникальных почвенных разностей в целях их охраны.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 486 с.
2. Атлас Карельской АССР. М.: Главное управление геодезии и картографии, 1989. 37 с.
3. Газизуллин А. Х. Региональные особенности почвообразования и почвы лесов центральной части Среднего Поволжья // Лесной журнал. 2006. № 5. С. 7–13.
4. Мамаев С. А., Махнев А. К., Семериков Л. Ф. Принципы выявления и сохранения генетических ресурсов древесных растений в лесах СССР / // Лесное хозяйство. 1984. № 11. С. 35–38.
5. Путенихин В. П. Лесные генетические резерваты хвойных в Республике Башкортостан // Хвойные бореальной зоны. 2010. Т. XXVII. № 1–2. С. 175–178.
6. Положение о выделении и сохранении генетического фонда древесных пород в лесах СССР. М., 1982. 23 с.
7. Морозова Р. М. Лесные почвы Карелии. Л.: Наука, 1991. 184 с.
8. Морозова Р. М., Федорец Н. Г. Земельные ресурсы Карелии и их охрана. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 148 с.
9. Раменская М. Л. Анализ флоры Мурманской области и Карелии. Л.: Наука, 1983. 216 с.
10. Федорец Н. Г., Морозова Р. М., Синькевич С. М., Загруральская Л. М. Оценка продуктивности лесных почв Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. 190 с.
11. Морозова Р. М., Лазарева И. П. Почвы и почвенный покров Валаамского архипелага. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2002. 170 с.

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ПЕТРОЗАВОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Сентябрь, № 6 **Биология** **2012**

УДК 595.789: 591.151

ВЯЧЕСЛАВ ВАСИЛЬЕВИЧ ГОРБАЧ
кандидат биологических наук, доцент кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
gorbach@psu.karelia.ru

ВНУТРИПОПУЛЯЦИОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ РИСУНКА НА КРЫЛЬЯХ ГЛАЗКА ЦВЕТОЧНОГО *APHANTOPUS HYPERANTUS* (LEPIDOPTERA, SATYRIDAE)*

С локальной территории площадью 4 км^2 описан 71 вариант крылового рисунка глазка цветочного. Выявлены половые отличия, значимой сезонной и топической дифференциации среди бабочек не обнаружено. Результаты изучения индивидуальной изменчивости и почти полное отсутствие повторных отловов меченых особей позволяют предположить, что данному виду в местных условиях не свойственен оседлый образ жизни; расселяясь, бабочки перемешиваются, формируя на рассматриваемой территории неделимую популяцию.

Ключевые слова: глазок цветочный, *Aphantopus hyperantus*, крыловой рисунок, изменчивость, популяция, мечение бабочек

Изменчивость – одно из фундаментальных свойств живого. В основе индивидуальной изменчивости лежат генетические явления, внешний же облик особи есть результат комплексного взаимодействия генотипа и условий среды. Вклад каждого из этих факторов в формирование определенных морфологических признаков оценить довольно сложно, между тем генетическая составляющая обычно выявляется при изучении особей разной степени родства [9]. Принцип сходства генетически родственных организмов служит основанием для выделения таксономических категорий и крупных территориальных группировок. Одним из излюбленных объектов фенотипических исследований являются бабочки. По рисунку крыльев обычно судят о географической изменчивости видов, выделяют новые таксоны и проводят ревизии ранее описанных [1], [5], [6], [7], [8]. В других случаях предметом изучения являются закономерности формирования самого рисунка [10], [11], [15], [16].

Настоящее исследование посвящено индивидуальной изменчивости бабочек, населяющих локальную территорию. Объектом изучения стал глазок цветочный *Aphantopus hyperantus* (Linnaeus, 1758), небольшая дневная бабочка, широко распространенная в умеренном поясе Европы и Азии. В Восточной Фенноскандии вид населяет разнообразные луга. Гусеница питается на злаках. Бабочки появляются в конце июня и летают до августа [12], [14]. Пространственная организованность популяций вида во многом остается неясной. Существует мнение [13], что глазок цветочный является оседлым видом, а население той или иной локальной территории выявляется как большая, более или менее непрерывная популяция, некий континуум сменяющих друг друга скоплений особей, формирующихся в подходящих местообитаниях. Подобная модель пространственной организованности населения предполагает некоторую степень обособленности внутрипопуляционных группировок, которая должна неизбежно возрастать при сокращении численности вида, когда особи вследствие уменьшения общей дисперсии оказываются сконцентрированными лишь в наиболее благоприятных для развития местах. Низкая миграционная активность бабочек в подобных условиях способна ограничивать обмен генетической информацией и тем самым приводить к появлению хоть и небольших, но устойчивых пространственных отличий в частоте встречаемости различных фенотипов. Существование таких отличий может стать весомым аргументом в пользу самостоятельности биотопических группировок, которые при определенных условиях могут рассматриваться в качестве полноценных популяций. В данной работе мы изучаем изменчивость элементов крылового рисунка бабочек с целью обоснования пространственной дифференциации населения исследуемой территории. Подтвердить гипотезу об оседлости вида был призван эксперимент с мечением бабочек.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Исследования проводили в окрестностях с. Кончезера (Кондопожский район Республики Карелия, 62°07’ с. ш., 34° в. д.) на территории в 4 км^2 (рис. 1). Здесь глазок цветочный встречается повсеместно. Для проведения эксперимента были выбраны участки с наиболее высокой численностью бабочек. Эти выделы представляют собой разнотравно-злаковые суходольные луга площадью 3–4 га, отделенные от соседних открытых биотопов более или менее выраженными перелесками. На подготовительном этапе,

© Горбач В. В., 2012

в июле 2004 года, провели выборочные сборы бабочек и по коллекции составили таблицу возможных морф, вариантов крылового рисунка вида. В следующем, 2005, году особей отлавливали и здесь же, используя подготовленную таблицу, описывали особенности рисунка. Для изучения подвижности вида каждую особь метили индивидуальным номером и немедленно освобождали. Метки наносили нетоксичной ручкой-маркером на нижнюю поверхность левого заднего крыла [2]. Обычно каждый участок посещали 2–3 раза в неделю, но из-за неблагоприятных погодных условий запланированные визиты порой приходилось откладывать на несколько дней. Связь между признаками исследовали с помощью корреляционного анализа. Критерий χ^2 использовали для оценки различия частот в полученных выборках.

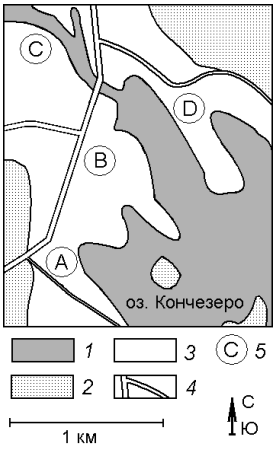


Рис. 1. Исследуемая территория: 1 – озера; 2 – леса; 3 – открытый ландшафт, включающий жилые и хозяйственные постройки с. Кончезера, сельскохозяйственные угодья и перелески; 4 – шоссейные и грунтовые дороги; 5 – изученные участки

РЕЗУЛЬТАТЫ

Всего изучено 600 особей глазка цветочного (табл. 1). Установлено, что рисунок крыльев у местных бабочек в целом соответствует норме [15]. В наиболее типичном варианте на исподе крыльев имеются глазчатые пятна в светлых ободках с хорошо развитыми белыми ядрами (рис. 2). Взаимосвязь числа исследуемых элементов рисунка на передних и задних крыльях проявляется слабо ($r = 0{,}18$, $df = 599$, $t = 4{,}44$, $p < 0{,}001$). По передним крыльям существуют значимые половые различия ($\chi^2 = 463{,}61$, $df = 2$, $p < 0{,}001$), а по задним среди всех бабочек выделяются лишь самцы, собранные на участке С в 2004 году ($\chi^2 = 75{,}36$, $df = 2$, $p < 0{,}001$, рис. 3). В остальных случаях существенных сезонных и топических отличий не обнаружено (χ^2 с $p > 0{,}166$). Комбинация и выраженность элементов рисунка меняются в широком диапазоне, всего описана 71 морфа (табл. 2). Обычны случаи редукции глазков вплоть до полного их исчезновения. Особи с крупными эллипсовидными глазками или со сверхкомплектными элементами попадаются редко. Большинство бабочек (68 % самок и 61 % самцов) имеют полный набор глазчатых пятен на задних крыльях. Рисунок передних крыльев более изменчив (рис. 4): половина самок представлена тремя морфами (2c – 31 %, 3b – 12 % и 13b – 11 %), а у половины самцов их насчитывается по меньшей мере пять (4a – 11 %, 5a – 15 %, 10a – 5 %; 13b – 9 %, 23a – 10 %). Около 70 % описанных вариантов рисунка регистрировали в единичных случаях. Анализ встречаемости морф, для которых имелись достаточные по объему выборки, не выявил какой-либо пространственной дифференциации: распределение эмпирических частот не отличается от равномерного распределения ($\chi^2 < 4{,}77$, $df = 3$, $p > 0{,}189$). Значимые отличия отмечены лишь для самцов морфы 23d ($\chi^2 = 25{,}01$, $df = 3$, $p < 0{,}001$), более половины из которых отловлено на участке С в 2004 году.

Таблица 1

Число изученных особей глазка цветочного

Год	Пол	Участки			
		A	B	C	D
2004	Самцы	27	21	41	70
	Самки	7	15	16	3
2005	Самцы	25	44	38	56
	Самки	57	77	46	57

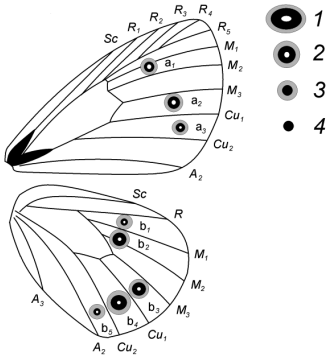


Рис. 2. Исследуемые элементы рисунка на нижней поверхности крыльев глазка цветочного: $Sc – A_3$ – стандартные обозначения жилок; a_i и b_i – элементы рисунка; 1 – эллипсовидное глазчатое пятно; 2 – глазчатое пятно; 3 – пятно с точкой; 4 – точка

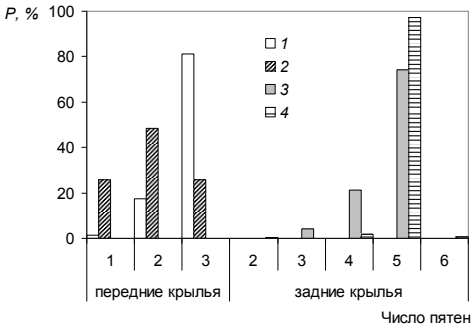


Рис. 3. Число пятен на крыльях глазка цветочного: 1 – самки, 2 – самцы, 3 – самцы, отловленные на участке С в 2004 году, 4 – остальные особи

Таблица 2

Изменчивость рисунка на крыльях глазка цветочного

Морфа	Особенности рисунка		Число особей, экз.	
	Переднее крыло	Заднее крыло	Самцы	Самки
1a	$(+1)a_1$-a_2-$(+1)a_3$	b_1-b_2-b_3-b_4-b_5	3	2
2a	a_1-a_2-a_3	b_1-b_2-$(+1)b_3$-$(+1)b_4$-b_5	0	1
2b		b_1-$(+1)b_2$-b_3-b_4-b_5	0	1
2c		b_1-b_2-b_3-b_4-b_5	2	85
2d		$(-1)b_1$-b_2-b_3-b_4-b_5	4	15
3a	a_1-a_2-$(-1)a_3$	$(+1)b_1$-$(+1)b_2$-b_3-b_4-b_5	0	2
3b		b_1-b_2-b_3-b_4-b_5	4	34
3c		$(-1)b_1$-b_2-b_3-b_4-b_5	0	3
4a	a_1-a_2-$(-2)a_3$	b_1-b_2-b_3-b_4-b_5	36	13
5a	a_1-a_2	b_1-b_2-b_3-b_4-b_5	47	15
5b		$(-1)b_1$-$(-1)b_2$-b_6-b_3-b_4-b_5	0	1
5c		$(-2)b_1$-b_2-b_3-b_4-b_5	5	3
5d		b_1-b_2-$(-2)b_3$-b_4-b_5	0	1
5e		$(-1)b_1$-b_2-b_3-b_4-$(-1)b_5$	1	5
5f		$(-1)b_1$-b_2-b_3-b_4-$(-2)b_5$	11	0
5e		$(-1)b_1$-b_2-b_3-b_4-$(-3)b_5$	0	1
6a	a_1-$(-1)a_2$-a_3	b_1-b_2-b_3-b_4-b_5	0	5
7a	a_1-$(-2)a_2$-a_3	$(-1)b_1$-$(-1)b_2$-b_3-b_4-b_5	1	0
8a	a_1-$(-1)a_2$-$(-1)a_3$	b_1-b_2-b_3-b_4-b_5	2	9
8b		$(-1)b_1$-b_2-b_3-b_4-b_5	1	1
8c		$(-1)b_1$-b_2-b_3-b_4-$(-1)b_5$	0	1
9a	a_1-$(-1)a_2$-$(-2)a_3$	b_1-b_2-b_3-b_4-$(-1)b_5$	1	1
9b		$(-1)b_1$-b_2-$(-1)b_3$-b_4-$(-1)b_5$	0	1
10a	a_1-$(-1)a_2$	b_1-b_2-b_3-b_4-b_5	17	10
10b		$(-1)b_1$-b_2-b_3-b_4-b_5	1	1
11a	a_1-$(-2)a_2$	b_1-b_2-b_3-b_4-$(-1)b_5$	5	0
11b		$(-1)b_1$-b_2-b_3-b_4-b_5	0	2
11c		$(-3)b_1$-b_2-$(-3)b_3$-b_4-b_5	4	0
12a	a_1	b_1-b_2-b_3-b_4-b_5	3	0
12b		$(-1)b_1$-$(-1)b_2$-b_3-b_4-b_5	1	0
12c		$(-1)b_1$-b_2-$(-3)b_3$-$(-1)b_4$-b_5	5	1
13a	$(-1)a_1$-a_2-a_3	b_1-$(+1)b_2$-b_3-$(+1)b_4$-b_5	0	1
13b		b_1-b_2-b_3-b_4-b_5	30	30
14a	$(-1)a_1$-a_2-$(-1)a_3$	b_1-b_2-b_3-b_4-$(-1)b_5$	4	1
15a	$(-1)a_1$-a_2-$(-2)a_3$	b_1-b_2-b_3-b_4-b_5	1	0
16a	$(-1)a_1$-a_2	$(-1)b_1$-b_2-b_3-b_4-b_5	1	1
17a	$(-1)a_1$-$(-1)a_2$-a_3	b_1-b_2-b_3-b_4-b_5	0	2
18a	$(-1)a_1$-$(-1)a_2$-$(-1)a_3$	b_1-b_2-b_3-b_4-b_5	1	0
18b		$(-1)b_1$-b_2-b_3-b_4-b_5	4	1
18c		b_2-b_3-b_4-b_5	1	0
19a	$(-1)a_1$-$(-1)a_2$-$(-2)a_3$	b_1-b_2-b_3-b_4-b_5	4	0
19b		$(-1)b_1$-b_2-b_3-b_4-b_5	6	4
19c		$(-1)b_1$-b_2-$(-1)b_3$-b_4-b_5	2	0
19d		$(-1)b_1$-$(-1)b_2$-$(-1)b_3$-$(-1)b_5$	2	0
20a	$(-1)a_1$-$(-1)a_2$	b_1-b_2-b_3-b_4-b_5	4	5
20b		$(-1)b_1$-b_2-b_3-b_4-b_5	15	2
20c		$(-1)b_1$-b_2-$(-1)b_3$-b_4-$(-1)b_5$	2	0
20d		b_2-b_3-b_4-b_5	0	1
20e		b_2-b_3-b_4-$(-2)b_5$	1	0
20f		$(-2)b_4$-$(-2)b_5$	1	0
21a	$(-1)a_1$-$(-2)a_2$-$(-2)a_3$	$(-1)b_1$-b_2-b_3-b_4-b_5	2	2
22a	$(-1)a_1$-$(-2)a_2$	b_1-b_2-b_3-b_4-b_5	2	0
22b		$(-1)b_1$-$(-1)b_2$-b_3-b_4-b_5	3	0

Окончание табл. 2

23a	$(-1)a_1$	b_1-b_2-b_3-b_4-b_5	33	6
23b		$(-1)b_1$-$(-1)b_2$-b_3-$(-1)b_4$-$(-1)b_5$	2	0
23c		$(-2)b_1$-$(-2)b_2$-b_3-b_4-b_5	1	0
23d		$(-1)b_1$-b_2-b_3-b_4	20	2
23e		b_2-b_3-b_4-b_5	1	0
23f		b_2-$(-2)b_3$-b_4-$(-2)b_5$	0	1
23g		b_4-b_5	1	0
23h		$(-1)b_1$	2	3
24a	$(-2)a_1$-$(-1)a_2$	b_1-b_2-b_3-b_4-b_5	12	1
25a	$(-2)a_1$-$(-2)a_2$	$(-1)b_1$-$(-2)b_2$-$(-2)b_4$-$(-2)b_5$	2	0
26a	$(-2)a_1$	b_1-b_2-b_3-b_4-b_5	1	0
26b		$(-1)b_1$-$(-1)b_2$-b_3-b_4-b_5	1	0
26c		$(-1)b_2$-b_3-b_4-b_5	1	0
26d		$(-1)b_1$-b_2-$(-2)b_3$-b_4-$(-1)b_5$	0	1
26e		$(-2)b_2$-$(-1)b_3$-b_4-b_5	1	0
26f		$(-2)b_1$-$(-2)b_2$-$(-1)b_3$-$(-1)b_4$-$(-1)b_5$	1	0
27a		$(-1)b_1$-b_2-b_3-b_4-b_5	2	0
27b		$(-1)b_1$-$(-1)b_2$-b_3-b_4-b_5	1	0

Примечание. Элементы a_i и b_i соответствуют рис. 2 и 4; - – разделитель элементов; если пятно глазчатое, то перед литерой нет скобок; (+1) – эллипсовидное глазчатое пятно; (–1) – пятно с точкой; (–2) – точка.

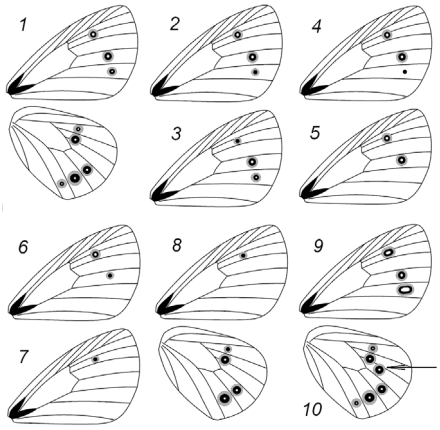


Рис. 4. Варианты рисунка нижней поверхности крыльев глазка цветочного: 1 – морфа 2c, 2–7 – рисунок передних крыльев морф 3b, 13b, 4a, 5a, 10a, 23a соответственно, 8 – морфа 23d; 9 – рисунок с эллипсовидными элементами, 10 – сверхкомплектное пятно b6 в рисунке задних крыльев

Эксперимент с мечением бабочек не дал ожидаемых результатов. Из 400 бабочек, помеченных в течение сезона 2005 года, лишь одна попалась во время следующего посещения исследуемой территории. Между тем только что меченых особей отлавливали довольно часто.

ОБСУЖДЕНИЕ

Глазок цветочный оказался не столь многочисленным видом, как ожидалось исходя из визуальных наблюдений и результатов учетов на трансектах [12]. В 2005 году, когда на исследуемых участках отлавливали каждую замеченную бабочку, удалось описать и пометить всего 400 особей. Объемы полученных выборок вполне сравнимы с таковыми для краснокнижной мнемозины [3] и намного ниже, чем у перламутровки *Boloria aquilonaris* [2]. Кроме того, встречаемость бабочек не отличалась стабильностью даже во время их массового лёта, и порой, для того чтобы пометить приемлемое число особей, на участке приходилось проводить больше времени, чем обычно.

Отсутствие повторных отловов меченых особей при последующих посещениях изучаемых участков не может быть интерпретировано однозначно. С одной стороны, результаты эксперимента отвергают предположение об оседлости бабочек, с другой стороны, наблюдаемый эффект может быть следствием высокой смертности особей между отловами. В тех случаях, когда речь идет об оседлых видах, приуроченных к небольшим местообитаниям, встречаемость меченых особей достигает 50 и даже 70 %. При увеличении площади населенных биотопов или их дисперсии доля повторных отловов может падать до 10–15 %, но бабочки тем не менее довольно долго остаются в тех же местах, где были помечены [2]. Даже у такого подвижного вида, как ленточник тополевый, на территории в 20 км^2 повторно попадались до 20 % особей [4]. Предполагаемая высокая смертность бабочек в периоды между отловами, по-видимому, может иметь место в случае длительных пауз, возникающих из-за ухудшения погодных условий, но, как показывает опыт, даже двухнедельный интервал не приводит к полному исчезновению меченых бабочек оседлого вида с исследуемой территории [3]. Манипуляции, связанные с отловом и мечением бабочек, вряд ли существенным образом влияют на их выживаемость. После мечения происходит снижение двигательной активности, но в течение часа бабочки, по крайней мере большинство из них, восстанавливаются и начинают попадаться повторно. Этот эффект известен уже довольно давно, поэтому и рекомендуется во избежание искажений в оценках проводить мечения с интервалом не менее одних суток. При-

нимая во внимание изложенные выше доводы, почти полное отсутствие повторных отловов у глазка цветочного можно объяснить лишь быстрой сменой населения исследуемых участков. Такое поведение согласуется с широким распространением необходимых для существования и воспроизводства вида ресурсов. И поскольку в местных условиях имеется большое число биотопов с обилием кормовых растений гусениц и источников нектара для имаго в составе сообществ, то и строгая приуроченность бабочек к конкретным местообитаниям вряд ли имеет смысл. Вместе с тем не исключено, что в ландшафтах с высокой дисперсией подходящих биотопов виду свойственен оседлый образ жизни.

Установленный факт несущественности отличий крылового рисунка у особей с разных участков не противоречит выводу об отсутствии оседлости у вида в местных условиях. Никаких пространственных разграничений в пределах рассматриваемой территории, по-видимому, не существует, бабочки в той или иной мере перемешиваются, формируя единую популяцию. Более высокая, чем у самок, фенотипическая изменчивость самцов – общебиологическое явление, имеющее генетическую природу. Наблюдаемое в 2004 году на участке С преобладание самцов морфы 23d, скорее всего, обусловлено случайными причинами, поскольку в тот сезон участки посещали менее регулярно, чем на следующий год, и собирали не более трети от числа замеченных бабочек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комбинации и выраженность элементов рисунка на крыльях глазка цветочного весьма изменчивы, но значимой пространственной дифференциации бабочек не выявлено. Отсутствие повторных отловов в эксперименте с мечением бабочек позволяет считать, что виду в местных условиях не свойственен оседлый образ жизни. Глазок цветочный, таким образом, не формирует стабильных внутрипопуляционных группировок, в местообитаниях происходит постоянная смена населения и бабочки, перемешиваясь, обеспечивают непрерывность популяции в пределах исследуемой территории.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор глубоко признателен выпускнице эколого-биологического факультета 2006 года И. В. Павлючене, активно участвовавшей в исследованиях по данной теме в студенческие годы.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемьева Е. А. Об изменчивости некоторых признаков крылового рисунка голубянки *Polyommatus icarus* (Lepidoptera, Lycaenidae) // Вестник зоологии. 1990. № 6. С. 70–76.
2. Горбач В. В. Сезонная динамика численности и половой состав популяции перламутровки *Boloria aquilonaris* (Lepidoptera, Nymphalidae) // Зоологический журнал. 1998. Т. 77. № 5. С. 576–581.
3. Горбач В. В., Кабанен Д. Н. Пространственная организованность популяции черного аполлона (*Parnassius mnemosyne*) в условиях Заонежья // Зоологический журнал. 2009. Т. 88. № 12. С. 1493–1505.
4. Горбач В. В., Сааринен К., Резниченко Е. С. К экологии тополевого ленточника *Limenitis populi* (Lepidoptera, Nymphalidae) Восточной Фенноскандии // Зоологический журнал. 2010. Т. 89.
5. Захарова Е. Ю., Кулакова О. И., Татаринов А. Г. Географическая изменчивость *Coenonympha tullia* (Müller, 1764) (Lepidoptera, Satyridae) // Евразиатский энтомологический журнал. 2006. Т. 5. № 2. С. 165–172.
6. Кулакова О. И., Татаринов А. Г. К познанию фенотипической изменчивости чернушки *Erebia rossii* (Curtis, 1834) (Lepidoptera, Satyridae) на Полярном Урале // Вестник Поморского университета. Сер. «Естественные и точные науки». 2005. № 2. С. 70–78.
7. Татаринов А. Г. Заметки об изменчивости и биологии тундровой бархатницы *Oeneis bore* (Schneider, 1792) (Lepidoptera: Satyridae) на Полярном Урале // Русский энтомологический журнал. 1998. Т. 7. № 1–2. С. 71–75.
8. Татаринов А. Г., Долгин М. М. К познанию внутривидовой изменчивости бархатницы *Erebia euryale* Esp. (Lepidoptera, Satyridae) на европейском Северо-Востоке России // Энтомологическое обозрение. 1999. Т. 88. Вып. 1. С. 155–162.
9. Хедрик Ф. Генетика популяций. М.: Техносфера, 2003. 592 с.
10. Шванвич Б. Н. Курс общей энтомологии. М.: Советская наука, 1949. 899 с.
11. Carroll S. B., Gates J., Keys D. N. et al. Pattern formation and eyespot determination in butterfly wings // Science. 1994. Vol. 265. P. 109–114.
12. Gorbach V. V., Saarinen K. The butterfly assemblages of Onega Lake Area in Karelia, middle taiga of NW Russia (Hesperioidea, Papilionoidea) // Nota lepid. 2003. Vol. 25. P. 267–279.
13. Hanski I., Kuussaari M. Butterfly metapopulation dynamics // Population dynamics: new approaches and synthesis. San Diego: Academic Press, 1995. P. 149–171.
14. Marttila O., Saarinen K., Aarnio H., Haahtela T., Ojalainen P. Päiväperhosopas. Suomi ja lähialueet. Helsinki: Tammi, 2000. 231 s.
15. Merit K. Les aberrations *d'Aphantopus hyperantus* L. (Lepidoptera, Nymphalidae, Satyrinae) // Alexanor. 1993. Vol. 8. P. 178–180.
16. Quivaon D. Satyrines a taches surnumeraires (Lepidoptera, Nymphalidae, Satyrinae) // Alexanor. 1993. Vol. 8. P. 180–182.

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ПЕТРОЗАВОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Сентябрь, № 6 **Биология** **2012**

УДК 598.2:591.53

ЕКАТЕРИНА ЛЕОНИДОВНА ТОЛМАЧЕВА
аспирант кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
tolmacheva-e@list.ru

ПИТАНИЕ СЕРЕБРИСТОЙ ЧАЙКИ (*LARUS ARGENTATUS* PONTOPP.) КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ*

На островах Кандалакшского залива Белого моря собрано 306 погадок серебристой чайки *Larus argentatus*. Разбор содержимого погадок показал, что основными объектами питания являются мидии, рыба и ягоды вороники. Высока встречаемость компонентов антропогенного происхождения.

Ключевые слова: серебристая чайка, Кандалакшский залив, погадка, корма

Серебристые чайки *Larus argentatus* как хорошо выраженные полифаги питаются самыми разнообразными кормами. На островах Кандалакшского залива Белого моря встречаются как колонии, так и одиночные пары чаек. Обычно для изучения питания требуется добыча птиц (исследование желудков, зоба или всего пищеварительного тракта). Но есть и прижизненные методы, из которых наиболее простой и безопасный для птиц – анализ погадок. Погадка – отрыгиваемый птицами округлый комок из непереваренных остатков костей, шерсти, перьев, хитина насекомых и т. п. Поскольку погадки включают твердые неперевариваемые компоненты, в них можно обнаружить и несъедобные для птиц предметы. Несовершенство метода заключается в занижении доли хорошо усвояемых, мягких, в том числе наиболее важных кормов (например, мелкая рыба). Тем не менее анализ погадок достаточно хорошо характеризует особенности кормовой базы и ее изменения. К тому же погадки неплохо сохраняются в природе и их легко собирать.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Сбор погадок *L. argentatus* осуществлялся на трех островах Кандалакшского залива (Малый, Красотка и Краюшка), которые находятся в непосредственной близости от городских поселений. Выбор островов был обусловлен наличием гнездящихся колоний серебристых чаек. Погадки собирались в местах гнездования и отдыха птиц в августе 2011 года. Всего было собрано 306 погадок серебристой чайки.

При разборе погадок визуально отмечались наличие и объем компонента (процент содержания одного компонента от всего объема погадки, где одна погадка – 100 %). В дальнейшем на основании первичных данных определялась встречаемость (количество погадок, содержащих данный объект питания), доля одного кормового объекта по отношению к общему количеству погадок и средний объемный процент содержания компонента во всех погадках.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Данные по встречаемости и содержанию компонентов в погадках, собранных на островах Кандалакшского залива в 2011 году, представлены в таблице.

Содержание различных объектов питания в погадках серебристой чайки (*L. argentatus*), n = 306

Название компонента	Встречаемость компонентов		Доля компонента, %	Среднее объемное содержание компонента, %
	Количество погадок	Содержание от общего числа погадок, %		
Полихеты	8	2,61	1,26	0,75
Мидии	128	41,83	20,13	22,52
Литорины	2	0,65	0,31	0,03
Ракообразные	2	0,65	0,31	0,11
Иглокожие	9	2,94	1,42	1,01
Насекомые	4	1,31	0,63	0,26
Рыба	85	27,78	13,36	17,05
Перо	29	9,48	4,56	0,84
Скорлупа и пленка яиц птиц	6	1,96	0,94	1,19
Птица	8	2,61	1,26	2,55
Грызуны и мелкие млекопитающие	9	2,94	1,42	2,88
Шерсть тюленя	4	1,31	0,63	0,67
Ягоды	96	31,37	15,09	15,90
Растения	69	22,55	10,85	3,42
Камни	5	1,63	0,79	0,38
Корма антропогенного происхождения	172	56,21	27,04	30,43

Примечание. Перо – собственное перо; птица – фрагменты или остатки разных видов птиц.

В собранных погадках максимальные показатели приходятся на следующие корма: мидии (*Mytilus edulis*), рыба (кости и отолиты *Gadus morhua marisalbi* и более мелкие неопределенные виды), ягоды (более 70 % – *Empetrum her-*

© Толмачева Е. Л., 2012

maphroditum), вегетативные части высших растений и талломы фукусов (в таблице отмечены как «растения»), а также корма антропогенного происхождения (пищевые отходы и материалы – полиэтилен, бумага и др.).

Реже в погадках встречались перья (вероятно, собственное перо, которое птица проглатывала когда чистилась), иглокожие (морские звезды *Asterias rubens*), насекомые (в основном представители семейства настоящих ос *Vespidae*), из полихеты отмечались только нереисы (*Nereis virens* определяли по найденным челюстям). Не так часто встречали яичную скорлупу и пленку, преимущественно утиных птиц (в основном гаги обыкновенной *Somateria mollissima*). Из всех погадок только три состояли полностью из скорлупы и пленки, во всех остальных находили только их фрагменты. Из птиц были отмечены 5 погадок с останками птенца *S. mollissima* и две с пухом утят, одна с останками дрозда (*Turdus sp.*).

В 2011 году отмечали высокую численность мелких млекопитающих (устное сообщение Н. С. Бойко), в том числе норвежских леммингов *Lemmus lemmus*, но частота их встреч в погадках не столь велика, как ожидалось. Из всех погадок, в которых отметили мелких млекопитающих, в 44 % были лемминги *L. lemmus*, по два раза встречались полевки (*Microtus sp.* и *M. oeconomus*) и погадки, состоящие из нескольких видов (красно-серая *Clethrionomys rufocanus* и рыжая полевки *Cl. glareolus*, а также бурозубка обыкновенная *Sorex araneus*), в одной отметили только обыкновенную бурозубку.

Самыми редкими компонентами питания стали ракообразные (фрагменты краба и балянусов) и литорины (*Littorina spp.*); небольших размеров камни встречались в 5 погадках.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение результатов изучения питания по составу погадок и по содержимому желудков показывает, что данные могут сильно отличаться. В погадках, как правило, мидии занимают относительно большее место, чем в желудках, а рыбные корма – наоборот. Объясняется это тем, что мелкую рыбу чайки переваривают почти полностью, следовательно, происходит занижение рыбных кормов [2], [5], [11]. Иногда в погадках встречались кости достаточно крупной рыбы – трески, в основном это череп и плавники, скорее всего, такая рыба была не поймана, а собрана на литорали как отход рыболовного промысла. По результатам нашей работы, заметно преобладание мидий над рыбными кормами, что соответствует данным копрологического анализа из того же района исследований [8]. Стоит отметить, что мидия (*M. edulis*) – как один из основных, массовых кормов серебристых чаек также является основным объектом питания у морских звезд *Asterias rubens*. На больших скоплениях мидий часто можно встретить как серебристых чаек, так и морских звезд, в связи с чем вероятность заглатывания звезд вместе с мидиями увеличивается, но из-за отсутствия крупных твердых элементов в экзоскелете морских звезд их встречаемость и доля в погадках несколько занижена [1], [12]. В конце июня – начале июля у поверхности воды появляются нереисы, в это время они в массе поедаются чайками [2]. Низкое содержание челюстей *Nereis virens* в погадках, вероятно, можно объяснить сроками сбора материала (начало августа).

Среди морских колониальных птиц только чайки используют растительные корма в питании, а сочные плоды являются немаловажным сезонным кормом в их диете. В период созревания (июль – август) они могут составлять до 50 % всего рациона серебристых чаек [2], [3]. Сведения о потреблении растительных кормов и сочных плодов некоторых видов кустарничков крупными чайками на островах Кольской Субарктики приводит И. П. Бреслина [7]. Их доля в спектре кормов, вероятнее всего, отражает как склонность чаек к питанию ягодами, так и их обилие в окрестностях гнездовой колонии. Потребление в больших количествах дикорастущих ягод, возможно, обусловлено высоким содержанием легкоусвояемых сахаров и витаминов, особенно витамина С [2], [6], [7]. Обычно погадка чаек состояла из ягод одного вида – шикши *Empetrum hermaphroditum*. Иногда отмечались комплексы из семян 2–3, реже 4–5 видов (*E. hermaphroditum*, *Rubus chamaemorus*, *Vaccinium myrtillus*, *V. uliginosum*, *V. vitis-idaea*). Вместе с ягодами птицы могут проглатывать различные части травянистых растений, а вместе с ними и насекомых. Таким же образом в пищевой рацион попадают фрагменты водорослей и литорины, которые поглощаются вместе с мидиями.

Несмотря на соседство в гнездовой период с другими видами морских птиц (утки, кулики), встречаемость остатков яиц и птенцов в погадках в нашем случае невелика, как и встречаемость мелких млекопитающих. Удельный вес этой группы кормов может колебаться в зависимости от наличия или отсутствия массовых объектов питания [5]. По всей видимости, здесь серебристым чайкам достаточно и других источников пищи, поэтому о роли хищничества или клептопаразитизма в кормодобывательных стратегиях чаек по нашим данным судить сложно. Наличие в погадках шерсти тюленя, несмотря на низкую встречаемость, может свидетельствовать о падальничестве птиц.

Высокое содержание кормов антропогенного происхождения в погадках отмечают на протяжении нескольких десятилетий [9], [10], [12], [13]. В районе исследования пищевые отбросы распределены неравномерно, основным источником питания такого типа можно считать

свалку вблизи города Кандалакши. На свалках птицы могут потреблять в пищу как высококалорийные, так и заглатываемые попутно, не несущие никакой энергетической ценности предметы (полиэтилен, фольга и др.), поэтому можно предположить использование последних в качестве балласта (плохо перевариваемые компоненты снижают скорость продвижения химуса, тем самым увеличивая извлекаемость питательных веществ) [8], [14].

Несмотря на занижение доли некоторых пищевых объектов *L. argentatus*, оценка питания по разбору погадок является достаточно информативным, быстрым и удобным методом для выявления массовых кормов в рационе птиц, а также кормов, носящих сезонный или случайный характер.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность за помощь в сборе материала и определении компонентов сотрудникам Кандалакшского государственного природного заповедника Е. В. Шутовой и Н. С. Бойко.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беэр Т. Л. Морские звезды и мидии на литорали Белого моря // Биология Белого моря: Труды ББС МГУ. М., 1980. С. 124–135.
2. Бианки В. В. Кулики, чайки и чистиковые Кандалакшского залива // Труды Кандалакшского государственного заповедника. Вып. VI. Мурманск: Мурманское книжное изд-во, 1967. 364 с.
3. Бианки В. В. Урожайность ягод водяники на островах Кандалакшского залива и потребление их животными // Продуктивность дикорастущих ягодников и их хозяйственное использование: Материалы к Всесоюзному научно-производственному совещанию. Киров, 1972. С. 207–209.
4. Бианки В. В., Карпович В. Н., Пилипас Н. И., Татаринкова И. П. О суточной потребности в пище некоторых морских птиц севера // Труды Кандалакшского государственного заповедника. Вып. IX. Мурманск: Мурманское книжное изд-во, 1975. С. 100–128.
5. Бойко Н. С., Коханов В. Д., Татаринкова И. П. О способах добывания корма большой морской и серебристой чайками на Мурмане и в Кандалакшском заливе // Труды Кандалакшского государственного заповедника. Вып. VIII. Мурманск: Мурманское книжное изд-во, 1970. С. 120–148.
6. Бреслина И. П. Растения и водоплавающие птицы морских островов Кольской Субарктики / Отв. ред. М. Л. Раменская. Л.: Наука, 1987. 200 с.
7. Вигоров Л. И. Дикорастущие ягоды и плоды как источник биологических активных веществ // Продуктивность дикорастущих ягодников и их хозяйственное использование: Материалы к Всесоюзному научно-производственному совещанию. Киров, 1972. С. 30–32.
8. Корбут В. В. Трофические стратегии птиц, связанных с морем: методология и методы изучения // Методы и теоретические аспекты исследования морских птиц: Материалы V Всероссийской школы по морской биологии. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2007. С. 69–82.
9. Краснов Ю. В. Состав пищи и особенности поведения чайковых птиц в условиях многолетнего дефицита рыбного корма // Экология птиц морских островов и побережий Кольского севера. Мурманск: Мурманское книжное изд-во, 1989. С. 11–26.
10. Краснов Ю. В., Матишов Г. Г., Галактионов К. В., Савинова Т. Н. Морские колониальные птицы Мурмана. СПб.: Наука, 1995. 224 с.
11. Малашичев Е. Б. Опыт анализа питания серебристой чайки Larus argentatus на островах Кандалакшского залива Белого моря по результатам разбора погадок // Русский орнитологический журнал. Экспресс-выпуск 26. 1997. С. 5–21.
12. Татаринкова И. П., Краснов Ю. В. Синантропные тенденции и современная роль чайковых птиц в заповедных орнитоценозах // Проблемы охраны природы в бассейне Белого моря. Мурманск, 1984. С. 28–29.
13. Татаринкова И. П. Зависимость временного баланса крупных чаек от состояния кормовой базы в период гнездования // Экология птиц морских островов и побережий Кольского севера. Мурманск: Мурманское книжное изд-во, 1989. С. 5–11.
14. Speakman J. R. Apparent absorbtion efficiencies for Redshank (Tringa tetanus) and Oystercatcher (Haematopus ostralegus): implication for the predictions of optimal foraging models // The American Naturalist. 1987. Vol. 130. № 5. P. 677–691.

Сентябрь, № 6 **Медицинские науки** **2012**

УДК 612.46

ЕЛЕНА ЮРЬЕВНА БАРСУКОВА
соискатель кафедры анатомии и физиологии человека, Карельская государственная педагогическая академия (Петрозаводск, Российская Федерация)
e_barsukova@mail.ru

АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ ГОРАНСКИЙ
доктор медицинских наук, профессор кафедры анатомии и физиологии человека, Карельская государственная педагогическая академия (Петрозаводск, Российская Федерация)
goranskaya@onego.ru

ИРИНА АНАТОЛЬЕВНА ВИНОГРАДОВА
доктор медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой фармакологии, организации и экономики фармации медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
iri89569627@yandex.ru

ОСМО- И ИОНОРЕГУЛИРУЮЩАЯ ФУНКЦИИ ПОЧЕК У МОЛОДЫХ КРЫС В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ*

Содержание молодых самцов крыс с месячного возраста в постоянном или естественном освещении Карелии («белые ночи») в течение 3 месяцев приводит к однонаправленным нарушениям функций почек. Изменение фотопериода в сторону увеличения световой фазы не оказывает прямого влияния на почки, но приводит к гипофункции эпифиза, что отражается на гормональной регуляции гипотоламо-гипофизарно-надпочечниковой системы и является причиной выявленных нарушений.

Ключевые слова: постоянное освещение, естественное освещение, осморегулирующая функция почек, ионорегулирующая функция почек, эпифиз

Для функциональной нефрологии важнейшее значение имеет оценка состояния клубочкового аппарата и почечных канальцев, их резервных возможностей. Большие успехи в изучении функции почек обусловлены применением разнообразных методов исследования, позволяющих охарактеризовать работу почки в целостном организме и оценить роль субклеточных структур и биохимических процессов в отдельных ее клетках. Исследование осмо- и ионорегулирующей функций является одним из наиболее важных критериев для суждения о сохранности почки как органа [5], [14]. Известно, что суточные и сезонные биоритмы участвуют в регуляции водно-солевого обмена [6], [15]. Вклад эпифиза в организацию суточных и сезонных колебаний физиологических функций организма животных и человека в настоящее время представляется очевидным и считается наиболее значимым физиологическим свойством шишковидной железы [3]. Экспериментальные подходы для изучения этого явления связаны с созданием эпифизарного дефицита за счет удаления эпифиза или с имитацией его гиперреактивности путем введения извне биологических активных соединений пинеальной железы, и прежде всего мелатонина [4].

В настоящей работе нарушение функционирования эпифиза было произведено за счет изменения продолжительности светового дня. Задача исследования – проследить изменение осмо- и ионорегулирующей функций почек у молодых крыс на фоне функционального гипопинеализма за счет нарушенного циркадианного ритма.

МЕТОДИКА

Эксперименты проведены на 150 крысах-самцах [18]. Животные рождены в условиях вивария ПетрГУ в конце апреля – начале мая. Все крысы получали стандартный лабораторный корм [17] и имели свободный доступ к воде. Крысы одномесячного возраста были рандомизированно разделены на 3 группы и в дальнейшем содержались при различных световых режимах. Первая группа находилась при постоянном искусственном освещении (750 лк; LL). Вторая группа – в условиях естественного освещения. В данном случае учитывались особенности светового режима Северо-Запада России («белые ночи» в весенне-летний период с постепенным уменьшением светового дня к сентябрю; NL). Освещенность в помещении менялась в течение суток (на уровне клеток в утренние часы – 50–200 лк, днем – до 1000 лк в ясный день и 500 лк в пасмурный день, к вечеру – от 150–500 лк). Третья группа содержалась при искусственно созданном стандартном фиксированном чередующемся режиме освещения (750 лк; 12 часов свет и 12 часов темнота, LD) и рассматривалась в качестве контроля. Работа выполнена с соблюдением международных принципов Хельсинкской декларации о гуманном отношении к животным.

Ежемесячно крыс взвешивали и помещали в обменные клетки для сбора суточной мочи

© Барсукова Е. Ю., Горанский А. И., Виноградова И. А., 2012

[5], [20]. Производили забор крови из хвостовой вены. В собранных пробах мочи и плазмы крови определяли содержание натрия и калия методом пламенной фотометрии [5], [11] на фотометре «Carl Zeiss Jena» (Германия). Осмотическое давление и осмолярную концентрацию определяли криоскопическим микрометодом по L. G. Wesson [21] по снижению точки замерзания раствора при помощи полупроводникового терморезистора МТ-54.

Цифровой материал подвергали статистической обработке методом вариационной статистики с использованием t-критерия Стьюдента [10]. На основании полученных данных по общепринятым методикам [13], [16] рассчитывали парциальные функции почек: диурез (V); содержание ионов натрия, калия, осмотически активных веществ в крови (P_{Na}, P_K, P_{OSM}) и в моче (U_{Na}, U_K, U_{OSM}); экскрецию ионов натрия, калия и осмотически активных веществ (E_{Na}, E_K, E_{OSM}); очищение ионов натрия, калия, осмотически активных веществ и воды (C_{Na}, C_K, C_{OSM}, C_{H2O}); натрий-калиевый коэффициент (Na/K_{pl}, Na/K_{ur}) в крови и моче и концентрационный индекс (U/P_{Na}, U/P_K, U/P_{OSM}). Параметры пересчитывали на 100 г массы тела животного.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Формирование осмо- и ионорегулирующей функций почек происходит на протяжении значительного периода постнатального онтогенеза [2]. У молодых крыс, в отличие от взрослых особей, наблюдаются физиологические особенности регуляции водно-солевого равновесия, почечной экскреции воды и солей, а также функции концентрирования мочи. Это связано с морфологической и функциональной незрелостью молодой почки [8]. Основными причинами неустойчивости регуляции гомеостаза в раннем возрасте являются главным образом незрелость осморегуляции, недостаточное развитие канальцевого аппарата почек и относительный гиперальдостеронизм. Низкая способность к концентрированию мочи на ранних этапах онтогенеза является также свидетельством низкой чувствительности почечных рецепторов к действию гормонов, таких как вазопрессин и др. [12], [14].

Интегральным показателем концентрационной функции почек является величина диуреза и осмотичность экскретируемой мочи. У крыс-самцов контрольной группы (LD) показатели диуреза на 100 г веса животных (V), экскреции осмотически свободной воды (C_{H2O}), концентрации осмотически активных веществ в плазме (P_{OSM}), очищения плазмы от осмотически активных веществ (C_{OSM}) и экскреции осмотически активных веществ (E_{OSM}) достоверно снижались от первого месяца к четвертому, что соответствует физиологическим нормам и указывает на завершение формирования осморегулирующей функции почек в постнатальном онтогенезе (табл. 1). Значения показателей осморегулирующей функции почек у одномесячных крыс указывают на функциональную незрелость осморецепторов или отдельных звеньев дуги осморегулирующего рефлекса и о физиологической неполноценности гипоталамо-гипофизарной системы [2], [9], [12].

Таблица 1

Возрастные изменения осморегулирующей функции почек крыс-самцов

Показатель	Возраст (месяцы)	Световой режимы		
		стандартное освещение (LD)	постоянное освещение (LL)	естественное освещение (NL-Spring)
Диурез (мкл/1'/100)	1	7,6 ± 0,57	4,2 ± 0,81^	7,4 ± 0,46
	4	3,1 ± 0,28*	2,5 ± 0,21*	2,3 ± 0,11*^
C_{H2O} (мкл/1'/100)	1	3,72 ± 0,48	2,1 ± 0,18^	1,15 ± 0,3^
	4	1,5 ± 0,11*	1,2 ± 0,14*	0,95 ± 0,4
P_{OSM} (мосм/л)	1	292,0 ± 1,1	294,0 ± 1,2	296,0 ± 1,8
	4	282,1 ± 2,1*	294,4 ± 1,9^	298,1 ± 2,1^
U_{OSM} (мосм/л)	1	149,0 ± 1,6	151,0 ± 2,1	152,0 ± 0,9
	4	146,1 ± 2,0	152,2 ± 3,2	148,3 ± 2,9
C_{OSM} (мкл/1'/100)	1	3,88 ± 0,52	2,1 ± 0,64	3,77 ± 0,91
	4	1,6 ± 0,07*	1,3 ± 0,08^	1,15 ± 0,06*^
E_{OSM} (мосм/1'/100)	1	1,13±0,07	0,63±0,09^	1,12±0,08
	4	0,45±0,07*	0,38 ± 0,06	0,34±0,11*
U/P_{OSM}	1	0,51±0,06	0,51±0,08	0,51±0,02
	4	0,52±0,01	0,51±0,02	0,49±0,08

Примечание. * – значения достоверны по сравнению с показателями первого месяца в том же режиме; ^– значения достоверны по сравнению с показателями в стандартном режиме освещения в том же месяце.

Процессы фильтрации в раннем возрасте доминируют над реабсорбцией, что и наблюдалось у крыс контрольной группы. Как видно из табл. 2, содержание Na^+ и K^+ в крови достоверно не изменялось от первого месяца к четвертому, но с возрастом по мере функционального становления клубочкового и канальцевого аппарата почки показатели натрий- и калийуретической функций почек (такие как содержание ионов калия в моче (U_K), минутная экскреция натрия и калия (E_{Na}, E_K), очищение плазмы от ионов натрия и калия (C_{Na}, C_K)) снижались к 4-месячному возрасту и соответствовали возрастным изменениям, происходящим при формировании почек в постнатальном онтогенезе [2], [12].

В одномесячном возрасте у самцов, переведенных в условия постоянного освещения (LL), по сравнению с контрольными значениями были достоверно снижены диурез (V), экскреция осмотически свободной воды (C_{H2O}), экскреция осмотически свободных веществ (E_{OSM}). Кроме этого наблюдалась тенденция к снижению очищения плазмы от осмотически активных веществ (C_{OSM}). Данные значения соответствовали аналогичным параметрам контрольных животных, но полученным уже в 4-месячном возрасте, что говорит либо о более быстром становлении системы регуляции экскреторной функции почек, либо о более быстром функциональном фор-

мировании почечного аппарата. В режиме LL от первого месяца к четвертому достоверно снижались только величина диуреза (V) и экскреция осмотически свободной воды (C_{H2O}), остальные показатели достоверно не отличались от значений, полученных у одномесячных животных. По сравнению со значениями у крыс группы LD в 4-месячном возрасте у самцов группы LL наблюдалось достоверное снижение осмотического клиренса (C_{OSM}) за счет повышения осмолярности крови (P_{OSM}) (табл. 1).

Таблица 2

Возрастные изменения ионорегулирующей функции почек крыс-самцов

Показатели	Возраст (месяцы)	Световой режим		
		стандартное освещение (LD)	постоянное освещение (LL)	естественное освещение (NL-Spring)
P_{Na} (мэкв/л/100)	1	122,9 ± 2,2	126,8 ± 2,3	121,0 ± 3,1
	4	121,1 ± 2,1	130,2 ± 2,6	131,5 ± 2,3*^
P_K (мэкв/л/100)	1	4,96 ± 0,41	5,30 ± 0,51	5,10 ± 0,32
	4	4,25 ± 0,32	5,25 ± 0,42	4,60 ± 0,21
U_{Na} (мэкв/л/100)	1	25,8 ± 1,4	28,6 ± 0,7	26,4 ± 0,5
	4	22,5 ± 0,8	28,7 ± 0,6^	28,5 ± 0,4^
U_K (мэкв/л/100)	1	13,3 ± 0,8	15,7 ± 0,7	14,6 ± 0,6
	4	10,7 ± 0,3*	13,5 ± 0,1*^	11,7 ± 0,7*
E_{Na} (мэкв/1'/100)	1	0,20 ± 0,01	0,12 ± 0,02^	0,19 ± 0,01
	4	0,07 ± 0,01*	0,07 ± 0,01	0,07 ± 0,01*
E_K (мэкв/1'/100)	1	0,170 ± 0,01	0,071 ± 0,03^	0,110 ± 0,02
	4	0,038 ± 0,02*	0,034 ± 0,01	0,027 ± 0,01*
C_{Na} (мкл/1'/100)	1	1,60 ± 0,03	0,92 ± 0,08^	1,63 ± 0,07
	4	0,58 ± 0,02*	0,55 ± 0,02*	0,51 ± 0,18*
C_K (мкл/1'/100)	1	20,4 ± 0,8	12,4 ± 0,2^	21,2 ± 0,3
	4	7,8 ± 0,9*	6,4 ± 1,1*	5,8 ± 0,9*
Na/Kpl	1	24,8 ± 2,1	24,0 ± 1,5	23,7 ± 1,7
	4	28,5 ± 1,6	24,8 ± 0,9	28,6 ± 1,8
Na/Kur	1	1,94 ± 0,03	1,82 ± 0,08	1,81 ± 0,06
	4	2,10 ± 0,08	2,13 ± 0,04*	2,44 ± 0,08*
U/P_{Na}	1	0,21 ± 0,01	0,22 ± 0,02	0,22 ± 0,01
	4	0,19 ± 0,04	0,22 ± 0,02	0,22 ± 0,01
U/P_K	1	2,68 ± 0,06	2,96 ± 0,08	2,86 ± 0,05
	4	2,52 ± 0,08	2,57 ± 0,06*	2,54 ± 0,04*

Примечание. * – значения достоверны по сравнению с показателями первого месяца в том же режиме; ^ – значения достоверны по сравнению с показателями в стандартном режиме освещения в том же месяце.

У одномесячных крыс, содержавшихся в условиях LL, по сравнению с аналогичными показателями ионного обмена у самцов группы LD уже в этом возрасте были достоверно ниже экскреция натрия и калия (E_{Na}, E_K) и очищение плазмы от натрия и калия (C_{Na}, C_K) (табл. 2). Можно думать, что обнаруженные изменения вызваны снижением скорости клубочковой фильтрации и уменьшением диуреза [2]. Изменения, возникшие в ионорегулирующей деятельности почек, указывают не только на более быстрое созревание почечного аппарата, о чем уже говорилось выше, но и на возникшие нарушения в регуляции ионного обмена [15].

При постоянном освещении к четвертому месяцу у крыс достоверно снижались содержание калия в моче (U_K), очищение плазмы от ионов натрия и калия (C_{Na}, C_K) и концентрационный индекс калия (U/P_K) с одновременным увеличением натрий-калиевого коэффициента мочи (Na/K_{ur}) (табл. 2). В отличие от натрия, калий не только реабсорбируется, но и секретируется в дистальном отделе нефрона [16]. Очищение от натрия и калия отражает участие почки в волюморегуляции и характеризует объем жидкости с концентрацией натрия или калия, равной его уровню в плазме крови, который экскретируется почкой в единицу времени [13]. По сравнению с показателями, определяемыми в режиме LD в возрасте 4 месяцев, у крыс этой группы было повышено содержание натрия и калия в моче (U_{Na}, U_K).

В условиях естественного освещения Карелии (апрель, продолжительность дня 16,4 ч.) у одномесячных крыс был достоверно снижен показатель экскреции осмотически свободной воды (C_{H2O}), остальные параметры находились на уровне показателей контрольной группы (табл. 1). В режимах NL и LL происходило снижение клиренса осмотически свободной воды, который является количественным критерием осмотической способности почек, что подтверждает канальцевое происхождение антидиуреза. Известно, что одной из особенностей онтогенетически незрелой почки млекопитающих является ее слабая эффективность при необходимости экономить осмотически свободную воду [8], [14]. К четвертому месяцу (июль, «белые ночи», продолжительность светового дня 24 ч.) показатели осморегулирующей функции почек, такие как диурез (V), очищение плазмы от осмотически активных веществ (C_{OSM}) и экскреция осмотически активных веществ (E_{OSM}), снижались по сравнению с параметрами в одномесячном возрасте. По сравнению с контрольными показателями в режиме LD в 4 месяца у крыс группы NL-Spring значения диуреза (V) и осмотического клиренса (C_{OSM}) были достоверно ниже, а экскреция осмотически свободной воды имела тенденцию к снижению (табл. 1).

У самцов в условиях NL в возрасте одного месяца ионорегулирующая функция почек соответствовала таковой в контрольной группе животных. К третьему месяцу содержания в условиях постоянно увеличивающейся продолжительности светового дня (от 16,4 ч. в апреле до 24 ч. к концу мая и далее до конца июля) показатели натрийуретической и калийуретической функций почек соответствовали таковым в условиях постоянного освещения (табл. 2). Таким образом, возрастная динамика изменений ионорегулирующей функции у крыс под воздействием своеобразного весенне-летнего фотопериодизма Карелии подобна изменениям, возникающим под влиянием круглосуточного освещения, од-

нако возрастные изменения появляются позже и медленнее.

Отличительной чертой биохимических и гематологических показателей крыс этой линии является их относительная стабильность в возрастном аспекте [1]. Полученные нами данные указывают на то, что при длительном гипопинеализме, индуцированном содержанием молодых крыс в условиях круглосуточного освещения или «белых ночей», развиваются изменения функций почек, которые можно расценивать как ускоренное созревание почечного аппарата с одновременным нарушением водно-солевого равновесия. На сегодняшний день недостаточно освещены данные о значении пинеальной железы в хроноорганизации ренальных функций [6]. Известны различные биологические ритмы функции почек, основными и наиболее изученными являются циркадианные. Хорошо известно о превышении дневного диуреза над ночным. В ритмике диуреза наибольшие значения приходятся на 16–21 ч. у здоровых людей. Акрофазу выделения натрия и калия относят к дневным часам, по разным данным, от 6–8 до 16–23 ч. [14]. Функция мочевыделительной системы зависит не только от суточных, но и от сезонных колебаний освещенности. Так, состояние концентрационной деятельности почек обеспечивается процессами клубочковой фильтрации и канальцевой реабсорбции, которые контролируются гемодинамическими и гормональными факторами. Ведущим гормональным регулятором концентрирующего транспорта воды является антидиуретический гормон [13]. При введении экстракта эпифиза собакам или крысам наблюдалось резкое нарастание диуреза [15], обусловленного возрастанием скорости клубочковой фильтрации и снижением канальцевой реабсорбции воды. После пинеалэктомии регистрировалось повышение секреторной активности ядер гипоталамуса и усиление синтеза вазопрессина, изменение суточных ритмов секреции вазопрессина в нейрогипофизе и задержка воды в организме, особенно при функциональной нагрузке [4]. Эти данные согласуются с нашими исследованиями, поскольку в LL- и в NL-режимах показатели осморегулирующей функции были снижены по сравнению с контрольными цифрами. Скорее всего, подобные изменения являются результатом ингибирования функции эпифиза, выполняющего охранное значение в ювенильный период, и снижения им выработки мелатонина при отсутствии темновой фазы суток [8], [19].

Ведущим фактором, определяющим реабсорбцию натрия в нефроне, является альдостерон. Концентрация натрия в плазме крови и моче отражает уровень циркулирующего альдостерона. У человека следствием эпифизэктомии является нарушение циркадианных ритмов водно-солевого обмена и артериального давления [3]. Изучение механизмов регуляции секреции альдостерона в эксперименте показало, что на секрецию этого гормона влияет шишковидная железа [15]. Введение животным экзогенного мелатонина приводило к повышению экскреции натрия, нарушению канальцевого транспорта этого иона, угнетению реабсорбции в проксимальном и дистальном канальце нефрона [7]. Таким образом, мелатонин участвует в регуляции обмена калия и натрия через минералокортикоидную функцию надпочечников [15]. Нельзя исключить и непосредственное влияние мелатонина на функции почек, так как при всех формах нефрита наблюдается положительная корреляционная связь между экскрецией мелатонина и реабсорбцией, а при затихании процесса обнаруживалась обратная сопряженность этих показателей [7].

Результаты нашего исследования подтверждают ускоренное созревание почечного аппарата с нарушением осмо- и ионорегулирующей функций почек под влиянием постоянного освещения и своеобразного фотопериодизма Северо-Запада России с удлиненным световым днем в весенне-летний период. «Белые ночи» с отсутствием полноценной темновой фазы вызывают гипофункцию эпифиза и как следствие – подавляют выработку мелатонина, способствуя развитию описанных выше изменений функций почек. Вероятнее всего, прямого влияния на почки нарушения светового режима не оказывают, но изменение нормального фотопериода в сторону увеличения световой фазы является стрессовым воздействием на организм, которое отражается на гормональной регуляции гипотоламо-гипофизарно-надпочечниковой системы, что, в свою очередь, приводит к изменению ионо- и осморегулирующей функций [6], [9].

Подводя итоги проведенных экспериментов, можно сказать, что существующие сдвиги в выработке гормонов, оказывающих влияние на выведение и распределение электролитов в организме, могут быть одной из причин описанных изменений функций почек.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг. и гранта РГНФ № 12-06-00340

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрашева Т. В., Соколова А. П., Селезнева А. И. и др. Вариабельность биохимических и гематологических показателей у лабораторных крыс в зависимости от линии и возраста // Международный вестник ветеринарии. 2010. № 2. С. 55–60.
2. Айзман Р. И., Антоненко Н. П. Формирование механизмов регуляции водно-солевого обмена в онтогенезе // Формирование механизмов регуляции водно-солевого обмена в процессе онтогенеза. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ГПИ, 1979. С. 57–75.

3. Анисимов В. Н. Молекулярные и физиологические механизмы старения: В 2 т. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Наука, 2008. Т. 1. С. 313–364.
4. Арушанян Э. Б. Хронофармакология. Ставрополь: Изд-во СГМА, 2000. С. 47–152.
5. Брюханов В. М., Зверев Я. Ф., Лампатов В. В., Жариков А. Ю. Методические подходы к изучению функции почек в эксперименте на животных // Нефрология. 2009. Т. 13. № 3. С. 52–62.
6. Брюханов В. М., Зверева А. Я. Роль почки в регуляции суточных ритмов организма // Нефрология. 2010. Т. 10. № 3. С. 17–31.
7. Высоцкая В. Г., Пишак В. П., Черновская Н. В. Действие вита-мелатонина на хроноритмы ионорегулирующей функции почек при действии ксенобиотиков // Материалы 53-й ежегодной науч.-практ. конф. с международным участием «Украинская школа эндокринологии». Харьков, 2009. С. 168–169.
8. Горанский А. И., Барсукова Е. Ю. Влияние световых режимов на осмо- и ионорегулирующую функции почек у молодых крыс // Медицинский академический журнал. 2005. Т. 5. Прилож. 7. № 3. С. 20–22.
9. Зверев Я. Р., Брюханов В. М. Влияние циркадных ритмов на выраженность диуретического эффекта фуросемида у крыс // Нефрология. 2006. Т. 10. № 2. С. 77–80.
10. Ивантер Э. В., Коросов А. В. Введение в количественную биологию. Петрозаводск, Изд-во ПетрГУ, 2003. 304 с.
11. Колб В. Г., Камышников В. С. Справочник по клинической химии. Минск: Беларусь, 1982. 360 с.
12. Курдубан Л. И., Финкинштейн Я. Д. Механизмы нарушений онтогенезе // Онтогенез почки. Новосибирск, 1984.
13. Наточин Ю. В. Физиология почки: формулы и расчеты. Л.: Наука, 1976. 268 с.
14. Рябов С. И., Наточин Ю. В. Функциональная нефрология. СПб.: Лань, 1997. 307 с.
15. Слепушкин В. Д., Золоев Г. К. Механизмы нарушений водно-электролитного обмена и их коррекция при неотложных состояниях. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1986. 175 с.
16. Шюк О. Функциональное исследование почек. Прага: Авиценум, 1975. 333 с.
17. Anisimov V. N., Khavinson V. Kh., Popovich I. G. et al. Inhibitory effect of the peptide epitalon on the development of spontaneous mammory tumors in HER-2/neu transgenic mice // Int. J. Cancer. 2002. Vol. 101. № 1. P. 7–10.
18. Anisimov V. N., Pliss G. B., Iogannsen N. G. et al. Spontaneous tumors in outbred LIO rats // J. Exp. Clin. Cancer Res. 1989. Vol. 8. № 4. P. 254–262.
19. Vinogradova I. A., Anisimov V. N., Bukalev A. V. et al. Circadian disruption induced by light-at-night accelerates aging and promotes tumorigenesis in rats // Aging. 2009. Vol. 1. № 10. P. 855–865.
20. Vadiei K., Berens K. L., Luke D. R. Isolation induced renal functional changes in rats from for breeders // Lab. Anem. Sci. 1990. Vol. 40. № 1. P. 56–59.
21. Wesson L. G. Physiology of the human kidney. N. Y.: Grune and Stratton, 1969. 712 p.

Сентябрь, № 6 **Медицинские науки** **2012**

УДК 61

ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ ВАПИРОВ
доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой общей химии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
vapirov@petrsu.ru

МАРИНА ЭДУАРДОВНА ШУБИНА
кандидат медицинских наук, доцент кафедры пропедевтики внутренних болезней медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
shubina@petrsu.ru

ИГОРЬ ВЛАДИМИРОВИЧ ШУБИН
врач-эпидемиолог, Республиканская больница им. В. А. Баранова (Петрозаводск, Российская Федерация)
shubina@petrsu.ru

АНИ АРЦРУНОВНА ВЕНСКОВИЧ
аспирант кафедры общей химии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
ajdanna@yandex.ru

СЕЛЕН: АКТУАЛЬНЫЕ МЕДИЦИНСКИЕ, ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ*

Обобщены актуальные вопросы экологии, связанные с содержанием селена в ландшафтах Карелии. Рассмотрен вопрос селенового статуса населения и актуальность изучения роли селена в развитии эндемического зоба в условиях Карелии. Обозначены основные направления исследований по селеновой тематике в регионе.

Ключевые слова: селен, экология, патология, эндемический зоб, гормоны щитовидной железы.

Селен является эссенциальным элементом, биологическая роль которого широко исследуется и представлена в ряде оригинальных публикаций и обзоров. Не останавливаясь на биологической роли селена, отметим лишь наиболее полные обзоры последних лет [1], [2], [3], [4], [8], [13]. Целью настоящей работы является анализ актуальных проблем по изучению селеновой тематики в Карелии в связи с рядом природно-климатических, социально экономических и других особенностей данного региона.

Среди многих направлений данной проблемы наибольший интерес вызывают исследования патологических процессов, связанных с дефицитом или избытком селена в организмах животных и человека, а также коррекция патологических состояний с участием этого ультрамикроэлемента. В этой связи обоснованны исследования по содержанию селена в природных объектах как промежуточных звеньях в цепи его поступления в организмы животных и человека.

СЕЛЕН В ЛАНДШАФТАХ КАРЕЛИИ

Северо-Западный регион России, в том числе территорию Карелии, относят к селенодефицитным районам [10], [8]. Карелия расположена на платформе Балтийского щита, который в основном характеризуется низким содержанием селена в почве [16]. Наиболее полно в регионе Карелии исследовано содержание селена в почвах. Эти основополагающие работы выполнены Е. А. Чаженгиной [12]. В ряде публикаций отмечается, что даже в почвах одного генетического типа наблюдаются широкие колебания в концентрации этого элемента, что весьма затрудняет интерпретацию полученных данных, но в то же время прослеживается и ряд закономерностей. Среднее содержание селена в большинстве типов почв региона колеблется от 0,12 до 0,3 мг/кг, при этом наименьшее содержание обнаруживается в илювиально-железисто-гумусовых подзолах на песках, железистых подзолах на песках, супесчаной морене и в верховых болотно-торфяных почвах. Указанные типы почв охватывают большую часть территории Карелии, а большинство районов северо-западной части региона могут быть отнесены к территориям с низким или аномально низким содержанием селена в почвах. В то же время обращает на себя внимание содержание селена в дерновых шунгитовых почвах Заонежья, среднее значение которого составляет 1 мг/кг. При этом проведенный анализ профиля почв показывает увеличение содержания селена в нижних горизонтах, что наиболее вероятно связано с аномально высоким содержанием этого элемента в шунгитовых породах. В Заонежье находится единственное в мире месторождение шунгита, что может привлечь особое внимание к изучению селенового статуса природных объектов данной территории. Эти исследования

© Вапиров В. В., Шубина М. Э., Шубин И. В., Венскович А. А., 2012

приобретают особую значимость и в связи с разработками месторождений, которые ведутся на территории данного района.

Не менее важным является вопрос изучения содержания селена в водоемах, в питьевой воде, откуда, по данным [8], в организм поступает до 10 % этого элемента. Токсичность соединений селена ограничивает его предельно допустимую концентрацию в питьевой воде, которая составляет 10 мкг/л [6]. Для минеральных питьевых, лечебных и лечебно-столовых вод это значение равно 50 мкг/л [7].

Медианное содержание селена в воде Мирового океана составляет 0,2 мкг/л [14], в пресных и морских водах содержание селена находится в широких колебаниях от 10^{-4}–10^{-3} мг/л и 10^{-7}–10^{-4} мг/л соответственно [8]. Несмотря на очевидную важность, этот вопрос в Карелии остается практически неизученным. При этом отсутствуют данные о количественном содержании элемента как в наземных, так и в подземных водных источниках. Не ведется мониторинг селена в водных экосистемах региона. При изучении данного вопроса следует учесть, что степень обогащения воды селеном определяется значениями pH, а также окислительно-восстановительных потенциалов среды.

СЕЛЕН В ПРОДУКТАХ ПИТАНИЯ

Основным источником селена для человека являются продукты растительного и животного происхождения. Содержание микроэлемента в растительной пище, как правило, ниже, чем в продуктах животного происхождения. Так, например, содержание селена в мясных продуктах в России составляет от 60–400 мкг/кг сырой массы, а в морепродуктах – от 300–600 мкг/кг сырой массы [11]. Из растительных источников наиболее высокое содержание элемента встречается в кокосах, чесноке, грибах, зерновых, выращенных на обогащенных селеном почвах. Следует учесть, что концентрация в растениях и накопление элемента определяются его содержанием в почвах, а также его биодоступностью. К сожалению, в литературе отсутствуют данные по содержанию селена в основных продуктах питания населения Карелии. Следует учесть, что в настоящее время подавляющее большинство необходимых продуктов питания импортируются в республику из других регионов. В этой связи представляется целесообразным изучение содержания селена во ввозимых продуктах. Так, например, содержание селена в муке, используемой в России, варьирует от 46 до 577 мкг/кг, а в странах СНГ – от 6 до 87 мкг/кг. В пшеничной и ржаной муке из ряда областей Российской Федерации (Калининградская, Новгородская, Псковская, Ленинградская области, Алтайский край), а также из Белоруссии и стран Балтии содержание селена очень низкое и составляет для пшеничной и ржаной муки соответственно 34–60 и 5–20 мкг/кг. Эти данные должны учитываться при ввозе соответствующего продукта в регион.

Не менее актуальным представляется исследование содержания селена в традиционных продуктах питания коренного населения, в первую очередь ягодных культур лесных биоценозов и грибов как накопителей селена. По данным некоторых авторов, последние в зависимости от региона произрастания накапливают до 4000 мкг/кг и более сухой массы биоэлемента. Особый интерес представляют количественные характеристики содержания селена в культурных растениях, кормах сельскохозяйственных животных, а также в некоторых видах лекарственных растений, произрастающих на территории региона. Также необходимо выявление форм селена в пищевом рационе человека.

В последнее время получил распространение метод добавления пищевых селеновых добавок в рацион птиц, обеспечивающий накопление этого элемента в мясе и яйцах кур. К сожалению, в аннотациях такой продукции не указывается концентрация селена.

СЕЛЕНОВЫЙ СТАТУС НАСЕЛЕНИЯ РЕГИОНА

Согласно литературным данным, содержание селена в организме взрослого человека в норме составляет 15–20 мг. Следует учитывать, что для организмов животных и человека в равной степени опасны как недостаток, так и избыток этого элемента. Известно, что при гипоселенозе, сопровождающемся снижением активности глутатионпероксидазы (ГПО) и активацией пероксидного окисления липидов, развивается синдром окислительного стресса [1]. Это проявляется в повышении текучести липидов биологических мембран, снижении активности сукцинатдегидрогеназы, цитохромоксидазы митохондрий, возникают изменения в кишечнике, печени, сердце и т. д. Патологический процесс, связанный с недостатком селена, не ограничивается указанными изменениями, он достаточно многогранен и до конца не изучен. В регионах с глубоким селенодефицитом при наличии других факторов наблюдаются такие заболевания, как болезнь Кешана и Кашина – Бека. Наряду с этим селен относится к высокоопасным элементам, а многие его соединения отнесены к 1-му классу опасности. Избыточные количества селена, поступающие в организм по пищевой цепи или при техногенном загрязнении, оказывают токсическое действие на животных и человека, вызывая гиперселенозы.

Обеспеченность населения селеном может быть оценена по его содержанию в цельной крови, сыворотке, плазме, моче, волосах и ногтях. Разные авторы приводят несколько отличные данные, однако некоторые средние значения этих показателей могут быть выбраны в каче-

стве референсных. Так, по данным [8], содержание селена в крови составляет 70–200 мкг/л, в сыворотке – 60–150 мкг/л, в моче – 30–120 мкг/сут., в волосах и ногтях – 0,8–3 и 1,0–5,0 мкг/г соответственно. В то же время отмечается, что содержание селена в плазме колеблется изо дня в день, а в эритроцитах эти данные более стабильны; содержание же в ногтях, волосах и моче менее информативно [15], [19].

Следует отметить, что, несмотря на важность определения селенового статуса населения по различным референсным показателям, к сожалению, этот вопрос в регионе Карелии практически не изучен. Имеются лишь единичные данные, относящиеся к 1997 году [5], основанные на определении селена в крови 118 жителей различных районов республики. Возраст доноров колебался в пределах 19–50 лет, а установленный средний показатель селена в крови по региону составил 90,0 ± 10,0 мкг/л. Безусловно, представленные данные не могут отражать ситуацию по селеновому статусу населения региона в целом. Представляется целесообразным детальное изучение этого вопроса за счет расширения числа доноров из различных регионов республики, а также учета различных социально-экономических условий обследуемых групп населения. Важность решения данного вопроса определяется тем, что содержание селена в биологических субстратах зависит как от экономического развития региона, так и от образа жизни людей [8]. Однако уже предварительные данные свидетельствуют о том, что по сравнению с Мурманской и Вологодской областями в Карелии отмечается статистически достоверное снижение обеспеченности населения селеном. Отметим, что данные по селеновому статусу населения крайне необходимы не только для определения продовольственной политики в регионе, но и для решения вопросов необходимой коррекции по данному биогенному элементу.

СЕЛЕН И ПАТОЛОГИЯ

Одной из геохимических особенностей почв Северо-Запада России, включая территорию Карелии, является недостаток не только селена, но и йода. В [17] указывается, что селенодефицит часто сопровождается йододефицитом как результат особенностей геохимии почв. Территорию Карелии традиционно и обоснованно относят к йододефицитным регионам, что обусловливает высокую заболеваемость эндемическим зобом. При коррекции селенодефицита без коррекции йододефицита возможно усиление метаболизма тиреоидных гормонов, которое приводит к падению тиреоидной функции щитовидной железы [8].

В этой связи в рассматриваемом регионе следует учесть взаимосвязь селена и йода в этиологии эндемического зоба. В настоящее время известны ферменты – дейодиназы, в состав которых входит селеноцистеин. Активность этих ферментов зависит в первую очередь от поступления в организм как йода, так и селена. Основная роль дейодиназ может быть сведена к конверсии тиронина в тироксин.

По данным различных авторов, в условиях эутиреоза от 20 до 60 % трийодтиронина секретируется щитовидной железой, а оставшаяся часть образуется путем дейодирования в других органах с участием этого фермента.

Следует учитывать три типа дейодиназ (Д1, Д2, Д3), которые отличаются как по молекулярной массе, периоду полураспада, так и по тканям-мишеням. Что касается щитовидной железы, то в ней локализованы дейодиназы всех типов. Вместе с тем каждый тип дейодиназ имеет преимущественные ткани-мишени. Являясь компонентом дейодиназ, селен принимает непосредственное участие в конверсии тироксина (Т4) в трийодтиронин (Т3), осуществляя дейодирование Т4. Периоды полураспада дейодиназ неодинаковы и составляют для Д2 и Д3 менее 1 часа, а для Д1 более 8 часов, что свидетельствует о более важной роли Д2 и Д3 в регуляции метаболизма тиреоидных гормонов [18]. В пользу участия селена в метаболизме тиреоидных гормонов свидетельствуют и данные о снижении примерно в 8 раз активности селен-дейодиназы при недостатке селена и как следствие – увеличение в крови и органах тироксина.

Таким образом, при коррекции йододефицитных состояний следует особое внимание уделить и коррекции селендефицитного состояния. Учет этих двух факторов с клинических позиций в Карелии очень затруднен вследствие отсутствия данных по селеновому статусу жителей региона.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникина Л. В., Никитина Л. П. Селен. Экология, патология, коррекция. Чита, 2002. 400 с.
2. Барабой В. А., Шестакова Е. Н. Селен: биологическая роль и антиоксидантная активность // Укр. біохім. журн. 2004. Т. 76. № 1. С. 23–32.
3. Вапиров В. В., Шубина М. Э., Вапирова Н. В., Беличенко В. И., Шубин И. В. Селен. Некоторые аспекты химии, экологии и участия в развитии патологии. Рукопись депонирована в ВИНИТИ (ГЦМНБ). № Д-26993.04.03.2002. 74 с.
4. Галочкин В. А., Галочкина В. П. Органические и минеральные формы селена, их метаболизм, биологическая доступность и роль в организме // Сельскохозяйственная биология. 2011. № 4. С. 3–15.
5. Голубкина Н. А., Соколов Я. А. Уровень обеспеченности селеном жителей северного экономического района России // Гигиена и санитария. 1997. № 3. С. 22–24.

6. ГОСТ № 2874-82 Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1997. 6 с.
7. ГОСТ 13273-88. Воды минеральные питьевые лечебные и лечебно-столовые. Технические условия. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. 43 с.
8. Решетник Л. А., Парфенова Е. О. Биогеохимическое и клиническое значение селена для здоровья человека // Микроэлементы в медицине. 2001. Т. 2. Вып. 2. С. 2–8.
9. Скальный А. В. Химические элементы в физиологии и экологии человека. М.: Издательский дом «ОНИКС 21 век»: Мир, 2004. 216 с.
10. Скальный А. В., Рудаков И. А. Биоэлементы в медицине. М.: Издательский дом «ОНИКС 21 век»: Мир, 2004. 272 с.
11. Тутельян В. А., Мазо В. К., Ширина Л. И. Значение селена в полноценном питании человека // Гинекология. 2002. Т. 4. № 2. С. 67–71.
12. Чаженгина Е. А. Распределение селена в ландшафтно-геохимических условиях Карелии: Дис. ... канд. геогр. наук. Петрозаводск, 1989. 117 с.
13. Шабалина Е. А., Моргунова Т. Б., Орлова С. В., Фадеев В. В. Селен и щитовидная железа // Клиническая и экспериментальная тиреоидология. 2010. Т. 7. № 2. С. 7–18.
14. Reimann C., Ayras M., Chekushin V. et al. Environmental Geochemical Atlas of the Central Barents Region. NGU – GTK – CKE Special Publication. Trondheim: Geological Survey of Norway, 1998. 745 p.
15. Hunter D. J., Morris J. S., Chute C. G. et al. Predictors of selenium concentration in human toenails // Amer. J. Epidemiol. 1990. Vol. 132. P. 114–122.
16. Koljonen T. The behavior of selenium in Finnish soils // Ann. Agris. Fenn. 1975. Vol. 14. P. 240–247.
17. Sanz Alaejos M., Diaz R. Selenium in human lactation // Nutr. Rev. 1995. Vol. 53. № 6. P. 159–166.
18. Van der Geyten S., Segers I., Gereben B., Bartha T., Rudas P., Larsen P. R. et al. Transcriptional regulation of iodothyronine deiodinases during embryonic development // Mol. Cell. Endocrinol. 2001. № 183(1–2). P. 1–9.
19. Willett W. C., Stampfer M. J. Selenium and human cancer // Acta Pharmacol. Toxicol. 1986. Vol. 59 (Suppl. 7). P. 240–247.

Сентябрь, № 6 **Медицинские науки** **2012**

УДК 616-001

АЛЕКСЕЙ ЮРЬЕВИЧ ВЕРХОВОД
аспирант кафедры общей и факультетской хирургии, курса травматологии, ортопедии и военно-полевой хирургии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
verhovod3000@mail.ru

МОЭЗ ФАУЗИ БАРАКАТ
кандидат медицинских наук, главный врач, Центр костно-суставной патологии (Петрозаводск, Российская Федерация)
barakat18@hotmail.com

РУДОЛЬФ ИОНТЕЛЕВИЧ МЕЛЬЦЕР
доктор медицинских наук, профессор кафедры общей и факультетской хирургии, заведующий курсом травматологии, ортопедии и военно-полевой хирургии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
surgery@karelia.ru

ИЛЬЯ ПЕТРОВИЧ ЛОЗОВИК
врач-травматолог-ортопед, Республиканская больница им. В. А. Баранова (Петрозаводск, Российская Федерация)
ilyalozovik@me.com

СОВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОБ ОПЕРАТИВНОМ ЛЕЧЕНИИ ПЕРЕЛОМОВ ГРУППЫ С У БОЛЬНЫХ С ПОЛИТРАВМОЙ*

Проанализированы результаты лечения группы из 28 пострадавших с переломами группы С по классификации AO/ASIF, входивших в клинический комплекс множественных и сочетанных повреждений, для уточнения адекватности современных изменений взглядов на характер, сроки, объем и возможную этапность оперативных вмешательств.

Ключевые слова: политравма, переломы группы С, переломы голени

Очевидной особенностью начала третьего тысячелетия является заметное ускорение темпа жизни. Меняющая облик мира урбанизация с нарастающей этажностью застройки и соответствующим увеличением скорости свободных полетов при кататравме, а также современный технопарк с его стремительным движением решительно меняют механогенез травм опорно-двигательного аппарата. Это сопровождается увеличением числа множественных и сочетанных повреждений, а также изменением характера типичных травм с тяготением к наиболее тяжелым и сложным для лечения переломам группы С по классификации AO/ASIF. Подобная динамика требует адекватной корректировки бытующих представлений о характере, оптимальных сроках и допустимых объемах вмешательств при оперативном лечении сегментарных и многооскольчатых переломов длинных трубчатых костей (ПДТК), составляющих основное ядро группы С.

Анализ хронологической и смысловой последовательности этапов развития взглядов на лечение сложных ПДТК, а также их оценка должны и могут производиться, во-первых, только в неразрывной связи со всем научным контекстом и потенциалом соответствующего периода времени, во-вторых, в зависимости от влияния тех или иных предложений на последующее развитие решений данной проблемы. Это позволяет проследить закономерности развития от основополагающих до современных научно-практических разработок и сделать попытку прогнозирования хотя бы ближайших перспектив в лечении переломов ДТК группы С.

С методологической точки зрения необходимо более четкое определение классификационных границ самого понятия сложных форм переломов и включение в их состав сегментарных и многооскольчатых переломов ДТК. Это же диктует и необходимость конкретного ответа на запросы клинической практики, касающиеся выбора оптимальных решений, вопросов времени, объема и варианта операций, правильный выбор которых совершенно необходим для достижения положительного результата при тяжелой травме конечностей. Одним из сложных и спорных вопросов, которые, вероятно, еще будут оставаться предметом постоянных дискуссий и в обозримом будущем, является определение стратегии и тактики лечения пострадавших со сложными формами переломов, когда они входят в состав комплекса множественных и сочетанных повреждений. Сюда относится, в частности, принятие решения о том, следует ли дожидаться в условиях подобной политравмы окончательной

© Верховод А. Ю., Баракат М. Ф., Мельцер Р. И., Лозовик И. П., 2012

стабилизации состояния больного для выполнения сложных восстановительных операций на органах опоры и движения или надо как-то иначе подходить к определению наиболее благоприятного для этого срока, рационально увязывая его с адекватными обстоятельствам колебаниями объема оперативного вмешательства. А проблема такой флюктуации должна быть неразрывно связана с пересмотром взгляда на оперативное вмешательство как на окончательный и завершенный акт. Подобные вопросы, учитывая их неоднозначность, по всей видимости, следует отнести к философии остеосинтеза, к разряду фундаментальных, так как их решение требует очень внимательного и строгого отношения к критериям [1].

Существуют многочисленные оценочные шкалы для определения тяжести состояния больных с политравмой, претерпевшие за последние десятилетия немало модификаций. Наиболее современными из них считаются:

1. Шкала оценки тяжести повреждения (Abbreviated Injury Scale – AIS), многократно измененная, а в 1990 году получившая название AIS-90.

2. Шкала тяжести повреждений (Injury Severity Score – ISS).

3. Шкала Glasgow Coma Scale (GCS) для определения глубины комы у пациентов с черепно-мозговой травмой.

Данные шкалы используются в едином комплексе при оценке тяжести общих реакций исследуемых больных на полученную травму.

Необходимость и возможность уточнения некоторых тактических постулатов была подсказана практикой лечения множественных и сочетанных травм, которая показала, что подход к формированию алгоритма лечения в группе С даже в условиях такого жизнеугрожающего осложнения, как шок, может и должен быть дифференцированным. Указанные моменты приобретают особое значение, учитывая тот факт, что отсрочка необходимого при таких переломах оперативного пособия всегда увеличивает угрозу развития последующих ишемических и инфекционных осложнений, а в некоторых случаях она просто невозможна, так как это угрожает жизни больного.

Вопрос о рациональной корректировке сроков оперативного вмешательства при переломах группы С не может рассматриваться без учета необходимости синхронного определения допустимого объема пособия в конкретных обстоятельствах.

Достаточно характерные общие и местные изменения в состоянии пациентов при сложных повреждениях ДТК, входящих в комплекс политравмы, заставили задуматься о том, всегда ли надо стремиться к одноэтапному, исчерпывающему варианту операции или следует в определенных случаях вынужденно выполнять в условиях еще недостаточной стабильности общего состояния только те оперативные действия, которые диктуются требованиями остановки кровотечения, восстановления магистрального кровотока, хотя бы по временной схеме и временной жесткой стабилизации сегмента в положении, предупреждающем возможные вторичные повреждения мягкотканного футляра отломками и осколками костей или их компрессионное воздействие на сосудистые и нервные магистрали. Введению I этапа оперативного вмешательства – хирургической иммобилизации перелома аппаратом внешней фиксации (АВФ), которая сначала выполнялась в порядке исключения, а в последние годы становится правилом, во многом способствовали стремительно меняющиеся возможности службы ИТАР и совершенствование метода внеочагового остеосинтеза.

Трудно не согласиться с теми авторами, которые утверждают, что в настоящее время еще не существует общепринятых объективных критериев для обоснованного выбора оптимальных времени и объема оперативного пособия при тяжелых травмах [2], [7], [8], [9], [10], [11]. До сих пор существуют сторонники и более сдержанного отношения к максимально ранней оперативной иммобилизации множественных переломов. Так, по данным Д. И. Фадеева [4], [5], [6], в «золотой период» (1-е сутки после травмы) им было произведено только 25,1 % операций по ранней стабилизации переломов, а по статистике, опубликованной в работе В. А. Соколова в 2006 году [3], больше 95 % операций при переломах нижних конечностей выполнялись практически в плановом порядке. Практикующим травматологам, по всей вероятности, эти разночтения, сомнения и опасения представляются вполне понятными и достаточно оправданными, так как каждому из них, вероятно, доводилось видеть, как с трудом достигнутая стабилизация гемодинамики утрачивалась во время или сразу после преждевременного остеосинтеза, объем которого не индивидуализировался [12], [13], [14]. В подобных случаях, когда избирался весьма травматичный вариант оперативного пособия и объем его недостаточно учитывал изменения общего состояния пациента, подобная динамика могла носить даже необратимый характер.

В качестве модели для уточнения адекватности современных изменений взглядов на характер, сроки, объем и возможную этапность оперативных вмешательств в статье предлагаются данные, полученные при лечении группы из 28 пострадавших с переломами группы С, входившими в клинический комплекс множественных и сочетанных повреждений, лечившихся методом стабильного остеосинтеза, у подавляющего большинства которых сопутствующей была черепно-мозговая травма (71,43 %). Нами было проанализировано взаимоотношение сочетаний

полостных и костных повреждений. Так, в тех случаях, когда переломы носили закрытый характер, повреждения головы отмечались в 9 случаях, груди и живота – в 6 случаях, что составило 53,5 % от всех пострадавших. Открытые повреждения опорно-двигательного аппарата сочетались с повреждением головы в 11 случаях, а в сочетании с повреждением груди и живота – в 2 случаях, что составило 46,4 % всех пострадавших.

Выбор времени остеосинтеза и его объема при сочетании скелетных повреждений и черепно-мозговой травмы в значительной степени зависел от общего состояния пострадавшего, которое в первую очередь определялось тяжестью повреждений головного мозга.

Для определения тяжести состояния и оптимального времени оперативного лечения всех пострадавших (28 человек) разделили в соответствии со схемой Pape и Krettek [11]. 15 пострадавших были госпитализированы в стабильном состоянии, в пограничном – 7, в нестабильном – 4 и в критическом – 2.

Исходя из накопленного клинического опыта, в обычном алгоритме остеосинтез выполнялся только при стабильном состоянии пострадавших. У больных с пограничным состоянием считали возможным выполнение оперативной фиксации переломов группы С на протяжении первых двух суток.

При нестабильном общем состоянии оперативное пособие считалось допустимым осуществлять только в два этапа, с хирургической «иммобилизацией» упрощенными модулями аппарата наружной фиксации (АНФ) на первом из них и окончательной репозицией (и фиксацией) – на втором. Если тяжесть состояния расценивалась как критическая, то оперативное лечение проводилось только после достижения достаточного эффекта от проводимой интенсивной противошоковой терапии.

У троих больных с тяжелой ЧМТ выявлены внутричерепные гематомы со сдавлением головного мозга. Операции на конечностях в этих случаях выполнялись параллельно и в пределах того времени, которое требовалось для выполнения основного вмешательства, направленного на декомпрессию головного мозга. У 3 других пациентов этой группы диагностированы ушибы головного мозга, причем у 2 из них легкой степени, что позволило оперировать данных пациентов по поводу открытого сегментарного перелома голени в срочном порядке: была выполнена ПХО ран с одноэтапным остеосинтезом переломов. Пациенту с ушибом головного мозга тяжелой степени остеосинтез закрытого сегментарного перелома выполнен через 12 суток, когда уже наступила полная стабилизация общего состояния и нейрохирурги пришли к выводу, что это не скажется отрицательно на течении ЧМТ. До этого момента вполне достаточной для ухода и изменения положения тела больного в постели была иммобилизация гипсовой повязкой.

В качестве примера приводим следующее клиническое наблюдение: больная 36 лет, была доставлена в больницу через 2 часа после травмы. При поступлении состояние больной тяжелое, сознание отсутствует (10 баллов по шкале GCS), А/Д 80/50 мм рт. ст., пульс 45 в 1′, ритмичный, ЧД 36 в 1′.

При обследовании с помощью эхоэнцефалоскопа было выявлено смещение срединных структур мозга. Компьютерная томография подтвердила наличие внутричерепной гематомы.

Диагноз – тяжелая ЧМТ. Внутричерепная гематома. Закрытый многооскольчатый сегментарный перелом левой голени (C_1) в с/3 со смещением.

В связи с развернутой клиникой компрессии головного мозга и фиксированным разворотом осколков в области проксимального очага травматической деструкции кости, угрожавшим перфорацией покровных тканей, больная после короткой подготовки в палате ИТАР была оперирована двумя бригадами (нейрохирургами и травматологами). Были выполнены трепанация черепа с удалением внутричерепной гематомы и остеосинтез левой голени аппаратом Илизарова. После операции в условиях палаты ИТАР продолжена противошоковая терапия. Внутривенно вводился цефозалин (1 г 4 раза в сутки). Через 3 суток пациентка в стабильном состоянии была переведена в общую палату.

В качестве другого варианта политравмы, потребовавшего аналогичной активизации тактики, рассмотрим сочетание тяжелых повреждений органов брюшной полости с многооскольчатым переломом голени, встретившееся у одного из наблюдавшихся пациентов: 41 год, доставлен в больницу через 45 минут после автодорожной травмы. При поступлении осмотрен травматологом и хирургом, были выполнены рентгенография грудной клетки, УЗИ органов брюшной полости и малого таза. Установлен диагноз подкапсульного разрыва селезенки, закрытого многооскольчатого перелома правой голени (C_2) со значительным смещением. Шок I степени.

При поступлении состояние больного средней тяжести, в сознании, адекватен, АД 110/60 мм рт. ст., ЧСС 90 в 1′, пульс ритмичный, ЧД 20 в 1′. Больной помещен в ИТАР, где организована активная противошоковая терапия и принято решение о необходимости операции на органах брюшной полости с целью опережения завершения разрыва селезенки, сопровождающегося, как известно, значительной кровопотерей. Больная оперирована одновременно хирургами и травматологами.

Бригада хирургов выполнила спленэктомию и перевязку сосудов селезенки. Параллельно травматологами произведен I этап (иммобили-

зационный) остеосинтеза правой голени аппаратом Илизарова из 4 колец, что не удлинило общий срок вмешательства.

На 14-е сутки, после полной стабилизации состояния, выполнен II этап операции: в систему кость – АНФ введены дополнительные спицы, начата репозиция промежуточного отломка, которая была завершена через 2 недели. После этого больному было разрешено ходить с дозированной нагрузкой на ногу, еще через 1 месяц – с полной нагрузкой на травмированную конечность.

В качестве примера лечебной тактики у больного, поступающего в критическом состоянии, может быть приведена история болезни пациентки 24 лет, доставленной в больницу через 1 час после автодорожной травмы. Состояние при поступлении тяжелое, без сознания, гипотония (АД 80/40 мм рт. ст.), пульс 110 в 1′, ритмичный, ЧД 32 в 1′.

Диагноз – политравма: тяжелая ЧМТ, ушиб головного мозга, субарахноидальное кровоизлияние. Открытый оскольчатый сегментарный перелом в/3 левой голени типа C_3 с повреждением передней большеберцовой артерии (ПБА), закрытый оскольчатый перелом левого бедра. Оскольчатый перелом Н/3 правой голени, перелом левого локтевого отростка, перелом нижней челюсти. Травматический шок II–III степени (рис. 1).

Рис. 1. Первичные рентгенограммы

Местно: в области в/3 левой голени имеется умеренно кровоточащая рана с неровными краями, размером 5 х 3 см, дном раны являются костные отломки.

Больной госпитализирован в палату ИТАР, где проводилась активная противошоковая терапия и предоперационное обследование: рентгенография поврежденных сегментов конечностей, ангиография, выявившая повреждение ПБА. Через 1 час от момента поступления, после существенного восполнения дефицита объема циркулирующей крови по так называемым «вынужденным показаниям» произведена ПХО раны с пластикой магистрального сосуда, наложен модуль аппарата Илизарова (рис. 2). На левую бедренную кость наложен иммобилизационый аппарат Илизарова из двух колец. Гипсовые лангеты – на правую голень и левую руку. В дальнейшем больной 14 суток находился в палате ИТАР, получал соответствующую терапию, в том числе цефалоспорины 3-го поколения. После стабилизации состояния пациент вновь был взят в операционную, где на втором этапе лечения выполнен интрамедуллярный остеосинтез левого бедра титановым стержнем с дополнительной фиксацией двумя проволочными серкляжами. В модульную систему аппарата Илизарова, наложенного на левую голень в порядке I этапа операции, введены дополнительные спицы, после чего проведена репозиция отломков (рис. 3). АНФ из двух полуколец наложен на левый локтевой отросток. Второй бригадой (челюстно-лицевых хирургов) параллельно выполнено шинирование нижней челюсти. Два дня больной находился в палате ИТАР, далее продолжил лечение в травматологическом отделении. В ходе обследования больной осмотрен нейрохирургом, неврологом, выполнялась компьютерная томография головного мозга.

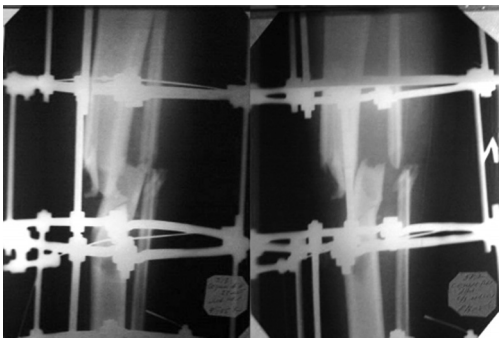


Рис. 2. Этап хирургической иммобилизации в аппарате

После операции больной был активен в пределах кровати, садился, занимался ЛФК под руководством инструктора. Через 10 суток после последней операции режим был расширен: больной начал садиться, а еще через 14 дней уже встал на костыли.

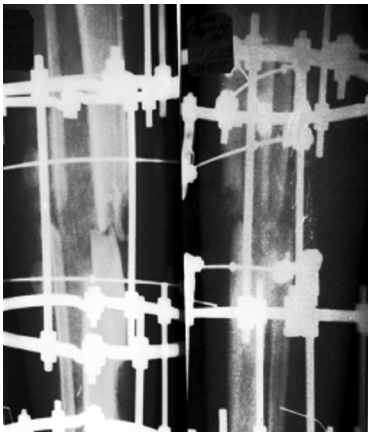


Рис. 3. Рентгенограммы на этапе репозиции в аппарате Илизарова

Через 6 недель после последней операции пациент в удовлетворительном состоянии выписан на амбулаторное лечение. В последующем пациент неоднократно госпитализировался для курсов восстановительного лечения (рис. 4).

Рис. 4. Вид пациента после сращения и снятия аппарата

Таким образом, клиническая практика позволяет делать вывод, что при наличии сопутствующих повреждений, требующих срочного оперативного вмешательства, возможно параллельное выполнение остеосинтеза АНФ или хотя бы его первого этапа – хирургической иммобилизации, что не только позволяет предупредить развитие ишемических местных осложнений со стороны мягких тканей, но и входит в состав противошокового комплекса. Кроме того, подобная тактика коренным образом изменяет характер послеоперационного периода, позволяя раньше активизировать больного и тем самым предупреждая развитие традиционных гиподинамических осложнений, которые могут свести на нет все достигнутое в операционной.

Современные шкалы оценки состояния больного, а также схема Pape и Krettek в большинстве случаев позволяют уточнить оптимальное время для выполнения оперативного пособия. При этом у пострадавших, пребывающих в достаточно стабильном состоянии, остеосинтез может быть выполнен в срочном порядке. Подтверждением этого положения может быть тот факт, что ни у одного из 22 больных (79,6 % всего состава данной группы) оперативные вмешательства, выполненные в сроки от 1 часа до 2 дней с момента поступления, не привели к клинически ощутимому ухудшению состояния.

Таким образом, в условиях многопрофильного стационара, обладающего мощной анестезиологической службой и имеющего в своем составе квалифицированное инструментально обеспеченное травматологическое отделение, может быть избрана лучше отвечающая современным требованиям активная тактика ведения подобных больных.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литвина Е. А., Скороглядов А. В., Гордиенко Д. И. Одноэтапные операции при множественной и сочетанной травме // Вестник травматологии и ортопедии. 2003. № 3. С. 10–15.
2. Николаев А. П., Разенков Н. Н. // Материалы конгресса травматологов и ортопедов России с международным участием. Ярославль, 1999. С. 479.
3. Соколов В. А. Множественные и сочетанные травмы. М.: ГЭОТАР Медиа, 2006. 512 с.
4. Фадеев Д. И. Ранний металлоостеосинтез закрытых и открытых множественных и сочетанных переломов длинных трубчатых костей. Смоленск, 1997. С. 39–90.
5. Фадеев Д. И. Ранний чрескостный остеосинтез переломов длинных костей при политравме // Седьмой Российский национальный конгресс «Человек и его здоровье». СПб., 2002. С. 128.
6. Фадеев Д. И., Чекин Е. Г., Быстряков А. В., Кинос Н. А., Лединников И. М. Чрескостный остеосинтез переломов длинных костей и их неблагоприятных последствий в Смоленской клинической больнице скорой медицинской помощи // Седьмой Российский национальный конгресс «Человек и его здоровье». СПб., 2002. С. 127–128.
7. Фадеев Д. И., Чукин Е. Г., Быстряков А. В., Кинос Н. А., Лединников И. М., Ковынников В. В. Осложнения при лечении переломов длинных трубчатых костей и их последствий методом чрескостного остеосинтеза // Материалы междунар. медицинского форума «Человек и травма». Н. Новгород, 2001. С. 102–103.
8. Черкес-Заде Д. И. Современные технологии в травматологии и ортопедии. М., 1999. С. 95–96.
9. Krettek C., Muller M., Miclau T. Evolution of minimally invasive plate osteosynthesis (MIPO) in the femur. Injury // Injury. 2001. Vol. 32. Suppl. 3. P. 14–23.
10. Krettek C., Simon R. G., Tscherne H. Management priorities in patients with polytrauma // Langenbecks Arch. Surg. 1998. № 2–4. P. 220–227.
11. Pape H. C., Krettek C. Management of fractures in the severely injured-influence of the principle of “damage control orthopaedic surgery” // Unfallchirurg. 2003. Bd. 106. № 2. P. 87–96.
12. Pape H. C., Remmers D., Regel G., Tscherne H. Pulmonary complications following intramedullary stabilization of long bones. Effect of surgical procedure, time and injury pattern // Orthopade. 1995. Bd. 24. № 2. P. 164–172.
13. Pape H. C., van Griensven M., Rice J. et al. Major secondary surgery in blunt trauma patients and perioperative cytokine liberation: determination of the clinical relevance of biochemical markers // J. Trauma. 2001. Vol. 50. P. 989–1000.
14. Perl M., Gebhard F., Knoferl M. W.et al. The pattern of preformed cytokines in tissues frequently affected by blunt trauma // Shock. 2003. Vol. 19. P. 299–304.

Сентябрь, № 6 **Медицинские науки** **2012**

УДК 616.1-02:613.84; 616.1-02:547.262. 616.1-036.88-02:613.81

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

АНДРЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ УСЕНКО
кандидат медицинских наук, врач кабинета функциональной диагностики, Новосибирский областной госпиталь № 2 ветеранов войн (Новосибирск, Российская Федерация)
h2w@mail.ru

ДМИТРИЙ ВИКТОРОВИЧ ВАСЕНДИН
кандидат медицинских наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности Института кадастра и геоинформационных систем, Сибирская государственная геодезическая академия (Новосибирск, Российская Федерация)
vasendindv@gmail.com

СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ МАШКОВ
кандидат медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой мобилизационной подготовки здравоохранения и медицины катастроф медико-профилактического факультета, Новосибирский государственный медицинский университет (Новосибирск, Российская Федерация)
mashkovngmu@mail.ru

НАТАЛЬЯ ПАВЛОВНА ВЕЛИЧКО
врач-терапевт, Детская городская поликлиника № 1 (Новосибирск, Российская Федерация)
zdrav-dgp1@novo-sibirsk.ru

ОЛЕГ ВИКТОРОВИЧ НИЩЕТА
врач-терапевт амбулатории (пос. Кудряши, Новосибирский район, Новосибирская область, Российская Федерация)
afeuckoooa@gmail.com

ТАТЬЯНА ЮРЬЕВНА КОЗЫРЕВА
врач-терапевт Межрегионального ожогового центра, Государственная новосибирская областная клиническая больница (Новосибирск, Российская Федерация)
gnokb@oblmed.nsk.ru

ГАЛИНА СЕМЕНОВНА ШУСТЕР
начальник отдела ионосферно-магнитного прогнозирования, Новосибирский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с функциями регионального специализированного метеорологического центра Всемирной службы погоды (Новосибирск, Российская Федерация)
rsmc@meteo-nso.ru

ОСОБЕННОСТИ ПОТРЕБЛЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КИСЛОРОДА ОРГАНИЗМОМ БОЛЬНЫХ ИШЕМИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНЬЮ СЕРДЦА В ДНИ МАГНИТНЫХ БУРЬ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПСИХОСОМАТИЧЕСКОГО СТАТУСА

Группы больных (n = 640 ± 11 в год) и здоровых (n = 485 ± 6 в год) мужчин были разделены на лиц холерического, сангвинического, флегматического и меланхолического темпераментов с высокой и низкой тревожностью. Учитывали баланс симпатического и парасимпатического отделов вегетативной нервной системы, минутные объемы дыхания, кровотока, потребление, коэффициент использования и коэффициент утилизации кислорода тканями, число приступов загрудинных болей на фоне лечения, направленного и не направленного на блок особенностей психосоматического статуса. К особенностям психосоматического статуса у высоко- и низкотревожных холериков и сангвиников отнесли превалирование активности симпатического отдела вегетативной нервной системы, а у высоко- и низкотревожных флегматиков и высокотревожных меланхоликов – парасимпатического отдела. У холериков и сангвиников содержание кортизола было выше, а альдостерона ниже, чем у флегматиков и меланхоликов. У высокотревожных флегматиков и меланхоликов – тревожность + депрессивность легкой степени. Данные учитывали до магнитной бури, в период и на 1–7-е сутки после нее. В период магнитной бури отмечено повышение γ-фона среды и снижение коэффициента утилизации кислорода тканями, но повышение числа приступов стенокардии за сутки (только у холериков), в дни магнитной бури – у сангвиников, на 3–4-е сутки – у флегматиков, на 4–5-е – у меланхоликов, особенно в группах высокотревожных флегматиков и меланхоликов.

© Усенко Г. А., Усенко А. Г., Васендин Д. В., Машков С. В., Величко Н. П., Нищета О. В., Козырева Т. Ю., Шустер Г. С., 2012

Последние – группа риска тяжелого течения ишемической болезни сердца. Антиангинальная терапия с блоком особенностей психосоматического статуса существенно снизила число приступов и приблизила величину использования кислорода организмом и коэффициент утилизации кислорода тканями во все дни к таковым у здоровых лиц соответствующей тревожности и темперамента.

Ключевые слова: ишемическая болезнь сердца, магнитные бури, гамма-фон, темперамент, утилизация кислорода

Конец XX и начало XXI века сопровождались высоким уровнем заболеваемости и смертности трудоспособного населения вследствие развития артериальной гипертензии (АГ) и ишемической болезни сердца (ИБС) [2], [8]. На течение АГ и ИБС влияют различные факторы как социального, так и природного генеза, включая изменение погодных факторов – солнечной (СА) и геомагнитной активности [4], [11], [12]. Фактор СА, влияющий на организм, неизвестен, однако геомагнитные возмущения (ГМВ), или магнитные бури (М-бури), сочетаются с изменениями артериальной гемодинамики, капиллярного кровотока, повышением активности свертывающей системы крови, перекисного окисления липидов, снижением сократительной способности миокарда [5], [15]. Существенные изменения в организме отмечены у высокотревожных (ВТ) лиц по сравнению с низкотревожными (НТ) [9]. Нельзя исключить, что у ВТ- и НТ-лиц имеются существенные различия в утилизации кислорода тканями.

Цель работы – изучить изменения минутного объема кровотока (МОК) и минутного объема дыхания (МОД), величину потребления ($ПО_2$) и использования ($КИО_2$) кислорода организмом мужчин, страдающих ИБС и АГ-I, до, в период и после ГМВ, в дни с различным уровнем гамма-фона среды в зависимости от особенностей психосоматического статуса (ПСС) и лечения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В период с 2000 по 2010 год в амбулаторных условиях обследована группа мужчин, технических работников, в возрасте 44–62 лет (в среднем 54,2 ± 1,8 года), страдающих ИБС, стабильная стенокардия напряжения ФК-II, недостаточность кровообращения 0–1 НК0-1, и гипертонической болезнью I степени (ГБ-I), риск 3. Значения АД пациентов находились в пределах 140/90–159/99 мм рт. ст. В год обследовалось 640 ± 11 пациентов (43 ± 2 человека в день). Исходя из 4 разновидностей темперамента были выделены 8 групп: 4 высоко- и 4 низкотревожных. Наличие ИБС устанавливали по критериям, изложенным в Рекомендациях ВНОК («Профилактика, диагностика и лечение АГ») [10]. У 96 % обследуемых лиц отсутствовала патология, препятствующая трудовой деятельности. Средняя продолжительность ИБС и ГБ-I составила 8,6 ± 1,1 года. Контролем служили 456 ± 9 (в год) здоровых мужчин тех же цехов, совместимых по возрасту, месту жительства, профессии. Приверженность к лечению была ниже необходимой. В целях определения особенностей психосоматического статуса изучали: 1) активность симпатического (SNS) и парасимпатического (PSNS) отделов вегетативной нервной системы (ВНС) по вегетативному индексу Керде (ВИК): частота сердечных сокращений (ЧСС) / диастолическое артериальное давление (ДАД) – 1; 2) минутный объем кровотока, который является интегральным показателем состояния артериальной гемодинамики: [(САД – ДАД) х ЧСС] : [(САД + ДАД) : 2] х 100 [4]; 3) содержание в сыворотке крови кортизола, инсулина и альдостерона радиоиммунным методом с использованием коммерческих реактивов фирмы «CEA-IRE-SORIN» (Франция, Италия). Данные о состоянии внешнего дыхания: частоте и глубине дыхания, минутном объеме дыхания, $ПО_2$ и $КИО_2$ получали в условиях базального обмена на оксиспирографе «МЕТАТЕСТ-2» (фирма «МЕДИКОР», Венгрия). Важным являлось определение различий в содержании кислорода в артериализованной венозной и чисто венозной крови. Для этого определяли напряжение кислорода в крови (pO_2, мм рт. ст.) и насыщение (сатурацию) гемоглобина (Нв) кислородом (SaO_2, %) с помощью анализатора газов крови «STAT PROFILE. pHOx» (Германия). При этом содержание Нв (г/л) определяли гемоглобинцианидным методом на приборе КФК-2 [7]. Содержание кислорода (O_2) в крови CaO_2 определяли по формуле: $CaO_2 = (1{,}34 \times Нв \times SaO_2 / 100 + pO_2) \times 0{,}0031$, где CaO_2 – содержание кислорода в крови; 1,34 – константа Хюфнера; Нв – содержание гемоглобина в крови; SaO_2 – насыщение Нв кислородом; pO_2 – напряжение кислорода в крови; 0,0031 – коэффициент растворимости кислорода по Бунзену. Для получения артериализированной венозной крови средний палец исследуемого человека (по его согласию) помещали в воду с температурой 50 °С на 3 минуты и забирали до 2 мл крови. Забор венозной крови производили из локтевой вены той же руки. После определения CaO_2 вычисляли разницу содержания кислорода в артериализированной и чисто венозной крови и умножали на 100, то есть определяли долю кислорода, утилизированного тканями (%). В норме (чисто артериальная кровь) коэффициент утилизации кислорода тканями (КУКТ) колеблется в пределах от 30 до 40 %. Наши данные не вышли за границы физиологической нормы [14]. Выбранная методика была для всех одинаковой, что позволило сравнить данные о тканевой экстракции кислорода тканями у ВТ- и НТ-лиц с различным темпераментом. В целях определения эффективности лечения в группе

учитывали долю (%) лиц, перенесших приступы стенокардии. Превалирующий темперамент – холерический (Х), сангвинический (С), флегматический (Ф) и меланхолический (М) определяли с использованием тестов Дж. Айзенка и А. Белова [13]. Темперамент определяли не менее 4–5 раз до лечения и далее 1 раз в 3 месяца. Величину реактивной (РТ) и личностной (ЛТ) тревожности определяли по тесту Спилбергера в модификации Ю. Л. Ханина [16] с той же частотой, что и темперамент. Уровень НТ не превысил 29,6 ± 1,5 балла, ВТ – 48,6 ± 1,5 балла. Уровень депрессивности определяли по методике [3], где от 20 до 50 баллов – состояние без депрессии, 51–59 баллов – состояние легкой депрессии неврогенного (ситуативного) генеза, 60–69 баллов – субдепрессивное состояние, от 70 баллов и выше – истинное депрессивное состояние. ВТ-лицам психоневрологи назначали анксиолитик (Ах) сибазон по 2,5 мг утром и на ночь. Из антидепрессантов (Ад) назначали коаксил по 12,5 мг утром и на ночь, избегая назначения трициклических Ад и Ах НТ-лицам и водителям. Лечение ИБС и АГ проводилось в рамках 6 групп препаратов, согласно Приказу Минздравсоцразвития РФ от 22.11.2004 № 254 «Об утверждении стандарта медицинской помощи больным артериальной гипертонией» [9] и на основании коррекции особенностей ПСС: у ВТ/Х и С – превалирование SNS, у Ф и М – PSNS и более высокая активность ренин-ангиотензин-альдостероновой системы (РААС по альдостерону). В этой связи ВТ/Х и С-пациентам назначали нитросорбид по 10 мг х 4 раза/сут. + β-адреноблокатор (БАБ) + диуретик (Д) + Ах, для НТ – без Ах. Для ВТ/Ф и М-пациентов: нитросорбид по 10 мг х 4 раза/сут., ингибитор ангиотензинпревращающего фермента (иАПФ) + Д (верошпирон) + Ад, для НТ/Ф и М – без Ад. Все остальные больные с определившимся темпераментом и тревожностью принимали такие же препараты, назначаемые без целенаправленного купирования тревожности и депрессивности по темпераменту, а также активности отделов ВНС и РААС. Пациенты получали панангин и кардиомагнил (1 таб. х 1 раз/сут., утром), предуктал (по 20 мг 2–3 раза/сут.). Препараты, влияющие на обмен холестерина, принимали 10 % обследуемых, причем нерегулярно. Все исследования, в том числе определение мощности γ-фона места работы, осуществляли утром с 8.00 до 10.00, забор материала производился в это же время, натощак. Частота исследования мощности γ-фона среды составила 52 ± 2 измерения ежесуточно. Данные о состоянии СА, магнитных бурях и мощности γ-фона внешней среды (мкР/ч) по дням, месяцам и по годам с 2000 по 2010 год получали из лаборатории ионосферно-магнитного прогнозирования ГУ «Новосибирский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с функциями регионального специализированного метеорологического центра Всемирной службы погоды». Для определения изменений в период М-бурь использовали метод наложенных эпох [5], где значения показателей учитывали за 7–2 (–7; –6; –5; –4; –3; –2; –1) суток до начала М-бури, в день бури (0) и в последующие от начала М-бури дни (+1; +2; +3; +4; +5; +6; +7). Полученные результаты обрабатывали методами вариационной статистики с использованием прикладных программ «Statistica 6.0» и непараметрического критерия t-Стьюдента. Достоверными считали различия при $p < 0,05$. Результаты представлены как $M \pm m$, где М – среднестатистическое значение, m – стандартная ошибка от среднего. Выбор методик исследования обусловлен их наличием в практическом здравоохранении, они соответствуют требованиям Хельсинкской декларации лечения и обследования людей и были одобрены Комитетом по этике Новосибирского государственного медицинского университета от 20.11.2009, протокол № 18.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Подобные исследования ранее не проводились, и нами впервые было установлено, что положительные значения ВИК у ВТ/Х и ВТ/С свидетельствовали о превалировании тонуса SNS, а отрицательные у ВТ/Ф и М – о превалировании PSNS-отдела ВНС. У НТ/Х и С равновесность смещена в сторону симпатического, а НТ/Ф и М-лиц – парасимпатического отдела ВНС, хотя и в меньшей степени, чем у ВТ. Содержание кортизола у Х и С было выше, а альдостерона и инсулина ниже, чем у Ф и М (см. табл.). Указанные различия отнесены к психосоматическим особенностям (ПСО) пациентов, а назначение, с одной стороны, Ах + БАБ для ВТ/Х и С, с другой – иАПФ + Ад + верошпирон для ВТ/Ф и М основано на особенностях ПСС. На этом основании здесь и антиангинальная терапия, не связанная с блокадой особенностей ПСС, обозначена «ААТ», а с блоком особенностей ПСС как «ААТ + БлОПСС».

Исследование показало достоверное повышение мощности γ-фона среды за сутки (–1), в 1-е (0) и 2-е–3-и (+1; +2) сутки ГМВ. Далее отмечалось снижение до исходных значений, и только к +4–+5 суткам от начала М-бури она вновь достоверно возрастала (см. табл.). Таким образом, отмечены две волны подъема мощности γ-фона среды в границах установленной для данного региона нормы. Однако эти волны сочетались с достоверным изменением величины изучаемых показателей. Так, изменения МОК у Х/ВТ-лиц отмечены за сутки (–1) и в +1–+2 сутки ГМВ. К +3 суткам от начала М-бури МОК достоверно снижался до исходных значений. В группах С/ВТ-лиц достоверное повышение

МОК отмечено в день начала М-бури, а к исходным значениям он снижался на +5 сутки. В группах Ф/ВТ-лиц МОК достоверно возрастал на +2–+3, а в группах М/ВТ – лишь на +3–+4 от начала бури сутки. К исходным значениям у Ф/ВТ МОК снижался на +5, а в группах М/ВТ – на +7 сут. У Ф/ВТ в это время отмечалось снижение ВИК (тонуса PSNS) в среднем с –6 ± 0,4 до –1 ± 0,4, а у М/ВТ – до –1,5 ± 0,4. В группах пациентов, принимавших ААТ + БлОПСС, характер изменения МОК был такой же, как у пациентов, принимавших только ААТ. Однако во все дни исследования величина МОК у них была достоверно ниже, а к исходным значениям МОК снижался на 2 суток раньше, чем у пациентов, которым проводилась только ААТ. В группах НТ-пациентов рисунок изменения МОК был такой же, но величина МОК у них была на 0,75 ± 0,05 л достоверно ниже, чем у ВТ-лиц соответствующего темперамента. В группах здоровых ВТ- и НТ-мужчин изменения МОК были такие же, как указаны выше, но величина МОК у них была достоверно ниже в среднем на 0,76 ± 0,04 л, чем у больных соответствующего темперамента и тревожности. У НТ-пациентов, принимавших ААТ + БлОПСС, величина МОК была практически такой же, как у здоровых лиц соответствующего темперамента. Таким образом, у лиц с симпатикотонией (Х и С) увеличение МОК сочеталось с повышением напряженности магнитного поля (МП) Земли и γ-фона среды за сутки и в 1-й день М-бури, а у парасимпатотоников (Ф и М) – снижением напряженности МП Земли и повторным повышением мощности γ-фона среды. Выраженность реакции у ВТ-лиц оказалась выше, чем у НТ. Анализ оксиспирограмм показал, что в спокойные от ГМВ дни у Х/ВТ МОД варьировал в границах 10,7 ± 0,1 л, у С/ВТ – 11,1 ± 0,06 л, у Ф/ВТ – 11,5 ± 0,05 л, а у М/ВТ – 12,0 ± 0,05 л. В дни ГМВ МОД у всех лиц увеличивался в те же дни, что и МОК. У Х/ВТ-пациентов МОД достоверно увеличивался за сутки и в 1–2-е сутки М-бури, достигая 11,7 ± 0,05 и 12,5 ± 0,05 л соответственно. У С/ВТ пик повышения МОД пришелся на начало (0) и 1-й (+1) день М-бури: 11,7 ± 0,05 л и 12,5 ± 0,05 л соответственно. В группе Ф/ВТ-пациентов максимум увеличения МОД отмечен на +3–+4 сутки от начала ГМВ и составил 12,3 ± 0,05 и 12,6 ± 0,05 л, а у М/ВТ – на +4–+5 сутки: 13,5 ± 0,05 и 13,8 ± 0,05 л соответственно на фоне приема препаратов ААТ. Такой же характер изменения МОД был у пациентов, принимавших ААТ + БлОПСС, но величина МОД была достоверно на 1,0 ± 0,05 л ниже по сравнению с лицами соответствующего темперамента. В группах НТ-пациентов отмечена такая же динамика, но величина МОД у них была ниже, по сравнению с ВТ-пациентами, на 1,1 ± 0,04 л. У НТ-больных, принимавших ААТ + БлОПСС, МОД в указанные дни был достоверно ниже на 0,6 ± 0,05 л, чем у НТ-пациентов на фоне проведения только антиангинальной терапии. У ВТ- и НТ-пациентов во все дни исследования МОД приближался к таковому у здоровых лиц, если пациенты лечились по схеме ААТ + БлОПСС. У здоровых ВТ- и НТ-лиц рисунок изменений был такой же, как у пациентов, но во все дни исследования, а также в период ГМВ МОД был ниже, чем у пациентов, на 0,63 ± 0,05 л соответственно темпераменту. Известно, что повышение потребности в кислороде связано с повышением МОД и МОК [14]. Вероятно, увеличение МОД и МОК в период ГМВ является следствием изменившегося энергетического обеспечения организма на определенном уровне. Действительно, $ПО_2$ у здоровых и пациентов повышалось и приходило к исходным значениям в те же дни, что МОК и МОД. На фоне проведения ААТ $ПО_2$ у Х/ВТ в спокойные от ГМВ дни изменялся в пределах 268,2 ± 0,2 мл/ч. За сутки до М-бури и в 1-й ее день $ПО_2$ увеличивалось до 278,2 ± 0,2 мл/ч. В группе С/ВТ величина $ПО_2$ увеличивалась с 260,2 ± 0,2 мл/ч (в спокойные дни) до 272,3 ± 0,2 мл/ч в 1-й и 2-й дни ГМВ. У Ф/ВТ $ПО_2$ был не выше 261,6 ± 0,2 мл/ч и ниже, чем у Х и С/ВТ, а у М/ВТ – 257, 2 ± 0,2 мл/ч. В дни увеличения МОК $ПО_2$ достоверно также увеличивалось у Ф/ВТ до 271,3 ± 0,2 мл/ч, у М/ВТ – до 269,4 ± 0,2 мл/ч. У всех лиц снижение $ПО_2$ до исходных значений происходило в те же дни, что и МОК. В группах ВТ-пациентов, принимавших ААТ + БлОПСС, динамика аналогичная, но величина $ПО_2$ была достоверно ниже на 7,3 ± 0,2 мл/ч соответственно темпераменту. У НТ-пациентов паттерн изменений не отличался от ВТ, но величина $ПО_2$ во все дни исследования была достоверно ниже по сравнению с таковой у ВТ-лиц на 10,0 ± 0,05 мл/ч. У НТ-пациентов на фоне ААТ + БлОПСС величина $ПО_2$ была практически такой же, как у здоровых НТ-лиц соответствующего темперамента. Таким образом, за сутки и в период ГМВ отмечен рост потребления кислорода. Однако повышение МОК, МОД и $ПО_2$ у ВТ- и НТ-лиц на фоне ААТ и ААТ + БлОПСС сочеталось не с повышением, а со снижением величины $КИО_2$ и КУКТ в те же дни, что и повышение МОК, МОД и $ПО_2$. Оказалось, что уровень утилизации кислорода тканями (по $КИО_2$ и артериоло-венозной разнице содержания O_2) был ниже, чем в спокойные дни. Однако на фоне ААТ + БлОПСС снижение $КИО_2$ и КУКТ было менее выраженным. К исходным значениям величины $КИО_2$ и КУКТ приходили в те же дни, что и МОК. Но и в данных условиях у ВТ-лиц во все дни исследования $КИО_2$ и КУКТ были ниже, чем у НТ-лиц соответствующего темперамента. Положительным явилось то, что на фоне такого лечения величина указанных показателей у ВТ- и НТ-пациентов приближалась к значениям у ВТ- и НТ-здоровых лиц соответствующего темперамента. Различия

были достоверными, но несущественными (на 2,2 ± 0,05 % по КИО$_2$ и 2,3 ± 0,05 % по КУКТ) соответственно темпераменту.

Следует отметить, что на фоне только ААТ число приступов загрудинных болей в спокойные от ГМВ дни достоверно возрастало в последовательном ряду М > Ф > С > Х: 4,3 ± 0,04 > 3,5 ± 0,05 > 2,7 ± 0,04 > 1,8 ± 0,05. В период ГМВ и за сутки (только у Х) число приступов достоверно увеличивалось в том же последовательном «темпераментальном» ряду до 6,4 ± 0,06 > 5,6 ± 0,05 > 4,5 ± 0,04 соответственно. В аналогичных группах, принимавших лечение ААТ + БлОПСС, число приступов загрудинных болей до бури и в период бури было достоверно ниже. Так, М > Ф > Х > С: 3,6 ± 0,03 > 2,8 ± 0,05 > 2,0 ± 0,04 > 1,2 ± 0,04 случая. Положительным явился тот факт, что в дни М-бурь частота приступов у них была такой же, как у пациентов, принимавших препараты ААТ в спокойные дни. Такие же различия между темпераментами по частоте приступов получены в группах НТ-пациентов в указанные дни. Но их количество по сравнению с ВТ-лицами соответствующего темперамента было достоверно ниже (М > Ф > С > Х): 2,6 ± 0,03 > 1,9 ± 0,05 > 1,4 ± 0,04 > 1,1 ± 0,04 случая. В дни М-бурь (М > Ф > С > Х): 4,6 ± 0,03 > 3,9 ± 0,05 > 3,2 ± 0,04 > 2,3 ± 0,04 случая. Однако на фоне ААТ + БлОПСС число приступов оказалось достоверно ниже, чем на фоне ААТ-лечения. В спокойные от ГМВ дни (МФХС): 1,7 ± 0,03 > 1,4 ± 0,05 > 1,2 ± 0,04 > 0,97 ± 0,04 случая загрудинных болей. В дни М-бурь (МФХС): 3,7 ± 0,03 > 3,0 ± ,05 > 2,6 ± 0,04 > 2,0 ± 0,04 случая.

МОК (л) до и после магнитной бури у ВТ-пациентов на фоне антиангинальной терапии без сочетания (1) и в сочетании (1а) с препаратами, блокирующими особенности психосоматического статуса, за период с 2000 по 2010 г. (р < 0,05)

Дни до, в период и после начала М-бури		-5	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+7
Мощность γ-фона среды, мкР/ч		8,8±0,06	9,1±0,06	11,9±0,05	12,5±0,03	9,5±0,06	9,4±0,06	11,2±0,05	11,9±0,03	9,1±0,06	9,0±0,06
Х	1	5,9±0,06 30	5,8±0,06 31	6,7±0,06 33	6,85±0,05 35	6,5±0,05 32	6,4±0,04 33	6,0±0,05 33	5,8±0,06 32	5,8±0,03 31	5,9±0,03 35
	1а	5,4±0,04 31	5,4±0,05 33	5,6±0,03 34	5,90±0,05 36	5,8±0,05 34	5,5±0,04 35	5,4±0,05 34	5,3±0,06 35	5,4±0,03 33	5,4±0,03 36
С	1	5,7±0,06 33	5,6±0,06 31	5,8±0,04 33	6,5±0,05 34	6,6±0,05 33	6,2±0,04 34	6,0±0,05 33	6,1±0,04 33	5,6±0,03 34	5,6±0,03 36
	1а	5,2±0,04 34	5,1±0,05 35	5,2±0,03 36	5,5±0,05 34	5,8±0,05 34	5,7±0,04 33	5,4±0,05 34	5,3±0,06 35	5,4±0,03 33	5,4±0,03 34
Ф	1	5,4±0,06 32	5,5±0,06 34	5,3±0,04 33	5,4±0,1 32	5,6±0,1 35	6,1±0,04 34	6,5±0,05 33	5,9±0,04 34	5,6±0,03 31	5,5±0,03 33
	1а	5,0±0,04 33	5,1±0,05 34	5,2±0,03 33	5,0±0,05 35	5,2±0,05 35	5,4±0,04 35	5,8±0,05 36	5,3±0,06 32	5,3±0,03 33	5,4±0,03 36
М	1	4,8±0,06 34	4,7±0,06 31	4,9±0,04 32	5,0±0,1 32	5,4±0,1 33	5,6±0,04 33	5,7±0,05 32	6,4±0,04 33	6,0±0,03 34	5,3±0,03 36
	1а	4,3±0,04 34	4,2±0,05 34	4,3±0,03 33	4,4±0,05 33	4,3±0,05 34	4,6±0,04 33	4,6±0,05 33	5,3±0,06 34	5,4±0,03 33	5,4±0,03 35

Примечания: 1. Пациенты-мужчины с различным темпераментом, высоким и низким уровнем тревожности: 1, 2 – без коррекции особенностей ПСС; 1а, 2а – с коррекцией особенностей ПСС. 2. В числителе указано количество исследований.

Таким образом, у лиц группы контроля и пациентов экспериментальных групп в условиях повышения напряженности МП Земли и мощности γ-фона среды в период и за сутки (только у Х) до М-бури происходят сдвиги в структурах тканевого дыхания, которые сопровождаются снижением утилизации кислорода тканями и разницы по содержанию кислорода в артериализованной и чисто венозной крови. «Задолженность» клеток тканей и миокарда, в том числе по кислороду, в период ГМВ приводит к переходу организма на более напряженный (по увеличению МОК, МОД, ПО$_2$), но энергетически менее выгодный (по снижению КУКТ и КИО$_2$) уровень функционирования. Отметим, что в условиях напряженного МП Земли интенсифицируется процесс перекисного окисления липидов (ПОЛ), изменяются функции мембран эритроцитов и эндотелия капилляров вследствие ускорения процесса ПОЛ [4], [5], [17]. Нельзя исключить, что снижение утилизации О$_2$ с одновременным повышением его содержания в оттекающей от тканей венозной крови является следствием роста ПОЛ и снижения утилизации О$_2$ в митохондриях. В условиях региона отмечен рост мощности γ-фона среды за сутки до, в период и на 3–4-е сутки от начала ГМВ. Возможно, эти изменения способствовали развитию ПОЛ. Это тем более вероятно, если учесть, что вторая волна подъема мощности γ-фона среды развивается на фоне снижения напряженности МП Земли, на которую в эти дни в меньшей степени реагируют симпатотоники Х и С, в большей степени – парасимпатотоники Ф- и М-пациентов. Именно в эти дни у Ф и М отмечено снижение отрицательных значений ВИК (снижение тонуса PSNS). В основе

временных различий ответной реакции в период ГМВ также лежат особенности психосоматического статуса по темпераменту (гормональные, баланса SNS и PSNS, тревожности, депрессивности), что очевидно, если учесть, что на фоне ААТ + БлОПСС выраженность физиологических сдвигов во все дни ниже, а утилизация кислорода тканями выше, чем на фоне только ААТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В период ГМВ у трудоспособных больных ИБС (ФК-II, ГБ-I) мужчин отмечается увеличение МОК, МОД, $ПО_2$, которое сочетается со снижением утилизации кислорода тканями (по $КИО_2$ и КУКТ). Реакция организма (по изучаемым показателям) у Х отмечается за сутки и в первые сутки М-бури, у С – в день ГМВ и на вторые сутки, у Ф – на 3–4-е, а у М – и 4–5-е сутки, что обусловлено различиями в психосоматическом статусе.

2. В период М-бури снижение утилизации кислорода тканями (по $КИО_2$ и КУКТ) сочетается с повышением мощности γ-фона среды за сутки и в 1-е сутки ГМВ, а также на 3–4-е сутки от начала бури.

3. Выраженность изменений снижается в последовательном ряду: М > Ф > С > Х. На фоне антиангинальной терапии с блокадой или без блокады особенностей ПСС у ВТ-лиц снижение утилизации кислорода тканями выше, чем у НТ-лиц соответствующего темперамента.

4. ААТ в сочетании с блокадой особенностей ПСС по сравнению с ААТ сочетается с более высоким уровнем утилизации кислорода тканями (по $КИО_2$ и КУКТ) и снижением частоты приступов загрудинных болей.

ИСТОЧНИК

1. Приказ № 254 Минздравсоцразвития РФ от 22.11.2004 «Об утверждении стандарта медицинской помощи больным артериальной гипертонией».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

2. Акимова Е. В., Гакова Е. И., Пушкарев Г. С., Смазнов В. Ю., Гафаров В. В., Кузнецов В. А. Риск сердечно-сосудистой смертности и социальное положение в тюменской когорте: результаты 12-летнего проспективного исследования // Кардиология. 2010. № 7. С. 43–49.
3. Ахметжанов Э. Р. Шкала депрессии. Психологические тесты. М.: Лист, 1996. 320 с.
4. Вейн А. М., Вознесенская Т. Г., Голубев В. Л. Заболевания вегетативной нервной системы. М.: Медицина, 1991. 624 с.
5. Гурфинкель Ю. И. Ишемическая болезнь сердца и солнечная активность. М.: ИИКЦ «Эльф-3», 2004. 170 с.
6. Загидуллин Н. Ш., Валеева К. Ф., Гассанов Н., Загидуллин Ш. З. Значение дисфункции эндотелия при сердечно-сосудистых заболеваниях и методы ее медикаментозной коррекции // Кардиология. 2010. № 5. С. 54–62.
7. Кишкун А. А. Руководство по лабораторным методам диагностики. М.: ГЭОТАР, 2007. 800 с.
8. Ощепкова Е. В. Смертность населения от сердечно-сосудистых заболеваний в Российской Федерации в 2001–2006 гг. и пути по ее снижению // Кардиология. 2009. № 2. С. 67–73.
9. Панин Л. Е., Усенко Г. А. Тревожность, адаптация и донозологическая диспансеризация. Новосибирск: СО РАМН, 2004. 316 с.
10. Профилактика, диагностика и лечение АГ. Рекомендации ВНОК // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2004. Прилож. 1–19.
11. Сергеев А. В. Стойкие органические загрязнители и атеросклероз. Достаточно ли имеющихся фактов, чтобы сделать однозначный вывод // Кардиология. 2010. № 4. С. 50–55.
12. Соколов Е. И., Лавренова Н. Ю., Голобородова И. В. Реакция симпатико-адреналовой системы у больных ишемической болезнью сердца при эмоциональном напряжении в зависимости от типа личности // Кардиология. 2009. № 12. С. 18–23.
13. Столяренко Л. Д. Опросник Айзенка по определению темперамента. Основы психологии. Ростов-н/Д: Феникс, 1997. 736 с.
14. Ткаченко Б. И. Нормальная физиология человека. М.: Медицина, 2005. 928 с.
15. Усенко А. Г., Нищета О. В., Величко Н. П., Усенко Г. А., Козырева Т. Ю., Демин А. А., Машков С. В., Васендин Д. В., Шустер Г. С. Зависимость времени свертывания крови от содержания кортизола и альдостерона у больных гипертонической болезнью, подверженных воздействию токсических факторов // Бюллетень Волгоградского научного центра РАМН и Администрации Волгоградской области. 2011. № 3. С. 29–33.
16. Ханин Ю. Л. Исследование тревоги в спорте // Вопросы психологии. 1978. № 6. С. 94–106.
17. Янковская Л. В., Зинчук В. В., Лис М. А. Кислородно-транспортная функция крови и дисфункция эндотелия у больных со стенокардией и артериальной гипертензией // Кардиология. 2007. № 4. С. 22–27.

Сентябрь, № 6 **Медицинские науки** **2012**

УДК 616.14-089

ЭРНЕСТ АНАТОЛЬЕВИЧ ЩЕГЛОВ
кандидат медицинских наук, сердечно-сосудистый хирург, Больница скорой медицинской помощи (Петрозаводск, Российская Федерация)
esheglov@onego.ru

НАТАЛЬЯ НИКОЛАЕВНА ВЕЗИКОВА
доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой терапии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
vezikov23@mail.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ХИРУРГИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ ВАРИКОЗНОЙ БОЛЕЗНИ У ПАЦИЕНТОВ С ХРОНИЧЕСКОЙ ВЕНОЗНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТЬЮ В СОЧЕТАНИИ С ГОНАРТРОЗОМ*

Статья посвящена вопросам хирургического лечения пациентов с сочетанием варикозной болезни нижних конечностей и остеоартроза коленных суставов. Оценивались окружность голени, индекс Лекена, уровень ночной боли, шкала KOOS, данные артросонографии. На основании исследования сделан вывод об обоснованности активной хирургической тактики в данной группе пациентов.

Ключевые слова: хроническая венозная недостаточность, остеоартроз, варикозная болезнь

Значение варикозной болезни нижних конечностей и остеоартроза крупных суставов как важных медико-социальных проблем современного общества переоценить невозможно.

Неуклонный рост количества пациентов с хроническими заболеваниями вен фиксируют многочисленные эпидемиологические исследования, проведенные в различных странах. 25–33 % женщин и 10–20 % мужчин имеют формы болезни, требующие специализированного лечения [8]. По данным Боннского исследования, 32 % из 3027 обследованных пациентов имели признаки варикозной болезни [14].

В то же время самым распространенным заболеванием опорно-двигательного аппарата является остеоартроз [9]. Его манифестация обычно отмечается в возрасте старше 40 лет [7]. В России остеоартрозом крупных суставов страдают до 12 % трудоспособного населения, причем в последние годы вызванная им нетрудоспособность выросла в 3–5 раз [4]. В Карелии в последние годы отмечается непрерывный рост как общей, так и первичной заболеваемости остеоартрозом. Так, с 2000 по 2004 год первичная заболеваемость остеоартрозом в абсолютных цифрах выросла на 9,2 %, а в относительных – на 18 % [1].

В последнее время в научных публикациях большое внимание уделяется проблемам сочетания варикозной болезни нижних конечностей и остеоартроза коленных суставов.

При этом значительное внимание уделяется сочетанию хронической венозной недостаточности и гонартроза [5], [9]. Одной из ведущих причин боли у пациентов с остеоартрозом коленных суставов считается костный венозный стаз [8]. Присоединение патологии вен усугубляет клинику суставного синдрома, снижает качество жизни больных, уменьшает эффект лечебных мероприятий, применяемых при остеоартрозе коленных суставов [9], [11].

Цель работы – изучить влияние хирургического лечения варикозной болезни на проявления суставного синдрома у пациентов с сочетанием хронической венозной недостаточности и остеоартроза коленных суставов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании участвовали 95 больных, страдающих варикозной болезнью в сочетании с остеоартрозом коленных суставов, в возрасте старше 40 лет. Средний возраст пациентов – 55,4 ± 7,3 года, средняя длительность заболевания варикозной болезнью – 10,4 ± 2,5 года, остеоартрозом коленных суставов – 8,8 ± 1,4 года. 75 (78,9 %) пациентов – женщины, 20 (21,1 %) – мужчины.

Критериями исключения из исследования были:

- возраст моложе 40 лет;
- острый глубокий тромбофлебит на момент включения или перенесенный в анамнезе;
- нарушения артериального кровотока с исчезновением пульса более чем на одной из артерий стопы;
- телеангиоэктазии или ретикулярные вены (хроническая венозная недостаточность 1-го функционального класса по CEAP);
- активная трофическая язва голени (хроническая венозная недостаточность 6-го функционального класса по CEAP);
- отказ пациентов от операции или наличие сопутствующей патологии, которая не позволяла осуществить плановое хирургическое лечение;
- четвертая стадия остеоартроза коленных суставов по Kellgren – Lawrence.

© Щеглов Э. А., Везикова Н. Н., 2012

Нами была сформирована контрольная группа, которая состояла из 32 человек. В данную группу вошли пациенты, которые отказались от предложенной им операции по поводу варикозной болезни, либо те, которым из-за выраженности сопутствующей патологии, в основном ишемической болезни сердца, гипертонической болезни и хронической обструктивной болезни легких, операция не предлагалась. По всем остальным критериям, таким как возраст, распределение по половой принадлежности и средняя длительность заболевания, основная и контрольная группы были сопоставимы. Особо подчеркнем, что пациентам данной группы хирургическое лечение варикозной болезни было показано и при их согласии и отсутствии противопоказаний его следовало бы выполнить.

Диагноз варикозной болезни был выявлен при первичном осмотре и подтвержден данными триплексного сканирования вен нижних конечностей.

Степень выраженности хронической венозной недостаточности оценивалась в соответствии с классификацией CEAP. Хроническая венозная недостаточность второго функционального класса по классификации CEAP была выявлена у 53 больных (55,8 %), третьего – у 31 (32,6 %), четвертого – у 8 (8,4 %), пятого – у 3 (3,2 %). В контрольной группе эти цифры составили 16 (50 %), 11 (34,4 %), 4 (12,5 %) и 1 (3,1 %) соответственно.

Исследования проводились по стандартной методике в положении лежа и стоя, с выполнением функциональных проб [12]. При исследовании требовалось оценить состояние поверхностных, глубоких вен нижних конечностей и вен-перфорантов. Учитывались следующие параметры: проходимость, диаметр, состояние венозной стенки и функция клапанов, координаты несостоятельных клапанов, наличие крупных притоков, рефлюкс по ним, при тромбозе – уровень тромбоза, пути коллатерального оттока, для перфорантных вен – местоположение и отношение к стволу большой и малой подкожных вен.

Остеоартроз коленных суставов выявлялся по данным осмотра ревматолога или ортопеда. Стадия выраженности остеоартроза определялась в соответствии с рентгенологическими критериями артроза по Kellgren – Lawrence. Первая стадия остеоартроза была выявлена у 7 (7,4 %) больных, вторая – у 53 (55,8 %), третья – у 35 (36,8 %). В контрольной группе эти цифры составили 4 (12,5 %), 16 (50,0 %) и 12 (37,5 %) соответственно. Для подтверждения и уточнения диагноза пациентам выполнялись артросонография и рентгенография коленных суставов. Исследования проводились по стандартной методике [12].

Триплексное сканирование вен, артросонография коленных суставов выполнялись перед включением пациентов в исследование, далее через 6 и 12 месяцев после хирургического лечения. Осмотр сердечно-сосудистого хирурга проводился при первичном отборе пациентов для участия в исследовании и накануне хирургического лечения, далее через 3, 6 и 12 месяцев после операции. Осмотр ортопеда или ревматолога – перед началом исследования, через 6 и 12 месяцев после хирургического лечения. Хирургическое лечение включало в себя кроссэктомию, стриппинг ствола большой подкожной вены, надфасциальную перевязку несостоятельных перфорантных вен [3].

В послеоперационном периоде пациентам назначались флеботропные лекарственные препараты в течение 2 месяцев. Также пациенты получали рекомендации по режиму с ограничением времени нахождения в вертикальном положении, применению компрессионного трикотажа (предпочтение отдавалось чулкам или колготам 2-го функционального класса). Аналогичная консервативная терапия проводилась и пациентам контрольной группы.

После включения в исследование терапия остеоартроза включала в себя применение нестероидных противовоспалительных средств, болезнь-модифицирующих препаратов (хондроитин сульфат, глюкозамин сульфат в дозе 500 мг × 2 раза в сутки продолжительностью до 6 месяцев). Данная терапия полностью соответствовала той терапии остеоартроза, которую пациенты получали до включения в исследование.

Для оценки результатов лечения нами использовались следующие критерии:

- Для оценки отека конечности использовалось измерение окружности голеностопной области лентой, наложенной двумя петлями в виде восьмерки. Результаты этого метода, по оценкам ряда зарубежных авторов, аналогичны данным прямой волюмометрии, признанной золотым стандартом подтверждения венозной недостаточности и оценки эффективности различных методов лечения [13].
- Заполнение больным Шкалы исхода травмы и остеоартроза коленного сустава, или KOOS. Шкала заполняется самим пациентом, время заполнения – около 5 минут. Тест апробирован на пациентах в возрасте от 14 до 78 лет, доказана его высокая надежность. При оценке результатов 100 баллов соответствуют отсутствию симптомов, а 0 баллов показывают, что симптомы резко выражены [10].
- Суммарный индекс Лекена.
- Оценка болевого синдрома по ВАШ в ночное время (в мм).
- Количество больных с синовиитом по данным артросонографии коленных суставов.
- Толщина хряща коленного сустава по данным артросонографии коленных суставов.

Статистическая обработка результатов проводилась с помощью процессора Pentium с использованием пакета статистических программ Microsoft Excel, Statistica 5.0, Statplus 2007. Опре-

делялись средние величины [M ± m], достоверность средних величин по критерию Стьюдента (t), критериям Манна – Уитни для малых выборок [2], [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Всего было оперировано 95 больных с сочетанием варикозной болезни нижних конечностей и остеоартроза коленных суставов. Из них на контрольный осмотр через 6 месяцев явились 92 пациента, через 12 месяцев – 86. Через 12 месяцев пациентам было предложено оценить результаты хирургического лечения (табл. 1).

Таблица 1

Оценка пациентами результатов операции

Улучшение	Без эффекта	Ухудшение	Всего
83	3	0	86

Видно, что подавляющее большинство пациентов оценили результаты операции как «улучшение». Не было ни одного пациента, который бы оценил результаты как «ухудшение». Из 3 пациентов, которые оценили итоги как «без динамики», у двух имел место рецидив варикоза, который был связан с появлением несостоятельных перфорантных вен на месте ранее состоятельных по данным триплексного сканирования. У одной пациентки отмечено сохранение зуда, индурации и пигментации кожи голени в послеоперационном периоде.

По результатам измерения окружности голени в области лодыжек получены данные, которые представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерения окружности голени в области голеностопного сустава

Группа	До начала лечения	Через 6 месяцев	Через 12 месяцев
Клиническая	56,8 ± 2,5	50,1 ± 1,5*	49,7 ± 1,2*
Контрольная	57,4 ± 2,9	55,7 ± 2,5	54,6 ± 2.7

Примечание * – статистически достоверные различия ($p < 0,05$).

Хирургическое лечение пациентов привело к уменьшению выраженности отека, что может говорить о положительной динамике проявлений хронической венозной недостаточности. В контрольной группе также имеет место положительная динамика, что связано с приемом флеботропных лекарственных препаратов, ношением компрессионного трикотажа; ее выраженность значительно меньше.

По результатам заполнения больными шкалы KOOS получены данные, которые представлены на рис. 1.

Полученные результаты говорят о том, что после проведенного хирургического лечения больные отмечают выраженную положительную динамику состояния коленного сустава, что и проявляется ростом количества баллов по данной шкале.

Рис. 1. Результаты заполнения больными шкалы KOOS

С учетом того, что шкала KOOS имеет 5 подшкал, были проанализированы результаты по каждой отдельной подшкале (рис. 2).

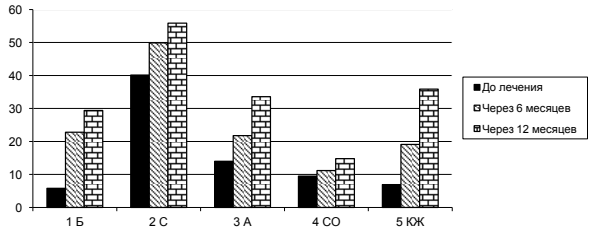


Рис. 2. Результаты заполнения больными шкалы KOOS по отдельным подшкалам: 1 Б – подшкала БОЛЬ, 2 С – подшкала СИМПТОМЫ, 3 А – подшкала АКТИВНОСТЬ ПОВСЕДНЕВНОЙ ЖИЗНИ, 4 СО – подшкала СПОРТ/ОТДЫХ, 5 КЖ – подшкала КАЧЕСТВО ЖИЗНИ

По рис. 2 видно, что пациенты отмечают положительную динамику не только в целом по результатам шкалы KOOS, но и по каждой отдельной подшкале. В контрольной группе также была получена положительная динамика, но она была значительно менее выражена.

Представляет интерес оценка выраженности проявлений гонартроза на основании подсчета индекса Лекена. Получены следующие данные (табл. 3).

Таблица 3

Выраженность проявлений гонартроза коленных суставов по данным суммарного индекса Лекена

Группа	До лечения	Через 6 месяцев	Через 12 месяцев
Клиническая (баллы)	16,3 ± 2,8	14,4 ± 2,1	10,3 ± 1,5*
Контрольная (баллы)	15,1 ± 3,1	14,3 ± 2,9	12,9 ± 2,2

Примечание. * – статистически достоверные различия ($p < 0,05$).

Можно сделать вывод, что, по данным оценки суммарного индекса Лекена, отмечается снижение выраженности проявлений остеоартроза в клинической группе не только по сравнению с исходными данными, но и с контрольной группой.

При оценке выраженности болевого синдрома ночью по шкале ВАШ получены результаты, которые приведены на рис. 3

Пациенты клинической группы отметили значительное уменьшение болевого синдрома как по сравнению с исходными данными, так и по сравнению с группой контроля.

При оценке результатов артросонографии, выполненной до операции и в послеоперационном периоде, получены следующие данные (рис. 4 и 5).

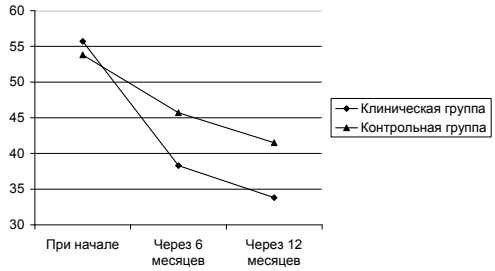


Рис. 3. Динамика ночного болевого синдрома по шкале ВАШ (мм)

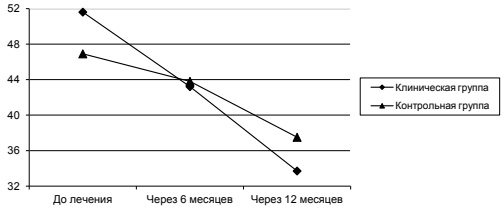


Рис. 4. Частота наличия синовита в процессе лечения (%)

По представленным данным видно, что у пациентов клинической группы отмечено значительное уменьшение частоты наличия синовита коленного сустава. Также у оперированных пациентов отмечается некоторая положительная динамика толщины хряща коленного сустава. И в том и в другом случае результаты клинической группы лучше, чем в контрольной группе пациентов.

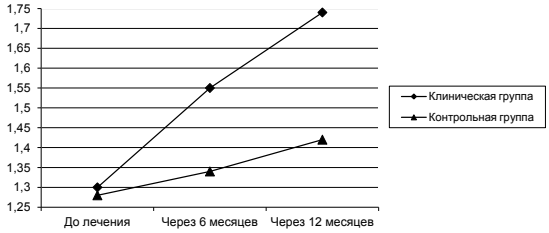


Рис. 5. Динамика толщины хряща коленного сустава (мм)

ВЫВОДЫ

1. При наличии у пациентов с сочетанной патологией показаний к хирургическому лечению варикозной болезни они подлежат операции так же, как и пациенты с изолированным поражением вен нижних конечностей.

2. Хирургическое лечение пациентов с сочетанной патологией приводит к выраженному клинико-инструментальному улучшению течения суставного синдрома.

3. При наличии показаний к операции результаты, полученные в клинической группе, превосходят результаты контрольной группы больных, которым операция не выполнялась.

4. У пациентов с сочетанием варикозной болезни нижних конечностей и остеоартроза коленных суставов активная хирургическая тактика является оправданной и способна привести к значительному улучшению состояния больных.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Везикова Н. Н., Варга О. Ю., Игнатьев В. К. Ревматология в Карелии // Научно-практическая ревматология. 2004. № 3. С. 99–101.
2. Зайцев В. М., Лифляндский В. Г., Маринкин В. И. Прикладная медицинская статистика. СПб., 2003. 429 с.
3. Константинова Г. Д., Воскресенский П. К., Гордина О. В. и др. Практикум по лечению варикозной болезни. М.: Профиль, 2006. 191 с.
4. Лучихина Л. В. Артроз. Ранняя диагностика и патогенетическая терапия. М.: Медицинская энциклопедия, 2001. 167 с.
5. Нагибин Р. М. Особенности клиники и физической реабилитации у больных с гонартрозом в сочетании с варикозной болезнью вен: Автореф. дис. … канд. мед. наук. Ярославль, 2011. 24 с.
6. Реброва О. Ю. Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ Statistica. М.: Медиа Сфера, 2006. 305 с.
7. Ревматология. Национальное руководство / Под ред. Е. Л. Насонова, В. А. Насоновой. М.: Гэотар-Медиа, 2008. 714 с.
8. Савельев В. С., Кириенко А. И., Богачев В. Ю. Хронические заболевания вен в Российской Федерации. Результаты международной исследовательской программы Vein Consult // Флебология. 2010. № 3. С. 9–12.
9. Салихов И. Г., Лапшина С. А., Мясоутова Л. И., Кириллова Э. Р., Мухина Р. Г. Остеоартроз и заболевания периферических вен нижних конечностей: особенности сочетанной патологии // Терапевтический архив. М., 2010. № 5. С. 560.
10. Шкалы, тесты и опросники в медицинской реабилитации: Руководство для врачей и научных работников / Под ред. А. Н. Беловой, О. Н. Щепетовой. М.: Антидор, 2002. 440 с.
11. Щеглов Э. А. К вопросу об оценке качества жизни больных с сочетанными заболеваниями вен и суставов нижних конечностей // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.science-education.ru/101-5481
12. Щеглов Э. А., Везикова Н. Н., Хейфец И. В., Кондричина С. Н. Ультразвуковая и рентгенологическая картина при сочетании хронической венозной недостаточности и остеоартроза коленных суставов // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2011. № 8 (121). С. 50–54.
13. Friends J., Augustine E., Danoff J. A comparison of different assessment techniques for measuring foot and ankle volume in healthy adults // J. Am. Podiatr. Med. Assoc. 2008. Vol. 98. № 2. P. 85–94.
14. Rabe E., Pannier-Fischer F., Bromen K., Schuldt K. et al. Bonn vein study by the german society of phlebology // Phlebologie. 2003. № 32. P. 1–14.

Сентябрь, № 6 **Сельскохозяйственные науки** **2012**

УДК 630*24:630*114:630*181.36

АННА ЮРЬЕВНА КАРПЕЧКО
кандидат сельскохозяйственных наук, младший научный сотрудник Института леса, Карельский научный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
yuvkarp@onego.ru

ОСОБЕННОСТИ АДАПТАЦИИ АКТИВНОЙ ЧАСТИ КОРНЕВОЙ СИСТЕМЫ ДРЕВОСТОЯ ПОСЛЕ РАЗРЕЖИВАНИЯ

Проведено исследование влияния разреживаний на водно-физические свойства и корненасыщенность почвы. Установлено, что корневые системы в технологических коридорах находятся в целом в более благоприятных температурных условиях, чем в пасеках. Выявлено, что в технологических коридорах по прошествии 14 лет после рубки наблюдается превышение плотности почвы по сравнению с естественным состоянием, что затрудняет освоение их корнями.

Ключевые слова: разреживание, корни, технологический коридор, пасека, плотность почвы, температура почвы

Разреживание древостоя является лесохозяйственным мероприятием, позволяющим увеличить количество солнечной энергии, попадающей под полог; изменить тепловой, водно-воздушный режимы почвы, которые влияют на развитие и эффективность работы корней, а также рост древостоя в целом.

Агрегатная лесозаготовительная техника, применяемая для несплошных рубок, оказывает влияние на свойства почв (плотность, влажность). Изменения и продолжительность восстановления почвенных показателей во времени обусловливают продуктивность древостоя. Таким образом, их изучение является весьма актуальным для оптимизации организационно-технических параметров разреживаний.

Работа велась на пробных площадях (ПП), заложенных в древостоях, пройденных несплошными рубками. Таксационная характеристика древостоев приведена в табл. 1. При исследовании корненасыщенности верхних горизонтов почвы использовался метод монолитов [4], отбираемых по всей площади участка в колее технологического коридора (10 точек) и пасеки (10 точек). Извлекались монолиты размером 10 х 10 х 20 см. Глубина образца составляла 20 см, что соответствует наиболее корнеобитаемому слою почвы. Из почвенного монолита (отдельно из лесной подстилки и минерального горизонта) извлекались корни древесных пород диаметром до 3 мм, высушивались до абсолютно сухого состояния и взвешивались.

Для оценки влияния плотности и влажности на корненасыщенность почвенным буром были отобраны образцы почвы ненарушенного сложения в верхних горизонтах. Исследования осуществлялись по известным методикам [2]. Измерение температуры почвы проводилось с мая до конца сентября с частотой два раза в месяц. Замеры выполнялись в технологических коридорах (10 точек) и пасеках (10 точек) на глубинах 5, 10, 15 см (всего 60 измерений на каждой пробе). Температура измерялась в верхнем 15-сантиметровом слое почвы, где наиболее ярко выражены ее сезонные изменения. Температурный режим почвы изучался в типичных для выполнения несплошных рубок еловом (ПП 6) и сосновом (ПП 3) древостоях.

Воздействие движителей заготовительной техники приводит к увеличению плотности почвы в технологических коридорах (табл. 2), где она до 22 % выше, чем в естественном состоянии (в пасеке). С увеличением промежутка времени после разреживания она несколько снижается, хотя на ее полное восстановление требуется не один десяток лет [1], [3]. Однако из табл. 2 следует, что не всегда лишь давность рубки определяет плотность почвы в технологических коридорах. На участках, где рубка была проведена 0,5–1,5 года назад, разница в плотностях почвы между коридором и пасекой практически отсутствует (табл. 2), что объясняется хорошим укреплением порубочными остатками технологических коридоров, позволившим свести до минимума негативные последствия разреживаний.

Влажность почвы в коридоре выше, чем в пасеке, в 1,03–1,3 раза, что обусловлено большим количеством осадков, попадающих в зону коридоров после разреживания, и уменьшением влагопотребления растениями в технологических коридорах вследствие снижения корненасыщенности. Однако различие во влажности почвы между коридором и пасекой в сосновых и еловых древостоях незначительное и не может вызвать существенных нарушений в работе корневых систем.

Увеличение плотности почвы и перемешивание почвенных горизонтов лесозаготовительной техникой приводят, как правило, к меньшему содержанию корней в технологическом коридоре по сравнению с пасекой (табл. 3).

Лесная подстилка наиболее сильно подвергается негативному воздействию движителей лесозаготовительной техники. Это обусловливает меньшее содержание корней в лесной подстилке технологического коридора по сравнению с подстилкой пасеки (табл. 4).

© Карпечко А. Ю., 2012

Таблица 1

Таксационная характеристика изреженных древостоев на пробных площадях

№ ПП	Тип леса	Выборка по запасу, %	Давность, лет	Состав	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Полнота	Запас, $м^3$ $га^{-1}$
Сосняки								
1	Черничный	32	14	$8С_{55}1Е1Б$	12,7	16,7	0,6	213
2	Черничный	38	10	$8С_{100}2Б+Ос$	22,0	22,0	0,7	226
3	Черничный	22	9	$8С_{85}2Б+Ос,Е$	16,0	18,0	0,8	231
4	Брусничный	30	5	$10С_{85}$	22,0	20,0	0,6	192
Ельники								
5	Черничный	43	8	$10Е_{120}+Б$	23,0	22,5	0,5	211
6	Черничный	35	2,5	$5Е_{70}2С1Б2Ос$	16,5	15,5	0,7	238
7	Черничный	40	1,5	$6Е_{150}3Е_{90}1Ос$	20,0	19,0	0,5	129
8	Черничный	80*	1	$10Е_{60}$	12,0	11,0	0,4	55

* Проведена рубка обновления, сохранен 2-й ярус и крупный подрост.

Таблица 2

Влажность и плотность верхних горизонтов почвы в коридорах и пасеках

ПП	Тип леса	Давность рубки, лет	Влажность, %		Плотность, г/см³	
			Коридор	Пасека	Коридор	Пасека
1	Сосняк черничный	14	32,5	28,9	1,21	1,10
2	Сосняк черничный	10	33,8	27,4	1,30	1,18
3	Сосняк черничный	9	27,4	23,8	0,56	0,48
4	Сосняк брусничный	5	27,1	21,4	1,38	1,31
5	Ельник черничный	8	44,2	38,8	1,49	1,22
6	Ельник черничный	2,5	58,3	54,1	1,58	1,37
7	Ельник черничный	1,5	42,8	37,8	1,22	1,17
8	Ельник черничный	0,5	43,0	41,7	0,74	0,73

Таблица 3

Масса корней диаметром до 3 мм в верхнем (20 см) слое почвы

ПП	Тип леса	Давность рубки, лет	Масса корней, т/га		
			Коридор	Пасека	Разница, %
1	Сосняк черничный	14	1,11	1,23	-10
2	Сосняк черничный	10	0,56	2,01	-72
3	Сосняк черничный	9	1,00	0,90	+11
4	Сосняк брусничный	5	1,70	2,11	-19
5	Ельник черничный	8	1,49	2,04	-27
6	Ельник черничный	2,5	0,99	1,85	-46
7	Ельник черничный	1,5	0,83	1,73	-52
8	Ельник черничный	0,5	0,65	0,96	-32

Таблица 4

Масса корней диаметром до 3 мм по почвенным горизонтам

ПП	Давность рубки, лет	Масса корней, т/га					
		Лесная подстилка			Минеральный горизонт		
		Коридор	Пасека	Разница, %	Коридор	Пасека	Разница, %
1	14	0,30	0,63	-52	0,81	0,59	+37
2	10	0,30	0,72	-58	0,26	1,29	-80
3	9	0,34	0,65	-48	0,66	0,25	+164
4	5	0,57	1,19	-52	1,13	0,92	+23
5	8	0,82	1,42	-42	0,67	0,62	+8
6	2,5	0,40	0,84	-52	0,59	1,01	- 2
7	1,5	0,23	0,70	-67	0,60	1,03	-42
8	0,5	0,24	0,41	-41	0,41	0,55	-25

Короткий промежуток времени (0,5–2,5 года) после разреживаний на еловых участках не является достаточным для полного восстановления корневой массы. Поэтому в пасеке на ПП 6, ПП 7 и ПП 8 по всему 20-сантиметровому слою почвы корней больше, чем в коридоре (табл. 4). Плотность почвы зачастую не единственный фактор, влияющий на рост корней. Так, на ПП 7 и ПП 8 в коридоре и пасеке она практически не различается. В данном случае на содержание корней, помимо чисто механических повреждений, оказывает влияние перемешивание минерального и органогенного горизонтов.

Давность рубок на сосновых участках выше, чем на еловых. Следовательно, почвы сосняков восстановились в большей степени, и по совокупности лесорастительных свойств минеральный слой почвы в коридорах сосновых древостоев имеет лучшие условия для роста корней, за исключением ПП 2. Минеральный слой почв сосновых насаждений (ПП 1, ПП 3, ПП 4) содержит больше корней в коридоре по сравнению с пасекой. На ПП 3 это выражено наиболее ярко вследствие высокой каменистости минеральных горизонтов, что усиливает конкуренцию между

корнями вследствие снижения доступного для их роста и развития объема почвы. В связи с этим корни деревьев, оставшихся после рубки, интенсивно осваивают минеральный слой почвы коридора. На других ПП масса корней в минеральном слое почвы технологического коридора больше, чем в минеральном слое пасеки, из-за некоторого вымывания из подстилки коридора питательных веществ в нижележащий горизонт вследствие несомкнутости полога крон в коридоре. Восстановление почвенного покрова, меньшая корневая конкуренция в коридоре также объясняют большую массу корней в минеральном слое почвы коридора по сравнению с минеральным слоем пасеки. Подстилка как наиболее повреждаемый в процессе рубки горизонт менее пригодна для заселения корнями древесных пород.

Поступление солнечной радиации к поверхности почвы в технологических коридорах выше по сравнению с пасеками в связи с разницей в сомкнутости полога между коридорами и пасеками. Как правило, почва технологического коридора имеет несколько большую температуру по сравнению с почвой пасеки. Это наблюдается в основном с конца мая по август включительно (табл. 5, 6). В сентябре температуры почвы коридора и пасеки в древостоях практически выравниваются вследствие снижения температуры воздуха до таких величин, когда большее поступление солнечной энергии к поверхности технологического коридора уже не нагревает почву здесь сильнее, чем в пасеке. В то же время древесный полог в пасеке препятствует охлаждению почвы, которое протекает более интенсивно в технологических коридорах.

Таблица 5

Температура почвы сосняка в технологических коридорах и пасеках на глубинах 5, 10, 15 см

Время измерения	Температура почвы, °С					
	Коридор	Пасека	Коридор	Пасека	Коридор	Пасека
	5 см		10 см		15 см	
Конец мая	8,2	7,4	7,7	7,2	7,6	7,0
Июнь	12,1	12,0	12,2	11,2	11,6	11,0
Июль	13,6	14,4	13,1	13,7	12,8	13,2
Начало августа	12,8	12,4	12,5	12,2	12,2	12,0
Конец августа	15,2	14,7	14,8	14,4	14,5	14,0
Начало сентября	12,4	12,1	12,2	11,9	11,8	11,7
Конец сентября	9,5	9,3	9,4	9,2	9,2	9,1

Несплошная рубка изменяет температурный режим почвы, так как обеспечивает увеличение светового потока к ее поверхности. В течение всего исследуемого сезона температурные показатели почвы в технологическом коридоре, как правило, превышают аналогичные для почвы пасеки. Весной почва коридора значительно быстрее прогревается и практически одинаково остывает осенью по сравнению с пасекой. Таким образом, корневые системы деревьев в технологических коридорах находятся в целом в более благоприятных температурных условиях, что способствует лучшему их росту. Вместе с тем увеличенный поток света к поверхности почвы технологического коридора после рубки, оказывающий благоприятное влияние на рост корневых систем, не может рассматриваться отдельно от негативных изменений физических свойств почвы. Однако, когда негативные последствия от проезда техники в технологическом коридоре минимизируются, можно будет говорить о положительном влиянии температур при условии сохранения повышенного солнечного потока к поверхности почв. Лесная подстилка наиболее сильно повреждается во время лесозаготовительных работ, что отражается на корнях: их масса в подстилке коридора значительно меньше, чем в подстилке пасеки. Минеральный горизонт коридора раньше «заполняется» корнями.

Таблица 6

Температура почвы ельника в технологических коридорах и пасеках на глубинах 5, 10, 15 см

Время измерения	Температура почвы, °С					
	Коридор	Пасека	Коридор	Пасека	Коридор	Пасека
	5 см		10 см		15 см	
Конец мая	7,5	6,2	6,0	5,2	5,0	4,8
Июнь	9,7	9,3	8,3	8,3	7,6	7,5
Июль	12,3	12,8	11,4	11,3	10,6	10,2
Начало августа	13,4	12,7	12,6	12,3	12,2	11,8
Конец августа	14,3	13,9	13,6	13,0	13,0	12,5
Начало сентября	11,1	10,9	10,9	10,8	10,7	10,5
Конец сентября	9,1	9,0	8,9	8,8	8,7	8,5

Соблюдение организационно-технических требований рубок (сезонность, укрепление технологических коридоров, использование подходящей для данных экологических условий лесозаготовительной техники) сводит к минимуму повреждения почвы, а следовательно, в меньшей степени нарушает функционирование корневых систем и не сокращает продуцирующую площадь насаждения на длительный срок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буш К. К., Иевинь И. К. Экологические и технологические основы рубок ухода. Рига: Зинатне, 1984. 174 с.
2. Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А. Методы определения физических свойств почв и грунтов. М.: Высш. шк., 1961. 346 с.
3. Карпечко А. Ю. Изменение плотности и корненасыщенности почв под влиянием лесозаготовительной техники в еловых лесах южной Карелии // Лесоведение. 2008. № 5. С. 66–70.
4. Орлов А. Я. Метод определения массы корней деревьев в лесу и возможность учета годичного прироста органической массы в толще лесной почвы // Лесоведение. 1967. № 1. С. 64–70.

Сентябрь, № 6 **Технические науки** **2012**

УДК 630*378.33

ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ АФОНИЧЕВ
доктор технических наук, профессор кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии лесопромышленного факультета, Воронежская государственная лесотехническая академия (Воронеж, Российская Федерация)
dmafonichev@yandex.ru

ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ ВАСИЛЬЕВ
аспирант кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии лесопромышленного факультета, Воронежская государственная лесотехническая академия (Воронеж, Российская Федерация)
vasiliev.vova2012@yandex.ru

НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ ПАПОНОВ
кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии лесопромышленного факультета, Воронежская государственная лесотехническая академия (Воронеж, Российская Федерация)
nis@vglta.vrn.ru

САМОТОРМОЗЯЩИЙСЯ ПЛОТ С ХВОСТОВЫМИ РАЗДВИЖНЫМИ СЕКЦИЯМИ

Представлена конструкция самотормозящегося плота с хвостовыми раздвижными секциями. Особенность предлагаемого плота заключается в создании раздвижными секциями необходимой силы упора при повороте плота на криволинейном участке реки для предотвращения сноса его хвостовой части к вогнутому берегу, причем при повороте налево торможение осуществляют задней левой секцией, а при повороте направо – задней правой.

Ключевые слова: плот, секция, сплав, лесоматериалы, такелажная скоба

Обеспечение безопасности плотового сплава по криволинейным участкам реки, сопровождающимся крутыми излучинами, осуществляется созданием силы упора в хвостовой части плота, которая должна быть больше всех сил, вовлекающих хвостовую часть плота в сторону вогнутого берега [1], [4]. На протяжении многих лет силу упора создавали посредством дополнительного судна, лотов и цепей-волокуш. Указанные способы трудоемкие и экономически невыгодные. Лоты и цепи-волокуши наносят большой вред экосистемам реки. С учетом этих факторов и стремления максимально уменьшить затраты на буксировку плотов по криволинейным участкам реки была разработана универсальная конструкция плота из серии самотормозящихся плотов [3], особенностью которого является раздвижение задних секций по отдельности, что дает возможность создавать определенную силу упора, обеспечивая его поворот при прохождении излучин с недостаточным радиусом закругления. Конструкция данного плота представлена на рис. 1.

Плот содержит пары секций 1, составленные из пучков лесоматериалов, соединенных продольными 2 (лежни), поперечными гибкими 3 (счалы) и жесткими 4 (брустверы) креплениями, последние и предпоследние секции 1 плота соединены между собой шарнирами 5, закрепленными на внешних углах, и такелажными скобами 6, продетыми в проушины 7, установленные на внутренних углах. Секции 1 предпоследней пары соединены между собой гибкой связью 8. В хвостовой части плота размещен поплавок 9 в виде трехгранной призмы, связанной с системой управления посредством тросовой тяги 10. На внешних бортах секций 1 последней пары установлены тормозные щиты 11, а на внутренних бортах хвостовой части – направляющие ролики 12, служащие для снижения сопротивления перемещению поплавка 9.

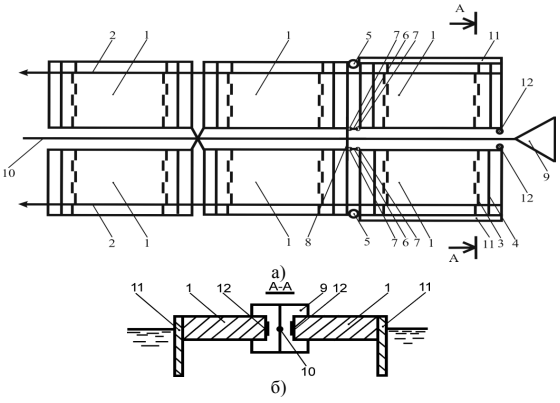


Рис. 1. Самотормозящийся плот:
а – вид сверху; б – разрез А–А

Плот работает следующим образом. При повороте на извилистом участке сплавного пути налево (рис. 2) сбрасывают усилие в продольном направлении на лежне 2 левого борта, из

© Афоничев Д. Н., Васильев В. В., Папонов Н. Н., 2012

проушин 7, установленных на внутренних углах предпоследней и последней секций 1 левого борта, вынимают такелажную скобу 6, после чего создают усилие натяжения в тросовой тяге 10. При этом поплавок 9, взаимодействуя с направляющими роликами 12, перемещается в направлении движения плота, в результате чего последняя секция 1 левого борта поворачивается вокруг шарнира 5.

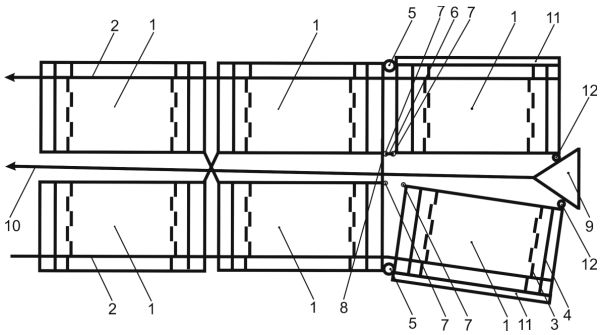


Рис. 2. Хвостовая часть плота в момент поворота налево

Сопротивление движению плота по левому борту увеличивается за счет увеличения площади миделя, то есть создается требуемая сила упора в результате поворота последней секции 1 левого борта с тормозным щитом 11 относительно шарнира 5, и плот поворачивается налево. После прохода извилистого участка сплавного пути сбрасывают усилие в тросовой тяге 10 и создают натяжение (усилие буксировки) в лежне 2 левого борта. При этом под давлением воды на тормозной щит 11, установленный на внешнем борту последней секции 1 левого борта, данная секция поворачивается вокруг шарнира 5 и возвращается в исходное положение, после чего устанавливается такелажная скоба 6. При повороте последней секции 1 левого борта под давлением воды и усилия взаимодействия с секциями 1 последней пары поплавок 9, взаимодействуя с направляющими роликами 12, перемещается в направлении, противоположном движению плота.

При повороте на извилистом участке сплавного пути направо (рис. 3) сбрасывают усилие в продольном направлении на лежне 2 правого борта, из проушин 7, установленных на внутренних углах предпоследней и последней секций 1 правого борта, вынимают такелажную скобу 6, после чего создают усилие натяжения в тросовой тяге 10. При этом поплавок 9, взаимодействуя с направляющими роликами 12, перемещается в направлении движения плота, в результате чего последняя секция 1 правого борта поворачивается вокруг шарнира 5. Сопротивление движению плота по правому борту увеличивается за счет увеличения площади миделя, то есть создается требуемая сила упора в результате поворота последней секции 1 правого борта с тормозным щитом 11 относительно шарнира 5, и плот поворачивается направо. После прохода извилистого участка сплавного пути сбрасывают усилие в тросовой тяге 10 и создают натяжение (усилие буксировки) в лежне 2 правого борта. При этом под давлением воды на тормозной щит 11, установленный на внешнем борту последней секции 1 правого борта, данная секция поворачивается вокруг шарнира 5 и возвращается в исходное положение, после чего устанавливается такелажная скоба 6. При повороте последней секции 1 правого борта под давлением воды и усилия взаимодействия с секциями 1 последней пары поплавок 9, взаимодействуя с направляющими роликами 12, перемещается в направлении, противоположном движению плота.

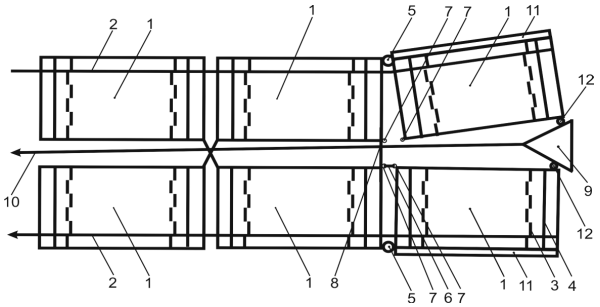


Рис. 3. Хвостовая часть плота в момент поворота направо

Для остановки плота (рис. 4) сбрасывают усилие в продольном направлении на лежнях 2 левого и правого бортов, из проушин 7, установленных на внутренних углах предпоследней и последней секций 1 левого и правого бортов, вынимают такелажные скобы 6, после чего создают усилие натяжения в тросовой тяге 10. При этом поплавок 9, взаимодействуя с направляющими роликами 12, перемещается в направлении движения плота, в результате чего секции 1 последней пары поворачиваются вокруг шарниров 5. Сопротивление движению плота увеличивается за счет увеличения площади миделя в результате поворота секций 1 последней пары, снабженных тормозными щитами 11 относительно шарниров 5, и плот останавливается. Для продолжения движения плота после остановки сбрасывают усилие в тросовой тяге 10 и создают натяжение (усилие буксировки) в лежнях 2 левого и правого бортов. При этом под давлением воды на тормозные щиты 11, установленные на внешних бортах секций 1 последней пары, данные секции поворачиваются вокруг шарниров 5 и возвращаются в исходное положение, после чего устанавливаются такелажные скобы 6. При повороте секций 1 последней пары под давлением воды и усилия взаимодействия с секциями 1 последней пары поплавок 9, взаимодействуя с направляющими роликами 12, перемещается в направлении, противоположном движению плота.

Во время движения плота по криволинейному участку реки, как правило, на его действуют:

сильное свальное течение и боковой ветер (при определенных метеорологических условиях), которые совместно сносят хвостовую часть плота к берегу. Рассмотрим случай движения плота по криволинейному участку реки. При этом обуславливаемся, что плот поворачивается вокруг вертикальной оси z, проходящей через точку крепления буксирного троса к буксировщику, а поперечные ряды секций рассматриваются как единое целое. Тогда движение плота можно описать следующими дифференциальными уравнениями [2]:

$$M_П a_X = \sum_{k=1}^{n} F_{xk}; \quad M_П a_Y = \sum_{k=1}^{n} F_{yk}; \quad I_Z \varepsilon_{\varphi_Z} = \sum_{k=1}^{n} F_{\varphi_Z k} l_{c_Z k}, \quad (1)$$

где $M_П$ – масса плота, кг; а X – мгновенное ускорение плота относительно координаты x, м/с^2; F_{xk} – присутствующие силы при перемещении относительно координаты x, Н; a_Y – мгновенное ускорение плота относительно координаты y, м/с^2; F_{yk} – присутствующие силы при перемещении относительно координаты y, Н; I_Z – момент инерции тела относительно мгновенной оси, проходящей через центр инерции, кг·м^2; $\varepsilon_{\varphi z}$ – угловые ускорения плота относительно мгновенной оси вращения, рад/с^2; $F_{\varphi zk}$ – присутствующие силы при перемещении относительно координаты z, Н; l_{czk} – плечо силы, м; n – количество сил, приложенных к плоту.

Совместное решение данных дифференциальных уравнений позволяет получить требуемую силу упора F_{Yn}, которую должна создавать раздвижная секция за счет увеличения площади миделя

$$F_{Yn} = \frac{F_c + F_{Инц} + R_в - F_{Тягу}\left(\frac{L_П}{2} + l_б\right)}{k_{ЗУ}\ \ L_П + l_б\ \ \cos\beta}, \quad (2)$$

где F_c – сила влечения плота от свального течения, Н; $F_{Инц}$ – центробежная сила инерции, Н; $R_в$ – сила, возникающая от бокового ветра, Н; $F_{Тягу}$ – сила тяги буксировщика, Н; $L_П$ – длина плота, м; $l_б$ – длина буксирного троса, м; $k_{ЗУ}$ – коэффициент запаса; β – угол, образованный вектором силы тяги с направлением перемещения центра тяжести плота.

Использование плота предложенной конструкции и выражения (2) для определения требуемой силы упора обеспечит безаварийную проводку плотов по извилистым участкам рек без привлечения автономных тормозных средств, а следовательно, позволит уменьшить затраты на сплав древесины. Это дает возможность увеличить объемы плотового сплава по труднопроходимым участкам рек и в перспективе использовать реки, где ранее проводился только молевой сплав.

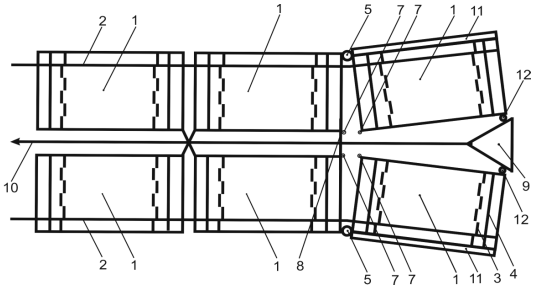


Рис. 4. Хвостовая часть плота в момент торможения

ВЫВОДЫ

1. Снижение скорости плота до скорости речного потока осуществляется за счет раздвижения двух секций одновременно, что дает возможность производить его остановку на любом участке реки при любых метеорологических условиях за короткий промежуток времени без использования автономных средств торможения.

2. Эффективность и надежность поворота плота на криволинейном участке реки обусловливается созданием требуемой силы упора раздвижными задними кормовыми секциями без использования автономных тормозных средств, причем при повороте налево торможение осуществляют задней левой секцией, а при повороте направо – задней правой, следовательно, функциональные возможности плота возрастают, а энергозатраты на буксировку уменьшаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов И. Г. Организация перевозок леса на внутренних водных путях. М.: Речной транспорт, 1959. 255 с.
2. Корпачев В. П. Общий вид дифференциальных уравнений движения лесо-транспортных единиц в водном патоке // Технология, комплексная механизация лесозаготовительных работ и транспорт леса / ЛТА. Л., 1972. С. 112–117.
3. Патент на полезную модель 99442 РФ, МПК B 63 B 35/62. Плот / Д.Н. Афо-ничев, В.В. Васильев, Н.Н. Папонов; заявитель и патентообладатель ВГЛТА. № 2010124965/11; заявл. 17.06.2010; опубл. 20.11.2010, бюл. № 32.
4. Приезжий И. И. Проблема повышения эффективности водного транспорта леса. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 296 с.

Сентябрь, № 6 **Технические науки** **2012**

УДК 630*372/375

ИГОРЬ ВЛАДИСЛАВОВИЧ ГРИГОРЬЕВ
доктор технических наук, профессор кафедры технологии лесозаготовительных производств лесоинженерного факультета, Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С. М. Кирова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
silver73@inbox.ru

ВЛАДИМИР ЯКОВЛЕВИЧ ШАПИРО
доктор технических наук, профессор кафедры высшей математики лесоинженерного факультета, Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С. М. Кирова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
unpplta@mail.ru

МАКСИМ ЕВГЕНЬЕВИЧ РУДОВ
аспирант кафедры технологии лесозаготовительных производств лесоинженерного факультета, Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С. М. Кирова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
tlzp@inbox.ru

АНТОНИНА ИВАНОВНА НИКИФОРОВА
кандидат технических наук, доцент кафедры технологии лесозаготовительных производств лесоинженерного факультета, Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С. М. Кирова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
tlzp@inbox.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПЛОТНЕНИЯ ПОЧВЫ КОМЛЯМИ ПАЧКИ ХЛЫСТОВ ПРИ ИХ ТРЕЛЕВКЕ

В статье представлена модель объемного уплотнения почвы волочащейся частью пачки трелевочной системы, позволяющая прогнозировать степень ее уплотнения в прилегающих к волокам полосах, с учетом изменчивости трассы движения трактора.

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

При анализе процессов трелевки древесины одной из основных задач является установление особенностей деформации и уплотнения почвогрунта при воздействии на него отдельных элементов трелевочной системы (ТС) – движителя, кроны деревьев, комлей и вершин хлыстов.

Одномерные модели уплотнения почвы в границах волока в результате циклического воздействия движителя ТС нашли свое применение в работах [1], [2], [3]. Объемная модель деформирования грунта [8] использована в задаче минимизации вредного воздействия движителя на почвогрунт как в границах волока, так и за его пределами в боковых полосах с целью охраны подроста и его корневой системы при многократном проходе ТС по заранее намеченным трассам волоков.

Однако в процессе трелевки точно выдержать заданное направление движения не представляется возможным, и ТС вынуждена совершать поворотные движения. Это обусловливает возникновение дополнительных касательных напряжений в направлении, перпендикулярном действию нормальной нагрузки движителя, которые оказывают разрушающее действие на почвогрунт и отрицательно влияют на ее плодородие и качественную структуру [3], [7].

Наряду с отмеченными оценками поворотного воздействия движителя представляют особый интерес исследования воздействия на почвогрунт веса пачки, в частности ее комлевой части, поскольку в этом случае возникает дополнительное уплотнение почвогрунта.

В рамках расчетной схемы воздействия комля хлыста на почвогрунт [3] с учетом оценки доли действующего объема и веса пачки деревьев [4] рассмотрим схему (рис. 1) давления на почвогрунт сосредоточенной силы $Q = P + G$, где Q – сила тяжести хлыста, $P = 0{,}3Q$ – сила тяжести хлыста, действующая на трактор, $G = 0{,}7Q$ – сила тяжести хлыста, действующая на почву при трелевке его за вершину, в результате чего часть хлыста может погружаться в почвогрунт на определенную величину первичной зоны осадки $h_о$.

На рис. 1а представлена схема погружения комлевой части хлыста 1, где обозначено: M – центр тяжести хлыста, $h_к$ – расстояние от точки 2 опоры хлыста на конике до опорной поверхности 3, L – длина хлыста, l – длина хлыста в зоне касания и погружения на глубину $h_о$.

© Григорьев И. В., Шапиро В. Я., Рудов М. Е., Никифорова А. И., 2012

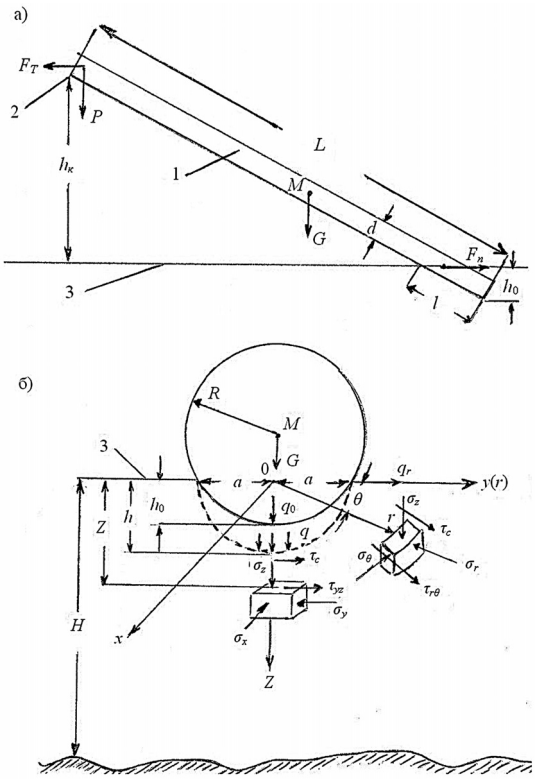


Рис. 1. Схема расчета напряжений при воздействии комля хлыста на почвогрунт: *а* – схема погружения комлевой части хлыста; *б* – схема расчета напряжений

Величина h_o на основании [6] с учетом связи условного радиуса комля, получаемого по таксационному значению диаметра ствола d, определяется в виде:

$$h_0 = \left(3^n \beta \frac{\pi h_k G}{AL\sqrt{d}}\right)^{\frac{1}{n+1,5}}, \qquad (1)$$

где коэффициент $\beta \geq 1$ представляет собой отношение величины L к максимально возможной подвешенной части длины хлыста; A и n – параметры почвогрунта и штампа весом G с пятном контакта d в степенных зависимостях $q = Ah^n$, то есть зависимостях величины давления (нагрузки) штампа q от глубины его погружения h [1], [2], [6] в пределах от 0 до глубины H зоны распространения деформаций (удаленности от твердого слоя).

На рис. 1б представлена схема расчета напряжений, возникающих в почвогрунте под действием силы G в пределах зоны деформаций H, в процессе контакта и погружения комлевой части хлыста с учетом его возможного поворота на определенный угол θ.

Действующая на грунт часть хлыста объемом в коре V_x определяется в соответствии со значениями L и d по сортиментным таблицам древостоев и в расчетах представлена как эквивалентная по объему и весу сфера радиусом $R = \sqrt[3]{\frac{0,7V_x}{\pi}}$ с центром в точке M.

Такое представление действующей части хлыста на почвогрунт позволяет использовать математическую модель деформирования среды на основе принципов механики контактного разрушения при воздействии сферического индентора радиусом R на упругое полупространство [5].

В рамках этой модели основными характеристиками процесса погружения индентора в среду являются величины контактного сближения h_o и радиуса контактной площадки $a = \sqrt{h_0 R}$, на которой действует усредненное по площади начальное равномерное давление $q_o = \frac{G}{\pi a^2} = \frac{G}{\pi h_0 R}$.

Оценим начальные параметры контакта при следующих исходных данных нагружения почвогрунта.

Трелевка одиночного хлыста осуществляется при следующих исходных данных: L = 30,5 м; d = 0,24 м; V_x = 0,65 м^3; G = 2,275 кН; $h_к$ = 1,8 м; l = 1,525 м, β = 1,05.

Почвогрунт волока является связным влажным грунтом с величиной влажности W, приблизительно равной величине предела текучести W_T [1]. Начальная плотность естественного сложения почвогрунта принимается ρ_o = 800–900 кг/м^3; модуль Юнга E = 1 МПа; величина внутреннего сцепления C = 12 кПа; угол внутреннего трения φ = 15°; несущая способность q_s = 30 кПа; коэффициент Пуассона ν = 0,25; H = 0,4 м.

В соответствии с методическими положениями [2], [6] для таких условий нагружения установлены значения коэффициентов A = 0,0564 м. е. и n = 1,0206, входящих в формулу (1), получены следующие параметры контакта:

h_o = 0,047 м; a = 0,157 м; R = 0,53 м; q_o = 41,64 кПа. (2)

Процесс деформирования почвогрунта за пределами зоны контакта глубиной h_o и радиусом a рассмотрим в декартовой системе координат, причем на элементарных площадках массива действуют напряжения (рис. 1б), определяемые в соответствии с соотношениями [5]:

а) вертикальное напряжение:

$$\sigma_z = -q_0\psi_z(r,z) = -q_0\left(\frac{z}{\sqrt{u}}\right)^3 \frac{a^2 u}{u^2 + a^2 z^2}, \qquad (3а)$$

б) горизонтальное напряжение:

$$\sigma_y = q_0\psi_y(r, z), \qquad (3б)$$

где

$$\psi_y(r,z) = \frac{1-2\nu}{3}\frac{a^2}{r^2+z^2}\left[1-\left(\frac{z}{\sqrt{u}}\right)^3\right] + \left(\frac{z}{\sqrt{u}}\right)^3 \frac{a^2 u}{u^2 + a^2 u^2} +$$
$$+ \frac{z}{\sqrt{u}}\left[\frac{(1-\nu)u}{a^2+u} + (1+\nu)arctg\left(\frac{a}{\sqrt{u}}\right) - 2\right],$$

в) тангенциальное напряжение:

$$\tau_{yz} = -q_0\psi_{yz}(r,z) = -q_0\frac{a^2\sqrt{u}z^2(r^2+z^2)}{(u+a^2)(u^2+a^2z^2)}, \qquad (3в)$$

где $\psi_z(r,z)$, $\psi_y(r,z)$ и $\psi_{yz}(r,z)$ – так называемые координатные функции, u – положительный корень квадратного уравнения $\frac{r^2}{a^2+u}+\frac{z^2}{u}=1$.

Компонента σ_x может быть определена через механизм бокового расширения грунта в виде $\sigma_x=\frac{\nu}{1-\nu}\sigma_z$.

Поскольку задача рассматривается в осесимметричной постановке, ось y может быть заменена на ось r, где r – радиальное расстояние от центра контакта до расчетной точки, то есть принимаем $\sigma_y=\sigma_r$.

Как следует из анализа соотношений (3), напряженное состояние почвогрунта зависит от координат расчетной точки и радиуса контактной площадки a, которая, в свою очередь, зависит от h_o и R.

На рис. 2 для исходных данных контакта (2) представлены зависимости изменения безразмерных функций $\psi_z(r, z)$, $\psi_y(r, z)$ и $\psi_{yz}(r, z)$ от относительной величины $\bar{h}=z/h_o$ непосредственно под сферическим индентором (r = 0). Анализ данных рис. 2 позволяет сделать ряд выводов. Во-первых, отрицательные (сжимающие) вертикальные σ_z и преимущественно положительные (растягивающие) радиальные напряжения σ_r свидетельствуют о том, что разрушение массива грунта происходит через механизм сдвига. Во-вторых, тангенциальные напряжения τ_{yz} по величине близки к нулю и слабо изменяются с глубиной по мере роста координаты z. Это означает, что компоненты σ_z, σ_y и σ_x можно принять за главные – соответственно σ_1, σ, и σ_3.

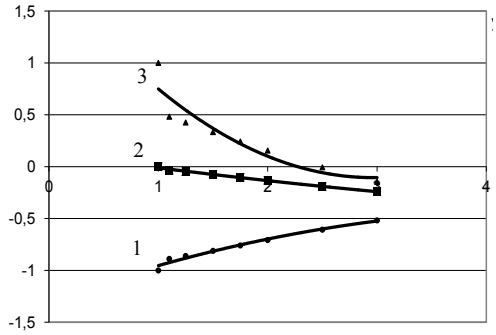


Рис. 2. Характер изменения координатных функций под сферическим индентором:
1 – $\psi_z(r, z)$, ($y = -0{,}0411x^2 + 0{,}3792x - 1{,}2919$, $R^2 = 0{,}9761$);
2 – $\psi_y(r, z)$, ($y = 0{,}2212x^2 - 1{,}3121x + 1{,}8398$, $R^2 = 0{,}8601$);
3 – $\psi_{yz}(r, z)$, ($y = 0{,}0088x^2 - 0{,}1504x + 0{,}1305$, $R^2 = 0{,}9942$)

Поскольку на почвогрунт кроме вертикальной силы G действует касательная (горизонтальная) сила F_T тяги трактора, необходимая для трелевки хлыста, то возникает сила F_n сопротивления его скольжению, в результате происходит деформация почвогрунтагрунта в направлении действия этой силы (рис. 1а). Следствием этого является формирование горизонтальных напряжений τ_c, перпендикулярных действию вертикальных напряжений σ_z и обусловливающих реализацию разрушения массива почвогрунта через механизм сдвига (рис. 1б).

Горизонтальные напряжения τ_c связаны с вертикальными σ_z обобщенным законом Кулона:

$$\tau_c=\sigma_z tg\varphi + C. \quad (4)$$

В момент отклонения ТС и, следовательно, хлыста от заданного направления движения на угол θ деформирование почвогрунта целесообразно рассмотреть в цилиндрической системе координат $zr\theta$.

Компоненты тензора напряжений в этой системе в общем случае при наличии касательных напряжений $\tau_{r\theta}$, совпадающих по направлению с действием горизонтальных напряжений τ_c, определяются соотношениями:

$$\sigma_z=\sigma_1; \qquad \sigma_r=\frac{\sigma_2+\sigma_3}{2}+\frac{\sigma_2-\sigma_3}{2}\cos 2\theta;$$
$$\sigma_\theta=\frac{\sigma_2+\sigma_3}{2}-\frac{\sigma_2-\sigma_3}{2}\cos 2\theta; \qquad \tau_{r\theta}=-\frac{\sigma_2-\sigma_3}{2}\sin 2\theta. \quad (5)$$

Из соотношений (5) следует, в частности, что при $\theta = 0$ компоненты тензора напряжений являются главными, то есть имеем:

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

Результирующая величина $\tau = \tau_c + \tau_{r\theta}$ будет характеризовать суммарные сдвиговые напряжения и в качестве критерия разрушения можно принять условие превышения величиной τ предела несущей способности почвогрунта q_s, то есть:

$$\tau \geq q^s. \quad (6)$$

Величину z, при которой выполняется условие (6), можно рассматривать в качестве предельной величины контактного сближения или максимально возможной глубины зоны осадки хлыста h_s.

Определив с помощью (3) компоненты тензора напряжений, на основании соотношений (4) и (5) вычислили суммарные сдвиговые напряжения τ, кПа в зависимости от относительной координаты $\bar{h}$ для различных значений угла поворота θ в пределах от 0 до 25°.

В результате установлено, что при трелевке одиночного хлыста по данному почвогрунту без каких-либо маневров ТС критерий разрушения сдвигом (6) за пределами контактной площадки ($\bar{h}$ = 1) не выполняется, то есть за пределами первичной зоны осадки ($z = h_o$ = 0,047 м) разрушение почвогрунта сдвигом не происходит.

В случае если наблюдаются повороты хлыста (угол θ изменяется от 10 до 25°), создаются условия для формирования дополнительной зоны осадки, глубина которой h_s увеличивается с 0,058 до 0,082 м ($\bar{h}$ изменяется от 1,25 до 1,75). Величина радиуса контактной площадки a возрастает в этом случае с 0,176 до 0,208 м.

Указанным значениям h_s в силу принятого закона изменения $q(h)$ и полученных коэффициентов A и n соответствуют величины нагрузки q на

почвогрунт от сферического индентора радиусом R в диапазоне от q = 27,3 до q = 48,33 кПа.

Обработка данных методами корреляционно-регрессионного анализа позволила с достаточно высоким коэффициентом детерминации (R^2 > 0,93) определить для трелевки одиночного хлыста зависимость τ от $\bar{h}$ с учетом углового параметра θ:

$$\tau = \lambda \bar{h}^{\eta}, \quad (7)$$

где коэффициенты λ и η являются функциями угла θ:

$$\lambda = 0{,}7605\theta + 23{,}913;\ \eta = -(0{,}0179\theta + 0{,}241). \quad (8)$$

Из соотношений (6) и (7) следует, что предельную глубину зоны осадки h_s можно определить в виде:

$$h_s = h_0\left(\frac{q_s}{\lambda}\right)^{\frac{1}{\eta}}. \quad (9)$$

Тогда величина относительного уплотнения почвогрунта в границах волока определяется как [2]:

$$\bar{\rho} = \rho/\rho_0 = \varepsilon + 1 = \frac{h_s}{H} + 1, \quad (10)$$

где ρ – достигнутая плотность грунта, ε – деформация уплотнения.

Радиальное давление q_r вдоль радиуса $r \geq a$, отсчитываемого от границы контактной площадки, описывается уравнением эллипса [5]:

$$q_r = q_0\sqrt{1-(a/r)^2}. \quad (11)$$

Как видим, на границе площадки при $r = a$ величина $q_r = 0$ и с ростом относительного расстояния r/a будет возрастать.

Предельное радиальное расстояние r_s, при котором величина q_r превысит величину несущей способности грунта q_s, можно трактовать как размер максимальной зоны уплотнения в радиальном направлении от колеи или как размер (ширину) охранной полосы корневой системы подроста или оставляемых на корню деревьев.

Таким образом получим:

$$r_S = a\sqrt{\frac{1}{\left(1-\frac{q_S^{\,2}}{q_0^{\,2}}\right)}}. \quad (12)$$

Используя соотношение (12) при исходных данных q_s = 30кПа и q_o = 41,64 кПа, установили, что для одиночного хлыста диапазон изменения r_s составляет 0,25–0,30 м.

Выполнив аналогичные расчеты для более широкого диапазона изменения угла поворота хлыста (θ = 0–45°), фиксировались предельные значения h_s, a, r_s, после чего оценивалась величина деформации уплотнения ε. На рис. 3 представлены зависимости деформации уплотнения ε и размера охранной полосы r_s от угла θ° при трелевке одного хлыста (N_x = 1) и одном двойном проходе ТС по одному и тому же волоку (N = 1).

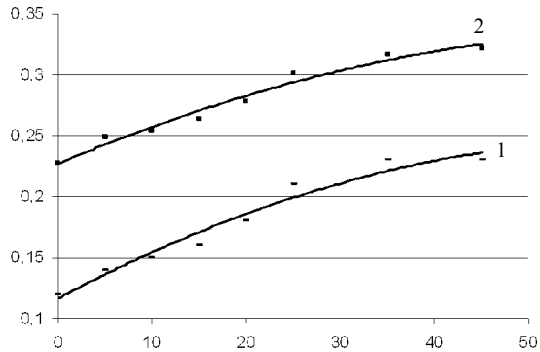


Рис. 3. Зависимость деформации уплотнения (1) и размера охранной полосы (2) от угла поворота θ

Видно, что маневры ТС существенно влияют на величину ε (диапазон изменения ε составляет от 0,12 до 0,23) и, соответственно, на величину относительного уплотнения $\bar{\rho}$, тогда как размер охранной полосы остается в более узком диапазоне r_s = 0,23–0,33 м.

Данные рис. 4 отражают характер совместного влияния цикличности и маневренности ТС на величину относительного уплотнения r. Число (N) проходов ТС по одному и тому же волоку учитывалось путем умножения расчетной величины ε на коэффициент λ_N = 1 + lg$N$ [2]. Анализ данных рис. 4 свидетельствует о значительном диапазоне изменения величины r даже при трелевке одиночного хлыста.

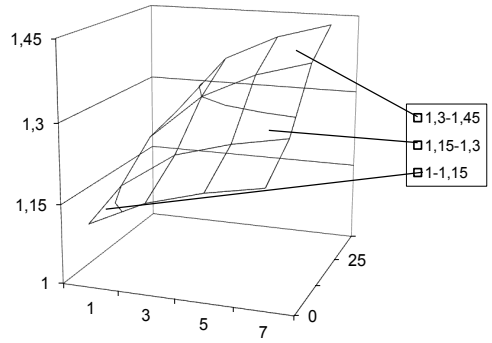


Рис. 4. Влияние угла поворота хлыста на процесс циклического уплотнения почвы

Разработанная математическая модель воздействия одиночного хлыста на почву явилась основой для расчета трелевки пачки аналогичных хлыстов в количестве N_x = 2, 3–10 штук объемом до V_x = 6,5 м³ и весом до Q = 32,5 кН (G = 22,75 кН).

Получены следующие начальные параметры контакта при значении N_x = 10:

$$h_o = 0{,}117\ \text{м};\ a = 0{,}363\ \text{м};\ R = 1{,}13\ \text{м};\ q_o = 78{,}3\ \text{кПа}, \quad (13)$$

для которых сделаны расчеты по выполнению критерия разрушения (6) на основе оценки компонент тензора напряжений (3). В конечном счете были установлены параметры уплотнения почвогрунта $\bar{\rho}$ и размеры охранной полосы r_s.

На рис. 5 представлены результаты расчетов в системе обозначений рис. 3. Абсолютные значения величины r_s существенно выросли, и диапазон их изменения составил r_s = 1,1–1,6 м. Деформация уплотнения почвогрунта ε при этом также увеличилась и достигла значения 0,8.

Влияние угла θ и параметра цикличности N на величину уплотнения почвогрунта отражено на рис. 6, где отложены значения $\bar{\rho}$ и $\theta°$ для четырех значений величины N = 1, 3, 5, 7.

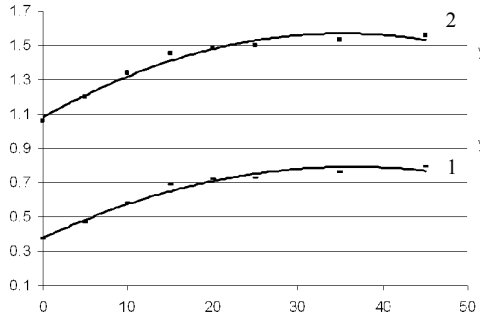


Рис. 5. Зависимость деформации уплотнения и размера охранной полосы от угла поворота пачки хлыстов

Сопоставим полученные расчетные данные с опытными значениями результатов исследования законов распределения изменения плотностей ρ почвогрунтов под движителем от естественного сложения до десятого двойного прохода ТС по волоку при трелевке пачки хлыстов длиной L = 24 м и d = 0,26 м [3].

Для участка прямолинейного движения (θ = 0°) при одном двойном проходе ТС экспериментальная плотность почвогрунта ρ возрастает с 870 до 1135 кг/м^3, то есть величина уплотнения $\bar{\rho}$ = 1,305. График 1 рис. 6 для оценки уплотнения почвы под хлыстами дает расчетное значение $\bar{\rho}$ = 1,365.

При N = 7 опытные значения плотности достигли величины ρ = 1750 кг/м^3, то есть относительное уплотнение составило $\bar{\rho}$ = 2, тогда как расчетное значение $\bar{\rho}$ = 1,68. Это позволяет заключить, что процессы уплотнения почвогрунта от нагрузки движителем и пачкой хлыстов сопоставимы и характеризуются близкими по величине параметрами относительного уплотнения $\bar{\rho}$.

Ограничивая сверху величину $\bar{\rho}$ значением 2, что означает уплотнение влажного почвогрунта на всю глубину H зоны распространения деформаций, то есть вплоть до основания твердого слоя, можно сделать вывод о том, что рост величины N диктует необходимость существенного снижения маневров ТС или соответствующего снижения веса пачки.

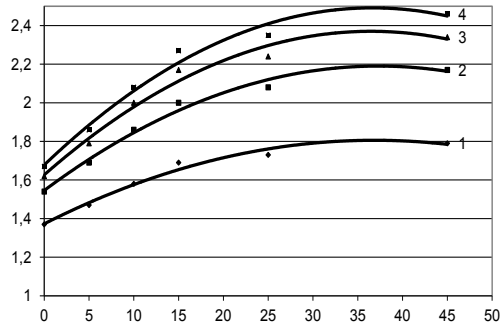


Рис. 6. Изменение $\bar{\rho}(\theta)$ в зависимости от числа N проходов ТС: 1 – один проход ТС ($y = -0{,}0006x^2 + 0{,}0444x + 1{,}6778$; $R^2 = 0{,}9815$); 2 – три прохода ТС ($y = -0{,}0006x^2 + 0{,}0408x + 1{,}6267$; $R^2 = 0{,}9797$); 3 – пять проходов ТС ($y = -0{,}0005x^2 + 0{,}0345x + 1{,}5457$; $R^2 = 0{,}9868$); 4 – семь проходов ТС ($y = -0{,}0003x^2 + 0{,}0235x + 1{,}3729$; $R^2 = 0{,}981$)

Выполнению первого условия способствует то обстоятельство, что увеличение предельной глубины зоны осадки h_s, то есть глубины образованной в процессе погружения ТС колеи, препятствует существенному отклонению ТС от заданного направления. Выполнение второго условия ограничено технологическими схемами трелевки и требует выполнения специальных исследований по оптимизации параметров ТС с учетом несущей способности почвогрунта в пределах проектных схем расположения волоков.

Обобщая установленные закономерности уплотнения почвогрунта под действием веса пачки хлыстов, можно отметить необходимость выполнения исследований по оценке предельных значений веса пачки и параметров ее трелевки по конкретным волокам, обеспечивающих в границах волока с учетом допустимых размеров охранных полос оптимальное уплотнение почвогрунта в заданных пределах.

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. Григорьев И. В., Жукова А. И., Григорьева О. И., Иванов А. В. Средощадящие технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации. СПб.: СПбГЛТА, 2008. 176 с.
4. Коротяев Л. В. Уточненная методика расчета объема пачки деревьев при трелевке // Лесной журнал. 2005. № 5. С. 91–97.
5. Морозов Е. М., Зернин М. В. Контактные задачи механики разрушения. Изд. 2-е. М.: ЛИБРОКОМ, 2010. 544 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., Лепилин Д. В., Жукова А. И. Моделирование уплотнения почвогрунта в боковых полосах трелевочного волока с учетом изменчивости трассы движения // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. № 6 (111). С. 61–64.
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.

Сентябрь, № 6 **Технические науки** **2012**

УДК 630.31

ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ СЮНЁВ
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тяговых машин лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
siounev@psu.karelia.ru

ЕЛЕНА ИГОРЕВНА РАТЬКОВА
старший преподаватель кафедры систем автоматизированного проектирования строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
ratjkova@mail.ru

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН НА ПОЧВОГРУНТЫ В МЕЖСЕЗОННЫЕ ПЕРИОДЫ*

Предложена методика и математическая модель оценки воздействия ходовой части лесозаготовительных машин на почвогрунты в межсезонные периоды (промерзания и оттаивания). Выполнена проверка адекватности модели. Приведена зависимость глубины колеи на частично промерзающих почвогрунтах от числа проходов.

Ключевые слова: почвогрунты, ходовая часть лесозаготовительных машин, глубина колеи, число проходов, уравнение Ферхюльста

В работе предлагается методика количественной оценки разрушающего воздействия лесозаготовительных машин на лесные почвогрунты с учетом их свойств в межсезонные периоды (промерзание и оттаивание). В качестве основного показателя воздействия машин на почвогрунты предлагается изменение глубины колеи в зависимости от числа проходов машины. Рассмотрены особенности влияния реологических свойств почвогрунта на процесс колееобразования. С точки зрения математического моделирования расчеты выполняются по эвристическому алгоритму [18]. Принято во внимание, что исходные данные для расчета являются приближенными, поэтому приведен анализ результатов расчетов, выполненных с учетом отклонений от истинных значений параметров математической модели. Адекватность методики подтверждена удовлетворительной согласованностью результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными в работах [8], [13].

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Воздействие колесной и гусеничной техники на почвогрунты рассматривается в большом числе работ. Однако по причине сложности объекта исследования многие практически важные вопросы требуют дальнейшего изучения. При этом наименее изученными остаются вопросы, связанные с работой лесной техники в межсезонные периоды, для которых характерна нестабильность структуры почвогрунта, связанная, в частности, с наличием частиц льда различной крупности, тиксотропными и реологическими свойствами лесных почвогрунтов. Аспекты затронутой темы рассмотрены в работах [1], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25].

Итогом деструктивного воздействия на почвогрунт являются колееобразование, уплотнение почвогрунтов, изменение их пористости, минерализация и т. д., что рассмотрено с учетом региональных почвенно-климатических условий, например, в [4], [5]. Полностью устранить деструктивное воздействие на лесные почвы и грунты невозможно. Технологии лесозаготовок и лесного хозяйства должны совершенствоваться так, чтобы обеспечивать минимально возможное разрушающее воздействие ходовой части лесозаготовительной машины (колеса или гусеницы) на лесные почвогрунты при обеспечении достаточной производительности, в том числе в межсезонные периоды. Для решения появляющихся в данной связи задач используются как экспериментальные методы, так и методы математического моделирования. Необходимость продолжения исследований данной проблемы и ее актуальность объясняются сложностью объекта исследования и недостаточной степенью адекватности известных в данной области математических моделей и методик расчета.

Цель данной работы – совершенствование методики количественной оценки деструктивного воздействия лесозаготовительных машин на лесные почвогрунты с учетом их свойств в межсезонные периоды.

Объект исследования – система «ходовая часть лесозаготовительной машины – почвогрунт».

Предмет исследования – закономерности и результат взаимодействия ходовой части лесозаготовительной машины с лесными почвогрунтами с учетом особенностей межсезонного периода.

© Сюнёв В. С., Ратькова Е. И., 2012

Подобные проблемы исследуются в работах по моделированию обработки земель сельскохозяйственного назначения. Однако прямые аналогии и заимствование методик расчета невозможно по ряду причин, которые рассмотрены, например, в статье [19]. В литературе по этой теме можно найти данные о предельных значениях плотности почвы, выше которых лесная культура развиваться не может [19]. Определение размеров данной области представляет практический интерес для обоснования как конструктивных параметров машин, так и рекомендаций по совершенствованию определенных стадий технологических процессов лесозаготовок и лесохозяйственных работ [8].

К настоящему времени создано множество математических моделей деформирования почвогрунта, предложены расчетные формулы для вычисления глубины колеи. Однако известные методики требуют, как правило, использования в качестве исходных данных множества экспериментально определяемых характеристик, что ограничивает область применения этих методик. Полностью отказаться от экспериментов, безусловно, невозможно. Достаточно подробно обсуждение появляющихся в этой связи вопросов представлено в книгах [10], [20], в статьях [1], [17] и в других работах. Авторы отмечают, что некоторые из упрощенных моделей и методов недостаточно обоснованны с физической точки зрения, имеют эмпирический характер, область их применения остается неясной. Другие методики, напротив, чрезвычайно сложны для применения в инженерной практике. В их основу положены модели с большим числом расчетных параметров, определение которых представляется не всегда возможным, а численная реализация некоторых методик выполняется по громоздким алгоритмам [12].

ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДИКА

Пусть H_0 – начальная глубина колеи, H – глубина колеи после некоторого количества проходов N. Рассматривается случай, когда почвогрунт уплотняется с увеличением числа проходов машины и величина H не может расти бесконечно. Существует предел роста для H, равный H_{max}. Если $H = H_{max}$, то скорость роста глубины колеи равна нулю. Примем во внимание, что в математических моделях многих процессов в природе и технике применяется логистическое уравнение Ферхюльста и его модификации [2], [16]. Известно множество применений логистического подхода. Однако для моделирования колееобразования данное уравнение не применялось.

Рассматривая переменную величину N как аналог времени и учитывая, что даже при однократном проходе колеса деформации почвогрунта появляются не мгновенно, запишем указанное уравнение в виде:

$$\frac{dH}{dN} = r\frac{H}{H_{max}}(H_{max} - H). \quad (1)$$

Здесь r – безразмерный параметр модели. Максимальная глубина колеи H_{max} заранее неизвестна. Чтобы исключить из рассмотрения H_{max}, введем безразмерный параметр модели $C = H_0/H_{max}$, который по физическому смыслу задачи изменяется в пределах $0 < C < 1$. Тогда решение уравнения (1) может быть представлено в виде:

$$H(N) = \frac{H_0 \exp(rN)}{1 + C(\exp(rN) - 1)}. \quad (2)$$

Для практического использования данного решения необходимо определить два параметра: r и C. Чтобы вычислить их, составим систему двух уравнений, записав выражение (2) для N = 1 и N = 2. Найдем:

$$r = \ln\frac{H_2(H_0 - H_1)}{H_0(H_1 - H_2)}. \quad (3)$$

$$C = \frac{H_0 \exp(r) - H_1}{H_1(\exp(r) - 1)}. \quad (4)$$

По физическому смыслу задачи $H_2 > H_1 > H_0 > 0$.

Исходными данными для прогнозирования глубины колеи в зависимости от числа проходов N являются: H_0 – начальная глубина колеи; H_1 и H_2 – глубина колеи соответственно при $N = 1$ и $N = 2$. Экспериментально определяемые путем несложных измерений значения H_0, H_1 и H_2 в интегральной форме учитывают влияние комплекса таких свойств почвогрунта в межсезонный период, как тиксотропность, льдистость и т. д.

Тестирование представленной модели [18] показало, что в целях обеспечения адекватности необходимо учитывать пластические свойства грунта, для чего соотношение (2) дополняется слагаемым и представляется в виде:

$$H(N) = \frac{H_0 \exp(rN)}{1 + C(\exp(rN) - 1)} + aN. \quad (5)$$

Параметр модели a характеризует сжимаемость грунта и равен увеличению глубины колеи при увеличении числа проходов N на единицу (пояснения приведены далее в решениях модельных задач).

ПРОВЕРКА ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

Для проверки адекватности модели (3)–(5) сравним результаты вычислений с независимо полученными экспериментальными данными. Алгоритм расчета весьма чувствителен к изменениям исходных величин, в связи с чем необходима достаточно высокая точность исходных данных.

Пример 1. Пусть по результатам измерений определены следующие значения: $H_0 = 4{,}0000$ см; $H_1 = 4{,}2904$ см; $H_2 = 4{,}6000$ см; $a = 0{,}01$ см. Тогда по формулам (3) и (4) находим: $r = 0{,}0757$

и C = 0,07207. Результаты дальнейших вычислений по формуле (5) представлены сплошной линией на рис. 1. Кружками на том же рисунке указаны экспериментальные данные, полученные В. К. Катаровым [8].

Указанные выше параметры модели r и C могут быть определены по экспериментальным данным с некоторыми отклонениями от их истинных значений. Рассмотрим случай, когда эти отклонения не превышают 10 %.

Влияние неточностей определения параметра r с увеличением количества проходов машины возрастает, а затем убывает, что показано на рис. 1 тонкими сплошными линиями. Влияние неточностей определения параметра C монотонно возрастает с увеличением количества проходов машины, что отражено на рис. 1 тонкими пунктирными линиями.

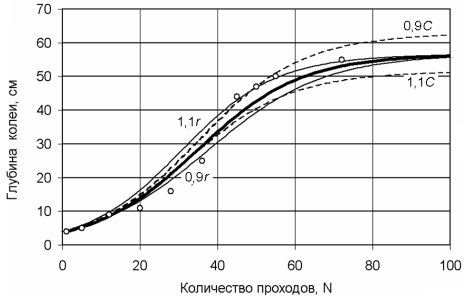


Рис. 1. Экспериментальные и расчетные значения глубины колеи H в зависимости от N

Пример 2. Пусть H_0 = 1,7100 см; H_1 = 2,2100 см; H_2 = 2,6900 см; a = 0,009 см. Тогда по формулам (3) и (4) находим: r = 0,4939 и C = 0,4195. Результаты дальнейших вычислений по формуле (5) представлены на рис. 1 сплошной линией 1. Пунктирная линия показывает результаты вычислений по формуле (2). Кружками указаны экспериментальные данные по работе [13].

Замечание 1: о влиянии корней растений и других элементов в почвогрунте

В межсезонный период в лесных почвогрунтах, помимо обычных минеральных частиц и корней растений, могут образовываться конгломераты льда. Точный учет их влияния в расчетах на изменение глубины колеи практически невозможен. Приближенно указанное влияние может быть учтено по методике, известной под названием «черный ящик» [26]. В рассматриваемом случае роль системы играет почвогрунт, а входными и выходными данными являются глубина колеи до и после прохода машины. Используя эту модель, покажем на примере, что она может применяться для приближенного расчета глубины колеи с учетом влияния находящихся в почвогрунте элементов, сопротивляющихся изменению глубины колеи.

Пример 3. Пусть H_0 = 1,4000 см; H_1 = 1,7000 см; H_2 = 1,9840 см; a = 0,008 см. Тогда находим: r = 0,4049 и C = 0,4700. Результаты дальнейших вычислений представлены сплошной линией 2 на рис. 2. Пунктирная линия представляет результаты вычислений по формуле (2). Объект исследования в примере 3 отличается от объекта исследования в примере 2 только наличием георешетки. Кружками на рис. 2 обозначены известные по работе [13] экспериментальные данные.

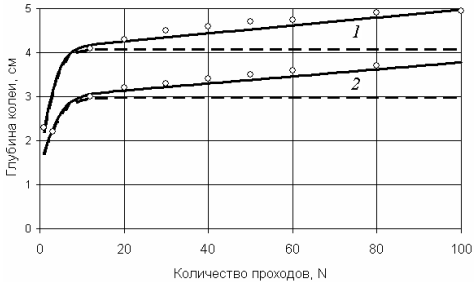


Рис. 2. Зависимость глубины колеи от числа проходов тележки по опытному участку: 1 – без георешетки; 2 – с георешеткой

В работе [13] рассмотрен вопрос применения георешеток для упрочнения лесных дорог. Георешетка повышает сопротивление материала дорожного покрытия колееобразованию. В ненарушенных (естественных) лесных почвогрунтах роль георешетки в определенной мере выполняют корни растений. Данный пример указывает на возможность применения предлагаемой методики для прогнозирования глубины колеи в лесных почвогрунтах с приближенным учетом армирующего влияния корней деревьев и других растений.

Таким образом, анализ представленных данных с учетом ранее полученных результатов [18] позволяет сделать вывод о целесообразности применения предложенной методики определения глубины колеи в зависимости от количества проходов машины. Однако для уточнения ограничений на область применения данной методики необходимо оценить влияние реологических свойств почвогрунта на изменение глубины колеи в зависимости от времени.

Аналогично в интегральной форме может быть учтено влияние крупных включений моренных грунтов.

Замечание 2: об учете реологических свойств почвогрунта

Анализ современного состояния исследований в области моделирования взаимодействия колесных и гусеничных машин с деформируемым опорным основанием приведен в работе [15]. Автором обосновано применение одного из классических подходов к исследованию реологических свойств материалов при разработке математических моделей указанного взаимодействия с целью выявления оптимальных режимов работы машин. Для описания процесса ползучести материала деформируемого основания применены простейшие соотношения нелинейной теории вязкоупругости. Данные соот-

ношения здесь не приводятся, поскольку их вид, методика решения задачи и библиография представлены в [15]. Автор отмечает, что скорость и величина деформации материала почвогрунта зависят от многих факторов: нагрузка, температура, влажность, толщина и плотность опорного слоя, параметры грунтозацепов и т. д. Для нашей работы важно заметить, что отмеченное выше влияние температуры, влажности, толщины и плотности опорного слоя прямо указывает на необходимость продолжения исследований с учетом сезонных и межсезонных почвенно-климатических особенностей.

Представляют интерес выявленные автором исследования [15] закономерности деформирования опорного основания с учетом реологических свойств почвогрунта при воздействии колесных и гусеничных машин. В частности, с использованием этих закономерностей обоснована упрощенная методика определения глубины колеи после прохода пневмоколеса по слою почвогрунта без учета сдвиговых (касательных) напряжений. Кроме того, при исследовании взаимодействия гусеничного движителя с основанием установлено, что глубина колеи существенно зависит не только от положения центра давления и почвенно-грунтовых условий, но также от особенностей конструкции гусеничного движителя и от скорости передвижения машины [15; 17–18]. Особый интерес представляют установленные взаимосвязи между развивающейся во времени деформацией и основными законами нагружения слоя опорного основания. На рис. 3 из работы [15; 12] приведены данные для воздействия трех видов: гусеничного движителя (линия 1), пневмоколеса низкого давления (линия 2), обычного пневмоколеса (линия 3).

Каждое из этих воздействий (рис. 3а) приводит к изменяющимся с течением времени деформациям (рис. 3б). Как показывает практика, при одной и той же массе машины деформации, вызванные воздействием пневмоколеса, будут больше, чем для пневмоколеса низкого давления, а деформации под пневмоколесом низкого давления будут больше, чем под гусеницами. Если же давление по площади контакта с основанием во всех трех случаях будет одинаковым, то примерно одинаковыми будут и деформации основания при $t > t_4$.

Учитывая все более широкое применение колесных лесных машин, рассмотрим более подробно воздействие пневмоколеса на почвогрунт (кривая 3 на рис. 3). Для данного случая указанные на рис. 3 характерные точки на оси абсцисс t_2, t_4 могут быть определены с использованием известных из литературных источников экспериментальных данных по значению деформаций лесных почвогрунтов [11], согласно которым значения t_2 и t_4 не превышают соответственно 1 и 2 с. Если не учитывать эти быстро исчезающие деформации, то получим кривую 4 (рис. 3б), которая соответствует рассмотренному выше решению (2) логистического уравнения (1) для приведенного примера (рис. 1). Отсюда следует ограничение на область применения данного решения: решение будет физически адекватным, если $t > t_4$, где $t_4 \approx 2$ с. Эти данные в комплексе с приведенными на рис. 1 и 2 результатами позволяют сделать следующие выводы, которые приведем с кратким их обоснованием.

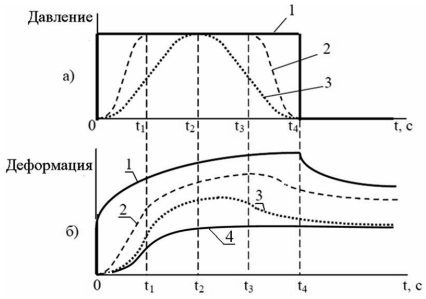


Рис. 3. Изменение во времени давления по площади контакта (а) и развитие полной деформации (б) опорного слоя [15]

ВЫВОДЫ

При воздействии ходовой части лесозаготовительной машины величина деформации почвогрунта, определенная с учетом реологических свойств, после прохода машины достаточно быстро убывает, асимптотически приближаясь к некоторому значению остаточной деформации (кривые 3 и 4 на рис. 3б). При этом характерное время стабилизации глубины колеи измеряется секундами. По этой причине реологические свойства почвогрунта необходимо учитывать прежде всего при исследовании проходимости машины. По этой же причине при оценке остаточного деструктивного воздействия движителей лесных машин на почвогрунты достаточно точные оценки прогнозируемой глубины колеи после планируемого числа проходов могут быть получены по предложенной методике. Данная методика адекватно отражает закономерности влияния количества проходов машины на глубину колеи в почвогрунтах, что подтверждается сравнением расчетных данных с независимо полученными экспериментальными данными, приведенными в работах [8] и [13].

Отличительная особенность методики заключается в том, что расчет не требует большого количества трудно определяемых исходных величин. Недостатком методики является высокая чувствительность к ошибкам округления чисел при определении параметров модели r (3) и C (4). Кроме того, методика позволяет прогнозировать влияние количества проходов машины на изменение глубины уже существующей колеи, поскольку необходимо, чтобы в формулах (2)–(5) выполнялось условие $H_0 > 0$.

Тем не менее, принимая во внимание сложность объекта исследования и недостаточную

изученность проблемы, можно сделать вывод о том, что предлагаемая методика в комплексе с другими известными моделями позволяет уточнить в интересах практики существующие представления о воздействии лесных машин на почвогрунты с учетом особенностей межсезонных периодов (промерзания и оттаивания).

В целях обеспечения оперативности при практическом применении методики целесообразно формирование региональной базы данных о свойствах лесных почвогрунтов с учетом их сезонных и межсезонных изменений. В состав этих данных необходимо ввести массив значений параметров предлагаемой модели r и C, указав их средние, минимальные и максимальные значения для различных почвогрунтов, для времени года и межсезонного периода (промерзания и оттаивания).

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А. П., Яковлев Ю. М., Лугов С. В. Прогнозирование общей глубины колеи и динамика ее развития на нежестких дорожных одеждах // Сборник научных трудов МАДИ-ГТУ. М., 2002. С. 4–13.
2. Васильев С. Б., Колесников Г. Н. Логистический подход к моделированию фракционирования сыпучих материалов // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. № 4(109). С. 61–65.
3. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высш. шк., 1979. 448 с.
4. Григорьев И. В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: Изд-во ЛТА, 2006. 236 с.
5. Григорьев И. В., Жукова А. И., Григорьева О. И., Иванов А. В. Средощадящие технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации. СПб.: Изд-во ЛТА, 2008. 176 с.
6. Дорожко А. В., Федоренчик А. С., Протас П. А. Методика лабораторных исследований вязкоупругих свойств порубочных остатков // Леса Европейского региона – устойчивое управление и развитие: Материалы конференции. Ч. 2. Минск, 2002. С. 255–257.
7. Дроздовский Г. П., Шоль Н. Р. Экологическая оценка процессов взаимодействия в системе «местность – машина» // Актуальные проблемы лесного комплекса: Сб. науч. тр. по итогам МНТК № 11. Брянск: БГИТА, 2005. С. 69–71.
8. Катаров В. К. Обоснование применимости технологических процессов лесосечных работ по степени воздействия на пути первичного транспорта леса: Автореф. дис. … канд. техн. наук. Петрозаводск, 2009. 20 с.
9. Коркин С. Н. Метод оценки конструкции внедорожных автомобилей по величине разрушающего воздействия на грунт: Автореф. дис. … канд. техн. наук. М.: МГТУ «МАМИ», 2009. 24 с.
10. Котиков В. М. Теория и конструкция машин и оборудования отрасли (колесные и гусеничные машины). Т. 1. М.: МГУЛ, 2007. 353 с.
11. Лепилин Д. В. Оценка влияния поворотов трелевочного трактора на уплотнение почвогрунтов лесосеки: Автореф. дис. … канд. техн. наук. Петрозаводск, 2011. 22 с.
12. Лугов С. В. Основные положения методики расчета глубины колеи на дорожных одеждах с асфальтобетонным покрытием: Автореф. дис. … канд. техн. наук. М., 2004. 24 с.
13. Лыщик П. А., Красковский С. В. Использование георешеток для упрочнения лесных дорог // Международная научно-техническая конференция «Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии»: Материалы конференции. Ч. 2. Минск, 2005. С. 245–247 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.kometa.by/Geotest.htm
14 Матвеенко Л. С. Автомобильные лесовозные дороги: Справочник. М.: Экология, 1991. 336 с.
15. Носов С. В. Взаимодействие колесных, гусеничных и дорожных машин с деформируемым опорным основанием: Автореф. дис. … д-ра техн. наук. СПб., 2008. 34 с.
16. Постан М. Я. Обобщенная логистическая кривая: ее свойства и оценка параметров // Экономика и математические методы. 1993. Т. 29. Вып. 2.
17. Протас П. А., Федоренчик А. С. Давление движителей трелевочных машин МТЗ на почвогрунты // Труды Белорусского государственного технологического университета. Сер. 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. Вып. 9. Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2001. С. 18–23.
18. Ратькова Е. И. Моделирование техногенного воздействия на лесные почво-грунты с учетом особенностей межсезонных периодов // «Леса России в XXI веке»: Материалы шестой междунар. науч.-техн. Интернет-конференции. Март 2011 г. СПб.: СПбГЛТА, 2011. С. 227–234.
19. Рудов С. Е. Пути исследования воздействия лесозаготовительных машин на почву при несплошных рубках // «Леса России в XXI веке». Первая междунар. науч.-практ. Интернет-конференция: Материалы конференции. СПб.: СПбГЛТА, 2009. С. 206–212.
20. Русанов В. А. Проблемы переуплотнения почв движителями и эффективность их решения. М.: ВИМ, 1998. 360 с.
21. Слюсаренко В. В., Русинов А. В., Миркин С. Н., Константинов А. И. Способ снижения отрицательного воздействия колесных энергонасыщенных тракторов на почву // Патент РФ № 2137654. B62D61/00. Опубликовано 20.09.1999.
22. Сюнёв В. С., Давыдков Г. А. Воздействие машин на лесные почвы // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. № 3. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2001. С. 77–79.
23. Сюнёв В. С., Катаров В. К., Герасимов Ю. Ю., Карвинен С. Воздействие лесозаготовительной техники на лесную среду // Актуальные проблемы лесного комплекса: Сб. науч. тр. по итогам междунар. научно-техн. конф. Брянск: Изд-во БГИТА, 2008. Вып. 21. С. 186–188.
24. Цыпук А. М., Родионов А. В. Определение глубины колеи лесных машин // Лесная промышленность. 2004. № 2. С. 21–22.
25. Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Жукова А. И. Оценка процессов деформирования почвы при циклическом уплотнении // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 2008. № 4. С. 44–51.
26. Эшби У. Р. Введение в кибернетику: Пер. с англ. М.: ЛИБРОКОМ, 2009. 432 с.

Сентябрь, № 6 **Технические науки** **2012**

УДК 624.014.074:539.4

АНАТОЛИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ РОЧЕВ
кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры, строительных конструкций и геотехники строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
metalll@bk.ru

О РАСЧЕТЕ НА ИЗГИБ НЕУПРУГИХ СОСТАВНЫХ ПЛАСТИНОК*

Рассмотрены неупругие многослойные составные пластинки, включающие в себя отдельные слои, соединенные между собой структурными связями. Использованы основные положения теории упругих составных пластинок А. Р. Ржаницына. Получено решение задачи расчета на изгиб пластинки, имеющей переменную толщину слоев и переменную жесткость связей сдвига, разную в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Получены выражения для определения эквивалентных модулей продольных деформаций в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Ключевые слова: неупругая составная пластинка, переменная жесткость связей сдвига, эквивалентные модули продольных деформаций

Исследуется поведение под нагрузкой упругопластических многослойных пластинок, имеющих слои переменной толщины, которые соединены между собой абсолютно жесткими поперечными связями и податливыми связями продольного сдвига, обладающими переменной жесткостью на сдвиг в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для материала слоев пластинки и ее связей устанавливается произвольная зависимость между деформациями и напряжением. Используется гипотеза о нелинейно-упругом материале, основанная на теореме, доказанной Л. М. Качановым [2], согласно которой при активной пластической деформации поведение упругопластического тела неотличимо от поведения нелинейно-упругого тела.

Исследование базируется на использовании основных положений теории расчета многослойных пластинок, разработанной А. Р. Ржаницыным [3]. В этой теории рассмотрены составные пластинки с упругими слоями постоянной толщины, соединенные между собой абсолютно жесткими поперечными связями и упругими продольными связями сдвига постоянной жесткости. В данной работе система дифференциальных уравнений изгиба упругих составных пластинок, полученная А. Р. Ржаницыным, заменена системой уравнений в конечных разностях, в которой учтена переменная толщина слоев, переменная жесткость продольных связей сдвига и нелинейная работа материала, как слоев, так и связей составной пластинки. Каждый k-й слой пластинки рассматривается как ортотропная пластинка. На срединную плоскость каждого слоя пластинки наложена ортогональная сетка, образованная семейством прямых линий: $x = j \cdot s_x$, $y = m \cdot s_y$, где j и m – порядковый номер прямых линий, расположенных перпендикулярно соответственно координатным осям x и y; s_x и s_y – шаг прямых линий, образующих сетку, соответственно в направлениях осей x и y. Расстояние между срединными плоскостями слоев – $c_{jm}^{(\kappa)}$. Используется метод шагового загружения конструкции [1].

Дифференциальное уравнение изгиба неупругой пластинки, состоящей из (n + 1) слоев в конечно-разностной форме для узла jm, расположенного на пересечении прямых линий, образующих сетку, с номерами j и m, на i-м шаге нагружения равномерно распределенной нагрузкой $q^{(i)}$ примет вид

$$\frac{\Delta_x^4 w_{jm}^{(i)}}{s_x^4}\sum_{\kappa=1}^{n+1} D_{xjm}^{equ(\kappa,i)} + 2\frac{\Delta_x^2(\Delta_y^2 w_{jm}^{(i)})}{s_x^2 s_y^2}\sum_{\kappa=1}^{n+1} D_{xyjm}^{equ(\kappa,i)} + \frac{\Delta_y^4 w_{jm}^{(i)}}{s_y^4}\sum_{\kappa=1}^{n+1} D_{yjm}^{equ(\kappa,i)} = q^{(i)} + \sum_{\kappa=1}^{n+1} c_{jm}^{(\kappa)}\left(\frac{\Delta_x \tau_{xjm}^{(\kappa,i)}}{s_x} + \frac{\Delta_y \tau_{yjm}^{(\kappa,i)}}{s_y}\right), \quad (1)$$

где $w_{jm}^{(i)}$ – перемещение узла jm в направлении оси z; $D_{xjm}^{equ(\kappa,i)}$ и $D_{yjm}^{equ(\kappa,i)}$ – эквивалентные цилиндрические жесткости k-го слоя пластинки в узле jm соответственно в плоскостях, параллельных плоскостям xz и yz, для расчета на i-м шаге нагружения

$$D_{xjm}^{equ(\kappa,i)} = \frac{E_{xjm}^{equ(\kappa,i)} h_{jm}^{3(\kappa)}}{12(1+\nu_{xyjm}^{equ(\kappa,i)}\nu_{yxjm}^{equ(\kappa,i)})}, \quad D_{yjm}^{equ(\kappa,i)} = \frac{E_{yjm}^{equ(\kappa,i)} h_{jm}^{3(\kappa)}}{12(1+\nu_{xyjm}^{equ(\kappa,i)}\nu_{yxjm}^{equ(\kappa,i)})}, \quad (2)$$

здесь $E_{xjm}^{equ(\kappa,i)}$, $E_{yjm}^{equ(\kappa,i)}$ и $\nu_{xyjm}^{equ(\kappa,i)}$, $\nu_{yxjm}^{equ(\kappa,i)}$ – эквивалентные модули деформаций и эквивалентные коэффициенты Пуассона в двух взаимно перпендикулярных плоскостях; $h_{jm}^{(\kappa)}$ – толщина k-го слоя составной пластинки; $D_{xyjm}^{equ(\kappa,i)}$ – эквивалентная жесткость k-го слоя составной пластинки при кручении; $\tau_{xjm}^{(\kappa,i)}$ и $\tau_{yjm}^{(\kappa,i)}$ – погонные сдвигающие усилия в k-м шве в узле jm; $\Delta_x^4 w_{jm}^{(i)}$, $\Delta_y^4 w_{jm}^{(i)}$ и $\Delta_x^2(\Delta_y^2 w_{jm}^{(i)})$ – центральные конечные разности четвертого порядка для функции $w_{jm}^{(i)}$ в узле jm.

© Рочев А. А., 2012

Вышеперечисленные эквивалентные параметры определяются по результатам расчета на (i - 1)-м шаге нагружения. Погонные изгибающие моменты в k-м слое пластинки $M_{xjm}^{(\kappa,i-1)}$ и $M_{yjm}^{(\kappa,i-1)}$, действующие соответственно в плоскостях xz и yz, проходящих через узел jm, на (i - 1)-м шаге нагружения определяются по формулам

$$M_{xjm}^{(\kappa,i-1)} = -D_{xjm}^{equ(\kappa,i-1)}\left(\frac{\Delta_x^2 w_{jm}^{(i-1)}}{s_x^2} + \nu_{yxjm}^{equ(\kappa,i-1)}\frac{\Delta_y^2 w_{jm}^{(i-1)}}{s_y^2}\right), \quad (3)$$

$$M_{yjm}^{(\kappa,i-1)} = -D_{yjm}^{equ(\kappa,i-1)}\left(\frac{\Delta_y^2 w_{jm}^{(i-1)}}{s_y^2} + \nu_{xyjm}^{equ(\kappa,i-1)}\frac{\Delta_x^2 w_{jm}^{(i-1)}}{s_x^2}\right). \quad (4)$$

Зная $M_{xjm}^{(\kappa,i-1)}$, $M_{yjm}^{(\kappa,i-1)}$ и осевые силы $N_{xjm}^{(\kappa,i-1)}$, $N_{yjm}^{(\kappa,i-1)}$, можно определить краевые относительные линейные деформации $\varepsilon_{xjm1}^{(\kappa,i-1)}$, $\varepsilon_{xjm2}^{(\kappa,i-1)}$ и $\varepsilon_{yjm1}^{(\kappa,i-1)}$, $\varepsilon_{yjm2}^{(\kappa,i-1)}$, возникающие в плоскостях, параллельных плоскостям xz и yz и проходящих через узел сетки jm. При этом используется метод Р. С. Санжаровского [6]. Слой k пластинки делится по толщине $h_{jm}^{(\kappa)}$ на $\overline{n}$ (в общем случае неравных) участков. Нормальные напряжения в k-м волокне на границе между этими смежными участками будут равны

$$\sigma_{xjmk}^{(\kappa,i-1)} = E_{xjmk}^{(\kappa,i-1)}\varepsilon_{xjmk}^{(\kappa,i-1)}, \sigma_{yjmk}^{(\kappa,i-1)} = E_{yjmk}^{(\kappa,i-1)}\varepsilon_{yjmk}^{(\kappa,i-1)}, \quad (5)$$

где $E_{xjmk}^{(\kappa,i-1)}$, $E_{yjmk}^{(\kappa,i-1)}$ и $\varepsilon_{xjmk}^{(\kappa,i-1)}$, $\varepsilon_{yjmk}^{(\kappa,i-1)}$ – модули продольных деформаций и относительные линейные деформации для k-го волокна k-го слоя пластинки.

С учетом (5) можно представить следующие равенства:

$$M_{xjm}^{(\kappa,i-1)} = \sum_{k=1}^{k=\overline{n}} A_{xjmk}^{(\kappa,i-1)}\sigma_{xjmk}^{(\kappa,i-1)}, M_{yjm}^{(\kappa,i-1)} = \sum_{k=1}^{k=\overline{n}} C_{yjmk}^{(\kappa,i-1)}\sigma_{yjmk}^{(\kappa,i-1)}, \quad (6)$$

$$N_{xjm}^{(\kappa,i-1)} = \sum_{k=1}^{k=\overline{n}} B_{xjmk}^{(\kappa,i-1)}\sigma_{xjmk}^{(\kappa,i-1)}, N_{yjm}^{(\kappa,i-1)} = \sum_{k=1}^{k=\overline{n}} F_{yjmk}^{(\kappa,i-1)}\sigma_{yjmk}^{(\kappa,i-1)}, \quad (7)$$

где $A_{xjmk}^{(\kappa,i-1)}$, $B_{xjmk}^{(\kappa,i-1)}$, $C_{xjmk}^{(\kappa,i-1)}$, $F_{xjmk}^{(\kappa,i-1)}$ – интерполяционные коэффициенты.

Принимая во внимание справедливость гипотезы прямых нормалей, из (6) и (7) определяются $\varepsilon_{xjm1}^{(\kappa,i-1)}$, $\varepsilon_{xjm2}^{(\kappa,i-1)}$ и $\varepsilon_{yjm1}^{(\kappa,i-1)}$, $\varepsilon_{yjm2}^{(\kappa,i-1)}$. Кривизна срединной поверхности в узле jm в направлениях плоскостей xz и yz с учетом влияния поперечной силы будет равна [4], [5]

$$\chi_{xjm}^{(i-1)} = -\Delta\varepsilon_{xjm12}^{(\kappa,i-1)} / h_{jm}^{(\kappa)} + \gamma_{1xjm}^{(\kappa,i-1)}\frac{\Delta_x Q_{xjm}^{(\kappa,i-1)}}{s_x}, \quad (8)$$

$$\chi_{yjm}^{(i-1)} = -\Delta\varepsilon_{yjm12}^{(\kappa,i-1)} / h_{jm}^{(\kappa)} + \gamma_{1yjm}^{(\kappa,i-1)}\frac{\Delta_y Q_{yjm}^{(\kappa,i-1)}}{s_y}, \quad (9)$$

где $\Delta\varepsilon_{xjm12}^{(\kappa,i-1)} = \varepsilon_{xjm1}^{(\kappa,i-1)} - \varepsilon_{xjm2}^{(\kappa,i-1)}$, $\Delta\varepsilon_{yjm12}^{(\kappa,i-1)} = \varepsilon_{yjm1}^{(\kappa,i-1)} - \varepsilon_{yjm2}^{(\kappa,i-1)}$; $\gamma_{1xjm}^{(\kappa,i-1)}$ – углы сдвига материала слоев составной пластинки от поперечных сил соответственно $Q_{xjm}^{(\kappa,i-1)} = 1$ и $Q_{yjm}^{(\kappa,i-1)} = 1$.

Приравняв кривизну упругопластического слоя составной пластинки кривизне упругого слоя, получаем выражения для определения эквивалентных цилиндрических жесткостей k-го слоя составной пластинки для расчета на i-м шаге загружения:

$$D_{xjm}^{equ(\kappa,i)} = -M_{xjm}^{(\kappa,i-1)} / \chi_{xjm}^{(i-1)}, \; D_{yjm}^{equ(\kappa,i)} = -M_{yjm}^{(\kappa,i-1)} / \chi_{yjm}^{(i-1)}. \quad (10)$$

Эквивалентные параметры $\nu_{xyjm}^{equ(\kappa,i)}$ и $\nu_{yxjm}^{equ(\kappa,i)}$ связаны с $E_{xjm}^{equ(\kappa,i)}$ и $E_{yjm}^{equ(\kappa,i)}$ известными зависимостями

$$\nu_{xyjm}^{equ(\kappa,i)} = \frac{1}{2} - \left(\frac{1}{2} - \nu_o^{(\kappa)}\right)\frac{E_{xjm}^{equ(\kappa,i)}}{E_o^{(\kappa)}}, \; \nu_{yxjm}^{equ(\kappa,i)} = \frac{1}{2} - \left(\frac{1}{2} - \nu_o^{(\kappa)}\right)\frac{E_{yjm}^{equ(\kappa,i)}}{E_o^{(\kappa)}}. \quad (11)$$

С учетом (2), (10) и (11) параметры $E_{xjm}^{equ(\kappa,i)}$ и $E_{yjm}^{equ(\kappa,i)}$ определяются из выражений

$$E_{xjm}^{equ(\kappa,i)} = 3(D_{xjm}^{equ(\kappa,i)} + D_{yjm}^{equ(\kappa,i)})\alpha_1 - \\ - E_o^{(\kappa)}h_{jm}^3 - E_o^{(\kappa)}\sqrt{\Psi_{xjm}^{(\kappa,i)}} / 3D_{yjm}^{equ(\kappa,i)}\alpha_2, \quad (12)$$

$$\Psi_{xjm}^{(\kappa,i)} = 6(E_o^{(\kappa)}D_{xjm}^{equ(\kappa,i)} + D_{yjm}^{equ(\kappa,i)})\alpha_1 - \\ - \{9[(D_{xjm}^{equ(\kappa,i)})^2 + (D_{yjm}^{equ(\kappa,i)})^2] + 126D_{xjm}^{equ(\kappa,i)}D_{yjm}^{equ(\kappa,i)}\}\alpha_2 - h_{jm}^3 E_o^{(\kappa)2}, \quad (13)$$

$$E_{yjm}^{equ(\kappa,i)} = 3(D_{xjm}^{equ(\kappa,i)} + D_{yjm}^{equ(\kappa,i)})\alpha_1 - \\ - E_o^{(\kappa)}h_{jm}^3 - E_o^{(\kappa)}\sqrt{\Psi_{yjm}^{(\kappa,i)}} / 3D_{xjm}^{equ(\kappa,i)}\alpha_2, \quad (14)$$

$$\Psi_{yjm}^{(\kappa,i)} = 6(E_o^{(\kappa)}D_{yjm}^{equ(\kappa,i)} + D_{xjm}^{equ(\kappa,i)})\alpha_1 - \\ - \{9[(D_{xjm}^{equ(\kappa,i)})^2 + (D_{yjm}^{equ(\kappa,i)})^2] + 126D_{xjm}^{equ(\kappa,i)}D_{yjm}^{equ(\kappa,i)}\}\alpha_2 - h_{jm}^3 E_o^{(\kappa)2}, \quad (15)$$

$$\alpha_1 = (1 - 2\nu_o^{(\kappa)}), \; \alpha_2 = (1 - 4\nu_o^{(\kappa)} + 4\nu_o^{(\kappa)2}), \quad (16)$$

где $E_o^{(\kappa)}$ и $\nu_o^{(\kappa)}$ – модуль продольных деформаций и коэффициент Пуассона, соответствующие начальной точке диаграмма материала k-го слоя.

По результатам расчета на (i - 1)-м шаге загружения погонный крутящий момент определится по формуле

$$M_{xyjm}^{(\kappa,i-1)} = -D_{xyjm}^{equ(\kappa,i-1)}\frac{\Delta_x(\Delta_y w_{jm}^{(i-1)})}{s_x s_y}. \quad (17)$$

Зная $M_{xyim}^{(\kappa,i-1)}$, определяем краевые угловые деформации $\gamma_{xyjm1}^{(\kappa,i-1)}$ и $\gamma_{xyjm2}^{(\kappa,i-1)}$ из решения системы уравнений

$$M_{xyjm}^{(\kappa,i-1)} = \sum_{k=1}^{k=\overline{n}} U_{xyjmk}^{(\kappa,i-1)}\tau_{xyjmk}^{(\kappa,i-1)}, \quad (18)$$

$$\sum_{k=1}^{k=\overline{n}} L_{xyjmk}^{(\kappa,i-1)}\tau_{xyjmk}^{(\kappa,i-1)} = 0, \quad (19)$$

где $\tau_{xyjmk}^{(\kappa,i-1)}$ – касательное напряжение кручения в k-м волокне на границе между смежными участками разбиения по толщине пластины, равное

$$\tau_{xyjmk}^{(\kappa,i-1)} = \gamma_{xyjmk}^{(\kappa,i-1)}G_{jmk}^{(\kappa,i-1)}, \quad (20)$$

здесь $G_{jmk}^{(\kappa,i-1)}$ – модуль сдвига, соответствующий $\gamma_{xyjmk}^{(\kappa,i-1)}$ на диаграмме «касательные напряжения – угловые деформации»; $U_{xyjmk}^{(\kappa,i-1)}$ и $L_{xyjmk}^{(\kappa,i-1)}$ – интерполяционные коэффициенты.

Эквивалентная жесткость при кручении для расчета на i-м шаге загружения будет равна

$$D_{xyjm}^{equ(\kappa,i)} = -M_{xyjm}^{equ(\kappa,i-1)} / \chi_{xyjm}^{(i-1)},\ \chi_{xyjm}^{(i-1)} = (\gamma_{xyjm1}^{(\kappa,i-1} - \gamma_{xyjm2}^{(\kappa,i-1}) / h_{jm}^{(\kappa)}, \quad (21)$$

где $\chi_{xyjm}^{(i-1)}$ – кривизна пластинки при кручении.

Зависимости для определения погонных сдвигающих усилий в k-м шве $\tau_{xjm}^{(\kappa,i)}$ и $\tau_{yjm}^{(\kappa,i)}$ устанавливаются на основе дифференциальных уравнений, полученных А. Р. Ржаницыным [3]. Продифференцированные уравнения разности продольных смещений по обе стороны плоскости k-го шва [3] в конечно-разностной форме с учетом разных жесткостей связей шва на продольный сдвиг $\xi_{xjm}^{(\kappa,i)}$ и $\xi_{yjm}^{(\kappa,i)}$ в направлениях, параллельных плоскостям xz и yz, примут вид

$$\frac{1}{\xi_{xjm}^{(\kappa,i)}} \cdot \frac{\Delta_x \tau_{xjm}^{(\kappa,i)}}{s_x} = c_{jm}^{(\kappa)} \frac{\Delta_x^2 w_{jm}^{(i)}}{s_x^2} + \frac{1}{E_{xjmo}^{(\kappa,i)}} [\delta(\sigma_{xjmo}^{(\kappa,i)}) - \nu_{yxjmo}^{(\kappa,i)} \delta(\sigma_{yjmo}^{(\kappa,i)})],$$

$$\frac{1}{\xi_{yjm}^{(\kappa,i)}} \cdot \frac{\Delta_y \tau_{yjm}^{(\kappa,i)}}{s_y} = c_{jm}^{(\kappa)} \frac{\Delta_y^2 w_{jm}^{(i)}}{s_y^2} + \frac{1}{E_{yjmo}^{(\kappa,i)}} [\delta(\sigma_{yjmo}^{(\kappa,i)}) - \nu_{xyjmo}^{(\kappa,i)} \delta(\sigma_{xjmo}^{(\kappa,i)})], \quad (22)$$

$$\frac{1}{\xi_{xjmo}^{(\kappa,i)}} \cdot \frac{\Delta_y \tau_{xjm}^{(\kappa,i)}}{s_y} + \frac{1}{\xi_{yjmo}^{(\kappa,i)}} \frac{\Delta_x \tau_{yjm}^{(\kappa,i)}}{s_x} = 2c_{jm}^{(\kappa)} \frac{\Delta_x (\Delta_y w_{jm}^{(i)})}{s_x s_y} + G_{xyjm}^{(\kappa,i)} \delta(\tau_{xyjmo}^{(\kappa,i)}),$$

где $\Delta_x \tau_{xjm}^{(i)}$, $\Delta_y \tau_{yjm}^{(i)}$, $\Delta_y \tau_{xjm}^{(i)}$ и $\Delta_x \tau_{yjm}^{(i)}$ – центральные конечные разности первого порядка для функций $\tau_{xjm}^{(i)}$ и $\tau_{yjm}^{(i)}$ в узле jm; $\delta(\sigma_{xjmo}^{(\kappa+1,i)}) = \sigma_{xjmo}^{(\kappa+1,i)} - \sigma_{xjmo}^{(\kappa,i)}$, $\delta(\sigma_{yjmo}^{(\kappa,i)}) = \sigma_{yjmo}^{(\kappa+1,i)} - \sigma_{yjmo}^{(\kappa,i)}$, $\delta(\tau_{xyjmo}^{(\kappa,i)}) = \tau_{xyjmo}^{(\kappa+1,i)} - \tau_{xyjmo}^{(\kappa,i)}$ – разность осевых напряжений k-го слоя в узле jm; $G_{xyjm}^{(\kappa,i)}$ – модуль сдвига в плоскости xy.

С учетом (22) система уравнений равновесия осевых сил для $(n + 1)$ слоев пластинки примет вид

$$[\xi_{yim}^{(\kappa,i)} E_{xjmo}^{(\kappa)} \frac{\Delta_x^2 \tau_{xjm}^{(\kappa,i)}}{s_x^2} + \xi_{xjm}^{(\kappa,i)} E_{yjmo}^{(\kappa)} \nu_{yxjmo}^{(\kappa,i)} \frac{\Delta_x (\Delta_y \tau_{yjm}^{(\kappa,i)})}{s_x s_y} -$$

$$- \xi_{xjm}^{(\kappa,i)} \xi_{yjm}^{(\kappa,i)} c_{jm}^{(\kappa)} (E_{xjmo}^{(\kappa)} \frac{\Delta_x^3 w_{jm}^{(i)}}{s_x^3} -$$

$$- \nu_{yxjmo}^{(\kappa,i)} E_{yjmo}^{(\kappa)} \frac{\Delta_y^3 w_{jm}^{(i)}}{s_y^3})] / \xi_{xjm}^{(\kappa,i)} \xi_{yjm}^{(\kappa,i)} (1 - \nu_{xyjmo}^{(\kappa,i)} \nu_{yxjmo}^{(\kappa,i)}) - \quad (23)$$

$$- (\xi_{yjm}^{(\kappa,i)} \frac{\Delta_y^2 \tau_{xjm}^{(\kappa,i)}}{s_y^2} - \xi_{xjm}^{(\kappa,i)} \frac{\Delta_x (\Delta_y \tau_{yjm}^{(\kappa,i)})}{s_x s_y} -$$

$$- 2\xi_{xjm}^{(\kappa,i)} \xi_{yjm}^{(\kappa,i)} c_{jm}^{(\kappa)} \frac{\Delta_x (\Delta_y^2 w_{jm}^{(i)})}{s_x s_y^2}) / \xi_{xjm}^{(\kappa,i)} \xi_{yjm}^{(\kappa,i)} G_{xyjmo}^{(\kappa,i)} +$$

$$+ \frac{\tau_{xjm}^{(\kappa+1,i)}}{h_{jm}^{(\kappa+1)}} - \left(\frac{1}{h_{jm}^{(\kappa+1)}} + \frac{1}{h_{jm}^{(\kappa)}} \right) \tau_{xjm}^{(\kappa,i)} + \frac{\tau_{xjm}^{(\kappa-1,i)}}{h_{jm}^{(\kappa)}} = 0,$$

$$[\xi_{xjm}^{(\kappa,i)} E_{yjmo}^{(\kappa,i)} \frac{\Delta_y^2 \tau_{yjm}^{(\kappa,i)}}{s_y^2} + \xi_{yjm}^{(\kappa,i)} E_{xjmo}^{(\kappa)} \nu_{xyjmo}^{(\kappa,i)} \frac{\Delta_x (\Delta_y \tau_{xjm}^{(\kappa,i)})}{s_x s_y} -$$

$$- \xi_{xjm}^{(\kappa,i)} \xi_{yjm}^{(\kappa,i)} c_{jm}^{(\kappa)} (\nu_{xyjmo}^{(\kappa,i)} E_{xjmo}^{(\kappa,i)} \frac{\Delta_x^3 w_{jm}^{(i)}}{s_x^3} -$$

$$- E_{yjmo}^{(\kappa)} \frac{\Delta_y^3 w_{jm}^{(i)}}{s_y^3})] / \xi_{xjm}^{(\kappa,i)} \xi_{yjm}^{(\kappa,i)} (1 - \nu_{xyjmo}^{(\kappa,i)} \nu_{yxjmo}^{(\kappa,i)}) - \quad (24)$$

$$- (\xi_{xjm}^{(\kappa,i)} \frac{\Delta_x^2 \tau_{yjm}^{(\kappa,i)}}{s_x^2} + \xi_{yjm}^{(\kappa,i)} \frac{\Delta_x (\Delta_y \tau_{xjm}^{(\kappa,i)})}{s_x s_y} -$$

$$- 2\xi_{xjm}^{(\kappa,i)} \xi_{yjm}^{(\kappa,i)} c_{jm}^{(\kappa)} \frac{\Delta_x^2 (\Delta_y w_{jm}^{(i)})}{s_x^2 s_y}) / \xi_{xjm}^{(\kappa,i)} \xi_{yjm}^{(\kappa,i)} G_{xyjmo}^{(\kappa,i)} +$$

$$+ \frac{\tau_{yjm}^{(\kappa+1,i)}}{h_{jm}^{(\kappa+1)}} - \left(\frac{1}{h_{jm}^{(\kappa+1)}} + \frac{1}{h_{jm}^{(\kappa+1)}} \right) \tau_{yjm}^{(\kappa+1,i)} + \frac{\tau_{yjm}^{(\kappa-1,i)}}{h_{jm}^{(\kappa)}} = 0,$$

где $\Delta_x^2 \tau_{xjm}^{(i)}$, $\Delta_y^2 \tau_{yjm}^{(i)}$, $\Delta_y^2 \tau_{xjm}^{(i)}$, $\Delta_x^2 \tau_{yjm}^{(i)}$, $\Delta_x (\Delta_y \tau_{xjm}^{(i)})$ и $\Delta_x (\Delta_y \tau_{yjm}^{(i)})$ – центральные конечные разности второго порядка для функций $\tau_{xjm}^{(i)}$ и $\tau_{yjm}^{(i)}$ в узле jm; $E_{xjmo}^{(\kappa,i)}$, $E_{yjmo}^{(\kappa,i)}$, $\nu_{xyjmo}^{(\kappa,i)}$, $\nu_{yxjmo}^{(\kappa,i)}$, $G_{xyjmo}^{(\kappa,i)}$ – соответственно модули продольной упругости, коэффициенты Пуассона и модуль сдвига для осевых волокон k-го слоя в узле jm.

Совместное решение (1), (23) и (24) с учетом граничных условий позволяет решить задачу определения напряженно-деформированного состояния при изгибе многослойной составной пластинки за пределами упругости.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер И. А. Общие алгоритмы решения задач теории упругости, пластичности и ползучести // Успехи механики деформируемых сред. М.: Наука, 1975. С. 61–73.
2. Качанов Л. М. Теория ползучести. М.: Физматгиз, 1960. 455 с.
3. Ржаницын А. Р. Составные стержни и пластинки. М.: Стройиздат, 1986. 314 с.
4. Рочев А. А. Исследование несущей способности сквозных упругопластических статически неопределимых рам переменного сечения // Труды молодых ученых: В 3 ч. Ч. 1. СПб.: СПбГАСУ, 2000. С. 187–192.
5. Рочев А. А. Алгоритм расчета арочной конструкции из составных упругопластических элементов // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2008. № 3 (94). С. 13–15.
6. Санжаровский Р. С. Устойчивость элементов строительных конструкций при ползучести. Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. 280 с.

Сентябрь, № 6 **Технические науки** **2012**

УДК 697.1

БОРИС НИКОЛАЕВИЧ ЯГНЮК
кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры, строительных конструкций и геотехники строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
yagnyuk@psu.karelia.ru

KEY NUMBER PARAMETERS FOR EVALUATION OF BUILDINGS ENERGY EFFICIENCY*

Key Number Method for quick evaluation of energy conservation measures worked out by Norwegian Company ENSI is presented. For further development and usage of this method in Russia parameters for main types of buildings in 10 different regions were calculated and collected.

Key words: Energy conservation, key number method, reference buildings, climatic data

INTRODUCTION

To develop energy efficiency of buildings several alternative solutions should be compared, and the corresponding energy consumption should be calculated. For detailed energy calculations several computer programs are available, however, they usually require large quantities of input data. To carry out all necessary calculations and to conduct results' evaluation from the point of an optimal solution require a lot of time.

The Norwegian company ENSI has developed the "Key Number Method" for quick energy calculations, dealing with design of new buildings, buildings' renovation, and implementation of energy conservation measures in existing buildings.

Based on the Key Number Method, the company has developed the user-friendly Key Number Software to assist engineers and technicians in quick calculations of the energy profile of new and existing buildings. The Key Number Software is partly based on results from advanced computer simulations and partly on experience and measurements from real projects. ENSI has essentially reduced the number of input values and focuses on the most important parameters dependent on major, alternative, energy efficient solutions/measures.

KEY NUMBERS

The key numbers are presented in both standard energy and power demand budgets, as well as in a more detailed form in the software.

The following energy and power demand budget comprise the key numbers for office buildings in Oslo (table 1).

The annual energy consumption [kWh/year] and specific, annual energy consumption, [kWh/m^{2}year] (per m^2 heated area) are given for each budget item, as well as total and specific power demand (kW and W/m^2). In this way, different buildings can be compared, and the energy efficiency of a building can undergo a preliminary evaluation comparing its energy consumption with the key numbers.

The key numbers based on specific energy consumption provide a direct expression of the energy efficiency of the building, similar to the expenditure of petrol per km indicative of vehicles' energy efficiency.

Table 1

Office building data for Oslo (Norway) according to different codes

Budget item	«Older» buildings		Building codes 1987		Building codes 1997	
	[kWh/m² yr]	[W/m²]	[kWh/m² yr]	[W/m²]	[kWh/m² yr]	[W/m²]
1. Heating	94	52	62	39	44	31
2. Ventilation	32	42	35	48	24	33
3. Domestic Hot Water	10	6	10	6	10	5
4. Fans and pumps	17	6	21	8	17	5
5. Lighting	32	16	32	16	26	13
6. Various	24	14	24	14	24	14
7. Cooling	4	15	4	15	4	15
Total	213		188		149	

Key Numbers for new buildings provide guideline values for buildings under construction according to the latest building codes and standards, including energy efficient solutions.

DETAILED KEY NUMBERS

For quick calculations of energy consumption by an individual building, the detailed Key Number Method is used in design of new buildings, buildings' renovation, and implementation of energy conservation measures in existing buildings.

Key Number Method focuses on the most important parameters influencing energy consumption. Based on a set of the countries' unique input values such as reference values, guideline values for energy consumption, and power demand, the energy consumption can be determined. These input values are given for different types of buildings and climatic zones.

According to Table 1, the key number for heating an office building, according to the building codes of 1987, is 62 kWh/m^{2}year. This corresponds with line "1. Heating" in Table 2 for comprehensive key numbers.

© Ягнюк Б. Н., 2012

Table 2

Key numbers for an office building in Oslo (Norway)

Parameter	Reference	Condition	Before ENCON	Sensitivity [kWh/m² yr]	ENCON measure	After ENCON
1. HEATING			62 kWh/m²yr			
U-wall	0,30 W/m²K	0,3	0	+ 0,1 W/m²K = + 6,6	0,3	0
U-window	2,40 W/m²K	3,0	8,9	+ 0,1 W/m²K = + 1,5	1,3	-25,3
U-roof	0,20 W/m²K	0,6	6,8	+ 0,1 W/m²K = + 1,7	0,6	0
U-floor	0,30 W/m²K	0,3	0	+ 0,1 W/m²K = + 1,7	0,3	0
Form-factor	0,36	0,36	0	+ 0,1 = + 9,0	0,36	0
Window area	15 %	15 %	0	+ 1 % = + 1,7	15 %	0
Total solar gain	0,55	0,55	0	+ 0,1 = - 1,5	0,55	0
Infiltration	0,25 h⁻¹	0,3	5,7	+ 0,1 h⁻¹ = + 11,3	0,3	0
Lighting	16 W/m²	16	0	+ 1 W/m² = - 0,7	16	0
Various equipment	11 W/m²	11	0	+ 1 W/m² = - 0,7	11	0
Sum 1			83,4			
Net room height	3,2 m	3,2 m	0	+ 10 % = + 7 % of sum 1		
Sum 2			83,4			
Indoor temperature	21 ºC	24	17,8	+ 1 ºC = + 7 % of sum 2	21	-17,8
Distribution system	98 %	98 %	0	+ 1 % = - 1 % of sum 2	98 %	0
Automatic control	Modern	Modern	0	Poor = + 3 % of sum 2 Manual = + 5 % of sum 2	Modern	0
Temperature set back	Yes	No	5,8	No = + 7 % of sum 2	Yes	-5,8
Sum 3			107,0			
O&M / Energy management	98 %	93	5,4	+ 1 % = - 1 % of sum 3	98	-5,4
Sum 4			112,4			58,1
Energy supply efficiency	100 %	100 %	0	+ 1 %= - 1 % of sum 4	100 %	0
1. Heating corrected			112,4			58,1

The most important "Parameters" influencing the energy demand for heating are listed in the first column. For each parameter "Reference" values are given. In this example the reference values are presented for office buildings according to the Norwegian building codes of 1987. With these reference values and climatic data for Oslo, the energy demand for heating is 62 kWh/m²year.

Existing "Conditions" for the building to be calculated are shown in the next column. If the existing condition is different from the reference value, the changes in energy consumption are calculated by the "Sensitivity", and results are listed in the column "Before ENCON" (ENCON – ENergy CONservation).

By describing alternative solutions or energy conservation measures in the column "ENCON measure," corresponding savings are calculated by the sensitivity, and results are listed in the column "After ENCON". The Key Number Software is a suitable tool to make these calculations quick and easy.

There are similar tables for each budget item in the total energy budget (Heating, Ventilation, Domestic hot water, etc.) presented in the software. Also detailed worksheets for each type of buildings are presented in the software.

Key numbers are based on some given conditions, or reference values (i.e. u-values, ventilation rates, operating periods, internal heat loads, efficiency factors, etc.). The reference values are partly based on national building codes and standards, partly on experience data from various projects, and partly on evaluations of what should be considered as profitable energy efficient solutions for the actual type of a building.

The Key Number Method is useful in the following cases:

- Establishing energy and power demand budgets;
- Performing energy evaluations of new or existing buildings;
- Calculating savings from alternative solutions/ ENCON measures.

The standard input values for all parameters (reference values) are included as default in the software, therefore energy calculations can be performed very quickly with the Key Number Software. The energy

calculations are made by changing only those values which are different from the standard input values.

The software can be used at various stages of a project. At the beginning preliminary calculations based on changes of the most important parameters provide engineers with the energy profile of the building. As the project develops, and information on the other parameters is defined, the software can also aid the user in more detailed calculations.

The key numbers do not replace advanced computer-based energy evaluations during detailed energy simulations and studies of alternative solutions. However, they can be used as an important tool at various stages of the project.

COUNTRIES' UNIQUE KEY NUMBERS

The philosophy behind the Key Number Method is that each building category has an energy signature or profile – based on the type of construction, technical installations, user patterns, etc. – described by reference values built into the software.

While determining key numbers for different countries, the decision must be made about the number of different types of buildings available in the software, as well as the reference values for each of them.

Usually they are calculated for the following types of buildings according to the algorithm worked out by ENSI Company:

- Office buildings;
- Hospitals;
- Schools;
- Universities;
- Kindergartens;
- Apartments;
- Single family houses;
- Multi-family houses;
- Warehouses (indoor temperature 15 °C).

According to the period of construction in Norway three levels of key numbers for each mentioned above types of buildings have been developed:

- Old buildings (designed before the year of 1987);
- Buildings designed according to codes of the year 1987;
- Buildings designed according to codes of the year 1997.

In addition to national reference values, local weather data are used to create country unique key numbers. In the Norwegian version 45 climatic zones are included in the software based on monthly climatic data.

The Norwegian authorities have selected the Key Number Method and the Key Number Software as the official tools to be used by Norwegian energy advisors, engineers, regional energy efficiency centres, etc.

RUSSIAN VERSION OF KEY NUMBERS

The author of this paper worked with the Company ENSI in order to prepare the Russian version of key numbers for the types of buildings mentioned above. Ten regions in different parts of Russia were selected for such kinds of buildings: Arkhangelsk, Belgorod, Moscow, Murmansk, Nizhniy Novgorod, Petrozavodsk, Saratov, St. Petersburg, Vladivostok, Volgograd. For all these cities and types of buildings mentioned above parameters were calculated and climatic data were collected. Using these data and a special algorithm the ENSI Company generated key numbers for the Russian version of the software. Table 3 presents the fact data for an office building in Petrozavodsk (Russia) considered as reference values for a building of this type.

Table 3

Office building data for key number parameters in Petrozavodsk

Parameter	Older	1996	2000
Heating			
U-wall W/m²K	1,3	0,66	0,55
U-window W/m²K	2,6	2,5	2,3
U-roof W/m²K	1,0	0,45	0,40
U-floor W/m²K	1,0	0,45	0,40
Window area %	18	18	18
Total solar gain %	0,60	0,60	0,55
Infiltration h-1	0,30	0,30	0,30
Lighting W/m²	10	10	10
Various equip. W/m²	5	5	5
People W/m²	4	4	4
Indoor temp. ºC	18	18	18
Distribution syst. %	97	97	97
Automatic control	97	97	97
Temp. set back %	-7	-7	-7
Common Parameters			
O&M / EM %	98	98	98
Energy supply efficiency %	98	98	98

Parameter	Older	1996	2000
Ventilation			
Operating per. h/week	55	55	55
Ventilation rate m³/hm²	8	8	8
Design indoor temp. ºC	18	18	18
Heat exchanger %	50	50	50
Automatic control %	98	98	98
Hot water			
Sanitary install. l/m²	150	150	150
Kitchen l/m²	250	250	250
Distribution system %	98	98	98
Automatic control %	98	98	98
Fans and pumps			
Operating per. h/week	55	55	55
Fans W/m²	6	6	6
Pumps, h & v W/m²	0,2	0,2	0,2
Pumps, cooling W/m²	0	0	0
Lighting			
Utilisation per. h/week	40	40	40
Simultaneous power W/m²	10	10	10
Various			
Utilisation per. h/week	35	35	35
Simultaneous power W/m²	5	5	5

Table 3 is just an example of different data calculated and collected for one city and one type of buildings. Additional information includes design temperature and solar radiation of the building at that place. Such data has been prepared for all types of the buildings mentioned above for every city under consideration.

Actually, we have prepared research results for reference buildings of different types – the problem has been set for the state members of the European Union in the following documents:

- Directive 2002/91/EU of the European Parliament and of the Council [1];
- Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council [2];
- Regulations No 244/2012 on the energy performance of buildings [3].

In these documents a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and building elements were established.

It reads: "Member States shall establish reference buildings for the following building categories:

1. Single-family buildings;
2. Apartment blocks and multifamily buildings;
3. Office buildings.

In addition to office buildings, Member States shall establish reference buildings for other non-residential building categories listed in Annex I paragraph (5) from (d) up to (i), to Directive 2010/31/EU for which specific energy performance requirements exist".

CONCLUSIONS

Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of Eco design requirements for energy-related products provides for the establishment of minimum energy performance requirements for such products. And Commission Delegated Regulations (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 establishes a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for new and existing buildings and building elements. To use this methodology it is necessary to establish reference buildings for different building categories and fix average and economic data from energy conservation point of view. This task is not obligatory for our country because Russia is not a member of EU. But we made an attempt to solve this problem for some regions of the Russian Federation with the help of Key Number Method aimed to use advanced methods in energy conservation suggested by the European Union.

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

REFERENSES

1. Directive 2002/91/EU of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings // Official Journal of the European Union. Brussels: L 1, 4.1. 2003. P. 65–85.
2. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on energy performance of buildings // Official Journal of the European Union. Brussels: L 153, 2010. P. 13–33.
3. Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 // Official Journal of the European Union. Brussels: L 81, 2012. P. 18–36.

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ПЕТРОЗАВОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Сентябрь, № 6 **Физико-математические науки** **2012**

УДК 547.551+544.142.3+544.182.22

ВЛАДИМИР ПЕТРОВИЧ АНДРЕЕВ
доктор химических наук, профессор кафедры молекулярной биологии, биологической и органической химии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
andreev@psu.karelia.ru

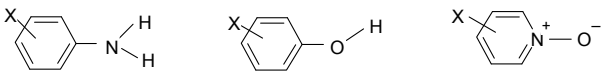
ГИБРИДИЗАЦИЯ АТОМОВ АЗОТА В АНИЛИНАХ И ИХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КОМПЛЕКСАХ С V-АКЦЕПТОРАМИ*

На основе анализа данных Cambridge Structural Database относительно структуры анилинов и их молекулярных комплексов n,v-типа показано, что гибридизация атома азота в них зависит от электронных свойств заместителей в ароматическом кольце, силы кислоты Льюиса, пространственной доступности атома азота (прочности донорно-акцепторной связи) и агрегатного состояния соединений.

Ключевые слова: гибридизация, координация, анилины, электронные и стерические факторы, рентгеноструктурный анализ

Согласно данным спектроскопии ЯМР ^{1}H и рентгеноструктурного анализа (РСА), пространственное строение и состояние гибридизации (sp^2 – sp^3) атома кислорода в молекулярных комплексах N-оксидов пиридинов и хинолинов с v-акцепторами зависит как от природы нуклеофила и акцептора, так и от агрегатного состояния исследуемых соединений [1], [2], [3]. В растворах вероятность $sp^2 \rightarrow sp^3$ перегибридизации в процессе образования аддукта возрастает с увеличением основности N-оксида, кислотности по Льюису акцептора и с уменьшением полярности растворителя. В кристаллическом же состоянии (в отсутствии растворителя) вследствие более плотной упаковки атомов становится очень важным соотношение внутри- и межмолекулярных взаимодействий между до-норно-акцепторными компонентами комплексов.

Предполагая, что $sp^2 \rightarrow sp^3$ перегибридизация атомов кислорода и азота (а возможно, и других гетероатомов) при комнатной температуре в зависимости от внешних условий является универсальным процессом, мы решили в дополнение к гетероароматическим N-оксидам проанализировать данные Cambridge Structural Database [7] относительно структуры анилинов и их молекулярных комплексов. Выбор объектов был обусловлен тем, что в анилинах (Ph-NH_2, Ph-NHR и Ph-NR_2) о состоянии гибридизации атома азота можно делать вывод на основании бóльшего числа величин углов и длин связей, чем в фенолах (Ph-OH), и особенно в гетероароматических N-оксидах (Py→O).



Нами были использованы только те данные РСА, где R-фактор не превышал 5,0 (по аналогии с $r > 0{,}95$ в органической, физической, неорганической химии, $p < 0{,}05$ в биологической химии, биологии и т. д.).

Для характеристики степени пирамидальности связей в аминогруппе в литературе [6], [16] принято рассматривать суммы величин валентных углов, образуемых атомом азота с двумя атомами водорода и углеродом бензольного кольца (для аммиака и анилина они составляют 319,01° и 339,3° соответственно). Особый интерес представляет величина торсионного угла τ между плоскостями аминогруппы и ароматического кольца. Согласно данным работы [6], экспериментальные методы дают следующие величины τ для анилина и его производных с заместителями в бензольном кольце: микроволновая спектроскопия – 37,5 ± 2° и 42,4 ± 0,3°, резонансная флуоресценция и дальняя ИК-спектроскопия – 44,3 ± 0,2°, газовая электронография и рентгеноструктурный анализ – 44 ± 4°. Данные *ab initio*-расчетов методом HF свидетельствуют о том, что угол выхода связи N–$C_{аром}$ из плоскости NH_2 составляет 41,8°, а метод MP2 дает величину τ 43,6°.

Среди производных анилина наиболее детально изучены методом микроволновой спектроскопии галогензамещенные о-, м- и п-$XC_6H_4NH_2$, где X = F [9], [10] и Cl [11], [12], [13], [14]. Отмечается [6], что из всех фторзамещенных анилинов только орто-изомер имеет геометрические параметры аминогруппы, наиболее близкие к таковым для анилина, причем его конформация несколько иная, что авторы связывают с возможностью образования внутримолекулярной водородной связи H…F. В ряду хлорзамещенных анилинов при переходе от орто-$ClC_6H_4NH_2$ к пара-изомеру угол τ увеличивается от 34,5 до 41,4°. Величина же угла HNH в ряду галогензамещенных мало изменяется: например, для пара-, фтор- и хлоранилинов она составляет 112 и 111,7° соответственно. Однако при замене одного (!) или двух атомов H в аминогруппе п-$FC_6H_4NH_2$ на группу CH_3 угол τ существенно уменьшается [8], [9], 10] (табл. 1).

© Андреев В. П., 2012

Таблица 1

Геометрические параметры молекул фторзамещенных анилина (по данным микроволновой спектроскопии [9], [10])

Угол, град.	$C_6H_5NH_2$	м-$FC_6H_4NH_2$	п-$FC_6H_4NH_2$	п-FC_6H_4NHMe	п-$FC_6H_4NMe_2$
HNX (X=H, CH_3)	113,1	115,0	112	115,6	114
τ	37,5	36,2	46,4	18,3	27

В молекуле мета-$CH_3C_6H_4NH_2$ планарность аминогруппы увеличивается (Σ= 348,7°) по сравнению с молекулой анилина и снижается величина торсионного угла τ до 26,9°(по данным РСА [15]).

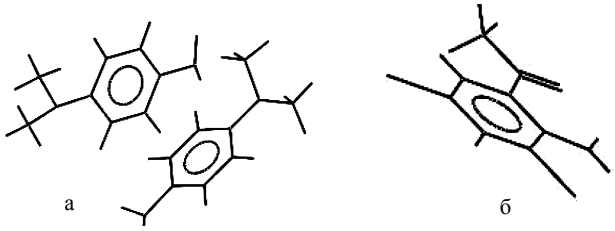
В молекуле пара-фенилендиамина угол τ немного больше, чем в анилине (43(4)°) [6], а их конформации подобны. Сравнение геометрических параметров этих молекул показывает, что величины длин связей N–C (1,402(2) Å в анилине и 1,424(5) Å в п-фенилендиамине) и валентных углов $CC_{NH2}C$ (119,4(2)° и 119,8(2)° соответственно) близки. Длина связи N–C в ароматических аминах значительно уменьшена по сравнению с алифатическими (в метиламине (1.472(3) Å)), а деформация валентного угла в бензольном кольце при атоме аминного азота $CC_{NH2}C$ незначительна.

Вызывает удивление, что все обсуждаемые в работе [6] литературные данные угла τ не выходят за пределы очень узкого интервала 35–48°, хотя теоретически этот диапазон должен быть значительно шире.

Согласно полученным нами экспериментальным данным [4], [5], константы устойчивости и ΔS^0 образования комплексов при координации Zn(II)тетрафенилпорфином (Zn-ТФП) в хлороформе с пара-замещенными анилинами линейно коррелируют с донорно-акцепторными свойствами заместителей и константами скоростей некоторых ферментативных и органических реакций. Мы предположили, что величина ΔS^0 связана с типом гибридизации атома азота в молекуле анилина, которая при наличии в положении 4 сильной электроноакцепторной группы, обладающей –М эффектом (например, NO_2), может быть плоской (sp^2-гибридизация атома азота). В пара-фенилендиамине, наоборот, величина угла между плоскостями бензольного кольца и атомов HNH должна приближаться к максимальному значению (sp^3-гибридизация).

Проведенный нами анализ данных Cambridge Structural Database за 1970–2010 годы [7] (табл. 2, 3) для анилинов, их солей и молекулярных комплексов показывает, что при образовании новой связи за счет НЭП атома азота анилина происходит удлинение связи C – N от 1,340–1,406 Å до 1,433–1,485 Å, а углы α между связями при этом атоме соответствуют sp^3-гибридному состоянию (~109°). В свободных же анилинах совместное использование значений r_{C-N}, углов α и τ (табл. 1, 2) позволяет оценить степень sp^3 (α ~ 109°, τ 20–50°) – sp^2 (α = 120°, τ = 0°) гибридизации атома азота. Например, введение (табл. 3) в бензольное кольцо анилина (№ 32, 36), 4-метил- (№ 22, 23), 4-метокси- (№ 3, 4), 4-иод- (№ 18–20) и хлоранилинов (№ 5–15, 42, 45) NO_2-, а 4-броманилина COMe-групп (№ 30–32) приводит к укорочению C – N связи и уменьшению угла τ (α приближается к 120°), что свидетельствует о $sp^3 \rightarrow sp^2$ перегибридизации атома азота NH_2 группы.

В анилинах (№ 1, 2, 3, 5–11, 18, 22, 24–30, 33–35, 37, 38, 46, 58, 62–64, 69; табл. 3), содержащих алкильные (положительные эффекты: гиперконъюгации в орто- и пара- и индуктивный во всех положениях бензольного кольца) или обладающие +М эффектом функциональные группы, угол τ составляет 22–49°, и его величина возрастает с увеличением объема находящихся рядом заместителей (в гекса-N,N-диметиламинобензоле № 84 достигает 89,74°, табл. 3). Наоборот, при накоплении в бензольном кольце функциональных групп, обладающих –М эффектом, таких как NO_2, COOH, COOR, C≡CH, C≡N, C(H)=O и C(R)=O (№ 4, 12–15, 17, 19–21, 23, 31, 32, 36, 41–44, 47, 49–51, 53, 57, 59, 60, 65, 67, 72, 75, 76, 78, 79, 81; табл. 3), этот угол уменьшается (0–7°), молекула становится все более плоской, и атом азота в конце концов переходит в sp^2-гибридное состояние. Пространственное строение молекул анилинов с атомом азота в состоянии sp^3-(4-диметиламиноанилин) и sp^2-(метиловый эфир 2-амино-3,5-дибромбензойной кислоты) гибридизации приведено на рисунке.

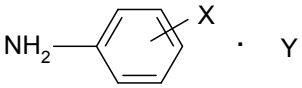


Структура [7] а) 4-диметиламиноанилина (GILYOP) и б) метилового эфира 2-амино-3,5-дибромбензойной кислоты (ICAMUU)

Таким образом, согласно данным Cambridge Structural Database, в твердой фазе тип гибридизации (sp^2 – sp^3) атома азота аминогруппы в анилинах определяется электронными и стерическими эффектами заместителей в бензольном кольце. Несмотря на то что подобные выводы нужно с большой осторожностью использовать для характеристики конформационного состояния молекул в жидкостях, мы бы хотели на примере комплексообразования Zn-ТФП с анилинами в хлороформе доказать, что числовые значения, которыми оперируют в РСА, во многих случаях могут быть применимы для химических и биохимических процессов, протекающих в растворах. Напомним, что при установлении нативной структуры высокомолекулярных

Таблица 2

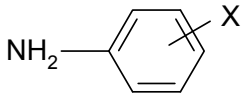
Данные РСА солей и молекулярных комплексов анилинов [8]



№	X	Y	r_{C-N}, Å	CSD refcode	№	X	Y	R_{C-N}, Å	CSD REFCODE
1	4-NH_2	2 HCl	1,463	PHNDMC11	20		$PdCl_2$	1,462	DEBKAW
2		2HBr	1,470	QUEHVIJ	21	3,4-F_2	$PdCl_2$	1,433	QETXOD
3		2HI, ZnI_2	1,468	MEGPAO	22	2,3,4-F_3	$PdCl_2$	1,438	QETXUJ
4	4-OCH_3	H_3PO_4	1,464	VOWWEM	23	3-Cl	HCl	1,464	UFAJOA
5		4-нитробензоат	1,462	JEJNES	24		$PdCl_2$	1,436	YELMOS
6	4-Cl	H_3AsO_4	1,460	CENROD	25	2-Cl	HCl	1,457	UFAJAM
7		HCl	1,465	CURGOL	26		HBr	1,471	TAYVEV
8		Cl_3CCOOH	1,459	GARVAW	27		пикрат	1,461	SARJEB
9	4-Cl, 2-CH_3	HCl, H_2O	1,466	TALWEJ	28	2,5-Cl_2	HCl	1,462	EDUGUF
10	4-I	3-нитрофталат	1,459	EKELUB	29	2,4,6-Cl_3	HCl	1,452	JACSAI
11		2-карбокси 4-нитробензоат	1,464	FOMFOD	30	4-Br	2-карбокси-4-нитробензоат	1,465	FOMFIX
12	4-CH_3	HCl	1,467	TOLHCL01	31		5-сульфосалицилат	1,54	QANLEX
13		$ZnCl_2$	1,464	FETKAR	32		HCl	1,463	TAWRAL
14		2-сульфокислота	1,467	HEKSOF	33		HBr, 0.5 H_2O	1,463	UFAKER
15		$Zn(NCS)_2$	1,442	ITPTZN	34		8-гидрокси-7-иод-5-сульфонат, H_2O	1,470	RIGLOJ
16	2,4,6-$(CH_3)_3$	HI	1,475	JEVPUW	35	2,4-Br_2	HBr	1,453	JACRAH
17	4-F	HCl	1,464	ANLCLA	36	2,4,6-Br_3	HBr	1,457	JACSEM
18		HBr	1,462	DOMBOW	37	4-$COCH_3$	HCl, H_2O	1,454	ETEZIM
19		HBr	1,485	DOMBOW01	38		$CuCl_2$	1,499	VETNEO

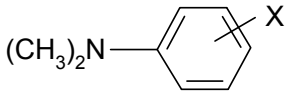
Таблица 3

Данные рентгеноструктурного анализа анилинов [8]

№	X	R_{C-N}, Å	A, град.	T, град.	CSD REFCODE	№	X	R_{C-N}, Å	A, град.	T, град.	CSD REFCODE
											
1	4-NH_2 [a]	1,394	112,79	32,61	PDTCNB	42	2-Cl, 5-NO_2	1,383	123,20	5,65	YOVCAO
2	4-NMe_2	1,409 – NH_2 1,425 – NMe_2	114,96 111,97	43,38 48,81	GILYOP	43	2,5-NO_2, 4-Me	1,370	122,41	4,62	COTKUS
3	4- OCH_3	1,398	108,78	33,55	PANISD01	44	2.4-NO_2, 5-Me	1,346	121,45	6,83	COTLAZ
4	4-OCH_3, 2-NO_2	1,348	122,86	0	QEXNIR	45	2,3-NO_2, 6-Me	1,348	120,81	16,41	COTLIH
5	4-Cl	1,387	114,52	32,61	CLANIC05	46	2-NHCOPh(2-NHPh)	1,389	114,08	35,72	MOSVOG
6	3,4-Cl_2	1,397	112,26	32,85	WEMDOH	47	2-COOMe, 4-OMe, 5-$O(CH_2)_3Cl$	1,393 1,388	119,97 119,98	0,45 1,07	QOTNET
7	3,5-Cl_2	1,401	123,81	37,17	WEMDUN	48	2-N=CHPh (2-OH), 4,5-CN	1,360	121,54	18,94	QOTRAT
8	2,5-Cl_2	1,394	11,66	37,20	DCHLAN01	49	3,6-C≡CH, 4-NO_2	1,345	119,85	4,75	SOLHUX
9	2,3-Cl_2	1,387	115,64	34,29	WEMDAT	50	2-COOMe, 4-$NHSO_2Ph$(4-Br)	1,364	120,00	0,77	SOSQOH

Окончание табл. 3

10	2,6-Cl_2	1,372	113,32	38,35	WEMDEX	51	2-NH2, 4,5-CN	1,366 1,379	119,97 120,01	1,49 4,32	VOQKUI
11	2,4-Cl_2	1,395	112,39	32,31	WEMDIB	52	5-amino-1-methyl-1-H-benzimidazol	1,392	119,95	0,83	MUBQIK
12	2-Cl, 3,5-$(NO_2)_2$	1,356	120,01	1,60	RATHAW	53	3-SO_2NH_2, 4-Me	1,379	119,93	1,32	MUBVOV
13	2-Cl, 4,6-$(NO_2)_2$	1,327	121,88	2,40	UCECAG03	54	4-$COOCMe_2COCH_2CN$	1,362	119,26	17,01	POTDUY
14	2-NO_2, 5-Cl	1,340	117,43	4,59	RAPKUP	55	2-(1-H-benzimidazol-2-yl), 4-I	1,395	93,07	48,11	XOWFOF
15	4-Cl, 6-NO_2	1,348	120,00	1,44	WEVNIV	56	2-Cl, 5-NO_2	1,383	117,67	40,30	VOVCAO
16	3-Cl, 4-$CONHNH_2$	1,396	112,54	43,72	WEPVUJ	57	2-Me, 4-COOMe	1,372	120,03	0,93	BIZFIA
17	2-Cl, 4-$COOSnMe_3$	1,372	120,59	6,51	MELVOP	58	4-$O(CH_2)_2OPh(4\text{-}NH_2)$	1,420	120,49	41,33	BIZZOA
18	4-I	1,397	117,74	38,93	EJAYET	59	4-OSO_2(1-naphtyl)	1,367	119,98	1,94	BOBBAW
19	4-I, 2-NO_2	1,343	120,05	0,75	CAMSOZ	60	2-OCH2C$(OEt)_2$, 4-NO_2	1,353	118,64	7,56	DOTQOT
20	2,4-I_2, 3-NO_2	1,380	119,99	0	CAMSUF	61	4-SF_5	1,381	122,14	24,97	GISVOU
21	4-I, 2-COO^-	1,346	119,88	0	MAVMEC	62	2,6-OH, 3-COPh(2-OH)	1,419	110,91	52,33	HIWMUW
22	4-CH_3	1,400	116,72	25,91	EDACUI	63	2,6-OH, 3-COPh(4-F)	1,421	113,16	50,16	HIWNAD
23	4-CH_3, 2,6-$(NO_2)_2$	1,367	120,00	0	ISAYAC01	64	2,6-OH, 3-COPh (2,3-Me)	1,418	108,29	41,94	HIWNEH
24	3,4-Me_2	1,406	116,23	44,65	WEMFAV	65	4-$O(CH_2)_2OPh(4\text{-}NO_2)$	1,409	120,06	2,10	IFUVIP
25	2-OH, 4-Me	1,423	109,80	48,81	MASZOW	66	4-CMe=NOH	1,417	111,24	50,27	IGABOI
26	3-OH, 4-Me	1,425	111,57	47,25	MATBOZ	67	4-CMe=NNHCOPh	1,394	120,04	2,11	JODNOG
27	4-F	1,395	11,29	37,45	IDAHUR	68	2-N=CPhPh(2-OH, 4-OMe)	1,373	120,00	1,77	KOFTUV
28	3-Cl, 4-F	1,398	117,66	35,71	KUMTER	69	4-OPhOPh(4-NH_2)	1,401	112,65	44,14	LIVTAM
29	2,3,4,5,6-F_5	1,376	118,59	31,29	YIFXER	70	4-C(Me)=NNHCSMe	1,377	111,13	27,31	LOBZUY
30	4-Br	1,396	120,93	27,16	PBRANL01	71	4-$COO(CH_2)_2NH^+$ Et_2Cl^-	1,367	112,55	33,77	PROCHC11
31	2,4-Br_2, 6-COMe	1,349	120,05	1,42	ICAMUU	72	2,4-NO_2, 5-NH_2	1,344 1,334	119,99 120,05	2,91 2,55	SIYWIH
32	2-COMe, 4-Br	1,363	120,06	3,26	ICANAB	73	2,4,6-I, 3,5-COOH	1,397	104,41	47,09	SOGGUR
33	H [б]	1,394	110,48	35,40	RAPLEA	74	2-Me, 4-I	1,404	120,05	2,62	TITZUS
34	2,4,6-F_3	1,396	115,81	44,05	IGAPUC	75	2,6-CN, 3,4-Ph, 5-COOEt	1,347 1,349	119,88 119,90	1,50 1,79	VIXPIC
35	2-Cl,4-I	1,394	110,41	41,12	VOJBAY	76	2.6-CN, 3,4-pTol, 5-COOEt	1,353	120,02	1,10	VIXPOI
36	2-Br, 4-NO_2	1,382	120,09	2,01	SOLSAO	77	4-SO_2NH_2	1,379	116,66	34,50	WOBHUR
37	2,6-pyrazol-1-yl, 4-t-Bu	1,389	114,21	39,91	DONYOV	78	2,6-CN, 3-C≡$CSiMe_3$, 5-$SiMe_3$	1,360	128,14	0,83	XOCVUH
38	4-$O(CH_2)_6OPh$ (4-NH_2)	1,415	110,07	41,76	LOSHUX	79	2,6-CN, 3-C≡$CSiMe_3$, 5-$SiMe_3$	1,359	119,99	0,94	XOCVUH02
39	4-CH_2Ph	1,388	117,74	33,91	POQQOC	80	2,6-Me_2, 4-Br	1,399 1,401	120,01 120,00	5,25 2,83	YIRTUP
40	2-SPh(2-NH_2)	1,369 1,394	119,51 113,92	12,79 32,95	SOMKIP	81	2-COPh(2-Cl),4-Cl	1,348	124,43	7,31	YIXSEE
41	2-Et, 5-NO_2	1,395	122,83	6,11	VOQJER						



82	H	1,371	119,02	1,88	GENLER	85	4- NMe_2 [в]	1,392	116,41	22,49	HAFVEQ
83		1,372	117,95	9,48	GENLAN	86	[г]	1,364	116,79	2,48	DAYVOP
84	$(NMe_2)_5$	1,439	111,77	89,74	GENFAG						

Примечание. α – углы H-N-H, C-N-H или C-N-C, θ – углы между плоскостями бензольного кольца и атомов аминогруппы. π-Комплексы: [а] с тетрацианоэтиленом , [б] с 3,4-дихлорнитробензолом, [в] с 4,4',6,6'-тетрациано-бис(1,3,5-триазином); [г] 4-диэтиламиносалициловый альдегид.

объектов (например, белков) широко используются данные, полученные методом РСА для их кристаллических форм. В дальнейшем мы предполагаем привлечь для исследования молекулярных комплексов анилинов с v-акцепторами метод газовой электронографии, так как результаты, полученные в отсутствие взаимодействий между молекулами аддуктов, могут дать дополнительную косвенную информацию о пространственном строении комплексов в растворах.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В. П. Молекулярные комплексы гетероароматических N-оксидов и ацетиленовых аминов с v-акцепторами как модель исследования нуклеофильности и основности соединений с пространственно доступными реакционными центрами: Дисс. … д-ра хим. наук. Петрозаводск, 2007. 427 с.
2. Андреев В. П., Вапиров В. В., Нижник Я. П., Алешина Л. А., Семенова Т. А. Изменение гибридизации атома кислорода группы N→O при комплексообразовании N-оксидов пиридинов и хинолинов с v-акцепторами // ЖОХ. 2008. Т. 78. Вып. 5. С. 830–840.
3. Андреев В. П., Нижник Я. П. Исследование комплексообразования N-оксидов пиридинов и хинолинов с трифторидом бора методом протонного магнитного резонанса // Координационная химия. 2007. Т. 33. № 9. С. 703–708.
4. Андреев В. П., Соболев П. С., Зайцев Д. О. Количественные корреляции, связывающие процессы координации Zn-ТФП и реакции нуклеофильного замещения с участием анилинов // ЖОрХ. 2012. Т. 48 Вып. 6. С. 776–783
5. Андреев В. П., Соболев П. С., Зайцев Д. О., Галибина Н. С., Зыкина Н. С., Плясунова Л. Ю., Романова М. И. Взаимодействие Zn-ТФП, бромистого пропаргила и пероксидазы хрена с анилинами // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2011. № 6 (119). С. 7–15.
6. Кустова Т. П. Аренсульфонилирование аминов, аренкарбогидразидов и аминокислот: влияние строения реагентов и эффекты среды: Дисс. … д-ра хим. наук. Иваново, 2008. 300 с.
7. Cambridge Structural Database, 2010 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.ccdc.cam.ac.uk
8. Cervellati R., Dal Borgo A., Scappini F. r0-Structure determination of the $HNCH_3$ group of N-methyl-p-fluoroaniline by microwave spectroscopy // J. Mol. Struct. 1979. Vol. 56. № 1. P. 69–75.
9. Christen D., Damiani D., Lister D. G. The conformation of o-fluoroaniline by microwave spectroscopy // J. Mol. Struct. 1977. Vol. 41. № 2. P. 315–317.
10. Nonat A., Bouchy A. Microwave spectra and structure of the amine group in orthofluoroaniline, $C_6H_4F\text{-}NH_2$ // J. Mol. Spectrosc. 1985. Vol. 114. № 1. P. 13–22.
11. Nonat A., Bouchy A., Roussy G. Microwave spectra of meta-chloroaniline // J. Mol. Struct. 1983. Vol. 97. P. 83–86.
12. Nonat A., Bouchy A., Roussy G. Microwave substitution structure of the amine group in metachloroaniline $C_6H_4Cl\text{-}NH_2$ // J. Mol. Spectrosc. 1983. Vol. 99. № 2. P. 407–414.
13. Nonat A., Bouchy A., Roussy G. Etude de la structure geometrique de la molecule de parachloroaniline par spectroscopie microonde // J. Mol. Struct. 1984. Vol. 116. № 3/4. P. 227–237.
14. Nonat A., Bouchy A., Roussy G. Microwave substitution structure of the amine group in orthochloroaniline, $C_6H_4ClNH_2$ // J. Mol. Spectrosc. 1984. Vol. 108. № 2. P. 230–239.
15. Rukiah M., Lefebvre J., Descamps M., Hemon S., Dzyabchenko A. Ab initio structure determination of m-toluidine by powder X ray diffraction // J. Appl. Crystallogr. 2004. Vol. 37. P. 464–471.
16. Szatylowicz H., Krygowski T. M., Hobza P. How the shape of the NH_2 group depends on the substituent effect and H-bond formation in derivatives of aniline // J. Phys. Chem. A. 2007. Vol. 111. P. 170–175.

Сентябрь, № 6 **Физико-математические науки** **2012**

УДК 538.935

АЛЕКСАНДР ЛИОНОВИЧ ПЕРГАМЕНТ
доктор физико-математических наук, доцент кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
aperg@psu.karelia.ru

ГЕНРИХ БОЛЕСЛАВОВИЧ СТЕФАНОВИЧ
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
gstef@yandex.ru

ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ АНДРЕЕВ
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики фазовых переходов в твердых телах, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
vn.andreev.solid@mail.ioffe.ru

ПАВЕЛ АНАТОЛЬЕВИЧ БОЛДИН
аспирант кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
arctus@sampo.ru

ЭЛЕКТРОННЫЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В КРИСТАЛЛАХ СОЕДИНЕНИЙ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ*

Дается представление о физической картине электронного переключения в кристаллических материалах. Круг рассматриваемых объектов включает, в частности, оксиды, сульфиды и халькогениды целого ряда переходных металлов, а также высокотемпературные сверхпроводники. Основное внимание уделяется потенциальным возможностям технических применений данных эффектов в современной наноэлектронике.

Ключевые слова: переключение, соединения переходных металлов, переход металл – изолятор

ВВЕДЕНИЕ

Соединения переходных металлов (оксиды, сульфиды, халькогениды и др.) представляют значительный научный интерес и являются перспективными материалами для использования в различных областях техники, что связано с их разнообразными, подчас уникальными свойствами [9], [35]. Переходные металлы, проявляя переменную валентность, образуют, например, в соединениях с кислородом, как правило, целый ряд оксидов, обладающих широким спектром физических свойств. В частности, по типу проводимости эти вещества могут быть как диэлектриками или полупроводниками, так и металлами [35]. Известно, например, что Ta_2O_5 и Nb_2O_5, являясь превосходными диэлектриками, используются в оксидно-полупроводниковых конденсаторах [19]. С другой стороны, низшие оксиды Ti, W, Mo, Nb проявляют металлические свойства, а при легировании могут быть даже сверхпроводниками [35]. Одними из выразительных свойств соединений переходных металлов являются электронные неустойчивости, такие как фазовый переход металл – изолятор (ПМИ) [3], [7], [12], [41] и эффект электрического переключения [10], [17], [23].

Переключение было первоначально обнаружено и исследовано в аморфных (халькогенидных стеклообразных) полупроводниках [6], [10], [11], [17], [21], [22], [53], [60], в которых наблюдаются эффекты отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) с S-образной вольт-амперной характеристикой (ВАХ), иногда после предварительного процесса так называемой «электрической формовки». Явление переключения связано с развитием токовых неустойчивостей в сильных электрических полях, приводящих к появлению на ВАХ участков с ОДС.

Помимо аморфных полупроводников, эффект переключения исследован в таких материалах, как оксидные стекла различного состава, пленки окислов многих металлов – как аморфные, так и поликристаллические, другие оксиды (например, SiO_2, GeO_2, SiO_x-B_2O_3), некоторые типичные полупроводники (Si, CdS, ZnS, GaAs), диэлектрики (AlN, BN, галогениды), органические соединения [6], [21], [27], [53], [54], [55], [59]. Кроме того, в последнее время электронные неустойчивости интенсивно изучаются в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП), манганитах с колоссальным магнетосопротивлением (КМС)

© Пергамент А. Л., Стефанович Г. Б., Андреев В. Н., Болдин П. А., 2012

и гетероструктурах на их основе [18], [66], а также в различных углеродсодержащих материалах [50], [64], включая фуллерены и нанотрубки [73]. В целом ряде тонких пленок оксидов переходных металлов наблюдается переключение, обусловленное переходом изолятор – металл в электрическом поле [14], [15], [16], [30].

Что касается кристаллов, а не тонкопленочных структур, то здесь прежде всего следует отметить работы по переключению в оксидах ванадия [5], [13], [37], [47], [48] (рис. 1), ибо эффект токовой неустойчивости обусловлен явлением ПМИ, происходящим в этих соединениях, например, в VO_2 при температуре $T_t = 340$ K [3]. Необходимо подчеркнуть, что исследование переключения в кристаллах актуально с точки зрения возможности детального изучения динамики процессов (в том числе *in situ* и в режиме реального времени) [37], [69], что, естественно, невозможно при использовании тонкопленочных сэндвич-структур. Кроме того, основным стимулом использования тонкопленочных переключателей всегда было требование микроминиатюризации. В настоящее же время технологические возможности позволяют изготавливать нанокристаллы (*nanobeams*, *nanrods*, *nanowires*, и т. п.), не уступающие по ключевым размерным параметрам тонким пленкам [46], [62], [69].

В физике соединений переходных металлов электронные неустойчивости связаны со спецификой поведения d-электронов.

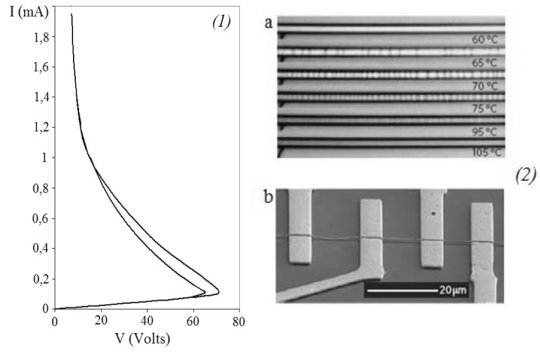


Рис. 1. (1) Вольт-амперная характеристика монокристалла VO_2 размером 0,05 × 0,05 × 3 мм^3 [37], где визуально наблюдалось движение доменов металлической фазы. (2) Похожие результаты наблюдались недавно в «*нанобрусках*» (*nanobeams*) VO_2 размером 50 нм × 15 нм × 100 мкм [69]: ПМИ в диоксиде ванадия, наблюдаемый в микроскоп. Видно чередование металлических (Tt > 68 °C) и полупроводниковых участков (a). Внизу (b) изображена исследуемая структура

Малая пространственная протяженность волновых функций d-электронов приводит к образованию узких зон, а поведение электронов в таких зонах характеризуется сильными межэлектронными корреляциями. Именно электронно-корреляционными эффектами объясняют во многих случаях механизм ПМИ: один из широко известных примеров – это переход Мотта – Хаббарда [12]. Таким образом, проблема изучения электронных неустойчивостей в соединениях переходных металлов находится на стыке различных наиболее актуальных областей физики конденсированного состояния – физики сильно коррелированных систем, нелинейных явлений, фазовых переходов.

Явления переключения и ПМИ представляют не только научный, но и значительный практический интерес, обусловленный возможностью разработки на их основе целого ряда электронных устройств [3], [11], [18], [28], [55]. В этой связи соединения переходных металлов, проявляющие эффекты электронных неустойчивостей, должны занять свое достойное место в ряду новых материалов, определяющих перспективы развития современной электронной техники, таких как, например, аморфные полупроводники [11], органические, в частности, полимерные материалы [38], сверхпроводники (включая ВТСП) [18], [66], фуллерены и нанотрубки [65].

По сравнению с хорошо изученными в части электрического переключения халькогенидными стеклообразными полупроводниками (ХСП), переключение в соединениях переходных металлов исследовано недостаточно. Вместе с тем, поскольку в данных соединениях наблюдаются переходы металл – изолятор, в отличие от ХСП, в которых ПМИ отсутствует, но тем не менее привлекается для объяснения переключения [21], можно полагать, что модельные представления, которые развиваются на основе исследования электронных неустойчивостей в соединениях переходных металлов, будут иметь существенно общий характер. В этом смысле соединения переходных металлов могут рассматриваться как модельный объект в физике электронных неустойчивостей конденсированных систем.

Как и ПМИ, эффект переключения проявляется в переходе системы из состояния с низкой электропроводностью в высокопроводящее состояние. Цель настоящего обзора состоит в раскрытии взаимосвязи между фазовым переходом металл – изолятор и электронным переключением с целью дальнейшего исследования электронных неустойчивостей в кристаллических структурах, включая нанокристаллические объекты, на основе различных соединений переходных металлов. Будут представлены как результаты, полученные авторами, так и некоторые литературные данные, в том числе опубликованные в последнее время.

ПОЛУЧЕНИЕ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследуемые образцы монокристаллов $(V_{1-x}Cr_x)_2O_3$, $NiS_{2-x}Se_x$ и $CuIr_2S_{4-x}Se_x$ были изготовлены в Purdue University (Индиана, США) в лаборатории P. A. Metcalf. Кристаллы V_2O_3:Cr были выращены методом «skull-melting» [51] из шихты, состоящей из порошка полуторного оксида

ванадия, полученного восстановлением V_2O_5 в водороде при T = 1000 °C, и соответствующего количества оксида хрома Cr_2O_3. В качестве затравки использовались кристаллы чистого V_2O_3, а атмосфера состояла из смеси 20 % CO_2 и 80 % CO. Послеростовой отжиг проводился в вертикальной высокотемпературной печи в атмосфере кислорода. Парциальное давление кислорода контролировалось электрохимическим кислородным насосом на основе суперионного проводника ZrO_2.

Для получения кристаллов $NiS_{2-x}Se_x$ использовалась следующая процедура. Ni, S и Se в количествах, соответствующих определенному стехиометрическому составу (x), нагревались до T = 730 °C в откаченной кварцевой ампуле в течение нескольких дней. (Аналогичная процедура использовалась и при получении $CuIr_2S_{4-x}Se_x$ с тем отличием, что температура отжига была 850 °C [24].) Образовавшийся поликристаллический продукт далее растворялся в теллуровом флюсе, и монокристаллы $NiS_{2-x}Se_x$ выращивались затем из данного флюса методом температурного градиента.

Для электрофизических измерений использовались образцы кубической формы с размерами ~ 1 × 1 × 1 мм^3. На две противоположные грани наносились металлические (In) контакты, так что толщина сэндвич-структуры составляла l ~ 0,5 – 1,0 мм, а площадь сечения S ~ 1 мм^2. ВАХ на постоянном токе исследовались с помощью стандартной двухзондовой методики [14] с использованием источника тока с выходным сопротивлением < 0,05 Ом и токового резистора RI = 1 – 2 Ом.

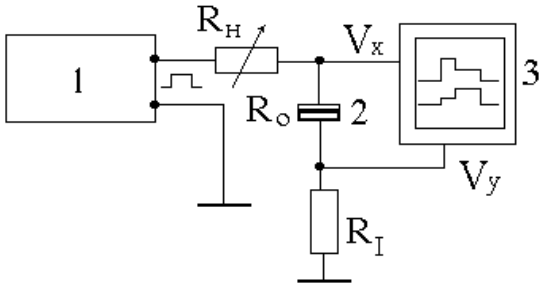


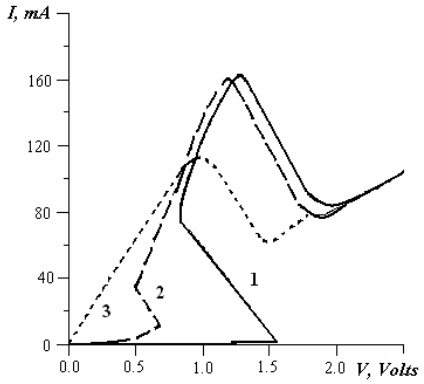
Рис. 2. Схема измерения времени задержки переключения: 1 – генератор прямоугольных импульсов, 2 – образец, 3 – двухлучевой осциллограф

Температурные зависимости сопротивления исследуемых кристаллов измерялись в диапазоне 4–300 К (с использованием жидкого гелия) четырехзондовым методом. Исследования временных характеристик переключения (время задержки t_d) проводились с помощью схемы, изображенной на рис. 2. Температурные зависимости пороговых параметров и сопротивления переключательных структур исследовались в диапазоне температур от 15 до 300 К при помощи криорефрижератора МСМР-110-3,2/20. Детали измерительных методик представлены в [14].

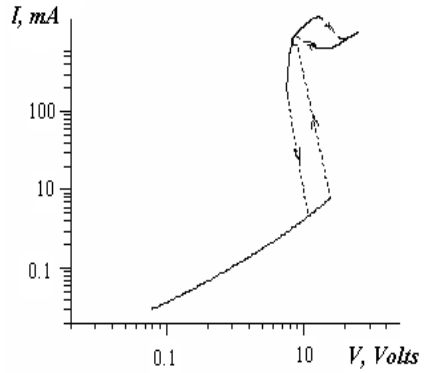
S- и N-ОБРАЗНЫЕ ВАХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ $(V_{1-x}Cr_x)_2O_3$

Полученные в эксперименте вольт-амперные характеристики при различных температурах для одного из образцов V_2O_3:Cr представлены на рис. 3. Видно, что в определенном интервале температур ВАХ включают два участка ОДС различных типов, то есть S-образное переключение в области малых токов и N-образное – при более высоких значениях тока.

Вначале в области малых напряжений (кривые 1 и 2 на рис. 3а) структура находится в высокоомном состоянии, его сопротивление R_{off} составляет порядка 1–10 кОм (состояние ВС-1). Когда напряжение достигает порогового значения $V_{th,S}$, происходит резкое увеличение проводимости, и структура переходит в низкоомное (НС) состояние с сопротивлением R_{on} ~ 10 Ом.



а



б

Рис. 3. (а) ВАХ V_2O_3:Cr при разных температурах, сопротивление нагрузки $R_н$ = 10 Ом: 1 – T = 170,5 K; 2 – T = 173,3 K; 3 – T = 221 K; (б) ВАХ 1 (T = 170,5 K) в билогарифмических координатах. На рисунке (а) показаны только прямые ветви ВАХ (при увеличении входного напряжения)

При дальнейшем увеличении тока наблюдается второе переключение (в состояние ВС-2) при $I = I_{th,N}$. Описанное поведение полностью обратимо, хотя прямые и обратные ветви ВАХ не совпадают в области ОДС, то есть имеется гисте-

резис (рис. 3б). При дальнейшем увеличении тока наблюдается второе переключение (в состояние ВС-2) при $I = I_{th,N}$. С ростом температуры $V_{th,S}$ уменьшается, стремясь к нулю при некоторой конечной температуре $T_{0,S}$, выше которой остается только второе переключение (N-типа). Дальнейшее нагревание приводит к уменьшению $I_{th,N}$, и при $T = T_{0,N}$ N-ОДС тоже исчезает. Температурные зависимости $V_{th,S}$ и $I_{th,N}$ показаны на рис. 4. Из этих графиков видно, что температура $T_{0,S}$ равна приблизительно (175 ± 1) K, $T_{0,N} \sim 270$ K.

Следует отметить, что образцы кристаллов V_2O_3:Cr являются относительно хрупкими и растрескиваются при термоциклировании вблизи $T \sim T_{0,S}$. Тем не менее ВАХ при $T < T_{0,S}$ вполне стабильны и воспроизводимы: разброс в параметрах не превышает 10 %. Циклирование напряжения (ВС-1 → НС → ВС-2 и обратно) не вызывает каких-либо видимых изменений в образцах. Параметры ВАХ также остаются неизменными в течение по крайней мере нескольких десятков циклов. Только после многократного охлаждения образца ниже $T_{0,S}$ и последующего нагрева происходит его деградация, приводящая к полному разрушению. При термоциклировании в других температурных интервалах выше $T_{0,S}$, включая область вблизи $T_{0,N}$, деградация отсутствует.

Из литературы известно [3], [7], [12], [35], [41], что в системе $(V_{1-x}Cr_x)_2O_3$ при концентрации хрома $0{,}005 < x < 0{,}018$ имеются два перехода металл – изолятор при $T < 300$ K. Первый переход – это преобразование антиферромагнитного изолятора (AFI) в парамагнитный металл (PM) в диапазоне 160–180 K (рис. 5а); температура перехода T_{t1} повышается с увеличением x. Этот переход сопровождается изменениями кристаллической структуры. В частности, объем элементарной ячейки AFI-фазы приблизительно на 3,5 % больше объема PM-фазы. Это изменение в объеме и приводит к растрескиванию образцов при термоциклировании через температуру перехода. Второй ПМИ – это переход из состояния PM в состояние парамагнитного изолятора (PI) при $T = T_{t2}$ в диапазоне 190–385 K в зависимости от значения x; температура T_{t2} уменьшается с увеличением x, и переход сопровождается гистерезисом с шириной петли ~ 50 K. Температурная зависимость удельного сопротивления $(V_{1-x}Cr_x)_2O_3$ для $x = 0{,}012$ в области температур 130–290 K показана на рис. 5б.

Таким образом, экспериментальные данные по эффекту переключения в легированном хромом полуторном оксиде ванадия можно объяснить в рамках переключения, связанного с переходами металл – изолятор. S-образная вольт-амперная характеристика обусловлена развитием электротермической неустойчивости в образце: при приложении напряжения образец нагревается протекающим током до $T = T_{t1}$ (при $V = V_{th,S}$), и структура претерпевает переход из высокоомного (ВС-1) AFI-состояния в низкоомное (НС) PM-состояние.

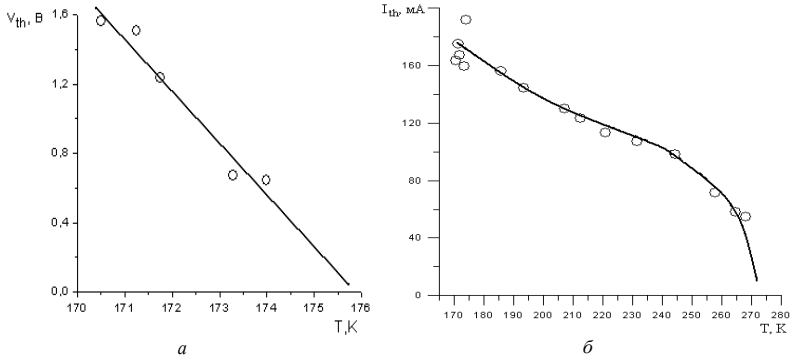


Рис. 4. Температурные зависимости порогового напряжения $V_{th,S}$ (а) и тока $I_{th,N}$ (б) структуры In/V_2O_3:Cr/In

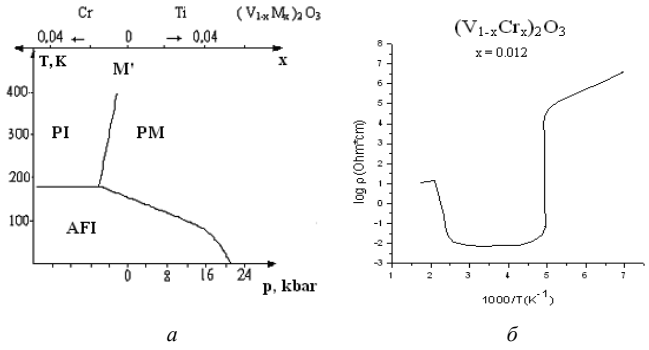


Рис. 5. (а) Фазовая диаграмма V_2O_3 – изменение T_t при легировании и при изменении давления. (б) Температурная зависимость сопротивления полуторного оксида ванадия, легированного хромом (1,2 ат. %)

Когда ток в НС-состоянии увеличивается, образец далее нагревается, и при температуре T_{t2} ($I = I_{th,N}$) происходит второй переход в ВС-2 (то есть в фазу PI). Данный механизм переключения подтверждается температурными зависимостями порогового напряжения и тока (рис. 4), откуда видно, что значения $T_{0,S}$ и $T_{0,N}$ совпадают с температурами переходов T_{t1} и T_{t2} соответственно.

Однако существуют экспериментальные факты, не укладывающиеся в рамки электротермической модели, в частности наблюдающаяся стабильность структур при циклировании напряжения. Действительно, если бы образцы нагревались выше T_{t1} в течение каждого цикла переключения, это приводило бы к их растрескиванию, точно так же, как это происходит и при термоциклировании. Этого, однако, не происходит, и одним из факторов, которые должны быть приняты во внимание, чтобы понять такое поведение, является, по-видимому, неравномерное распределение напряженности поля и плотности тока в образце. Известно, что структуры с ОДС неустойчивы относительно образования доменов сильного поля или шнуров высокой плотности тока [4], [10], [11]. Это означает, что в НС выше температуры перехода нагрет не весь объем образца, а только узкий токовый шнур. С другой стороны, необходимо отметить, что при переключении переход AFI-PM в V_2O_3:Cr происходит в существенно неравновесных условиях: в электрическом поле, при протекании тока высокой плотности. В этом случае электронные эффекты могут давать вклад в развитие ПМИ (учитывая мотт-хаббардовской характер перехода в V_2O_3 [12], [41]): вызванное полем увеличение концентрации носителей приведет к схлопыванию корреляционной запрещенной зоны при $T < T_t$. Структурные изменения, по-видимому, могут и отсутствовать при таком электронно-стимулированном переходе, чем и объясняется устойчивость образцов при изменении напряжения, в отличие от перехода при изменении температуры [14], [31]. В НС, после того как переход завершен, образец, конечно, может быть нагрет выше T_{t1}, то есть механизм второго (с N-ОДС) переключения может быть тепловым.

ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ В СУЛЬФИДЕ-СЕЛЕНИДЕ НИКЕЛЯ $NiS_{2-x}Se_x$

В $NiS_{2-x}Se_x$ имеет место инверсный ПМИ Мотта, подобный высокотемпературному переходу PM – PI в $(V_{1-x}Cr_x)_2O_3$ [44]. На рис. 6 показаны температурные зависимости сопротивления $NiS_{2-x}Se_x$ (x = 0,45), из которых видно, что переход происходит при $T_t \approx 55$ K. Исследовались также образцы с x = 0,1 и 0,3, в которых переход подавлен и, соответственно, переключение отсутствует. Полученные экспериментальные результаты соответствуют литературным данным [12], [44] по ПМИ в $NiS_{2-x}Se_x$.

На рис. 7 представлены ВАХ-структуры $M/NiS_{1,55}Se_{0,45}/M$ при T < 50 K. Полученные ВАХ имеют N-образную форму, они практически симметричны, обратимы (с незначительным гистерезисом) и хорошо воспроизводимы. С ростом температуры максимальный ток I_{th} уменьшается, и при $T \sim T_t$ переключение исчезает. Этот факт свидетельствует о том, что механизм переключения, как и в случае N-ВАХ в структурах с V_2O_3:Cr, обусловлен переходом металл – изолятор [33].

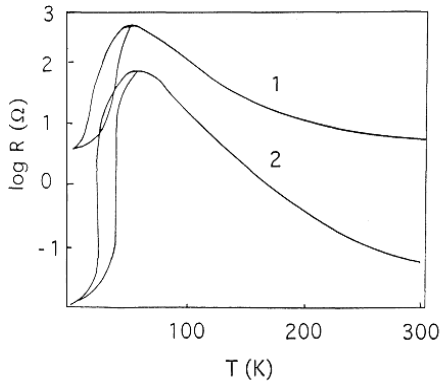


Рис. 6. Температурная зависимость сопротивления структуры $In/NiS_{1,55}Se_{0,45}/In$ (1) и образца $NiS_{1,55}Se_{0,45}$, четырехзондовый метод (2)

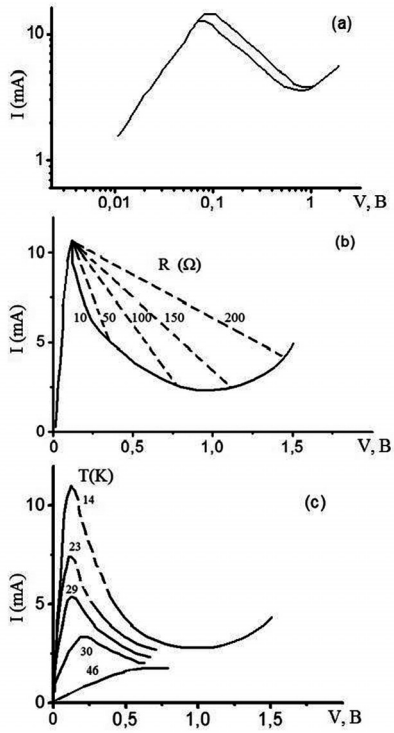


Рис. 7. ВАХ-структуры $In/NiS_{1,55}Se_{0,45}/In$: (a) в логарифмических координатах (T = 14 K, $R_н$ = 50 Ом); вариации ВАХ при изменении сопротивления нагрузки, T = 14 K (b) и при изменении температуры (T = 14, 23, 29, 30 и 45 K сверху вниз), $R_н$ = 50 Ом (c)

В [14] и [34] представлены результаты измерений времени задержки. Если частота следования импульсов достаточно высока и, соответственно, продолжительность импульса мала, можно наблюдать несколько (от одного до трех) сателлитных переключений в виде дополнительных ступенек переключения (помимо основного включения при $t = t_d$) при $t_{di} < t_d$.

Как было отмечено выше, переключение обусловлено переходом металл – изолятор в $NiS_{2-x}Se_x$ и может быть объяснено джоулевым нагревом образца до $T = T_t$, сопровождаемым резким уменьшением проводимости. Таким образом, электротермическая природа переключения представляется наиболее правдоподобным объяснением наблюдаемых явлений. Это подтверждается и относительно долгим временем восстановления. Однако для более детальной интерпретации результатов необходимо учитывать распределение внутренних электрических полей в образце. В частности, вышеупомянутое сателлитное переключение может быть связано с формированием доменов сильного поля, что характерно для ОДС N-типа [4]. При увеличении амплитуды импульса эти малые домены сливаются и формируют один домен (основное переключение с временем задержки t_d). Исходя из скачка проводимости при переходе в $M/NiS_{2-x}Se_x/M$-структуре (два порядка величины, см. рис. 6) и изменения сопротивления $R_{on}/R_{off} \sim 3$ (рис. 7) можно оценить размер домена $d = (3l - l) / 100 = 0{,}02l$, где $l = 1$ мм – толщина образца; то есть d = 20 мкм.

Оценим время переключения в простой тепловой модели. Минимальное время задержки можно найти из уравнения теплового баланса:

$$t_{d,min} = c\rho\Omega(T_t - T_o)/VI, \qquad (1)$$

где $\Omega = Sd = 1$ мм$^2 \cdot 20$ мкм $= 2 \cdot 10^{-11}$ м^3 – объем домена, $c = 11{,}6$ Дж/кг · К – теплоемкость $NiS_{2-x}Se_x$ при температуре 20 К [72], $\rho = 5160$ кг/м^3 – плотность.

Для экспериментально измеренных значений напряжения V ~ 1 В и тока I ~ 100 мА, $T_t = 55$ К и $T_o = 20$ К уравнение (1) дает $t_{d,min} = 0{,}42$ мс, что вполне согласуется с экспериментальным значением 0,45 мс [34].

Для сателлитного переключения, однако, $t_{di} \sim 10$–50 мкс [34], и тогда из (1) можно получить размер малого домена $d_i = 0{,}5$–2,5 мкм, то есть ~ 1 мкм. В этом случае максимальная напряженность электрического поля $E_{max} \sim$ (1 В) / (1 мкм) = 10^4 В/см, она значительно выше среднего поля E = (1 В) / (1 мм) = 10 В/см. Таким образом, при переключении в сэндвич-структурах с объемными материалами (а не только с тонкопленочными [14], [57]) локальные поля также могут достигать величины $\sim E_c$, то есть критического поля, при котором возможны сильнополевые эффекты и их влияние на ПМИ.

ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ В ТИОШПИНЕЛИ $CuIr_2S_{4-x}Se_x$

В настоящем разделе рассмотрены результаты, полученные при исследовании переключения в системе $CuIr_2S_{4-x}Se_x$. На рис. 8 показаны полученные в эксперименте температурные зависимости сопротивления для двух образцов с x = 0,1 и 0,55. Измерения удельного сопротивления (рис. 8а) были проведены с помощью четырехзондовой схемы по стандартной методике. Определенные из этих измерений температуры начала перехода составляют 210 К для x = 0,1 и 195 К для x = 0,55. ВАХ структур в двухзондовой схеме в сэндвич-структуре являются S-образными (рис. 9). Пороговое напряжение V_{th} уменьшается с ростом температуры (рис. 10) и стремится к нулю при некоторой температуре T_0. Эти температуры T_0 совпадают с температурами перехода для соответствующих составов, то есть $T_0 = 210$ К для образца с x = 0,1, 195 К – для x = 0,55. Это указывает на то, что эффект переключения связан с ПМИ в $CuIr_2S_{4-x}Se_x$.

Эффект переключения был далее исследован на импульсном напряжении. Время переключения t_s ограничено сверху постоянной времени внешней цепи RC и не превышает 50 нс. Время задержки также может достигать относительно малых значений (до 0,1 мкс, см. рис. 11).

Возвращаясь к обсуждению вольт-амперных характеристик (рис. 9), отметим, что эти кривые являются двухпороговыми. Например, для образца с x = 0,1 первое переключение происходит при $V_{th1} = 18$ В, $I_{th1} = 45$ мА, а второе – при $V_{th2} = 8{,}6$ В, $I_{th2} = 130$ мА. Эти пороговые точки разделены двумя устойчивыми областями отрицательного сопротивления. Подобные эффекты переключения с двумя порогами наблюдались ранее в ХСП-переключателях [10] и в p-Ge(Au) [8]. В работе [8] наличие на ВАХ второго участка с S-переключением связывается с шумоиндуцированным неравновесным фазовым переходом. Однако в нашем случае, по-видимому, более предпочтительна интерпретация, предложенная в [10], согласно которой первое переключение соответствует собственно процессу включения структуры (переходу ВС – НС с образованием статического шнура), а второй скачок связан с образованием стабильного шнура тока.

Минимальный радиус шнура можно оценить из величины сопротивления в низкоомном (ON) состоянии вблизи напряжения поддержания:

$$R_{on} = \rho_m l/\pi(r_f)^2, \qquad (2)$$

где $\rho_m \sim 10\text{-}3$ Ом · см – удельное сопротивление металлической фазы (рис. 8), $l = 1$ мм – толщина образца (длина токового шнура), rf – радиус шнура. Для образца с x = 0,1 (рис. 12) $V_h = 10$ В, $I_h = 60$ мА и $R_{on} \approx 170$ Ом, откуда $r_f = 4{,}3$ мкм. Таким образом, низкоомное состояние обусловлено появлением узкого шнура металлической фазы $CuIr_2S_{4-x}Se_x$. Тогда плотность тока $J \sim 10^5$ А/см^2.

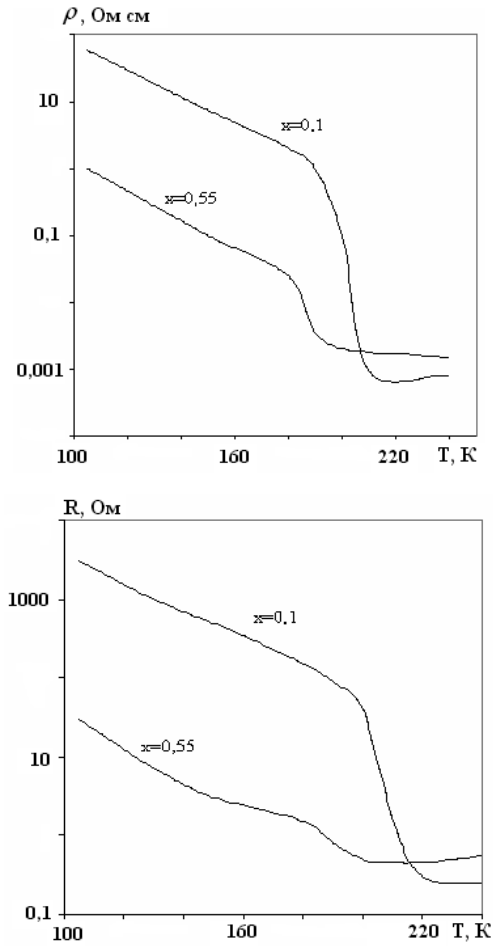


Рис. 8. Температурные зависимости удельного сопротивления монокристаллов $CuIr_2S_{4-x}Se_x$, измеренного в четырехзондовой схеме (слева), и полного сопротивления сэндвич-структур $In/CuIr_2S_{4-x}Se_x/In$ (справа) для x = 0, 1 (верхние кривые), 0,55 (нижние кривые)

Необходимо отметить, что ПМИ в $CuIr_2S_4$ связан со структурным переходом [24] (кроме того, T_t увеличивается с ростом давления, как и в VO_2 [3]), поэтому переключение имеет, скорее всего, электротермическую природу и описывается моделью критической температуры [32].

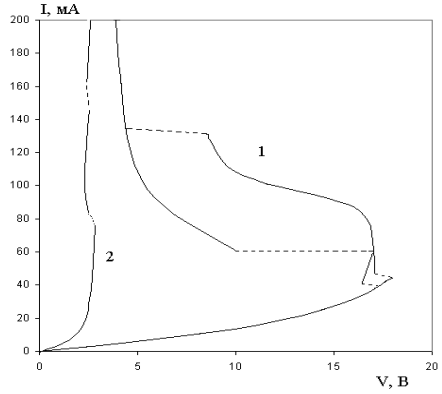


Рис. 9. ВАХ структур $In/CuIr_2S_{4-x}Se_x/In$ с x = 0,1 (1) и 0,55 (2) при T = 77 K. Для кривой 2 гистерезис значительно меньше, чем для кривой 1, и в данном масштабе не проявляется

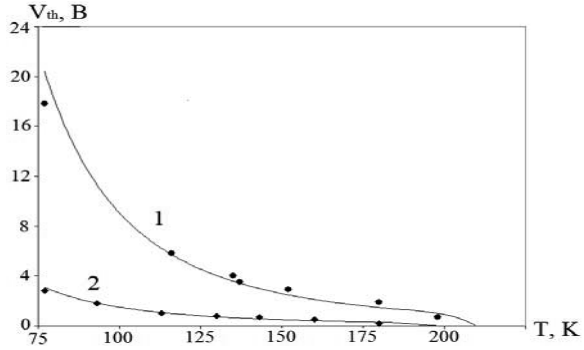


Рис. 10. Температурная зависимость порогового напряжения $CuIr_2S_{4-x}Se_x$ с x = 0,1 (1) и 0,55 (2)

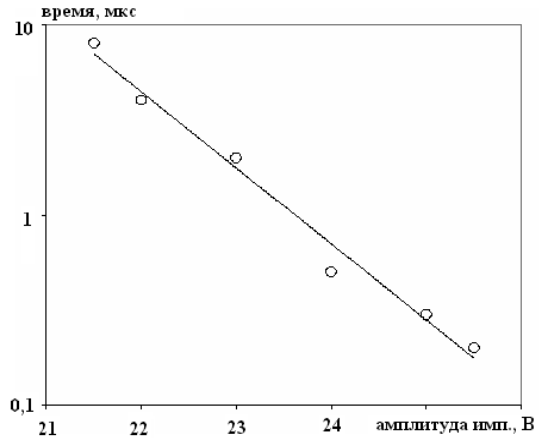


Рис. 11. Зависимость времени задержки от приложенного напряжения для $CuIr_2S_{4-x}Se_x$ (x = 0,1). T = 77 K, длительность импульсов – 48 мкс, частота – 7,8 кГц

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ВТСП

Во всех материалах, о которых шла речь в предыдущих разделах ($(V_{1-x}Cr_x)_2O_3$, $NiS_{2-x}Se_x$, $CuIr_2S_{4-x}Se_x$), эффекты переключения связаны с переходами металл – изолятор по температуре, хотя, как было показано, электронные эффекты тоже играют определенную роль в некоторых случаях (в частности, в структурах на основе $(V_{1-x}Cr_x)_2O_3$ и $NiS_{2-x}Se_x$). В данном разделе будут представлены результаты по переключению в ВТСП $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (Y-123) и $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ (Bi-2212). В этих системах нет ПМИ по температуре, и наличие переключения в них, как будет показано, может быть связано со «скрытым» ПМИ, проявляющимся в электрическом поле аналогично тому, как это имеет место, например, в ХСП [11], [21], [22].

В описанных ниже экспериментах использовались керамические образцы ВТСП [29], приготовленные по твердофазной технологии с In-контактами. Для получения Bi-2212 в некоторых случаях применялся также метод плавления: порошок $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ растирался с изопропиловым спиртом, наносился на сапфировую подложку, плавился при T ~ 900 °C с последующей

закалкой (быстрым охлаждением) до комнатной температуры, после чего проводился дополнительный отжиг в атмосфере воздуха (T ~ 850 °C в течение 1 часа). Сверхпроводящие (СП) свойства образцов тестировались по измерениям сопротивления и магнитной восприимчивости. Для исследования переключения использовались образцы с содержанием кислорода (δ), отличающимся от оптимального для проявления СП-свойств. Это достигалось соответствующим вакуумным отжигом или методом электрохимической поляризации в расплаве эвтектики KNO_3-$NaNO_3$ [1], [29]. Поляризация проводилась при температуре 350–380 °C с титановым противоэлектродом, в гальваностатическом режиме. При этом содержание кислорода определялось прошедшим зарядом, то есть временем электрохимической обработки: при катодной поляризации происходило уменьшение, а при анодной − увеличение содержания кислорода.

Динамика изменения СП-свойств образцов при электрохимическом регулировании содержания кислорода показана на рис. 12. Температура СП-перехода по данным резистивных измерений соответствовала началу проявления СП-свойств в магнитных измерениях и для исходных образцов составляла T_c ~ 90 K (Y-123) и ~ 70 K (Bi-2212). Небольшой сигнал диамагнитной восприимчивости при $T_c \approx 110$ K (рис. 12б) свидетельствует о наличии в исходном образце незначительного количества фазы Bi-2223. Переключение наблюдается в образцах, близких к ПМИ по составу (то есть в таких, в которых содержание кислорода соответствует, например, кривым 2 и 3 на рис. 12а и кривой 6 на рис. 12б). На рис. 13 представлены некоторые примеры S-образных ВАХ таких образцов. Более резко участок ОДС проявляется при измерениях в четырехзондовой схеме (рис. 13в), что, по-видимому, связано с относительно высоким сопротивлением контактов.

Необходимо отметить, что, согласно литературным данным, эффекты ОДС в ВТСП-материалах могут быть обусловлены самыми разными причинами. В некоторых случаях наблюдаются N-образные ВАХ, связанные, по-видимому, с переходом из сверхпроводящего в нормальное состояние под действием электронного разогрева или критического тока или с движением температурно-электрических доменов [20]. S- и N-ВАХ с памятью [18] могут быть обусловлены обратимыми изменениями кислородной стехиометрии в гетероструктурах с ВТСП.

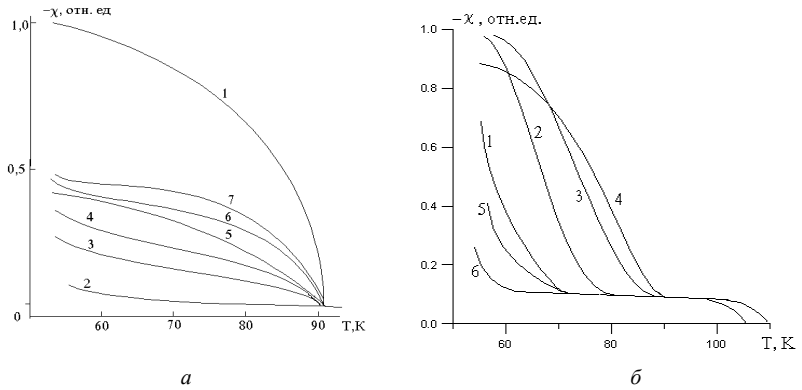


Рис. 12. (а) Температурная зависимость магнитной восприимчивости образца Y-123: 1 – исходного; 2 – после вакуумного отжига; 3–7 – после анодной поляризации в расплаве при I = 80 мА (номера кривых соответствуют последовательному увеличению времени поляризации: 3 – 3 мин., 4 – 4 мин., 5 – 5 мин., 6 – 7 мин., 7 – 8,5 мин.). (б) Температурные зависимости магнитной восприимчивости образца Bi-2212: исходного (1), после электрохимической обработки, I = 62 мА, катодная поляризация – t = 1 мин. (2), 7 мин. (3), 20 мин (4) и анодная – 4,5 мин. (5), 9 мин. (6)

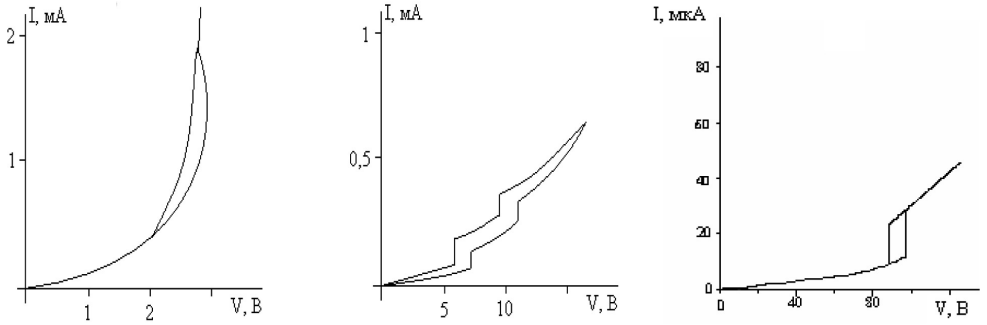


Рис. 13. ВАХ образцов ВТСП, измеренные при комнатной температуре в двухзондовой схеме с расстоянием между электродами *l* ~ 1 мм: Y-123 (а) и Bi-2212 (б), а также ВАХ несверхпроводящего образца Y-123, измеренная в четырехзондовой схеме при T = 77 K (в)

В изучаемых объектах в силу специфики их получения мы имеем дело с пороговым переключением S-типа, которое может быть обусловлено электронно-индуцированным переходом Мотта. Концентрация носителей заряда, необходимая для перехода в металлическое состояние, создается не изменением состава, а генерацией носителей в электрическом поле.

Таким образом, эксперименты по исследованию электрических неустойчивостей в Y-123, Bi-2212 также могут быть описаны в рамках развитых представлений о механизме переключения, обусловленном переходом металл – изолятор. Необходимо отметить, однако, что наблюдаемые эффекты отличаются некоторой нестабильностью и меньшей воспроизводимостью по сравнению с переключением в других изучаемых в данной работе материалах, например в VO_2 или V_2O_3. Обзор свойств гетероконтактов на основе как кристаллов, так и тонких пленок ВТСП- и КМС-материалов содержится в [18]. В качестве примера на рис. 14 представлена ВАХ с эффектом памяти гетероструктуры на основе ВТСП.

Причину отличия резистивного порогового переключения с несколькими ветвями (рис. 13б) от ВАХ с памятью на одном и том же материале (Bi-2212) еще предстоит выяснить. Возможно, не последнюю роль здесь играет именно материал электрода (Ag).

В целом класс материалов, в которых наблюдается эффект переключения, достаточно широк. Помимо представленных в настоящем обзоре соединений, следует также указать такие материалы, как, например, Cu-TCNQ нанопроволоки [45], наноструктуры на основе монокристаллических сегнетоэлектриков [49], гетероструктуры CeO_2-манганит [39], сверхрешетки SiGe-Cu [40], фотонные кристаллы [63], природные углеродосодержащие материалы – шунгиты [14] (содержащие фуллерены [2]), монокристаллы EuS [56] и EuO:Gd [68] и многие другие монокристаллические (в том числе нанокристаллические) материалы и системы.

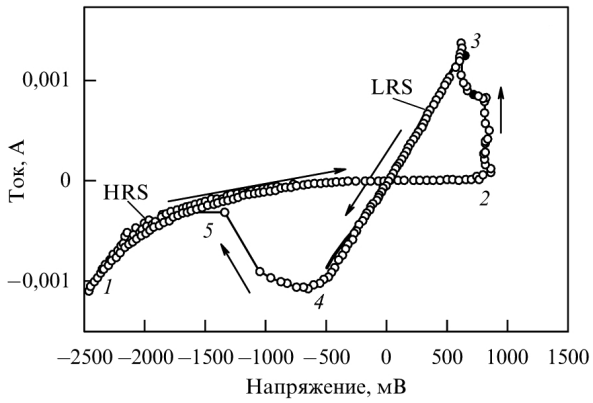


Рис. 14. ВАХ структуры $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+y}$ – Ag [18]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышесказанного можно сделать следующие выводы. Во всех исследованных материалах переключение имеет, скорее всего, электротермическую природу и описывается моделью критической температуры. Переключение связано с ПМИ: образец нагревается протекающим током и переходит в металлическое состояние. Отметим, что в объемных, относительно больших по размерам кристаллах, в отличие от тонкопленочных сэндвич-структур, напряженности действующих электрических полей малы. В то же время есть ряд фактов, не укладывающихся в ординарную тепловую модель. Перечислим их.

1. Кристаллы V_2O_3:Cr не растрескиваются при переключении, тогда как при фазовом переходе по температуре такое растрескивание, из-за теплового расширения, налицо.

2. Дополнительные по отношению к основному («сателлитные») переключения, обусловленные доменами сильного электрического поля, в $NiS_{2-x}Se_x$ говорят в пользу переключения в поле ~10^4 В/см – уравнение (1).

3. Высокая плотность тока (~10^5А/см^2 – уравнение (2)) в $CuIr_2S_{4-x}Se_x$ также может свидетельствовать о действующем сильном электрическом поле.

Вообще при интерпретации переключения в объемных, то есть не тонкопленочных, материалах (кристаллах) необходимо учитывать возможность неоднородного распределения поля, так как дебаевская длина экранирования в соединениях с относительно высокой удельной электропроводностью может достигать величины ~100 нм и меньше.

Следующий пункт, на который бы хотелось обратить внимание в заключение, это переключение в пентаоксиде ванадия. В этом соединении, в отличие от рассмотренных выше материалов, нет ПМИ по температуре. Например, в [52] переключение с памятью наблюдалось в структурах Al-V_2O_5-Al. Перевод структуры обратно в ВС осуществлялся импульсом напряжения амплитудой 12 В и длительностью 5 мкс. В [52] предполагается наличие некоего фазового перехода «металл ↔ стекло», происходящего при температуре T ~ 530 К и ответственного за переключение. С тех пор в литературе даже бытует мнение о наличии ПМИ в V_2O_5. Впервые эта идея была высказана в [26] (со ссылкой как раз на работу [52]), но впоследствии она была неоднократно перепроверена и опровергнута [36], [42]. Тем удивительнее появление в недавнем выпуске такого уважаемого издания, как Applied Physic Letters, статьи [43], возрождающей эту идею. Причем авторы [43] ссылаются на [25], где речь идет о совсем другом фазовом переходе – не ПМИ по температуре, а о структурном переходе на поверхности V_2O_5 из-за изменения кислородной стехиометрии, что, естественно, сопровождается уменьшением электри-

ческого сопротивления. Однако вопрос о ПМИ в пентаоксиде ванадия нельзя считать окончательно закрытым (особенно если данные [43] подтвердятся). Возможно, такой переход действительно будет обнаружен, например, в нестехиометричном с недостатком кислорода V_2O_{5-x} или в легированном оксиде; скажем, в нанопроволоках ванадиевых бронз $A_xV_2O_5$ (A – щелочной металл) недавно обнаружен ПМИ при T = 300–400 K [71].

И наконец, последнее. Оксидные материалы в нанометровом масштабе проявляют новые, по сравнению с объемными образцами, свойства [61]. Однако для того чтобы интегрировать, например, диоксид ванадия в такую бурно развивающуюся область, как оксидная наноэлектроника, необходимо исследовать ПМИ в тонкопленочных или монокристаллических наноструктурах на основе VO_2. В этом направлении в последнее время получены важные результаты [46], [58], [61], [62], [69], [70], в частности, показано, что ПМИ сохраняется в тонких пленках вплоть до характерных размеров, по крайней мере ~100 нм. Что касается конкретных экспериментальных результатов, то минимальные размеры составляют ~20 и ~30 нм [58], [62], [70] для толщины пленки и ширины «нанопроволоки» соответственно.

* Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (2009–2013)», государственные контракты № 14.740.11.0895, 14.740.11.0137, 16.740.11.0562 и 14.740.11.1157, в соответствии с государственным заданием Минобрнауки РФ и заказами Департамента научных и научно-педагогических кадров № 2.3282.2011 и 2.2774.2011, и при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверьянов Е. Е. Справочник по анодированию. М.: Машиностроение, 1988. 224 с.
2. Алешина Л. А., Подгорный В. И., Стефанович Г. Б., Фофанов А. Д. Исследование распыления шунгитов с помощью дугового разряда // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 9. С. 43–46.
3. Бугаев А. А., Захарченя Б. П., Чудновский Ф. А. Фазовый переход металл – полупроводник и его применение. Л.: Наука, 1979. 183 с.
4. Викулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Радио и связь, 1999. 264 с.
5. Волженский Д. С., Савицкий В. Г., Котлярчук Б. К. Механизм переключения в монокристаллах V_2O_5 // ФТТ. 1977. Т. 19. Вып. 9. С. 1552–1554.
6. Дирнлей Дж., Стоунхэм А., Морган Д. Электрические явления в аморфных пленках окислов // УФН. 1974. Т. 112. Вып. 1. С. 83–128.
7. Зайцев Р. О., Кузьмин Е. В., Овчинников С. Г. Основные представления о переходах металл – изолятор в соединениях 3d-переходных металлов // УФН. 1986. Т. 148. Вып. 4. С. 603–636.
8. Ибрагимов Х. О., Алиев К. М., Камилов И. К., Абакарова Н. С. Рекомбинационная неустойчивость и двойное S-переключение в p-Ge(Au) // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 3. С. 82–85.
9. Изюмов Ю. А., Анисимов В. И. Электронная структура соединений с сильными корреляциями. М.: ИКИ, 2008. 376 с.
10. Костылев С. А., Шкут В. А. Электронное переключение в аморфных полупроводниках. Киев: Наукова думка, 1978. 203 с.
11. Меден А., Шо М. Физика и применение аморфных полупроводников: Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 670 с.
12. Мотт Н. Ф. Переходы металл – изолятор: Пер. с англ. М.: Наука, 1977. 344 с.
13. Огрин Ю. Ф., Кунькова З. Е., Абдуллаев А. А. Эффект переключения в кристаллах пятиокиси ванадия // Микроэлектроника. 1973. Т. 2. Вып. 6. С. 559–563.
14. Пергамент А. Л. Электронные неустойчивости в соединениях переходных металлов: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. СПб., 2007. 302 с.
15. Пергамент А. Л., Стефанович Г. Б., Чудновский Ф. А. Фазовый переход металл – полупроводник и эффект переключения в оксидах переходных металлов // ФТТ. 1994. Т. 36. Вып. 10. С. 2988–3001.
16. Пергамент А. Л., Ханин С. Д. Электронное переключение в тонких слоях оксидов переходных металлов // Известия РГПУ им. А. И. Герцена. Естественные и точные науки. 2007. № 7(26). С. 69–86
17. Сандомирский В. Б., Суханов А. А. Явления электрической неустойчивости (переключение) в стеклообразных полупроводниках // Зарубежная радиоэлектроника. 1976. № 9. С. 68–101.
18. Тулина Н. А. Колоссальное электросопротивление и электронная неустойчивость в структурах на основе сильнокоррелированных электронных систем // УФН. 2007. Т. 177. Вып. 11. С. 1231–1239.
19. Ханин С. Д. Проблемы электрофизики металлооксидных конденсаторных диэлектриков // Обзоры по электронной технике. Сер. 5. М.: ЦНИИ «Электроника», 1990. Вып. 1(1524). С. 1–58.
20. Хирный В. Ф., Козловский А. А. Нелинейные эффекты и доменная неустойчивость в оксидной керамике // УФН. 2003. Т. 173. Вып. 6. С. 679–685.
21. Цэндин К. Д., Лебедев Э. А., Шмелькин А. Б. Неустойчивости с S- и N-образными вольт-амперными характеристиками и фазовые переходы в халькогенидных стеклообразных полупроводниках и полимерах // ФТТ. 2005. Т. 47. Вып. 3. С. 427–432.
22. Электронные явления в халькогенидных стеклообразных полупроводниках / Под ред. К. Д. Цэндина. СПб.: Наука, 1996. 483 с.
23. Adler D., Shur M. S., Silver M., Ovshinsky S. R. Threshold switching in chalcogenide glass thin films // J. Appl. Phys. 1980. Vol. 51, №. 6. P. 3289.
24. Andreev V. N., Chudnovskiy F. A., Perooly S., Honig J. M. Electrical conductivity of $CuIr_2S_4$ // Phys. Stat. Sol. (b). 2002. Vol. 234. № 2. P. 623–627.

25. Blum R.-P., Niehus H., Hucho C., Fortrie R., Ganduglia-Pirovano M. V., Sauer J., Shaikhutdinov S., Freund H.-J. Surface Metal-Insulator Transition on a Vanadium Pentoxide (001) Single Crystal // Phys. Rev. Lett. 2007. Vol. 99. P. 226103-1–226103-4.
26. Chain E. E. Optical properties of vanadium dioxide and vanadium pentoxide thin films // Appl. Optics. 1991. Vol. 30. №. 19. P. 2782–2787.
27. Chopra K. L. Avalanch-induced negative resistance in thin oxide films // J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36. P. 184–189.
28. Chudnovskiy F., Luryi S., Spivak B. Switching Device Based on a First-Order Metal-Insulator Transition Induced by an External Electric Field // Future Trends in Microelectronics: the Nano Millennium/ Ed. S. Luryi, J. M. Xu, A. Zaslavsky. Part II: The Future Beyond Silicon. N. Y.: John Wiley and Sons Ltd, 2002. P. 148–155.
29. Chudnovskii F. A., Malinenko V. P., Pergament A. L., Stefanovich G. B. Electrochemical oxidation of Y-Ba-Cu-O high-T_c superconductors // Electrochimica Acta. 1998. Vol. 43. № 12–13. P. 1779–1784.
30. Chudnovskii F. A., Odynets L. L., Pergament A. L., Stefanovich G. B. Electroforming and switching in oxides of transition metals: The role of metal-insulator transition in the switching mechanism // J. Solid State Chem. 1996. Vol. 122. P. 95–99.
31. Chudnovskii F. A., Pergament A. L., Stefanovich G. B., Metcalf P. A., Honig J. M. Switching phenomena in chromium-doped vanadium sesquioxide // J. Appl. Phys. 1998. Vol. 84. № 5. P. 2643–2646.
32. Chudnovskii F. A., Pergament A. L., Stefanovich G. B., Somasundaram P., Honig J. M. Electronic switching in $CuIr_2S_{4-x}Se_x$ // Phys. Status Solidi (a). 1997. Vol. 162. P. 601–607.
33. Chudnovskii F. A., Pergament A. L., Stefanovich G. B., Somasundaram P., Honig J. M. N-type negative resistance in $M/NiS_{2-x}Se_x/M$ structures // Phys. Status Solidi (a). 1997. Vol. 161. P. 577–580.
34. Chudnovskii F. A., Pergament A. L., Somasundaram P., Honig J. M. Delay Time Measurements of $NiS_{2-x}Se_x$-Based Switches // Phys. Stat. Sol. (a). 1999. Vol. 172. P. 131–136.
35. Cox P. A. Transition Metal Oxides. An Introduction to their Electronic Structure and Properties. Oxford: Clarendon Press, 1992. 284 p.
36. Dachuan Y., Niankan X., Jingyu Z. Vanadium dioxide films with good electrical switching properties // J. Phys. D: Appl. Phys. 1996. Vol. 29. P. 1051–1057.
37. Fisher B. Moving boundaries and travelling domains during switching of VO_2 single crystals // J. Phys. C: Solid State Phys. 1975. Vol. 8. P. 2072–2076.
38. Forrest S. R. Organic-inorganic semiconductor devices and 3, 4, 9, 10 perylenetetra-carboxylicdianhydrid: an early history of organic electronics // J. Phys. Condens. Matter. 2003. Vol. 15. № 8. P. S2599–S2610.
39. Fors R., Khartsev S. I., Grishin A. M. Giant resistance switching in metal-insulator-manganite junctions: Evidence for Mott transition // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 71. P. 045305-1–045305-10.
40. Golzan M. M., Hassanzadeh A., Maleki M. H., Kiani-Dehkiani A. Electrical switching properties of nanostructured multilayer superlattice Ge-Si…Cu…Si-Ge prepared by electron beam evaporation on glass // Superlattices and Microstructures. 2010. V. 48. P. 321–329.
41. Imada M., Fujimori A., Tokura Y. Metal-Insulator Transitions // Rev. Mod. Phys. 1998. Vol. 70. № 4. P. 1059–1263.
42. Jerominek H., Picard F., Vincent D. Vanadium oxide films for optical switching and detection // Optical Engineering. 1993. Vol. 32. № 9. P. 2092–2099.
43. Kang M., Kim I., Kim S. W., Ryu J.-W., Park H. Y. Metal-insulator transition without structural phase transition in V_2O_5 film // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 98. P.131907-1–131907-3.
44. Kotliar G. The Mott transition in V_2O_3 and $NiSe_xS_{2-x}$: Insights from dynamical mean field theory // Physica B. 1999. Vol. 259–261. P. 711–717.
45. Li X.-Y., Zheng K.-B., Chen G.-Y., Mo X.-L., Sun D.-L., Chen G.-R. Electrical switching property of single CuTCNQ nanowire // Gongneng Cailiao / Journal of Functional Materials. 2010. Vol. 41. № 5. P. 918–921.
46. Lopez R., Haynes T. E., Boatner L. A. Temperature controlled surface control resonance in VO_2 nanorods // Opt. Lett. 2002. Vol. 27. № 15. P. 1327–1332.
47. Mansingh A., Singh R. The mechanism of electrical threshold switching in VO_2 crystals // J. of Phys. C. 1980. Vol. 13, № 33. P. 5725–5733.
48. Mansingh A., Singh R., Krupanidhi S. B. Electrical Switching In Single Crystal VO_2 // Solid-State Electronics. 1979. Vol. 23. P. 649–654.
49. McQuaid R. G. P., McMillen M., Chang L.-W., Gruverman A., Gregg J. M. Domain wall propagation in meso- and nanoscale ferroelectrics // J. Phys.: Condens. Matter. 2012. Vol. 24. № 2. P. 4204–4209.
50. Meenakshi V., Subramanyam S. V. Effect of disorder on the electrical properties of amorphous conducting carbon films: Observance of field induced metal-insulator transition? // Int. J. Modern Phys. B. 2000. Vol. 14. № 2. P. 224–229.
51. Metcalf P. A., Honig J. M. Study of Cr-doped Vanadium Sesquioxide Crystal Growth // Curr. Top. Crystal Growth Res. 1995. Vol. 2. P. 445–450.
52. Nadkarni G. S., Shirodkar V. S. Experiment and theory for switching in $Al/V_2O_5/Al$ devices // Thin Solid Films. 1983. Vol. 105. P. 115–129.
53. Owen A. E., Le Comber P. G., Hajto J., Rose M. J., Snell A. J. Switching in amorphous devices // Int. J. Electronics. 1992. Vol. 73. № 5. P. 897–906.
54. Oxley D. P. Electroforming, switching and memory effects in oxide thin films // Electrocomponent Sci. Technol. 1977. Vol. 3. № 4. P. 217–224.
55. Pagnia H. Prospects for metal/non-metal microsystems: sensors, sourses, and switches // Int. J. Electronics. 1992. Vol. 72. № 5. P. 819–828.
56. Peña L., Sinencio F. S., Helman J. S., Abraham S., Kaldis E. Electrical switching in metal-EuS contacts // J. Appl. Phys. 1978. Vol. 49. P. 2581–2583.
57. Pergament A. L., Stefanovich G. B., Velichko A. A., Khanin S. D. Electronic Switching and Metal-Insulator Transitions in Compounds of Transition Metals // Materials Science Research Journal. 2007. Vol. 1. Issue 1–2. P. 115–182.
58. Pergament A., Velicko A. Metal-insulator transition in thin films of vanadium dioxide: The problem of dimensional effects // Thin Solid Films. 2010. Vol. 518. № 6. P. 1760–1762.

59. Ray A. K., Hogarth C. A. A critical review of the observed electrical properties of MIM devices showing VCNR // Int. J. Electronics. 1984. Vol. 57. № 1. P. 1–78.
60. Rocca J., Eraz M., Fontana M., Arcondo B. Crystallization process on amorphous GeTeSb samples near to eutectic point $Ge_{15}Te_{85}$ // Journal of Non-Crystalline Solids. 2009. Vol. 355. P. 2068–2073.
61. Schoiswohl J., Surney S., Nedzer F. P. Vanadium Oxide Nanostructures: From Zero- to Three-Dimensional // J. Phys. Condens. Matter. 2006. Vol. 18. P. R1–R15.
62. Sohn J. I., Joo H. J., Porter E. Direct observation of the structural component of the metal-insulator phase transition and growth habits of epitaxially grown VO_2 nanowires // Nanolett. 2007. Vol. 7. № 6. 1570–1575.
63. Sun X. H., Tao X. M. Switchable photonic crystal for polymer dispersed liquid crystal // Optics & Laser Technology. 2011. Vol. 43. P. 820–824.
64. Thurstans R. E., Oxley D. P. The electroformed metal-insulator-metal structure: a comprehensive model // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002. Vol. 35. № 8. P. 802–809.
65. Tsukagoshi K., Yoneya N., Uryu S., Aoyagi Y., Kanada A., Ootuka Y., Alphenaar B. W. Carbon nanotube devices for nanoelectronics // Physica B. 2002. Vol. 323. № 1–4. P. 107–114.
66. Tulina N. A., Ionov A. M., Chaika A. N. Reversible electrical switching at the $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+y}$ surface in the normal metal – $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+y}$ single crystal heterojunction // Physica C. 2001. Vol. 366. P. 23–30.
67. Ummarino G. A., Gonnelli R. S., Daghero D. Eliashberg Equations and the Phenomenology of Field-Effect-Doped C_{60} // Int. J. Modern Phys. B: Condens. Matter Phys. 2002. Vol. 16. № 11/12. P. 1539–1547.
68. Wachter P. Electrical switching and memory effects in doped ferromagnetic semiconductors // Phys. Lett. 1972. Vol. 41a. № 4. P. 391–392.
69. Wei J., Wang Z., Chen W., Cobden D. H. New aspects of the metal-insulator transition in single-domain vanadium dioxide nanobeams // Nature Nanotechnology. 2009. Vol. 4. 420–424.
70. Wu C., Wei H., Ning B., Xie Y. New Vanadium Oxide Nanostructures: Controlled Synthesis and Their Smart Electrical Switching Properties // Advanced Materials. 2010. Vol. 22. № 17. P. 1972–1976.
71. Wu T., Partridge C. J., Banerjiee S. Sambandamurthy G Metal-insulator transition in individual nanowires of doped-V_2O_5 // American Physical Society, APS March Meeting 2010. abstract #V16.007. Portland, Oregon, 2010) [Electronic resource]. Access mode: http://meetings.aps.org/Meeting/MAR10/SessionIndex2/?SessionEventID=125779
72. Yao X., Kuo Y.-K., Powell D. K., Brill J. W., Honig J. M. Magnetic susceptibility and heat-capacity studies of $NiS_{2-x}Se_x$ single crystals: A study of transition at nonzero temperature // Phys. Rev. B. 1997. Vol. 56. P. 7129.
73. Zhong-can O.-Y. Can electric field induced energy gaps in metallic carbon nanotubes? // J. Phys.: Condens. Matter. 2001. Vol. 13. P. L635–L640.

Сентябрь, № 6 **Физико-математические науки** **2012**

УДК 666.1.056

ПАВЕЛ ВИКТОРОВИЧ КУЖАКОВ
аспирант отдела фотофизики сред с нанообъектами, Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
kpv_2002@mail.ru

НАТАЛИЯ ВЛАДИМИРОВНА КАМАНИНА
доктор физико-математических наук, начальник отдела фотофизики сред с нанообъектами Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
nvkamanina@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЗУЛЬТАТА НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НА СПЕКТР ОТРАЖЕНИЯ И МИКРОТВЕРДОСТЬ KBR И BAF_2^*

Рассмотрено влияние поверхностного структурирования углеродными нанотрубками «мягких» материалов УФ- и ИК-диапазонов спектра (KBr и BaF_2) на спектральные характеристики. Дискутируется наличие процесса корреляции между спектральными и прочностными параметрами изучаемых материалов, дается прогноз по их возможному использованию.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, наноструктурирование, «мягкие» оптические материалы

Наряду с классическими оптическими материалами и методами расчета их характеристик [1], [5], [6], в последнее время большое внимание уделяется изучению влияния процесса наноструктурирования, в том числе углеродными нанотрубками, с целью модификации объемных и поверхностных свойств «мягких» материалов УФ- и ИК-диапазонов оптического спектра. К группе «мягких» материалов зачастую относят неорганические структуры на основе фторидов бария, кальция, магния, хлоридов натрия и калия, бромида калия и др. Данные системы без модификации их свойств разными методами упрочнения по критерию проявления именно прочностных характеристик (прочность на истирание, микротвердость и др.) сравнимы с таковыми параметрами для органических пластических материалов. В данной статье исследуется влияние углеродных нанотрубок (УНТ) на спектр отражения оптических материалов: бромида калия KBr и фторида бария BaF_2, а также на их прочностные параметры. В качестве метода нанесения углеродных нанотрубок использовался метод, описанный в работах [3], [7]. Формирование слоя на границе раздела «поверхность материала – углеродная нанотрубка» позволяет несколько уменьшить потери Френеля в силу малости показателя преломления углеродных нанотрубок $n = 1{,}1$; потери Френеля могут быть изменены от единиц процентов (~4 и 8 % от одной до двух необработанных поверхностей оптического материала KBr или BaF_2) до долей процентов (0,2 и 0,4 % от одной и двух обработанных поверхностей соответственно).

Для нормального падения света коэффициент отражения дается известным соотношением [2]:

$$R_{12} = [(n_2 - n_1)/(n_2 + n_1)]^2. \quad (1)$$

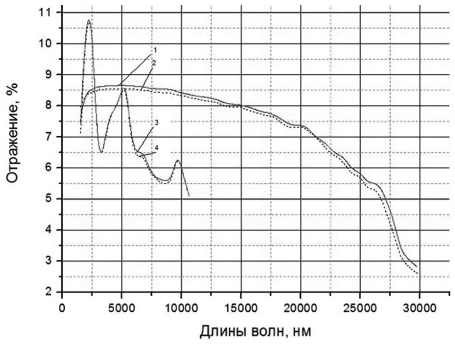
На границе раздела сред «воздух – образец» бромида калия при коэффициенте преломления воздуха $n_1 = 1$ и коэффициенте преломления KBr в рабочей области, например, 1,014 мкм $n_2 = 1{,}54425$ отражение составит 4,51 % без нанесенных нанотрубок.

Зададим показатель преломления n_2 с учетом таковой величины для углеродных нанотрубок, то есть введем $n_3 = 1{,}1$:

$$R_{12} = [(n_3 - n_1) / (n_3 + n_1)]^2. \quad (2)$$

В этом случае теоретически получаем коэффициент отражения 0,22 % при осаждении наноструктур на поверхность подложки.

Для экспериментальной проверки данного факта было проведено лазерное напыление УНТ в смеси с углеродными нановолокнами и собрана экспериментальная установка для проверки уменьшения коэффициента отражения. На рисунке приведены экспериментально полученные спектры отражения для материалов на основе KBr и BaF_2 до и после нанесения углеродных нанотрубок.



Спектр отражения оптических материалов KBr, BaF_2 в инфракрасной области спектра (2000–30 000 нм): 1 – чистый KBr, 2 – наноструктурированный KBr, 3 – чистый BaF_2, 4 – наноструктурированный BaF_2

© Кужаков П. В., Каманина Н. В., 2012

Параллельно спектральным измерениям были сделаны эксперименты по определению микротвердости KBr и BaF_2 до и после нанесения углеродных нанотрубок; использовался микротвердомер ПМТ-3М (разработки ОАО «ЛОМО», Санкт-Петербург). Данные приведены в таблице.

Сравнительные данные по микротвердости для чистых и наноструктурированных образцов KBr (нагрузка на индентор 10 г) и BaF_2 (нагрузка на индентор 20 г)

Изучаемая система	Микротвердость*, Па × 109	Относительное увеличение микротвердости, %
Чистая матричная структура KBr	0,0087 ± 0,0001	6,1
Наноструктурированный KBr	0,0092 ±0,0001	
Чистая матричная структура BaF_2	0,078 ± 0,002	15,8
Наноструктурированный BaF_2	0,090 ± 0,005	

* Среднее значение микротвердости было определено по 10 измерениям.

Итак, уже на первом этапе изучения влияния наноструктурирования на KBr и BaF_2 можно сделать следующие выводы.

1. Процесс наноструктурирования KBr, BaF_2 в ИК-диапазоне не всегда однозначно приводит к существенному изменению спектра отражения на разных длинах волн. Однако в указанном спектральном диапазоне (см. рисунок) получено небольшое изменение в спектре отражения. Наблюдаемый выигрыш при наноструктурировании поверхности, например, образцов KBr (с толщиной 6,08 mm), по результатам проведенных исследований в инфракрасной области спектра, составляет ~0,1 %, а для образцов BaF_2 (с толщиной 3,2 mm) ~0,1 %. Погрешность измерений на указанной установке составляла ~0,01 %, что бывает необходимым при решении таких, например, задач, как регистрация слабых сигналов фоточувствительными датчиками, защищенными «мягкими» оптическими материалами. Малое изменение в коэффициенте отражения, по-видимому, возможно объяснить двумя причинами: во-первых, использованием смеси углеродных наноструктур, а не одностенных УНТ, дающих рельеф с уменьшением шероховатости поверхности вдвое; во-вторых, тем фактом, что при диаметре нанотрубок и нановолокон в диапазоне 6–10 nm возможно попадание приповерхностных слоев матричного материала при частичной лазерной абляции внутрь нанотрубок, как было показано ранее для других систем в работе [4], что нивелирует ожидаемую разницу в показателях преломления и влияет на малые изменения в потерях на отражение; в-третьих, поскольку основным элементом приставки зеркального отражения является призма, обеспечивающая отражение света от поверхности анализируемого образца под определенным углом, нельзя отрицать тот факт, что, возможно, угол подобран для данного спектрального диапазона не совсем точно.

2. Очевидно, что выбор типа углеродных наноструктур, а также первичная обработка поверхности данных матричных материалов (шлифовка, полировка и др.), еще до проведения процесса лазерного нанесения с последующим ориентированием углеродных наноструктур в электрическом поле существенна для получения соответствия между теоретическими расчетами и экспериментальными данными по изучению потерь на отражение.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят В. Е. Ваганова и И. В. Мишакова, а также выражают признательность П. Я. Васильеву, В. И. Студёнову (ФГУП «НПК “ГОИ им. С. И. Вавилова”») и Н. Н. Рожковой (КарНЦ РАН, г. Петрозаводск).

* Работа была поддержана грантом РФФИ № 10-03-00916, а также ФЦП НТБ программой, проект «Модулятор с ПЭВ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альперович Л. И. Метод дисперсионных соотношений и его применение для определения оптических характеристик. Душанбе, 1973. 46 с.
2. Воронкова Е. М., Гречушников Б. Н., Дистлер Г. И., Петров И. П. Оптические материалы для инфракрасной техники. М.: Наука, 1965. 236 с.
3. Каманина Н. В., Васильев П. Я., Студенов В. И Особенности наноструктурированных покрытий при использовании лазерной технологии и ориентированных углеродных нанотрубок // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 3. № 1. С. 23–29.
4. Каманина Н. В., Лихоманова С. В., Васильев П. Я., Студёнов В. И., Чернозатонский Л. А., Ваганов В. Е., Мишаков И. В. Изменение поверхностных свойств тонкопленочных поляризаторов с углеродными наноструктурами // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 24. С. 49–56.
5. Погребняк А. Д., Шпак А. П., Азаренков Н. А., Бересков В. М. Структура и свойства твердых и сверхтвердых нанокомпозитных покрытий // Успехи физических наук. 2009. Т. 179. № 1. С. 3–64.
6. Уханов Ю. И. Оптические свойства полупроводников. М.: Наука, 1977. 366 с.
7. Kamanina N. V., Bogdanov K. Yu., Vasilyev P. Ya., Studeonov V. I., Pujsha A. E., Shmidt A. V., Krestinin A. V., Kajzar F. Nanoobjects – Containing Structures for Aerospace and Laser Switching Systems // Nonlinear Optics and Quantum Optics. 2010. Vol. 40. P. 277–285.

Сентябрь, № 6 **Физико-математические науки** **2012**

УДК 548.737

НАТАЛЬЯ ВАЛЕРЬЕВНА МЕЛЕХ
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Управления научных исследований, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
natalie_melekh@mail.ru

ЛЮДМИЛА АЛЕКСАНДРОВНА АЛЕШИНА
кандидат физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
aleshina@psu.karelia.ru

УТОЧНЕНИЕ АТОМНОЙ СТРУКТУРЫ ПОРОШКОВОЙ ЦЕЛЛОБИОЗЫ МЕТОДОМ РИТВЕЛЬДА*

Методом полнопрофильного анализа уточнена структура порошковой β-целлобиозы. Определены координаты базисных атомов, а также параметры их теплового смещения. Периоды и угол моноклинности элементарной ячейки составили: a = 10,980(3) Å, b = 13,076(5) Å, c = 5,093(1) Å, β = 90,90(2)°.

Ключевые слова: рентгеноструктурный анализ, полнопрофильный анализ, порошковая β-целлобиоза

Порошковую целлобиозу получают при частичном гидролизе целлюлозы, она относится к группе дисахаридов. В свободном виде целлобиоза содержится в соке некоторых деревьев, прорастающих семенах, косточках абрикосов.

Ранее рентгенографические исследования β-целлобиозы были выполнены в [4], [5], [6], [8] на монокристаллических образцах, полученных выпариванием раствора порошковой целлобиозы в различных растворителях и с различной скоростью испарения. В табл. 1 приведены кристаллографические характеристики, полученные в указанных работах.

Таблица 1

Периоды (a, b, c), угол моноклинности (β) и объем (V) элементарной ячейки целлобиозы. Указан код (REFCOD) в Кембриджской базе данных. Пространственная группа симметрии $P\,2_1$ (№ 4)

REFCOD Ссылка	CELLOB [6]	CELLOB01 [4]	CELLOB02 [5]	CELLOB04 [8]
a, Å	10,94(2)	10,993	10,972(4)	5,0633(2)
b, Å	13,05(5)	13,022	13,048(5)	13,0170(5)
c, Å	5,11(2)	5,063	5,091(3)	10,9499(4)
β°	90,0(5)	90,77	90,83(5)	90,811(2)
V, Å^3	729,539	724,707	728,765	721,624

Таким образом, β-целлобиоза кристаллизуется в моноклинной сингонии. Ориентация кристаллографических осей, выбранная в [8], отличается от таковой в [4], [5], [6] тем, что оси x и z поменяны местами.

На элементарную ячейку приходится две молекулы целлобиозы, каждая из которых, как и элементарное звено целлюлоз, состоит из двух глюкозных остатков (рис. 1). Базисными (x, y, z) являются координаты одной молекулы, координаты другой отображаются по закону –x, ½+y, –z: винтовая ось симметрии 2-го порядка. Глюкозные остатки одной молекулы не связаны между собой элементами симметрии.

Различие в кристаллографических характеристиках говорит о том, что условия выращивания монокристаллов влияют на структурные характеристики монокристаллов целлобиозы.

На рис. 1 приведено расположение атомов в элементарных ячейках в проекциях на плоскости ab [4], [5], [6] и bc [8], построенных с помощью программы Mercury [9] по координатам атомов, приведенным в cif-файлах, представленных авторами [4], [5], [6], [8] в Кембриджскую базу данных [3].

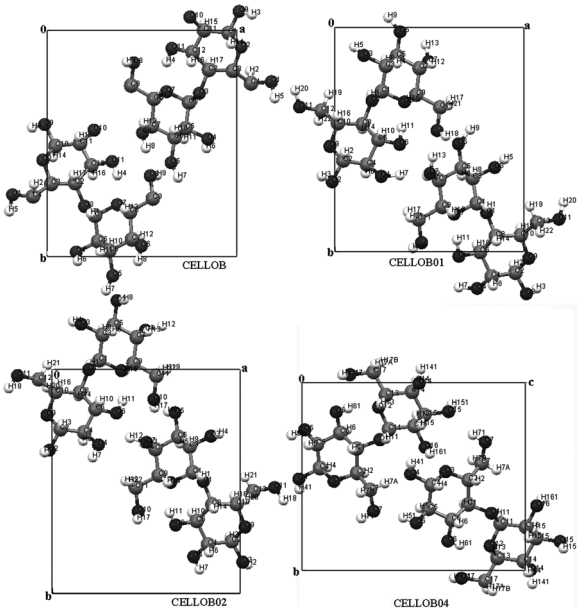


Рис. 1. Проекции расположения атомов в ячейке β-целлобиозы

© Мелех Н. В., Алешина Л. А., 2012

Молекулы целлобиозы связаны между собой водородными связями, но они не образуют цепочек, вытянутых вдоль оси Z (рис. 2), как это имеет место в целлюлозах I и II.

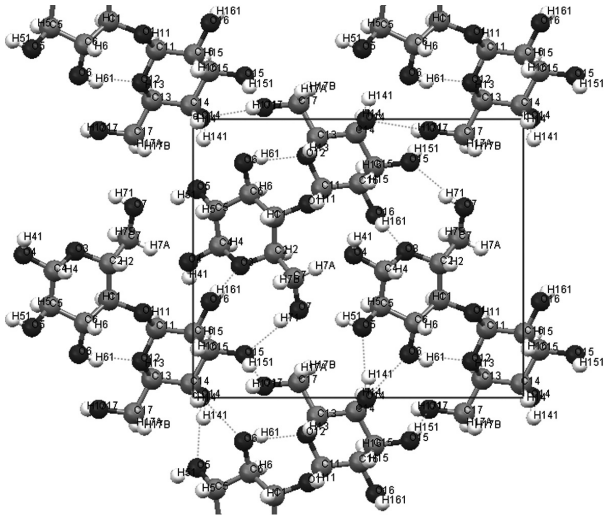


Рис. 2. Система водородных связей между молекулами в структуре β-целлобиозы

В ходе анализа результатов работ [4], [5], [6], [8] были проведены расчеты межатомных расстояний и углов связи по координатам атомов, приведенным в данных работах, с помощью программы Mercury [9].

Анализ значений указанных межатомных расстояний показал, что различие в величинах длин связей C–C и C–O минимально между данными работ [5], [8]: третий знак после запятой. Соответствующие значения, приведенные в [4], [6], отличаются от вышеуказанных уже во втором знаке после запятой как в большую, так и в меньшую сторону.

Угол связи между глюкозными кольцами составляет (116 ± 0.1)° по данным [5], [8] и (117 ± 0.4)° по данным работ [4], [6]. Разброс в значениях углов связи C – C – O более значителен и достигает 5°.

На начальном этапе уточнения структуры исследуемого порошкового образца β-D-целлобиозы использовалась программа «Метод Ритвельда» программного комплекса PdWin [1]. В качестве исходных структурных характеристик вводились атомные координаты и характеристики тепловых смещений, приведенные в работах [4], [5], [6], [8]. Для каждой группы структурных характеристик были уточнены масштабный фактор, коэффициенты полинома фона, параметры полуширины пиков, а также периоды и углы элементарной ячейки, параметр $2\theta_0$, характеризующий сдвиг нуля счетчика, и параметр, учитывающий асимметрию пиков (As), то есть профильные параметры рентгенограммы. Минимальное значение профильного фактора недостоверности 22,5 % было достигнуто для модели CELLOB02 [5].

В процессе уточнения профильных параметров было обнаружено, что ряд отражений на рентгенограмме завышен по интенсивности. Это свидетельствовало о наличии в образце преимущественной ориентации кристаллитов – текстуры. Уточнение текстурного параметра для ряда возможных индексов оси текстуры показало, что индексы оси текстуры [210]. Величина текстурного параметра T составила 0,242, а профильный фактор недостоверности уменьшился более чем в два раза и стал равным для модели CELLOB02 11,1 %, оставаясь по-прежнему минимальным.

Анализ полученной после учета текстуры рентгенограммы показал, что текстура, вероятнее всего, не является аксиальной. Учет сложной текстуры реализован в программе MRIA [10].

Обработка рентгенограммы на начальном этапе решения задачи уточнения структурных характеристик – координат и параметров теплового движения атомов – заключается в разложении рентгенограммы на сумму интегральных интенсивностей (FPD-разложение) [2]. На данном этапе уточняются все профильные параметры, включая периоды элементарной ячейки, кроме текстуры; расчет проводится без использования в качестве входных данных значений координат атомов. Результирующие значения факторов недостоверности, полученные с помощью программы MRIA, составили: профильный R_p = 4,6 %, брэгговский R_b = 3,2 %.

Значения факторов недостоверности, полученные в процессе FPD-разложения, являются минимально возможными для данной рентгенограммы и показывают, что пространственная группа симметрии выбрана верно.

При переходе на стадию уточнения методом Ритвельда вводятся координаты атомов и параметры теплового движения для той или иной модели, значения которых необходимо уточнить. После введения координат атомов для модели до процесса уточнения профильный и брэгговский факторы недостоверности имели значения 38 и 32 % соответственно. Первым шагом на данном этапе являлся учет влияния текстуры. Было установлено, что текстура соответствует модели разложения по симметризованным гармоникам [7]. Значимые величины имели коэффициенты вплоть до 15-го порядка включительно. Результирующие значения факторов недостоверности составили: профильный R_p = 16,03 %, брэгговский R_b = 12,02 %.

Далее проводилось уточнение координат атомов. При этом в качестве начальных использовались сведения об изотропных тепловых параметрах. На данном этапе уточнения все профильные параметры, включая текстурные, также периодически уточнялись. Впоследствии изотропные тепловые параметры были переведены в анизотропные и уточнены. Результирующие значения факторов недостоверности составили: профильный R_p = 3,7 %, брэгговский R_b = 3,0 %.

На рис. 3 представлены экспериментальный и рассчитанный теоретически профили рентгенограммы β-D-целлобиозы.

В табл. 2 приведены характеристики дифракционного эксперимента и уточненные кристаллографические характеристики исследуемого образца целлобиозы в сравнении с результатами работы [5]. Видно, что различие в периодах и угле элементарной ячейки, хотя и незначительно, но выходит за пределы погрешности, и это связано с природой образца.

В табл. 3, 4 приведены уточненные значения координат базисных атомов и изотропных тепловых параметров **B** атомов углерода и кислорода, а в табл. 5 – рассчитанные по значениям координат межатомные расстояния и углы связи в исследуемом образце.

Из данных табл. 3 следует, что уточненные координаты атомов углерода и кислорода в порошковом образце β-целлобиозы в основном находятся в хорошем согласии с данными [5].

Уточненные значения анизотропных тепловых параметров (b_{ij}) атомов углерода и кислорода приведены в табл. 4. Значение изотропного теплового параметра **B** для атомов водорода было принято равным 4,0 Å^2.

Расчет межатомных расстояний по уточненным значениям координат показал, что в целом значения длин связей, рассчитанные для порошкового образца, лежат в пределах: C–C = 1,505 ÷ 1,558 Å, C–O = 1,386 ÷ 1,481 Å (табл. 7), что достаточно хорошо согласуется с соответствующими данными работ [4], [5], [6], [8].

Значения углов связей C1-O1-C8 (между глюкозными остатками) и C9-C11-O10 укладываются в диапазон значений, найденных в работах [4], [5], [6], [8] для монокристаллов, а угол связи C10-C12-O11 в порошковой целлобиозе выше на градус.

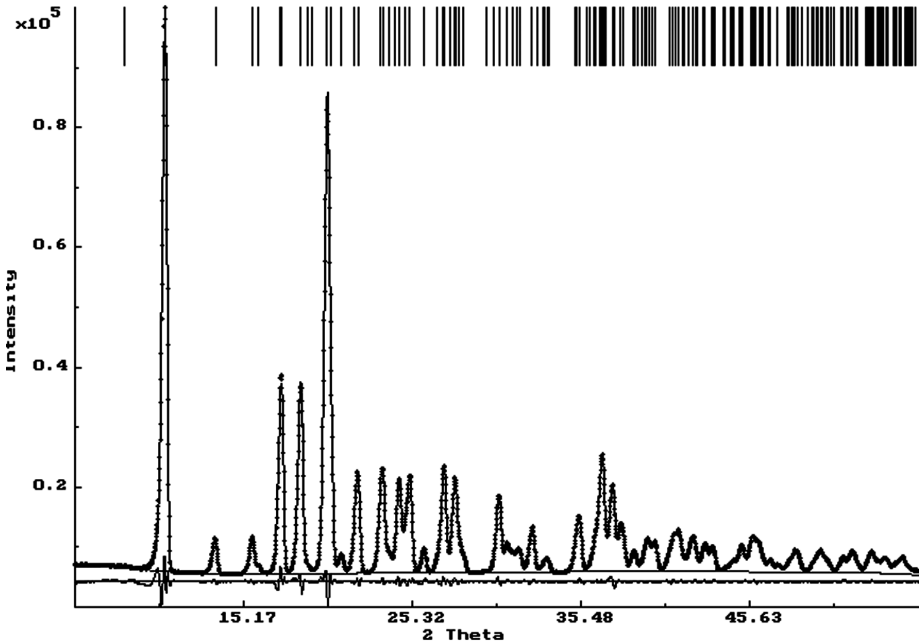


Рис. 3. Теоретическая (—) рассчитанная по данным, полученным в результате уточнения профильных и структурных параметров, и экспериментальная (+++) кривые распределения интенсивности рассеяния рентгеновских лучей порошковым образцом β-целлобиозы. Внизу указана разностная кривая

Таблица 2

Характеристики дифракционного эксперимента и кристаллической структуры целлобиозы

Характеристики дифракционного эксперимента данной работы	Кристаллографические характеристики целлобиозы $[C_{12}O_{11}H_{22}]$	
Излучение Cu Kα	Данная работа	[5]
	Моноклинная, $P2_1$, Z = 2	
	$M_{эл.яч.}$ = 684,68	
θ = 2,5–30°	a = 10,980(3) Å	a = 10,972(4)
	b = 13,076(5) Å	b = 13,048(5)
μ = 12,21 мм$^{-1}$	c = 5,093(1) Å	c = 5,0913(2) Å
	β = 90,90(2)°	β = 90,83(5)°
T = 293 K	V = 731,8(7)Å^3	V = 728 (7) Å^3
Белый порошок в кювете 17,5 × 17,5 × 2 мм	$\rho_{рентг}$ = 1,55 г/см^3	$\rho_{рентг}$ = 1,56 г/см^3

Таблица 3

Координаты базисных атомов в образце β-D-целлобиозы в сопоставлении с данными [5]

Атом	[5]			Атом	Данная работа		
	x	y	z		x	y	z
C1	0,2517	-0,0409	0,5259	C1	.2515(3)	-.0436(3)	.5228(13)
C2	0,0449	0,2670	0,0176	C2	.0477(3)	.2620(3)	.0049(10)
C3	0,2684	-0,1560	0,4883	C3	.2709(3)	-.1591(3)	.4699(13)
C4	0,1711	0,2807	0,1365	C4	.1707(3)	.2815(3)	.1444(10)
C5	0,3292	-0,1992	0,7346	C5	.3315(3)	-.2027(3)	.7156(12)
C6	0,2311	0,1769	0,1783	C6	.2303(3)	.1771(3)	.1827(11)
C7	0,4506	-0,1438	0,7852	C7	.4508(3)	-.1446(3)	.7826(11)
C8	0,1481	0,1029	0,3256	C8	.1470(3)	.1012(3)	.3274(11)
C9	0,4330	-0,0273	0,7848	C9	.4326(3)	-.0263(3)	.7956(11)
C10	0,0188	0,1006	0,2101	C10	.0215(3)	.1002(3)	.2039(10)
C11	0,5550	0,0277	0,7793	C11	.5565(3)	.0251(3)	.7668(13)
C12	-0,0702	0,0438	0,3772	C12	-.0715(2)	.0463(3)	.3849(11)
O1	0,19550	0,0000	0,3013	O1	.1986(2)	.0000(3)	.2972(8)
O2	-0,0138	0,3603	-0,0007	O2	-.0149(2)	.3589(2)	.0095(9)
O3	0,1551	-0,2025	0,4254	O3	.1547(2)	-.2041(2)	.4380(9)
O4	0,2471	0,3360	-0,0377	O4	.2457(2)	.3340(2)	-.0345(9)
O5	0,3456	-0,3075	0,7189	O5	.3435(2)	-.3113(2)	.7020(10)
O6	0,3425	0,1943	0,3122	O6	.3423(2)	.1929(2)	.3054(9)
O7	0,4967	-0,1753	1,0343	O7	.4946(2)	-.1759(2)	1.0431(8)
O8	0,3692	0,0049	0,5507	O8	.3665(2)	.0021(3)	.5506(10)
O9	-0,0263	0,2036	0,1873	O9	-.0250(2)	.2039(2)	.1950(9)
O10	0,5418	0,1338	0,7271	O10	.5452(2)	.1313(3)	.7169(8)
O11	-0,1830	0,0271	0,2428	O11	-.1834(2)	.0263(2)	.2569(8)
	[5]			[5]			
H1	0,2050	-0,0250	0,6900	H12	0,5850	-0,1950	1,028
H2	-0,0400	0,3700	-0,1850	H13	0,5100	-0,1700	0,640
H3	0,0550	0,2450	-0,1920	H14	0,1400	0,1200	0,5150
H4	0,1120	-0,2140	0,5930	H15	0,3850	0,0050	0,9420
H5	0,3200	-0,1700	0,3200	H16	0,0300	0,0650	0,0250
H6	0,1650	0,3180	0,3150	H17	0,5450	0,1700	0,8860
H7	0,2160	0,3930	-0,1150	H18	-0,2300	0,0840	0,2000
H8	0,3820	-0,3120	0,5640	H19	0,6100	-0,0020	0,6400
H9	0,2700	-0,1800	0,8650	H20	-0,0280	0,0800	0,5400
H10	0,2550	0,1400	0,0000	H21	-0,0250	-0,0200	0,4400
H11	0,3750	0,1400	0,4200	H22	0,5900	0,0000	0,9700

Таблица 4

Уточненные значения анизотропных тепловых параметров b_{ij} (Å^2) атомов C и O образца β-целлобиозы

Атом	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
b11	.0050(07)	.0061(07)	.0217(08)	.0068(07)	.0209(10)	.0129(07)	.0050(07)	.0164(08)
b22	.0124(10)	.0028(07)	-.0011(07)	.0006(06)	.0071(10)	.0055(08)	.0092(08)	.0065(08)
b33	.1156(05)	-.0420(65)	.0939(87)	.0147(57)	.1111(99)	-.0093(70)	.0021(63)	.0692(86)
b12	.0024(18)	.0007(13)	-.0027(16)	.0155(12)	.0084(15)	.0009(16)	.0048(15)	-.0129(17)
b13	.0147(51)	-.0301(41)	-.0377(50)	-.0029(36)	.0268(53)	.0005(43)	.0455(35)	-.0331(46)
b23	.0401(56)	-.0036(38)	-.0185(52)	.1207(33)	.0416(71)	-.0232(43)	.0475(48)	.0583(52)
Атом	C9	C10	C11	C12	O1	O2	O3	O4
b11	.0116(09)	.0120(07)	.0448(15)	-.0007(06)	.0094(5)	.0093(05)	.0052(04)	.0011(4)
b22	.0106(09)	.0056(08)	.0219(12)	.0038(07)	.0082(5)	.0164(08)	.0125(05)	.0074(5)
b33	.1188(97)	-.0796(48)	.0242(81)	.0922(79)	.0655(8)	.0790(54)	-.0145(36)	.1046(1)
b12	.0182(16)	.0233(14)	.0070(21)	-.0023(10)	-.0149(9)	-.0113(10)	-.0131(08)	.0057(8)
b13	-.0117(46)	-.0101(33)	.0199(57)	-.0301(35)	-.0204(5)	-.0105(27)	-.0048(23)	.0010(3)
b23	-.0773(57)	.0401(41)	-.0224(70)	-.0297(46)	.0545(7)	-.0350(36)	-.0213(30)	.0360(4)
Атом	O5	O6	O7	O8	O9	O10	O11	
b11	.0144(05)	.0133(05)	.0037(03)	.0159(05)	.0073(04)	.0128(04)	.0082(04)	
b22	.0027(04)	.0025(04)	.0125(05)	.0044(05)	.0006(04)	.0075(05)	.0033(04)	
b33	.0987(56)	.0581(48)	.0767(49)	.1538(66)	.0815(49)	.0160(42)	.0400(44)	
b12	.0047(09)	.0011(10)	-.0045(09)	.0015(10)	-.0050(08)	.0002(09)	.0099(07)	
b13	-.0100(26)	-.0309(28)	-.0086(24)	.0284(33)	.0012(28)	-.0128(25)	-.0290(21)	
b23	.0359(31)	-.0402(25)	.0516(29)	.0046(38)	.0241(34)	.0295(30)	-.0078(29)	

Таблица 5

Значения кратчайших межатомных расстояний и углов связей между атомами в элементарных звеньях порошковой целлобиозы

атом 1	атом 2	r_{12}, Å	атом 1	атом 2	r_{12}, Å	атом 1	атом 2	r_{12}, Å
C1	C3	1,546	O5	C5	1,425	C7	H13	1,036
C2	C4	1,537	O6	C6	1,386	C8	H14	0,990
C3	C5	1,519	O7	C7	1,462	C9	H15	1,003
C4	C6	1,522	O8	C1	1,401	C10	H16	1,025
C5	C7	1,546	O8	C9	1,481	C11	H19	0,947
C6	C8	1,542	O9	C2	1,473	C11	H22	1,141
C7	C9	1,558	O9	C10	1,447	C12	H20	1,017
C8	C10	1,505	O10	C11	1,414	O3	H4	0,933
C9	C11	1,525	O11	C12	1,406	O4	H7	0,929
C10	C12	1,553	C1	H1	1,028	O2	H2	1,034
O1	C1	1,405	C2	H3	1,031	O5	H8	0,825
O1	C8	1,434	C3	H5	0,951	O6	H11	0,969
O2	C2	1,439	C4	H6	0,993	O7	H12	1,027
O3	C3	1,411	C5	H9	1,066	O10	H17	0,998
O4	C4	1,413	C6	H10	1,086	O11	H18	0,953

Некоторые углы связей

Ат1-ат2-ат3	Угол, °	Ат1-ат2-ат3	Угол, °	Ат1- ат2-ат3	Угол, °
C1-O1-C8	116,7	C9-C11-O10	111,9	C10-C12-O11	112,7

Таким образом, нами была впервые уточнена атомная структура порошковой целлобиозы и показано, что в целом она качественно соответствует моделям, предложенным для монокристаллов, но не отождествляется ни с одной из них.

* Работа поддержана Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, ГК № П 415 от 30 июля 2009 года и Программой стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Программа «Метод Ритвельда» № 2006610292 от 27.03.2006 // Программный комплекс PDWin – 4.0. НПО «Буревестник». СПб., 2004. 24 с.
2. Чернышев В. В. Определение кристаллических структур по порошковым данным // Известия Академии наук. Серия химическая. 2001. С. 2171–2190.
3. Allen F. H. The Cambridge structural database: a quarter of a million crystal structures and rising // Acta Cryst. 2002. B58. P. 380–388.
4. Brown C. J. The crystalline structure of the sugars. Part VI. A three-dimensional analysis of β-celloboise // J. Chem. Soc. A. 1966. P. 927.
5. Chu S. S. C., Jeffey G. A. The refinement of the crystal structures of β-D-glucose and cellobiose // Acta Cryst. B. 1968. Vol. 24. P. 830–838.
6. Jakobson R. A., Wunderlich J. A., Lipscomb W. N. The crystal and molecular structure of cellobiose // Acta Cryst. 1961. Vol. 14. P. 598–607.
7. Järvinen M. Application of symmetrized harmonics expansion to correction of the preferred orientation effect // J. Appl. Cryst. 1993. Vol. 26. P. 525.
8. Kalenius E., Kekäläinen T., Neitola R., Beyeh K., Rissanen R., Vainiotaio P. Size- and Structure-Selective Noncovalent Recognition of Saccharides by Tetraethyl and Tetraphenyl Resorcinarenes in the Gas Phase // Chem.-Eur. J. 2008. Vol. 14. P. 5772–5779.
9. Macrae C. F., Edgington P. R., McCabe P., Pidcock E., Shields G. P., Taylor R., Towler M., van de Streek J. Mercury: visualization and analysis of crystal structures // J. Appl. Cryst. 2006. Vol. 39. P. 453–457.
10. Zlokazov V. B., Chernyshev V. V. MRIA – a program for a full profile analysis of powder multiphase neutron-diffraction time-of-flight (direct and Fourier) spectra // J. Appl. Cryst. 1992. № 25. P. 447–451.

Сентябрь, № 6 **Физико-математические науки** **2012**

УДК 519.853.62

АНАТОЛИЙ ВИКТОРОВИЧ ВОРОНИН
доктор технических наук, профессор, ректор, заведующий кафедрой прикладной математики и кибернетики, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
voronin@psu.karelia.ru

ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ КУЗНЕЦОВ
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и кибернетики, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
kuznetcv@mail.ru

АНТОН ИГОРЕВИЧ ШАБАЕВ
кандидат технических наук, директор Центра ПетрГУ-Метсо Систем Автоматизации, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
ashabaev@petrsu.ru

МАКСИМ ВЛАДИМИРОВИЧ СПИРИЧЕВ
программист Центра ПетрГУ-Метсо Систем Автоматизации, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
MaxSpirichev@gmail.com

ДАНИЛ ГРИГОРЬЕВИЧ ВИЛАЕВ
программист Центра ПетрГУ-Метсо Систем Автоматизации, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
vilaev@petrsu.ru

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ХИМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ НА ОСНОВЕ МИНИМИЗАЦИИ ЭНЕРГИИ ГИББСА*

Представлен алгоритм расчета термодинамически равновесного состава химической системы на основе минимизации энергии Гиббса. В основе алгоритма лежит метод возможных направлений. Предлагаемый алгоритм обеспечивает решение задачи с высокой точностью, даже когда другие известные алгоритмы не находят оптимального решения.

Ключевые слова: химическое равновесие, фазовое равновесие, минимизация энергии Гиббса, метод возможных направлений

Компьютерное моделирование химических процессов позволяет эффективно проектировать новые технологические процессы; экономить время и ресурсы при проведении экспериментов; проводить исследования, которые невозможно осуществить экспериментальным путем из-за высокой стоимости, экологических рисков и др.; исключить влияние посторонних факторов на исследуемый объект. Существенной частью моделирования химических процессов является расчет термодинамически равновесного состояния химической системы.

В литературе представлены два основных подхода к нахождению равновесного состояния химической системы, основанных на решении системы стехиометрических уравнений и на нахождении экстремума термодинамического потенциала системы, соответствующего равновесному состоянию [4; Т. 2; 500–501]. Последний метод приобретает большую популярность в связи с возможностью эффективной реализации на ЭВМ. На практике традиционно рассматриваются изобарно-изотермические условия, в которых равновесное состояние системы характеризуется минимумом энергии Гиббса. Таким образом, задача расчета равновесного состояния системы основана на поиске химического состава системы, обладающего минимальной энергией Гиббса.

В литературе представлено достаточно большое число алгоритмов поиска химического состава системы с минимальной энергией Гиббса, часть которых основана на методе наискорейшего спуска (в частности, алгоритм, предложенный Уайтом, Джонсоном и Данцигом в 1958 году [8]), часть – на методе Ньютона [7] и его модификациях [2]. Подробный обзор данных алгоритмов представлен в работе [6]. Другие подходы, например использование метода внутренних точек [5], [6], получили меньшее распространение.

Энергию Гиббса системы (в случае использования уравнения идеального газа в качестве уравнения состояния) можно найти следующим образом [4; Т. 1; 132–133]:

$$G = \sum_{k \in P} \sum_{i \in N_k} x_i \left(g_i + RT \ln \frac{x_i}{\sum_{j \in N_k} x_j} \right), \qquad (1)$$

где N – индексное множество всех зависимых компонентов, N_k – множество зависимых компо-

© Воронин А. В., Кузнецов В. А., Шабаев А. И., Спиричев М. В., Вилаев Д. Г., 2012

нентов, принадлежащих фазе k, x_i – количество зависимого компонента i (в молях), P – индексное множество фаз, g_i – молярный потенциал Гиббса зависимого компонента i, вычисляемый по формуле:

$$g_i = H_i - S_i T + RT \ln \frac{P}{P_0}, \quad (2)$$

где H_i – молярная энтальпия образования зависимого компонента i при температуре T, S_i – молярная энтропия образования зависимого компонента i при температуре T, R – универсальная газовая постоянная, P – давление системы, P_0 – давление, использовавшееся при определении S (в стандартных условиях, $P_0 = 10^5$ Па).

Обозначим общее количество вещества в фазе k как y_k, $y_k = \sum_{i \in N_k} x_i$ и разделим g_i на RT. Тогда задача минимизации энергии Гиббса формулируется следующим образом:

$$F(x) = \sum_{k \in P} \sum_{i \in N_k} x_i \left(c_i + \ln \frac{x_i}{y_k} \right) \to \min, \quad (3)$$

при условии

$$\sum_{i \in N} a_{ij} x_i = b_j, \forall j \in M, \quad (4)$$

$$x_i \geq 0, \forall i \in N, \quad (5)$$

$$y_k = \sum_{i \in N_k} x_i, \quad (6)$$

где M – индексное множество независимых компонентов, a_{ij} – стехиометрические коэффициенты (количество частиц независимого компонента j, входящих в состав одной частицы компонента i), b_j – общее количество независимого компонента j в системе (в молях), коэффициенты целевой функции определяются по формуле

$$c_i = \frac{g_i}{RT} = \frac{H_i - S_i T}{RT} + \ln \frac{P}{P_0}. \quad (7)$$

Укажем особенности задачи минимизации энергии Гиббса. Функция F является выпуклой в области определения, не определена при $x_i = 0$. Задача характеризуется относительно высокой размерностью (число переменных, соответствующих зависимым компонентам, может достигать тысяч, на практике часто встречаются задачи с более чем сотней переменных), при этом малым изменениям значений функции F могут соответствовать большие изменения переменных. Применение традиционных подходов, основанных на методе наискорейшего спуска и методе Ньютона, осложняется возможным вырождением системы линейных уравнений, решаемых на каждой итерации алгоритма, что может приводить к потере точности. В случае необходимости изменения состава фаз текущего решения происходят значительные изменения множителей Лагранжа, что также существенно затрудняет вычисления.

Для решения этой задачи будем использовать следующий вариант метода возможных направлений [3]. Для нахождения точек локальных минимумов общей задачи нелинейного программирования применяются релаксационные методы, в которых при вычислении направления спуска из некоторой точки x учитываются локальные свойства минимизируемой функции и локальные свойства множества X в окрестности точки x. Направление спуска в этом методе находят следующим образом: строят в точке x конус возможных направлений, который задается системой линейных равенств, и выбирают в этом конусе вектор конечной длины, составляющий острый угол с антиградиентом целевой функции.

Суть метода такова. Рассмотрим задачу минимизации выпуклого дифференцируемого функционала F в выпуклой ограниченной области X пространства R^n:

$$F(x) \to \min, x \in \mathrm{X}. \quad (8)$$

Выберем произвольную точку $x^0 \in$ X.

Для поиска направления спуска s^t в текущей точке $x^t \in$ X решается задача

$$\sigma^t \to \max, \quad (9)$$

$$\sum_i \frac{dF}{dx_i}(x^t) s_i^t + \sigma^t \leq 0, \quad (10)$$

$$[x^t, x^t + s^t] \subset \mathrm{X}. \quad (11)$$

Если $\sigma^t \leq 0$, то x – точка локального минимума. Иначе переходим к следующей точке

$$x^{t+1} = \min_{x \in [x^t, x^t + s^t]} F(x). \quad (12)$$

В применении к задаче минимизации энергии Гиббса метод возможных направлений имеет следующие особенности. Усилим ограничение (5):

$$x_i > 0, \forall i \in N. \quad (13)$$

Производная имеет вид:

$$\frac{dF}{dx_i}(x) = c_i + \ln \frac{x_i}{y_k}. \quad (14)$$

Целевая функция и множество допустимых значений выпуклы, следовательно, локальный минимум является глобальным.

Применим ограничение (11) к рассматриваемой задаче:

$$A(x^t + s^t) = B, \quad (15)$$

$$x_i^t + s_i^t \geq 0, \ \forall i \in N, \quad (16)$$

получаем

$$As^t = 0, \quad (17)$$

$$-s_i^t \leq x_i^t. \quad (18)$$

Таким образом, возможное направление из точки x^t на каждом шаге для задачи с нелиней-

ной целевой функцией и линейными ограничениями определяется следующим образом:

$$\sigma^t \to \max, \tag{19}$$

$$\sum_i \frac{dF}{dx_i}(x^t)s_i^t + \sigma^t \le 0, \tag{20}$$

$$As^t = 0, \tag{21}$$

$$-s_i^t \le x_i^t. \tag{22}$$

Задача (19)–(22) представляет собой задачу линейного программирования (ЛП). Метод возможных направлений требует решения задачи (19)–(22) на каждом шаге, что является затратным при большом количестве итераций алгоритма. Используем возможность заменить решение задачи ЛП модификацией предшествующего решения.

Шаг 1. На каждой итерации получаем текущее решение x^t и множество $B^t \subset N$, образующее базис по столбцам ограничений A^i, $i \in B^t$. Возможные направления будем находить следующим образом: для каждой небазисной переменной с индексом $q \in N \setminus B^t$ можно построить вектор

$$s_i \equiv \begin{cases} z_i^q, & i \in B^t, \\ -1, & i = q, \\ 0, & \textit{иначе}, \end{cases} \tag{23}$$

где z_i^q – разложение A_q по базису B^t.

Для заданного s выполняется уравнение (21). Действительно,

$$\sum_{i \in N} A_i s_i = \sum_{i \in B^t} A_i s_i - A_q s_q = \sum_{i \in B^t} A_i z_i - \sum_{i \in B^t} A_i z_i = 0.$$

Найдем значение $\sum_i \frac{dF}{dx_i}(x^t)s_i^t$. Если значение отрицательно, то s удовлетворяет условиям (21)–(22), если значение положительно, то s удовлетворяет условиям (21)–(22). Иначе данное направление не подходит для поиска решения.

Среди всех возможных направлений находим направление с минимальным значением $\sum_i \frac{dF}{dx_i}(x^t)s_i^t < 0$.

Решение найдено, если невозможно найти новое направление.

Шаг 2. Найдем $d = \max\{l : x_i + ls_i \ge 0, \forall\, i \in N\}$.

Рассмотрим переход к следующей точке, найдем

$$d^* = \arg\min_{h \in [0,d]} F(x^t + hs). \tag{24}$$

Функция $F(x)$ выпукла, что позволяет находить d^* методом дихотомии. Действительно, $x^{t+1} = x^t + d^*s$. Построим новый базис:

- если $\exists i \in B^t : x_i^t + d^* s_i = 0$, то $B^{t+1} = B^t \cup \{q\} \setminus \{i\}$,
- иначе, если $\exists j \in B^t : |F'_{x_j}(x^{t+1})| > |F'_{x_q}(x^{t+1})|$, то, $B^{t+1} = B^t \cup \{q\} \setminus \{i\}$
- иначе $B^{t+1} = B^t$.

После построения нового базиса – переход к шагу 1.

Начальные решение и базис задаются с помощью дополнительных переменных с единичной матрицей и $c_i = +\infty$.

При реализации алгоритма в виде программной системы использовалась универсальная библиотека UPS Framework, созданная специалистами IT-парка ПетрГУ на основе многолетнего опыта разработки и внедрения программных систем [1]. Библиотека включает большое количество тесно интегрированных друг с другом программных компонент, позволяющих унифицировать процессы и ускорить разработку модулей системы, упростить программное описание моделей данных, уменьшить количество ошибок. В частности, в нее входит модуль UPS.Solver для решения сложных оптимизационных задач планирования производства («универсальный решатель»). Все компоненты UPS Framework интегрированы в среду программирования MS Visual Studio .NET, что позволяет свободно и единообразно использовать их вместе со стандартными методами и компонентами MS Visual Studio.

Матрица ограничений в данной задаче оптимизации имеет достаточно большую размерность и ярко выраженную специфическую блочную структуру. С учетом большого количества блоков матрицы ограничений определение и задание их взаимного расположения часто приводит к трудноустранимых ошибкам. Поэтому в составе UPS. Solver реализована специальная структура данных для повышения эффективности хранения и использования данных с учетом структуры подматриц – «матричный конструктор».

Линеаризация выпуклого аддитивного функционала задачи (3)–(6) приводит к необходимости последовательного построения большого количества столбцов [8]. С целью учета особенностей используемого способа применения градиентного метода был использован модуль UPS. Solver, базовым методом которого является метод генерации столбцов. Его основное отличие от других методов в том, что проверка оптимальности решения осуществляется не с использованием матрицы исходных данных, а путем решения вспомогательной задачи оптимизации.

Представленный алгоритм был проверен на наборе тестовых данных собственной разработки. В качестве альтернативного подхода использовался алгоритм Уайта [7], который обычно используется в коммерческих программных продуктах для решения данной задачи. Термодинамические данные для тестов брались из базы данных, входящей в пакет HSC Chemistry 6.1 (разработка Outotec Oyj, Финляндия).

Использованный набор тестовых данных состоит из 30 химических систем, для каждой из которых было создано от 20 до 100 отдельных задач минимизации энергии Гиббса при различных исходных количествах веществ, температурах и давлениях. Набор тестовых данных условно состоит из двух частей: набора относительно простых и относительно сложных химических систем. Простые системы характеризуются следующими свойствами:

- малым количеством зависимых компонентов (< 50),
- невырожденной матрицей ограничений,
- обусловленностью целевой функции в окрестности оптимального решения.

Для простых химических систем равновесное состояние успешно находится алгоритмом Уайта. В случае сложных химических систем алгоритм Уайта иногда находит оптимальное решение не во всех точках, что приводит к «зигзагам» и «дырам» при построении графиков количеств веществ для близких химических систем (рис. 1, 2).

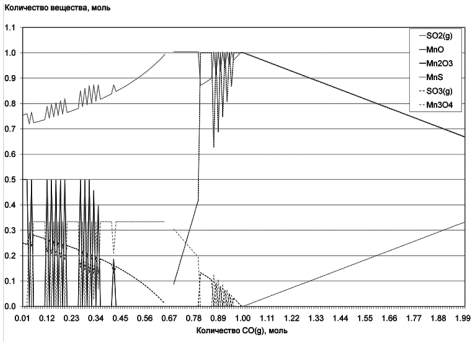


Рис. 1. График количеств веществ для сложной химической системы, найденных алгоритмом Уайта

Из представленных в таблице результатов тестирования видно, что предлагаемый алгоритм успешно находит равновесный состав для систем.

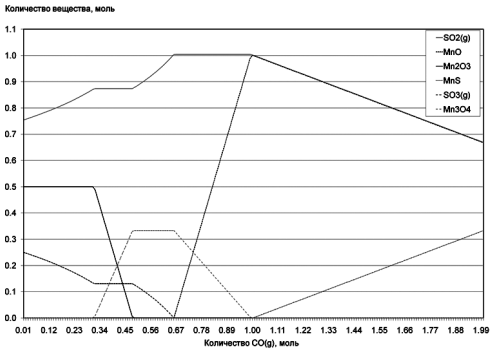


Рис. 2. График количеств веществ для сложной химической системы (рис. 1), найденных представленным в статье алгоритмом

Результаты тестирования предложенного алгоритма и алгоритма Уайта

		Алгоритм Уайта, решено тестов			Новый алгоритм, решено тестов		
Тип тестов	Всего тестов	Полностью	Частично	Не решено	Полностью	Частично	Не решено
Простые	10	10	0	0	10	0	0
Сложные	20	1	13	6	20	0	0
Итого	30	11	13	6	30	0	0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен алгоритм нахождения термодинамически равновесного состава химической системы на основе минимизации энергии Гиббса, который был успешно применен к решению практических задач. Алгоритм может применяться и для более широкого круга задач минимизации выпуклого дифференцируемого функционала в выпуклой ограниченной области пространства R^n. Примером является задача нахождения равновесного состава химической системы с функциональными коэффициентами активности.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронин А. В., Шабаев А. И., Печников А. А. Конвейерная технология разработки программного обеспечения для управления производственными ресурсами и процессами // Перспективы науки. 2010. Т. 4. С. 95–99.
2. Деревич И. В. Расчет термодинамического равновесия раствор – пар на основе минимизации энергии Гиббса // Теоретические основы химической технологии. 2008. Т. 42. № 3. С. 311–316.
3. Карманов В. Г. Математическое программирование: Учеб. пособие. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 260 с.
4. Уэйлес С. Фазовые равновесия в химической технологии: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. Ч. 1, 2.
5. Amundson et al. Primal-dual interior-point method for an optimization problem related to the modeling of atmospheric organic aerosols // Journal of optimization theory and applications. 2006. Vol. 130. № 3. P. 375–407.
6. Karpov I. K., Chudnenko K. V., Kulik D. A. Modeling chemical mass transfer in geochemical processes: thermodynamic relations, conditions of equilibria, and numerical algorithms // American Journal of Science. 1997. Vol. 297. P. 767–806.
7. White W. B. Numerical determination of chemical equilibrium and the partitioning of free energy // The Journal of Chemical Physics. 1967. Vol. 46. № 11. P. 4171–4175.
8. White W. B., Johnson S. M., Dantzig G. B. Chemical equilibrium in complex mixtures // The Journal of Chemical Physics. 1958. Vol. 28. № 5. P. 751–755.

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ПЕТРОЗАВОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Сентябрь, № 6 **Физико-математические науки** **2012**

УДК 517.977

АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ КИРИЛЛОВ
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования природно-технических систем Института прикладных математических исследований, Карельский научный центр РАН, профессор кафедры теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
kirillov@krc.karelia.ru

НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ СМИРНОВ
аспирант Института прикладных математических исследований, Карельский научный центр РАН, преподаватель кафедры теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
smirnov_work@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ МАЛОГО ПРЕДПРИЯТИЯ И ОПТИМАЛЬНАЯ СХЕМА КРЕДИТОВАНИЯ*

Строится математическая модель динамики развития малого предприятия с учетом штрафов за загрязнение окружающей среды. Рассматривается задача выбора оптимальной по прибыли схемы кредитования.

Ключевые слова: динамика развития, кредитование, фонды, управление

ВВЕДЕНИЕ

Современная Россия характеризуется наличием предпосылок для экономического роста. Как известно, на рынке существуют спрос и предложение на товары и услуги. В ситуации, когда спрос больше предложения, нужна быстрая организация или модернизация производства. В большинстве случаев кредиты – единственная возможность получения средств на эти цели. Как известно, в РФ приняты следующие схемы кредитования [2]:

- с равномерным погашением кредита;
- с «кредитными каникулами»;
- «воздушный шар».

В первой схеме долг, состоящий из предоставленного кредита и процентов по нему, выплачивается равномерно одинаковыми частями в течение всего периода кредитования. Во второй схеме долг выплачивается частями после некоторого промежутка времени, называемого «кредитные каникулы». В третьей весь долг погашается одной выплатой в конце периода кредитования.

Для совместного описания схем кредитования введем параметры Θ_1, Θ_2 – моменты окончания получения кредитов и окончания «кредитных каникул» соответственно. Тогда получаем задачу оптимального управления:

$$\dot{A} = F(A, \Theta_1, \Theta_2, t),$$

$$\max_{\Theta_2} I(A, \Theta_1, \Theta_2),$$

где $A(t)$ – стоимость производственных фондов, I – прибыль. В работе будут конкретизированы F и I.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В связи с разнообразием предложений возникает задача выбора оптимальной в смысле максимизации прибыли схемы кредитования. В работе рассмотрены аннуитетные платежи по кредиту. Перечисленные выше схемы отличаются моментом начала выплат. Введем функцию кредитования, объединяющую все схемы, что позволяет свести задачу выбора оптимальной по прибыли схемы к выбору момента окончания кредитных каникул.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Для построения модели рассмотрим схему «кредитные каникулы» и применим подход, предложенный в [1]. Затраты в начале проектов, как правило, наиболее капиталоемкие. Рассмотрим линейную убывающую во времени функцию кредитования $K(t) = \frac{2\overline{K}}{\Theta_1}(1 - \frac{t}{\Theta_1})$ [1], в которой общий объем кредитных займов $\overline{K}$ берется в период времени $(0, \Theta_1]$. Обычно можно заранее рассчитать Θ_1. В период $(\Theta_1, \Theta_2]$ предприятие развивается также без выплат по кредиту. Тогда $(0, \Theta_2]$ – период «кредитных каникул». С момента окончания кредитных каникул начинаются кредитные выплаты. По кредиту начисляются сложные проценты по ставке r за период начисления. Тогда к моменту Θ_2 кредитная задолженность $D = \frac{2\overline{K}}{r^2\Theta_1^2}(e^{r\Theta_1}(r\Theta_1 - 1) + 1)(1 + r(\Theta_2 - \Theta_1))$.

Введем следующие обозначения: A_0 – начальная стоимость предприятия; $\overline{K}$ – весь объем кредитных займов; T – длительность периода

© Кириллов А. Н., Смирнов Н. В., 2012

кредитования; f – коэффициент фондоотдачи; μ – коэффициент износа; коэффициент λ определяет количество полученных инвестиций в отношении к суммарному объему кредитов; коэффициент $0 \le \varepsilon \le 1$ определяет долю прибыли, вкладываемой в производство; все затраты на производство и штрафы за загрязнение окружающей среды включены в себестоимость единицы продукта γ, p – прибыль с каждой единицы продукта; $\delta(\Theta_2)$ – аннуитетный платеж.

Изменение стоимости фондов *A(t)* отражает система:

$$\dot{A}(t) = \begin{cases} A(t) f\varepsilon(p-\gamma) + (1+\lambda)K(t) - \mu A(t) \ \ при \ \ t \in (0, \Theta_1], \\ A(t) f\varepsilon(p-\gamma) - \mu A(t) \ \ при \ \ t \in (\Theta_1, \Theta_2], \\ \varepsilon(fA(t)(p-\gamma) - \delta(\Theta_2)) - \mu A(t) \ \ при \ \ t \in (\Theta_2, T], \end{cases} \quad (1)$$

где $\delta(\Theta_2) = D(r + \dfrac{r}{(1+r)^{T-\Theta_2} - 1})$ – аннуитетный платеж.

Решая уравнения системы (1), получим выражения стоимости фондов в любой момент времени $t \in [0, T]$ [3]:

$$A(t) = \begin{cases} e^{\beta t} A_0 + \dfrac{2\overline{K}(1+\lambda)}{\Theta_1}\left(\dfrac{e^{\beta t} - 1}{\beta} + \dfrac{t}{\Theta_1 \beta} + \dfrac{1 - e^{\beta t}}{\Theta_1 \beta^2}\right) \ \ при \ t \in (0, \Theta_1], \\ e^{\beta t} A_0 + \dfrac{2\overline{K}(1+\lambda)}{\Theta_1}\left(\dfrac{e^{\beta t}}{\beta} + \dfrac{e^{\beta(t-\Theta_1)} - e^{\beta t}}{\Theta_1 \beta^2}\right) \ \ при \ t \in (\Theta_1, \Theta_2], \\ e^{\beta t} A_0 + \dfrac{2\overline{K}(1+\lambda)}{\Theta_1}\left(\dfrac{e^{\beta t}}{\beta} + \dfrac{e^{\beta(t-\Theta_1)} - e^{\beta t}}{\Theta_1 \beta^2}\right) + \dfrac{\varepsilon\delta(\Theta_2)}{\beta}(1 - e^{\beta(t-\Theta_2)}) \ \ при \ t \in (\Theta_2, T], \end{cases}$$

где $\beta = \varepsilon f(p - \gamma) - \mu$.

Выразим из (1)

$$A(t) = \begin{cases} A_1(t) = \dfrac{\dot{A} - (1+\lambda)K(t)}{\varepsilon f(p-\gamma) - \mu} \ \ при \ \ t \in (0, \Theta_1], \\ A_2(t) = \dfrac{\dot{A}}{\varepsilon f(p-\gamma) - \mu} \ \ при \ t \in (\Theta_1, \Theta_2], \\ A_3(t) = \dfrac{\dot{A} + \delta(\Theta)\varepsilon}{\varepsilon f(p-\gamma) - \mu} \ \ при \ \ t \in (\Theta_2, T]. \end{cases} \quad (2)$$

Общая прибыль малого предприятия задается функционалом:

$$I = \int_0^{\Theta_1} (1-\varepsilon) f A_1(t)(p-\gamma)dt + \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} (1-\varepsilon) f A_2(t)(p-\gamma)dt + \\ + \int_{\Theta_2}^{T} (1-\varepsilon) f A_3(t)(p-\gamma)dt - \delta(\Theta_2)(T - \Theta_2). \quad (3)$$

Подставив в (3) найденные из (2) A_1, A_2, A_3 и введя $\alpha = \dfrac{f(p-\gamma)(1-\varepsilon)}{\varepsilon\, f(p-\gamma) - \mu}$, получим функционал для нахождения прибыли за период кредитования:

$$I = \alpha\left(A_o(e^{\beta T} - 1) + \frac{2\overline{K}(1+\lambda)e^{\beta T}(\Theta_1\beta - 1 + e^{-\beta\Theta_1})}{\Theta_1^2 \beta^2} + \right. \\ \left. + \varepsilon\delta(\Theta_2)\left(\frac{1 - e^{\beta(T-\Theta_2)}}{\beta} + T - \Theta_2\right) - (1+\lambda)\overline{K}\right) - \delta(\Theta_2)(T - \Theta_2).$$

В схеме «воздушный шар» $\Theta_2 = T$, тогда выплата всей задолженности по кредиту $D = \dfrac{2\overline{K}}{r^2\Theta_1^2}(e^{r\Theta_1}(r\Theta_1 - 1) + 1)(1 + r(T - \Theta_1))$ производится по окончании периода кредитования. Стоимость фондов вычисляется как

$$A(t) = \begin{cases} A_1(t) \ \ при \ t \in (0, \Theta_1], \\ A_2(t) \ \ при \ t \in (\Theta_1, T]. \end{cases}$$

Для схемы равномерного погашения кредита $\Theta_2 = 0$. Рассмотрим случай, когда в начальный момент времени берется один кредит K_0 и сразу начинаются выплаты по нему в размере $\delta(0)$. При условии, что до момента Θ_1 происходит модернизация производства, стоимость фондов вычисляется

$$A(t) = \begin{cases} A_1(t) - \delta(0) \ \ при \ t \in (0, \Theta_1], \\ A_2(t) - \delta(0) \ \ при \ t \in (\Theta_1, T]. \end{cases}$$

Для этих двух схем в формулу общей прибыли (3) вносятся соответствующие изменения.

При вычислениях важно учитывать, что:

- все параметры предоставляются в расчете на период начисления процентов по кредиту;
- при расчетах важно проверять ограничение, что стоимость фондов в конце периода кредитования не менее некоторого, подходящего нам значения $A(T) \ge \sigma_T = const$. Это условие влияет на выбор параметра ε, который следует увеличить, если условие не выполняется.

Поскольку функционал I сложен для аналитического исследования, перейдем к численному анализу.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА

Рассмотрим значения параметров, которые соответствуют типичному малому предприятию, выпускающему некоторую продукцию: хлебобулочные изделия, молочные продукты и т. д. (табл. 1). Для увеличения производства берутся кредиты. Табл. 2 показывает зависимость общей прибыли от значений параметров.

Особый интерес вызывает момент, с которого наиболее выгодно начинать выплаты по кредиту. Численный анализ данной задачи показывает зависимость общей прибыли от момента Θ_2 при различных значениях остальных параметров.

Таблица 1

Параметры задачи

Параметр	Стандартное значение	Параметр	Стандартное значение
A_0, руб.	10^6	Θ_1, мес.	6
f	0,068	Θ_2, мес.	9
ε	0,1	r %, в мес.	0,02
μ	0,0084	p	20
$\overline{K}$, руб.	10^6	λ	0
T, мес.	12	λ	0

Рис. 1–2 отражают влияние выбора момента начала выплат Θ_2 на прибыль при различных значениях процентной ставки кредита. По графикам видно, что при низкой процентной ставке выгоднее делать кредитные выплаты в конце периода кредитования (рис. 1). При большой

ставке лучше начинать делать выплаты сразу по окончании процесса модернизации предприятия (рис. 2).

Таблица 2

Результаты варьирования некоторых параметров

Параметр	Стандартное значение	Интервал варьирования	Общая прибыль за период кредитования
$\overline{K}$, руб.	10^6	$0{,}5*10^6$ – $2*10^6$	$2{,}773*10^6$ – $3{,}821*10^6$
Θ_2, мес.	9	7–11	$3{,}0962*10^6$ – $3{,}0974*10^6$
r% , в мес.	0,02	0,01–0,05	$3{,}2*10^6$ – $2{,}73*10^6$
ε	0,1	0,1–0,9	$3{,}096*10^6$ – $1{,}77*10^5$
f	0,068	0,04–0,09	$1{,}21*10^6$ – $4{,}71*10^6$
μ	0,0084	0,04–0,1	$2{,}4*10^6$ – $1{,}45*10^6$

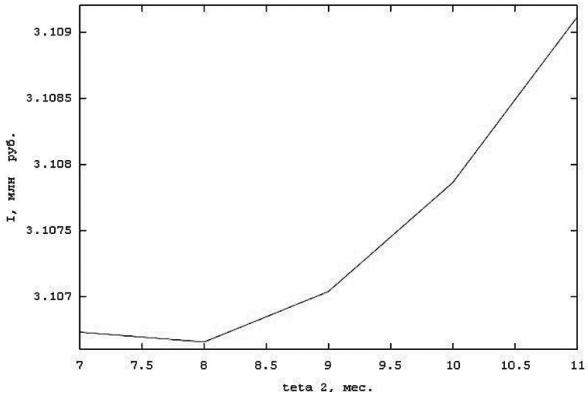


Рис. 1. $r = 0{,}019$

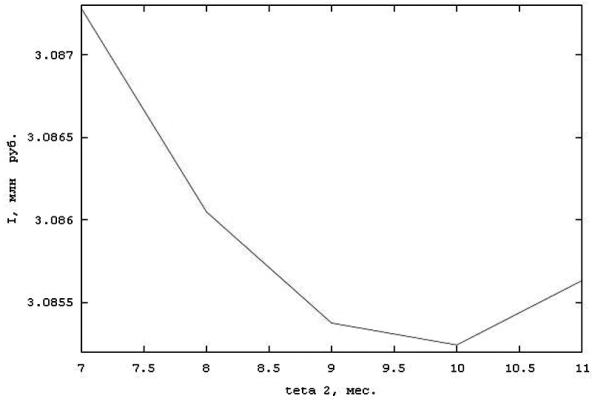


Рис. 2. $r = 0{,}021$

ВЫВОДЫ

Построенная модель динамики фондов дает возможность выбрать оптимальную в смысле максимизации прибыли схему кредитования и определить оптимальный момент окончания «кредитных каникул». Получены выражения для общей прибыли и стоимости фондов в любой момент времени, что позволяет оперативно корректировать значения параметров, определяющих развитие предприятия. Представлены результаты численного моделирования.

Имеется возможность дальнейшего развития этой модели с целью нахождения такой штрафной функции, которая позволила бы решить задачу экономического развития предприятия при ограничениях на допустимые загрязнения окружающей среды. Это дало бы подход к решению проблемы сочетания экономических и социальных интересов региона.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егорова Н. Е., Хачатрян С. Р. Применение дифференциальных уравнений для анализа динамики развития малых предприятий, использующих кредитно-инвестиционные ресурсы // Экономика и математические методы. 2006. Т. 42. № 1. С. 50–67.
2. Качалов Р. М., Клейнер Г. Б., Тамбовцев В. Л. Предприятие в нестабильной экономической среде: риски, стратегии, безопасность. М.: Экономика, 1997. 288 с.
3. Матвеев Н. М. Методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Высш. шк., 1967. 564 с.

Сентябрь, № 6 **Физико-математические науки** **2012**

УДК 004.9

АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ТАЛБОНЕН
преподаватель кафедры теории вероятностей и анализа данных математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
antal@sampo.ru

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

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ПОИСКА ЛЮДЕЙ НА ФОТОГРАФИЯХ ИЗ ИСТОРИЧЕСКОГО АЛЬБОМА*

Описываются методы детектирования и распознавания лиц, основанные на локальных бинарных шаблонах. Предложенные методы ориентированы на изображения невысокого качества, характерные для коллекций исторических фотографий.

Ключевые слова: детектирование лиц, распознавание лиц, алгоритм Виолы – Джонса, локальные бинарные шаблоны

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент существует множество работ по распознаванию лиц и разнообразное готовое программное обеспечение, позволяющее обнаруживать лица и сравнивать их между собой. Как правило, детектирование и распознавание лиц выполняется разными алгоритмами. В обоих случаях качество работы алгоритма, выраженное количественными характеристиками точности и полноты [1], зависит от качества исходных данных. В большинстве публикаций описываются результаты работы алгоритмов на качественных изображениях [2], [3], [4]. Отсутствуют работы по исследованию качества работы алгоритмов на изображениях низкого качества. Однако существуют коллекции с фотографиями низкого качества, на которых тоже требуется осуществлять поиск. К ним относятся цифровые исторические альбомы.

Исходными данными для проведенных исследований является электронная коллекция черно-белых изображений строительства Беломорско-Балтийского канала (ББК) в формате JPEG, созданных около 80 лет назад. Коллекция насчитывает более 6 тыс. изображений. Преобладание диапазона лиц размером 20–40 пикселей является следствием низкого качества как оригинальных фотографий, так и оцифрованных изображений.

Для алгоритмов детектирования характерны ложные срабатывания, когда определенный участок изображения, не являющийся лицом, но содержащий некоторые локальные признаки, признается классификатором как лицо. Вследствие этого снижается точность результатов. При этом наличие большого количества деталей и шумов повышает вероятность ложного срабатывания. Изменяя параметры алгоритма, можно оказывать влияние на вероятность обнаружения лица или ложного срабатывания. Но при этом в рамках одного алгоритма можно повысить точность за счет полноты и наоборот. Таким образом, можно наблюдать некоторую обратную зависимость, не позволяющую повысить оба показателя. Для решения этой проблемы можно использовать дополнительную классификацию: сортировку результатов детектирования с наибольшей полнотой.

ОСОБЕННОСТИ ЗАДАЧИ

В данной работе для обнаружения лиц используется алгоритм Виолы – Джонса [10]. Данный алгоритм был выбран потому, что он обладает высокими показателями по сравнению с другими бесплатными / широкодоступными алгоритмами [5], [11]. В процессе исследования с помощью этого алгоритма были получены коллекции с наибольшей полнотой («полная» коллекция) и с наибольшей точностью («точная» коллекция). Одной из задач данной работы является построение классификатора, позволяющего повысить точность «полной» коллекции, обеспечив показатели отсортированной коллекции выше показателей «точной».

Для распознавания лиц широко используется алгоритм локальных бинарных шаблонов (ЛБШ). В некоторых исследованиях алгоритм ЛБШ работал с более высокой точностью, чем другие алгоритмы [2].

РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ LBP

LBP, впервые описанный в [8], представляет собой простой и мощный инструмент для распознавания различных элементов изображения.

© Талбонен А. Н., Рогов А. А., 2012

В качестве пространства признаков используются гистограммы так называемых кодов LBP. Благодаря высокой скорости расчета некоторых типов кодов LBP стал широко применяться для распознавания образов.

LBP представляет собой фильтр, обозначаемый как $LBP_{P,R}(x, y)$, который для каждой точки изображения рассчитывает код на основе значений точек в некоторой окрестности этой точки. В данном случае P – число точек, R – радиус окрестности. Точки окрестности обозначим как g_i, где $i = \overline{0, P-1}$. При этом координаты точки рассчитываются как $(R \cdot \cos(\frac{i}{2\pi}); R \cdot \sin(\frac{i}{2\pi}))$. Обозначим изображение как $f(x, y)$ или как $f(g)$, если g – точка. Пусть $s_i(x, y) = \begin{cases} 1, f(g_i) > f(g_c) \\ 0, \text{иначе} \end{cases}$, где g_c – точка с координатами (x, y). Тогда $LBP_{P,R}(x, y) = \sum_{i=0}^{P-1} 2^i \cdot s_i(x, y)$. Таким образом, последовательность $s_i(x, y)$, где $i = \overline{0, P-1}$, представляет собой двоичную последовательность кода LBP. Следовательно, $LBP_{P,R}(x, y) \in [0, 2^P - 1]$.

Для сравнения двух изображений в качестве векторов признаков используются гистограммы кодов LBP. В общем случае для каждого изображения строится гистограмма $H(l)$ для значений $LBP_{P,R}(x, y)$, где $l = \overline{0, P-1}$. Существует несколько методов расчета расстояния между гистограммами. Например, расстояние Хи-квадрат: $\chi^2(H_1, H_2) = \sum_{i=0}^{B-1} \frac{(H_1(i) - H_2(i))^2}{H_1(i) + H_2(i)}$, где B – число кодов.

Существуют также модификации фильтра, описанные в работах [6], [7], [8], [9]:

1. Некоторые коды несут в себе больше информации, чем другие. Коды, в двоичной циклической записи которых число переходов между последовательностями «1» и «0» не превышает двух, обозначаются как «uniform», что соответствует слову «равномерный» [3]. Для заданного P существует всего $P \cdot (P - 1) + 2$ равномерных значений. Модифицированный фильтр $LBP^{u2}_{P,R}$ в этом случае возвращает коды равномерных значений, добавляя только один код для неравномерных значений.

$$LBP^{u2}_{P,R}(x, y) = \begin{cases} \text{индекс кода, если он равномерный} \\ P \cdot (P-1) + 2, \text{иначе} \end{cases}.$$

2. Так как окрестность представляет собой круг, можно найти группы кодов, инвариантных к повороту. Для каждого кода LBP существует P кодов, инвариантных к повороту, получаемых путем циклического сдвига P-битового числа. Для каждой такой группы в фильтр попадает минимальное значение кодов данной группы. Задача определения количества кодов, инвариантных к повороту, является нетривиальной. Фильтр обозначается как $LBP^{ri}_{P,R}$.
3. С учетом предыдущих двух свойств определяется также равномерный фильтр, инвариантный к повороту. Кодов LBP, обладающих одновременно двумя свойствами, всего $P + 2$, которые отличаются друг от друга числом бит, равных 1. В этом случае фильтр $LBP^{riu2}_{P,R}$ задается следующим образом:

$$LBP^{riu2}_{P,R}(x, y) = \begin{cases} \text{число единиц, если код равномерный} \\ P+1, \text{иначе} \end{cases}.$$

В работе [8] был предложен метод сравнения вычисления гистограмм лиц. Изображение лица разбивается на k × k участков, для каждого из которых рассчитывается гистограмма. Итоговая гистограмма изображения лица определяется как конкатенация гистограмм участков изображения.

В работе [4] был предложен расширенный метод сравнения гистограмм лиц, основанный на взвешенной матрице. Задается матрица весов k × k, каждый элемент которой соответствует участку изображения. Обозначим гистограмму j-го участка изображения как H^j, $j = \overline{0, k^2 - 1}$. Для каждого j-го участка задается вес w_j. Тогда можно определить модифицированное (взвешенное) расстояние Хи-квадрат следующим образом:

$$\chi^2_w(H_1, H_2) = \sum_{j=0}^{k^2-1} w_j \cdot \sum_{i=0}^{B-1} \frac{(H_1^j(i) - H_2^j(i))^2}{H_1^j(i) + H_2^j(i)},$$

где B – число паттернов.

В частности, в [4] предлагается использовать следующую матрицу для распознавания лиц (рис. 1).

2	1	1	1	1	1	2
2	4	4	3	4	4	2
1	1	1	2	1	1	1
0	1	1	2	1	1	0
0	1	1	1	1	1	0
0	1	1	2	1	1	0
0	1	1	1	1	1	0

Рис. 1. Матрица весов для распознавания лиц

ПОВЫШЕНИЕ ПОЛНОТЫ И ТОЧНОСТИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЛИЦ

Недостатком «полной» коллекции является большое число ложных объектов. Путем отсеивания найденных объектов с помощью обучающего множества можно повысить точность результатов.

Задача классификации сводится к выбору метода сравнения двух объектов и формированию множеств лиц и ложных объектов, которые будут являться обучающей выборкой.

Пусть F^* – множество лиц, а E^* – множество ложных объектов из обучающей выборки. Пусть $\rho_f(f_i, f_j)$ – расстояние между объектами. Суть алгоритма классификации заключается в сравнении расстояния между проверяемым объектом и множеством F^* и расстояния от объекта до E^*. Если проверяемый объект ближе к множеству F^*, то объект считается лицом, иначе – ложным объектом.

Поскольку любая классификация предполагает ненулевую вероятность ошибок 1-го и 2-го рода, алгоритм вычисления расстояния и обучающие множества подбираются для уменьшения количества ошибок обоих типов.

Применение данного алгоритма классификации над множеством с «наибольшей полнотой» («полная» коллекция, множество является результатом работы алгоритма детектирования лиц с наибольшей полнотой) позволяет за счет определенного количества ошибок 1-го рода (лица, признанные ложными объектами) повысить точность для данного множества.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В процессе исследования коллекции было обнаружено около 4 тыс. лиц. Для оценки качества найденных объектов по их размерам было составлено общее распределение (рис. 2).

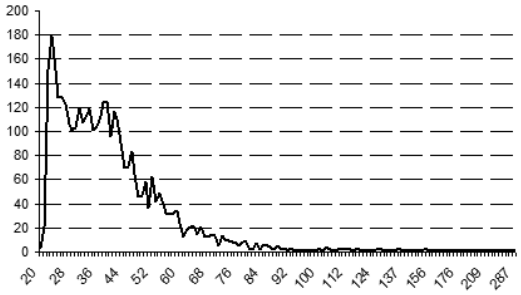


Рис. 2. Распределение размеров «полной» коллекции

Для оценки полноты и точности необходимо произвести экспертную оценку тестовой выборки (экспертная коллекция). В экспериментах использовалась выборка примерно в 1070 изображений. Процесс оценивания был упрощен: вместо выделения всех лиц на изображениях автоматически выделялись объекты полной коллекции, отсортированной вручную, после чего эксперту достаточно было отметить на изображении недостающие лица. Ручная сортировка также осуществлялась быстрым методом, позволяющим сортировать 100 объектов за 1 минуту.

Кроме очевидных лиц и ложных объектов, найденных в «полной» коллекции, были определены дополнительные правила оценивания. К ложным объектам относились слабо различимые лица (не видно глаз или рта) и лица людей, повернувшихся к камере на угол больше 90 градусов. К лицам относились различные изображения лиц: портреты, рисунки, бюсты.

В процессе классификации объекты преобразовывались к размеру 64 × 64. Эксперименты проводились и с использованием нескольких фильтров с различными параметрами расчета гистограммы и с различными обучающими множествами. Для вычисления векторов признаков использовались фильтры $LBP_{16,3}^{riu2}$ и $LBP_{24,3}^{riu2}$. В одних случаях применялась матрица весов (рис. 1), в других случаях вектор признаков сжимался до размера 200. В качестве множества лиц использовался набор из 18 изображений лиц. Кроме того, были заданы 2 множества ложных объектов (8 и 26 изображений, E_1 и E_2 соответственно).

Результатом каждого эксперимента являлась отдельная коллекция объектов. Полученные коллекции оценивались полнотой и точностью, для расчета которых объекты коллекций сопоставлялись с объектами экспертной коллекции. Результаты экспериментов, позволяющие сравнить качество полученных коллекций с соответствующими параметрами «полной» и «точной» коллекций, представлены в табл. 1 и на рис. 3. Описание каждого эксперимента содержит параметры фильтра LBP, использованные методы расчета гистограмм, а также множество ложных объектов.

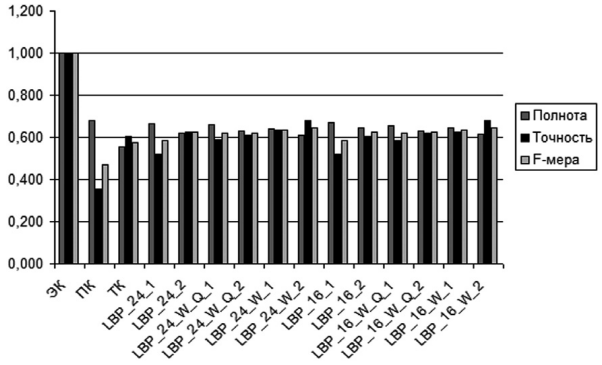


Рис. 3. Диаграмма сравнения полноты и точности обнаружения лиц

Проведенные эксперименты показали, что гистограммы, полученные с помощью фильтров $LBP_{16,3}^{riu2}$ и $LBP_{24,3}^{riu2}$, матрицы весов и расширенной обучающей выборки, обладают наилучшей селективной способностью с точки зрения F-меры [1]. Кроме того, в большинстве случаев расширение обучающей выборки позволило сократить количество ошибок и, следовательно, точность и F-меру отсортированной коллекции.

РАСПОЗНАВАНИЕ ЛИЦ С ПОМОЩЬЮ LBP

Современные исследования демонстрируют высокие показатели точности распознавания лиц размерами выше 100. В данном случае требуется отдельный подход. Для экспериментов использовалась следующая коллекция изображений (табл. 2), обозначим данный набор как *T*.

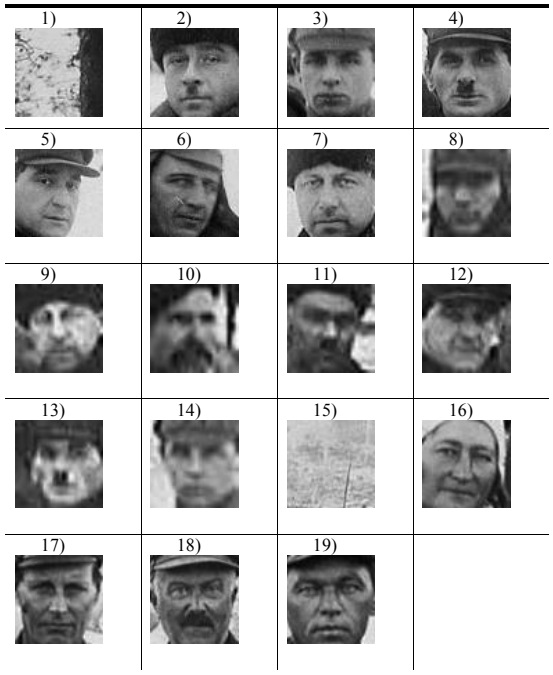
Таблица 1

Результаты экспериментов по повышению точности и полноты

Название	Описание	Лица	Ошибки	Полнота	Точность	F-мера
ЭК	Экспертная коллекция	793	0	1,000	1,000	1,000
ПК	Полная коллекция	540	973	0,681	0,357	0,468
ТК	Точная коллекция	439	289	0,554	0,603	0,577
LBP_24_1	$LBP^{riu2}_{24,3}$, E_1	529	484	0,667	0,522	0,586
LBP_24_2	$LBP^{riu2}_{24,3}$, E_2	492	294	0,620	0,626	0,623
LBP_24_W_Q_1	$LBP^{riu2}_{24,3}$, веса, сжатие, E_1	522	364	0,658	0,589	0,622
LBP_24_W_Q_2	$LBP^{riu2}_{24,3}$, веса, сжатие E_2	499	319	0,629	0,610	0,619
LBP_24_W_1	$LBP^{riu2}_{24,3}$, веса, E_1	506	292	0,638	0,634	0,636
LBP_24_W_2	$LBP^{riu2}_{24,3}$, веса E_2	483	226	0,609	0,681	0,643
LBP_16_1	$LBP^{riu2}_{16,3}$, E_1	532	492	0,671	0,520	0,586
LBP_16_2	$LBP^{riu2}_{16,3}$, E_2	512	332	0,646	0,607	0,626
LBP_16_W_Q_1	$LBP^{riu2}_{16,3}$, веса, сжатие, E_1	520	370	0,656	0,584	0,618
LBP_16_W_Q_2	$LBP^{riu2}_{16,3}$, веса, сжатие, E_2	499	306	0,629	0,620	0,625
LBP_16_W_1	$LBP^{riu2}_{16,3}$, веса, E_1	510	305	0,643	0,626	0,634
LBP_16_W_2	$LBP^{riu2}_{16,3}$, веса, E_2	488	230	0,615	0,680	0,646

Таблица 2

Тестовое множество изображений для распознавания лиц



Были обнаружены следующие пары лиц, соответствующие одному и тому же человеку: {3, 14}, {4, 13} и {7, 9}. Обозначим данное множество как T^+. Кроме того, очевидна пара ложных объектов, которые должны быть близки друг к другу: {1, 15} (T^-). Дополним множества T^+ и T^- зеркально отраженными элементами данных множеств.

Для исследования работы различных фильтров LBP используется следующий алгоритм:

1. Для каждого объекта $t_i \in T$ находится ближайший к нему объект $t_i^* \in T$. То есть

$$t_i^* = \arg\min_{t_j}\{\rho_f(t_i, t_j) \mid t_j \in T / t_i\}.$$

2. Полученное таким образом множество пар $T^P = \{<t_i, t_i^*> \mid t_i \in T\}$ сопоставляется с известными парами лиц и ложных объектов.

3. Обозначим $h(t_i, t_j) = \begin{cases} 1, <t_i, t_j> \in T^+ \text{ или } <t_i, t_j> \in T^- \\ 0, \text{иначе} \end{cases}$.

4. Будем рассчитывать точность следующим образом: $\mathrm{Re} = \dfrac{\sum_{t_i \in T} h(t_i, t_i^*)}{|T^+| + |T^-|}$.

В процессе исследования были рассмотрены различные варианты фильтров LBP. В табл. 3 приведено сравнение точности использованных фильтров относительно заданного множества T.

Таблица 3

Результаты экспериментов по распознованию лиц

Обозначение	Точность Re	Описание
$LBP_{8,1}$	3/8	P = 8, R = 1
$LBP_{16,1}$	2/8	P = 16, R = 1
$LBP_{8,2}$	4/8	P = 8, R = 2
$LBP_{16,2}$	4/8	P = 16, R = 2
$LBP_{8,3}$	4/8	P = 16, R = 3
$LBP_{16,3}$	6/8	P = 16, R = 3
Взвешенный $LBP^{ri}_{16,3}$	4/8	P = 16, R = 3, инвариантный
Взвешенный $LBP^{riu}_{16,3}$	3/8	P = 16, R = 3, равномерный, инвариантный
Взвешенный $LBP^{u}_{16,3}$	5/8	P = 16, R = 3, равномерный
Взвешенный $LBP_{16,3}$	8/8	P = 16, R = 3

Таким образом, наибольшая точность достигается для взвешенного фильтра $LBP_{16,3.}$

АННОТИРОВАНИЕ ЛИЦ

Аннотирование изображений предполагает присвоение каждому изображению набора текстовых меток, соответствующих данному изображению. При аннотировании за счет лиц необходима база данных лиц. Имена людей из базы данных будут являться текстовыми метками. При наличии такой базы данных предлагается использовать взвешенный фильтр $LBP_{16,3}$ для поиска похожих лиц.

В случае если база данных отсутствует, исходя из результатов экспериментов предлагается следующая схема аннотирования изображений с помощью эксперта:

1. Для каждого найденного лица выполняется поиск нескольких ближайших лиц, вычисленные расстояния между объектами сохраняются в базе данных. Количество ближайших объектов при этом задается.
2. При оценивании каждого лица эксперту предлагается сравнить его с ближайшим.
3. Если эксперт принимает предложенный объект, система запоминает новую связь.
4. Если эксперт отклоняет предложенный объект, система предлагает ему следующий ближайший объект по списку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были предложены методы повышения полноты и точности алгоритма Виолы – Джонса с помощью локальных бинарных шаблонов. Для распознавания лиц низкого качества была найдена модификация LBP, позволяющая сравнивать лица с максимальной точностью.

Для случая отсутствия базы данных лиц был предложен метод аннотирования изображений с помощью эксперта на основе локальных бинарных шаблонов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев М., Кураленок И. Официальные метрики РОМИП’2004 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://romip.ru/docs/romip_metrics.pdf
2. Маслий Р. В. Использование локальных бинарных шаблонов для распознавания лиц на полутоновых изображениях [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.nbuv.gov.ua/e-journals/vntu/2008-4/2008-4_ru.files/ru/08rvmgsi_ru.pdf
3. Петрук В. И., Самородов А. В., Спиридонов И. Н. Применение локальных бинарных шаблонов к решению задачи распознавания лиц // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2011. Спец. вып. Биометрические технологии. С. 58–63.
4. Ahonen T., Hadid A., Pietikäinen M. Face Recognition with Local Binary Patterns [Electronic resource]. Access mode: http://masters.donntu.edu.ua/2011/frt/dyrul/library/article8.pdf
5. Degtyarev N., Seredin O. Comparative Testing of Face Detection Algorithms [Electronic resource]. Access mode: http://lda.tsu.tula.ru/papers/degtyarev-2010-icisp-ctfd.pdf
6. Guo Z., Zhang L., Zhang D. Rotation invariant texture classification using LBP variance (LBPV) with global matching [Electronic resource]. Access mode: http://www4.comp.polyu.edu.hk/~cslzhang/paper/PR_10_Mar_LBPV.pdf
7. Mäenpää T. The local binary pattern approach to texture analysis – extensions and applications [Electronic resource]. Access mode: http://herkules.oulu.fi/isbn9514270762/isbn9514270762.pdf
8. Ojala T., Pietikäinen M., Harwood D. A Comparative Study of Texture Measures with Classification Based on Feature Distributions // Pattern Recognition. 1996. Vol. 29. № 1. C. 51–59.
9. Ojala T., Pietikäinen M., Mäenpää T. A Generalized Local Binary Pattern Operator for Multiresolution Gray Scale and Rotation Invariant Texture Classification [Electronic resource]. Access mode: http://www.mediateam.oulu.fi/publications/pdf/43.pdf
10. Viola P., Jones M. Robust Real-time Object Detection [Electronic resource]. Access mode: http://research.microsoft.com/en-us/um/people/viola/Pubs/Detect/violaJones_IJCV.pdf
11. Wechsler H. Reliable face recognition methods: system design, implementation and evaluation [Electronic resource]. Access mode: http://books.google.ru/books?id=refsB92dvEC&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs_atb#v=onepage&q&f=false

ГАЛИНА СТАНИСЛАВОВНА АНТИПИНА

К 60-летию со дня рождения

10 октября 2012 года исполняется 60 лет доктору биологических наук, профессору кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета Петрозаводского государственного университета *Галине Станиславовне Антипиной.*

Г. С. Антипина родилась в г. Мурманске. После окончания в 1975 году Петрозаводского университета училась в аспирантуре в Институте леса КарНЦ РАН. Защитив кандидатскую диссертацию в 1979 году, работала младшим научным сотрудником Института леса. В 1985 году начинает работать на кафедре ботаники и физиологии растений Петрозаводского университета. В 2003 году защитила докторскую диссертацию. Научные интересы Г. С. Антипиной связаны с почвенной альгологией, антропогенной динамикой флоры сосудистых растений, урбанофлористикой, биологией видов карельской флоры. Она автор и соавтор более 150 печатных работ, в том числе 4 монографий и 4 учебных пособий, член диссертационного совета по присвоению ученой степени доктора биологических наук при ПетрГУ. Г. С. Антипина – активный участник научных конференций различных уровней; была членом оргкомитета 12-го Делегатского съезда Русского ботанического общества. Г. С. Антипина имеет нагрудный знак «Почетный работник высшего профессионального образования РФ».

НИКОЛАЙ ВЛАДИМИРОВИЧ МЕДВЕДЕВ

К 50-летию со дня рождения

13 октября 2012 года исполняется 50 лет доктору биологических наук, профессору кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета Петрозаводского государственного университета *Николаю Владимировичу Медведеву.*

Н. В. Медведев родился в Петрозаводске. В 1985 году окончил биологический факультет Петрозаводского госуниверситета, затем три года работал старшим научным сотрудником отдела «Природа Карелии» в Карельском государственном краеведческом музее. В 1988 году перешел на работу в Институт леса КарНЦ РАН. С 2008 года работает на эколого-биологическом факультете. В 1995 году защитил кандидатскую диссертацию, в 2004-м – докторскую. Научные интересы Н. В. Медведева связаны с экологической токсикологией природных популяций птиц и млекопитающих Севера; млекопитающими как одним из биотических компонентов северных экосистем; с состоянием популяций редких видов животных; с созданием охраняемых природных территорий; зоогеографией; влиянием антропогенной трансформации ландшафтов на фауну позвоночных Северо-Запада России. Н. В. Медведев – член Региональной общественной организации «Совет по морским млекопитающим» и Союза по охране птиц России. В 1992 году был инициатором и соруководителем совместного российско-финского экологического проекта «Ладожская кольчатая нерпа», который продолжается по настоящее время. Он автор 110 работ, в том числе 2 монографий.

От всей души поздравляем юбиляров, желаем здоровья, успехов в научной и педагогической деятельности!

Редакция журнала «Ученые записки Петрозаводского государственного университета»

ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«ШКОЛА ЗИЛЬБЕРА: ОТКРЫТЫЙ ФОРУМ»

11–14 октября 2012 года
г. Петрозаводск

Организаторы конференции: Комитет по европейскому анестезиологическому образованию (СЕЕА), Петрозаводский государственный университет, Министерство здравоохранения и социального развития РК, Ассоциация анестезиологов и реаниматологов РК, научно-практическое общество анестезиологов и реаниматологов Санкт-Петербурга и ООО «Открытый форум».

Основные темы конференции: клиническая физиология и интенсивная терапия заболеваний системы кровообращения, клиническая физиология дыхания и искусственная респираторная поддержка, острая массивная кровопотеря и новые представления об инфузионно-трансфузионной терапии, клиническая физиология и интенсивная терапия заболеваний центральной нервной системы, регионарная анестезия и лечение боли, синдром абдоминальной компрессии, организационные вопросы в свете нового приказа по оказанию анестезиологической и реанимационной помощи, история и перспективы медицины критических состояний (МКС) как специальности, новые идеи и методы, гуманитарные проблемы становления специалиста по МКС. В рамках конференции проводится семинар СЕЕА № 2 «Сердечно-сосудистая система и кровообращение» Санкт-Петербургского регионального центра СЕЕА.

Оргкомитет конференции
Республиканская больница, кафедра критической и респираторной медицины
185019, Петрозаводск, ул. Пирогова, 3
Тел.: (8142) 76-44-58, тел./факс: (8142) 76-19-43,
Skype: *zilber8090,*
e-mail: *reanim@karelia.ru*

VI РЕГИОНАЛЬНАЯ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«УНИВЕРСИТЕТЫ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОСТРАНСТВЕ РЕГИОНА: ОПЫТ, ТРАДИЦИИ И ИННОВАЦИИ»

22–23 ноября 2012 года
г. Петрозаводск

Конференцию проводит ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет» (ПетрГУ). Заявки на участие в конференции и материалы докладов для публикации в сборнике принимаются до 31 октября 2012 года.

Оргкомитет конференции
Факультет повышения квалификации
185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33, каб. 204
тел. (8142) 71-96-41,
e-mail: *fpk@psu.karelia.ru*

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 0,5–0,7 печатного листа, кратких сообщений, отчетов о конференциях и рецензий на книги – до 3 страниц. Поля: верхнее и нижнее – 2 см, правое и левое – 3 см. Абзацный отступ – 0,5 см. Шрифт: Times New Roman, размер – 14 пунктов, аннотация, список литературы – 12 пт, межстрочный интервал – полуторный. Нумерация страниц – справа внизу страницы.

Статья должна состоять из следующих элементов: названию статьи должен предшествовать индекс универсальной десятичной классификации (УДК) в левом верхнем углу. Далее через 1 интервал – название статьи жирным шрифтом заглавными буквами, название должно быть по возможности кратким, точно отражающим содержание статьи. Точка в конце названия статьи не ставится. Сведения об авторе (имя, отчество, фамилия автора (-ов) полностью; ученая степень и звание; место работы: вуз, факультет, кафедра; должность; электронный адрес и контактные телефоны). Аннотация (объемом 6–8 строк) на русском и английском языках, перед ней – название статьи и фамилия (-ии) автора (-ов) также на двух языках; ключевые слова от 3 до 8 слов (или словосочетаний, несущих в тексте основную смысловую нагрузку) также на двух языках. Все перечисленные элементы статьи отделяются друг от друга пустой строкой и печатаются без абзацного отступа через 1 интервал.

Основной материал статьи и цитат, приводимых в статье, должен быть тщательно выверен автором. Сокращения слов не допускается, кроме общепринятых сокращений химических и математических величин и терминов. Размерность всех физических величин следует указывать в системе единиц СИ.

Список литературы, примечания, комментарии и пояснения по тексту статьи даются в виде концевых сносок. Список литературы должен быть напечатан через одинарный интервал, на отдельном листе. Цитируемая в статье литература (автор, название, место, издательство, год издания и страницы (от и до или количество)) приводится в алфавитном порядке в виде списка в конце статьи (сначала отечественные, затем зарубежные. Фамилии иностранных авторов приводятся в оригинальной транскрипции). В тексте статьи ссылка на источник делается путем указания в квадратных скобках порядкового номера цитируемой книги или статьи, через точку с запятой – цитируемых страниц, если это необходимо. В книгах иностранных авторов, изданных на русском языке, после заглавия книги через двоеточие указывают, с какого языка сделан перевод. Выходные данные по статьям из журналов и сборников указывают в следующем порядке: фамилия (-ии) автора (-ов) с инициалами, название статьи, через две косые черты – название журнала (год, том, номер, страницы (от и до) или сборника (место издания, год, страницы (от и до)). По авторефератам – фамилия, инициалы, полное название автореферата, после которого ставят двоеточие и указывают, на соискание какой степени и в какой области науки защищена диссертация, место издания, год, страницы.

Таблицы – каждая печатается на отдельной странице, нумеруется соответственно первому упоминанию ее в тексте и снабжается заголовком. Таблицы должны быть предоставлены в текстовом редакторе Microsoft Word (формат .doc). В тексте следует указать место таблицы и ее порядковый номер.

Иллюстрации (рисунки, фотографии, схемы, диаграммы) нумеруются, снабжаются подписями и представляются в виде отдельных растровых файлов (в формате .tif, .bmp), 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.

September, № 6 **2012**

CONTENTS

BIOLOGY

Sukhovskaya I. V., Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences (Petrozavodsk, Russian Federation)
Smirnov L. P., Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences (Petrozavodsk, Russian Federation)
Nemova N. N., Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Ostashkova V. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
MERCURY NITRATE EFFECT ON LOW MOLECULAR WEIGHT PEPTIDE STRUCTURE IN RATS' TISSUES
Summary: Low molecular weight peptides' composition of the liver, kidney, and muscles in rats daily fed with mercuric nitrate of divalent cation during 14 and 30 days was studied with the help of low-pressure liquid chromatography method. Alterations were found in all examined organs. Changes of high degree were observed in the liver and kidneys; significantly smaller deviations were registered in studied muscles. Sexual differences in reaction to mercury intoxication were revealed.
Key words: Low molecular weight peptides, mercury **7**

Lukin A. A., Kola Science Center (Apatity, Russian Federation)
Babiy A. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Shurov I. L., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Shirokov V. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Ivanov S. I., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
ONEGA LAKE FISH COMMUNITY UNDER INTENSIVE FISHERY
Summary: The influence of fisheries on the state of Onega Lake fish community is considered based on the analysis of commercial catches for the last 70 years. A drastic decrease in catches of salmonid and coregonid fish species is observed. The catches of vendance, smelt, burbot, and zander are subject to considerable fluctuations, while cyprinids' and perches' supply is underused. The solution of the essential part of the fish industry problems is closely associated with the legal and regulatory framework development.
Key words: Fisheries, fish community, catches' dynamics, legal and regulatory framework **12**

Medvedeva M. V., Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)
Fedorets N. G., Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)
Raevskiy B. V., Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)
Il'inov A. A., Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)
Rudkovskaja O. A., Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)
MORPHOLOGICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF SOILS IN GENETIC RESERVES OF NORTHERN PRILADOZHIE
Summary: Research results of morphological and chemical properties of the soil genetic reserves in Northern Priladozhie are provided. Leading soil-forming processes for these types of soil are braunification, gleization, and peat formation. The obtained results can be used for long-term monitoring of the soils formed by spruce forest stands.
Key words: Northern Priladozhie, spruce genetic reserves, morphological and chemical properties of the soils **20**

Gorbach V. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
VARIABILITY OF WING PATTERN ELEMENTS IN RINGLET BUTTERFLY *APHANTOPUS HYPERANTUS* POPULATION (LEPIDOPTERA, SATYRIDAE)
Summary: 71 variants of wing patterns in ringlet butterfly were discovered on the local area of 4 km^2. Sex differences in butterflies were revealed, but no significant seasonal or spatial differences were found. Results of the analysis and almost complete lack of marked specimens in recaptures suggest that local environment is not favorable for the species' sedentary life. Settling and mixing butterflies form indivisible mainland population on the studied area.
Key words: Ringlet butterfly, *Aphantopus hyperantus*, wing pattern, variability, population, butterfly marking **27**

Tolmacheva E. L., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
NUTRITION OF HERRING GULLS (LARUS ARGENTATUS *PONTOPP.*) DWELLING IN WHITE SEA KANDALAKSHA GULF
Summary: 306 pellets of Herring gulls were collected on the islands of the White Sea in Kandalaksha Gulf. The content of collected pellets showed that the main food items consumed by the birds were mussel, fish, and crowberries. High frequency of man-induced components in studied pellets was also noted.
Key words: Herring gull, Kandalaksha Gulf, pellet, feed **32**

MEDICAL SCIENCE

Barsukova E. Yu., Karelian State Pedagogical Academy (Petrozavodsk, Russian Federation)
Goranskiy A. I., Karelian State Pedagogical Academy (Petrozavodsk, Russian Federation)
Vinogradova I. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
OSMO- AND ION-REGULATING KIDNEY FUNCTION IN YOUNG RATS UNDER CONDITIONS OF EXCESSIVE LIGHT INTENSITY
Summary: The keeping of one-month young male rats in conditions of constant or natural illumination intensity of Karelia ("white nights") within 3 months period leads to unidirectional disorders of kidney functions. The change of the photoperiod toward the increase of the light phase does not have a direct influence on kidneys' function though leads to pineal

gland hypofunction. Such malfunction affects hormone regulation of hypotholamus-hypophysis-adrenal system and causes revealed disorders.
Key words: Constant illumination, natural lighting, osmoregulatory kidney function, ion-regulatory kidney function, pineal gland **35**

Vapirov V. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Shubina M. E., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Shubin I. V., Republican Hospital named after V. A. Baranov (Petrozavodsk, Russian Federation)
Venskovich A. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
SELENIUM: PRESSING MEDICAL, EPIDEMIOLOGICAL, AND ENVIRONMENTAL CHALLENGES OF KARELIAN REPUBLIC
Summary: Pressing challenges of ecology attributed to the presence of selenium in landscapes of Karelia are summed up. A question of selenium status of the population and relevance of the study assessing the role of selenium in the endemic goiter development in conditions of Karelian Republic are considered. Basic directions of the future research addressing selenium problem are defined.
Key words: Selenium, ecology, pathology, endemic goiter, thyroid hormones **40**

Verhovod A. Yu., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Barakat M. F., Center of Osseous-Articular Pathology (Petrozavodsk, Russian Federation)
Meltzer R. I., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Lozovik I. P., Republican Hospital named after V. A. Baranov (Petrozavodsk, Russian Federation)
MODERN ASPECTS OF GROUP C FRACTURES' OPERATIONAL TREATMENT IN PATIENTS WITH POLYTRAUMA
Summary: Results of the 28 patients' treatment with group C fractures, according to AO / ASIF classification, were part of the clinical complex of polytrauma injuries. The purpose of the study is to clarify the adequacy of today's changing views on the character, terms, volume, and possible staging of surgical treatment in cases of C fractures.
Key words: Multiple trauma, Group C fractures, leg fractures **44**

Usenko G. A., Novosibirsk State Medical University (Novosibirsk, Russian Federation)
Usenko A. G., Novosibirsk Regional Hospital for War Veterans № 2 (Novosibirsk, Russian Federation)
Vasendin D. V., Siberian State Geodetic Academy (Novosibirsk, Russian Federation)
Mashkov S. V., Novosibirsk State Medical University (Novosibirsk, Russian Federation)
Velichko N. P., City Pediatric Polyclinic № 1 (Novosibirsk, Russian Federation)
Nischeta O. V., Outpatient clinic (Kudryashi, Novosibirsk region, Russian Federation)
Kosyreva T. Yu., Novosibirsk State Regional Clinical Hospital (Novosibirsk, Russian Federation)
Shuster G. S., Novosibirsk Center of Hydrometeorology and Environment Monitoring (Novosibirsk, Russian Federation)
CHARACTERISTIC FEATURES OF OXYGEN USE AND CONSUMPTION BY BODY TISSUES IN PATIENTS SUFFERING FROM CORONARY DISEASE DURING MAGNETIC STORM DAYS AND THEIR DEPENDENCE UPON PSYCHOSOMATIC STATUS
Summary: A group of patients (n = 640 ± 11) and healthy males (n = 485 ± 6) was divided into subgroups according to their temperament: choleric (CH), sanguinic (SG), phlegmatic (PH), and melancholic (M) temperament with high (HA) and low (LA) anxiety level. Low level of depression was revealed in HA/Ph and in M participants of the study. Peculiarities of psychosomatic status (P-PSS) were defined as SNS prevalence in Ch and Sg and PSNS in Ph and M only. The level of cortisole accumulation in blood was higher in Ch and Sg than in Ph and M; the level of aldosterone in the correlated groups of studied participants was lower. We determined the minute volume of blood circulation (MVBC), minute volume of breath (MVB), level of oxygen consumption (CO_2), coefficient of oxygen utilization (KUO_2), and TOLU. We used AAT process with correction and without correction considering peculiarity PSS. Adherents to AAT were insufficient. Data were taken during 7 days starting from the first day of the MS including the 7th day of MS. Marked elevation of γ-phone medium was registered during MS days; essential reduction in TOLU, KUO2 was noted. Elevation of MVBC, MVB, CO_2, and increasing number of heartaches were registered in Ch on the second day of MS day, in SG on the first day of MS, in Ph and M on the 3–4 day, and on the 5-6 day in HA-men. HA/Ph and M belong to a high risk group of patients/participants. Conducted antiangina therapy led to increased consumption of oxygen by body tissues in males suffering from coronary disease as well as in healthy men with high level of anxiety and same temperaments.
Key words: IHD, magnetic storms, γ-phone, temperament, oxygen consumption, treatment **49**

Sheglov E. A., Emergency Care Hospital (Petrozavodsk, Russian Federation)
Vezikova N. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
EFFECTIVENESS OF VARICOSE DISEASE SURGICAL TREATMENT IN PATIENTS WITH CHRONIC VENOUS DEFICIENCY IN COMBINATION WITH KNEE OSTEOARTHRITIS
Summary: The article is concerned with the problem of surgical treatment of the patients suffering from varicose disease in lower extremities and knee osteoarthritis. The ankle volume, night pain level, KOOS scale, arthrosonography were evaluated. Considering results of the research it was concluded that active surgical intervention is preferable in this group of patients.
Key words: Chronic venous insufficiency, osteoarthritis, varicosity **55**

AGRICULTURAL SCIENCE

Karpechko A. Yu., Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)
CHARACTERISTIC FEATURES OF POST-THINNING ADAPTATION OF ACTIVE TREE STAND ROOT SYSTEM
Summary: The effect of thinning on hydrophysical properties and root content of the soil was studied. It was determined that temperature conditions for the root system development are generally more favorable in the area of skid roads than on

logging sites. We found out that even 14 years after the felling the soil in the area of skid roads remained more compact in comparison to its natural state, which consequently impedes root growth in the areas.
Key words: Thinning, roots, skid road, logging site, soil density, soil temperature **59**

ENGINEERING SCIENCE

Afonichev D. N., Voronezh State Forestry Academy (Voronezh, Russian Federation)
Vasilyev V. V., Voronezh State Forestry Academy (Voronezh, Russian Federation)
Paponov N. N., Voronezh State Forestry Academy (Voronezh, Russian Federation)
SELF-LOCKING RAFT WITH TAIL SLIDING SECTIONS
Summary: A design of the self-locking raft with sliding tail sections is presented. The featured purpose of the proposed raft is to create with the help of its sliding sections the necessary supporting force when turning along curvilinear parts of the river and to prevent dislocation of its tail part toward the concave bank of the river. When turning to the left, slowing down is accomplished by the rear left section, and on turning to the right – by rear right section.
Key words: Raft, section, alloy, timber, rigging bracket **62**

Grigorev I. V., Saint-Petersburg State Forest Technical University (Saint-Petersburg, Russian Federation)
Shapiro V. J., Saint-Petersburg State Forest Technical University (Saint-Petersburg, Russian Federation)
Rudov M. E., Saint-Petersburg State Forest Technical University (Saint-Petersburg, Russian Federation)
Nikiforova A. I., Saint-Petersburg State Forest Technical University (Saint-Petersburg, Russian Federation)
MATHEMATICAL MODEL OF SOIL CONDENSATION DURING PACK OF FULL-LENGTH LOGS' LOGGING
Summary: A model of volumetric condensation of the soil by a dragged part of the skidding system is presented. The model is instrumental in calculation of the soil density degree in parts adjoining the skids. Variability of trailers' routes is taken into account.
Key words: Logging, soil condensation, traffic route, tractor's turn **65**

Syunev V. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Rat'kova E. I., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
METHODS PROGNOSTICATING HARVESTERS' IMPACT ON SOIL DURING TRANSITIONAL SEASONS
Summary: Methods assessing the impact of the harvesters' running gear on the soil during transitional seasons are considered. Correlation between the track's depth and the number of trips is provided. The adequacy of the model is examined and substantiated.
Key words: Depth of the track, Ferhulst equation, number of trips **70**

Rochev A. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
ON CALCULATION OF BENDING FOR INELASTIC COMPOSITE PLATES
Summary: The article deals with inelastic multilayered composite plates, which consist of separate layers interconnected by structural constraints. The key tenets of A. R. Rzhanitsin's theory of elastic composite elements were used. A solution to the problem of calculation of the bending plate is obtained. The bending plate is characterized by a variable thickness of the layers and variable rigidity of the shear bond different in two mutually perpendicular directions. Expressions to determine the modulus of longitudinal deformations in two mutually perpendicular planes are obtained by the author.
Key words: Inelastic composite plate, variable stiffness of the shift, equivalent units of longitudinal strain **75**

Yagnyuk B. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
KEY NUMBER PARAMETERS FOR EVALUATION OF BUILDINGS ENERGY EFFICIENCY
Summary: Key Number Method for quick evaluation of energy conservation measures worked out by Norwegian Company ENSI is presented. For further development and usage of this method in Russia parameters for main types of buildings in 10 different regions were calculated and collected.
Key words: Energy conservation, key number method, reference buildings, climatic data. **78**

PHYSICS AND MATHEMATICS

Andreev V. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
HYBRIDIZATION OF NITROGEN ATOMS IN ANILINES AND THEIR MOLECULAR COMPLEXES WITH V-ACCEPTORS
Summary: Hybridization of nitrogen atoms in anilines and their molecular complexes of n,v-type depend on substituent electronic factors in aromatic cycle, the force of Lewis acid, special accessibility of nitrogen atoms, and aggregative state of external connections.
Key words: Hybridization, coordination, anilines, electronic and special factors, X-Ray analysis. **82**

Pergament A. L., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Stefanovich G. B., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Andreev V. N., Ioffe Physical Technical Institute (Saint-Petersburg, Russian Federation)
Boldin P. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
ELECTRONIC INSTABILITIES IN CRYSTALS OF TRANSITION METAL COMPOUNDS
Summary: The survey presents a concept of the physical picture of electronic switching in crystalline materials. The range of objects includes but is not limited to oxides, sulfides, chalcogenides of transition metals, and high-temperature superconductors. The emphasis is placed onto applied technical potential of these effects in contemporary nanoelectronics.
Key words: Switching, transition metal compounds, metal-insulator transition **87**

Kuzhakov P. V., Vavilov State Optical Institute (Saint-Petersburg, Russian Federation)
Kamanina N. V., Vavilov State Optical Institute (Saint-Petersburg, Russian Federation)
STUDY OF SURFACE NANOSTRUCTURIZATION INFLUENCE ON REFLECTION SPECTRUM AND MICROHARDNESS OF KBR AND BAF_2
Summary: The effect of surface carbon nanotubes structuring of "soft" materials for UV and IR spectral ranges (KBr, and BaF_2) on spectral characteristics is considered. The correlation between spectral and mechanical characteristics of the materials studied is discussed. Possible areas of application are proposed.
Key words: Carbon nanotubes, nanostructuring, "soft" optical materials **99**

Melekh N. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Aleshina L. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
POWDER CELLOBIOSE STRUCTURE REFINEMENT BY RIETVELD METHOD
Summary: The atomic structure of powder β-cellobiose refined by method of full-profile analysis is considered. Atomic coordinates and atomic temperature factors are defined. Refined dimensions of the unit cell are: a = 10,980(3) Å, b = 13,076(5) Å, c = 5,093(1) Å, β = 90,90 (2)°.
Key words: X-ray study, full-profile analysis, powder β-cellobiose **101**

Voronin A. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Kuznetsov V. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Shabaev A. I., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Spirichev M. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Vilaev D. G., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
CALCULATION ALGORITHM FOR CHEMICAL EQUILIBRIUM BASED ON GIBBS ENERGY MINIMIZATION
Summary: The article presents an algorithm for calculating thermodynamically equilibrated composition of the chemical system. The algorithm uses Gibbs energy minimization approach and is based on feasible directions method. The presented algorithm provides an optimal solution of high accuracy even for cases when other existing algorithms cannot find optimal solutions.
Key words: Chemical equilibrium, phase equilibrium, Gibbs energy minimization, feasible directions method **106**

Kirillov A. N., Karelian Research Center of RAS, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Smirnov N. V., Karelian Research Center of RAS, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
MODELING OF SMALL ENTERPRISE DEVELOPMENT DINAMICS AND OPTIMAL CREDIT SCHEME
Summary: A mathematical model of dynamics of the small enterprise development factoring in penalties for environmental pollution is provided. A problem of optimal profit scheme choice is considered.
Key words: Dynamics of development, crediting, funds, control **110**

Talbonen A. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Rogov A. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
MODELS AND METHODS IN SEARCH OF PEOPLE IN HISTORICAL ALBUMS
Summary: This article contains descriptions of the face detection and face recognition methods based on local binary patterns. The proposed techniques focus on low quality images that are typical for historical collections.
Key words: Face detection, face recognition, Viola-Jones algorithm, local binary patterns **113**

JUBILATION
To the 60th Birthday Anniversary of G. S. Antipina
To the 50th Birthday Anniversary of N. V. Medvedev **118**

SCIENTIFIC INFORMATION **119**

INFO FOR THE AUTHORS **120**