
Министерство образования и науки
Российской Федерации

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

№ 2 (147). Март, 2015

Серия: Естественные и технические науки

Главный редактор

А. В. Воронин, доктор технических наук, профессор

Зам. главного редактора

В. Б. Акулов, доктор экономических наук, профессор

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

В. С. Сюнёв, доктор технических наук, профессор

Ответственный секретарь журнала

Н. В. Ровенко, кандидат филологических наук

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

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

uchzap.petsu.ru

Редакционный совет

- | | |
|---|---|
| В. Н. БОЛЬШАКОВ
доктор биологических наук,
профессор, академик РАН (Екатеринбург) | Н. Н. МЕЛЬНИКОВ
доктор технических наук,
профессор, академик РАН (Апатиты) |
| И. П. ДУДАНОВ
доктор медицинских наук,
профессор, член-корреспондент РАН
(Петрозаводск) | И. И. МУЛЛОНЕН
доктор филологических наук,
профессор (Петрозаводск) |
| В. Н. ЗАХАРОВ
доктор филологических наук,
профессор (Москва) | В. П. ОРФИНСКИЙ
доктор архитектуры, профессор,
действительный член Российской академии архитектуры
и строительных наук (Петрозаводск) |
| Ю. ИНОУЭ
профессор (Токио, Япония) | П. ПЕЛКОНЕН
доктор технических наук,
профессор (Йоэнсуу, Финляндия) |
| А. С. ИСАЕВ
доктор биологических наук,
профессор, академик РАН (Москва) | И. В. РОМАНОВСКИЙ
доктор физико-математических наук,
профессор (Санкт-Петербург) |
| М. ВОХОЗКА
доктор экономических наук
(Чешские Будейовицы, Чешская Республика) | Е. С. СЕНЯВСКАЯ
доктор исторических наук, профессор (Москва) |
| В. М. ЛЕВИН
доктор физико-математических наук,
профессор (Мехико, Мексика) | К. СКВАРСКА
доктор философии (Прага, Чешская Республика) |
| Т. П. ЛЁННГРЕН
доктор философии (Тромсё, Норвегия) | А. Ф. ТИТОВ
доктор биологических наук, профессор,
член-корреспондент РАН (Петрозаводск) |
| В. И. МАЕВСКИЙ
доктор экономических наук, профессор,
академик РАН (Москва) | Р. М. ЮСУПОВ
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАН (Санкт-Петербург) |

Редакционная коллегия серии
«Естественные и технические науки»

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

Ministry of Education and Science
of the Russian Federation

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

№ 2 (147). March, 2015

Natural & Engineering Sciences

Chief Editor

Anatoly V. Voronin, Doctor of Technical Sciences, Professor

Chief Deputy Editor

Vladimir B. Akulov, Doctor of Economic Sciences, Professor

Ernest V. Ivanter, Doctor of Biological Sciences, Professor,

The RAS Corresponding Member

Vladimir S. Syuneyev, Doctor of Technical Sciences, Professor

Executive Secretary

Nadezhda V. Rovenko, Candidate of Philological Sciences

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

The Editor's Office Address

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

Petrozavodsk, Republic of Karelia

E-mail: uchzap@mail.ru

uchzap.petrSU.ru

Editorial Council

- | | |
|--|--|
| V. BOL'SHAKOV
Doctor of Biological Sciences,
Professor, the RAS Member (Ekaterinburg) | I. MULLONEN
Doctor of Philological Sciences, Professor (Petrozavodsk) |
| I. DUDANOV
Doctor of Medical Sciences, Professor,
the RAS Corresponding Member (Petrozavodsk) | V. ORPHINSKIY
Doctor of Architecture, Professor,
Full Member of Russian Academy of Architectural Sciences
(Petrozavodsk) |
| V. ZAKHAROV
Doctor of Philological Sciences, Professor (Moscow) | P. PELKONEN
Doctor of Technical Sciences,
Professor (Joensuu, Finland) |
| Y. INOUE
Professor (Tokyo, Japan) | I. ROMANOVSKIY
Doctor of Physical-Mathematical Sciences,
Professor (St. Petersburg) |
| A. ISAYEV
Doctor of Biological Sciences,
Professor, the RAS Member (Moscow) | E. SENYAVSKAYA
Doctor of Historical Sciences,
Professor (Moscow) |
| M. VOCHOZKA
Doctor of Economic Sciences
(Ceske Budejovice, Czech Republic) | K. SKWARSKA
Doctor of Philosophy
(Praha, Czech Republic) |
| V. LEVIN
Doctor of Physical-Mathematical Sciences,
Professor (Mexico, Mexico) | A. TITOV
Doctor of Biological Sciences, Professor,
the RAS Corresponding Member (Petrozavodsk) |
| T. LÖNNGREN
Doctor of Philosophy (Tromsø, Norway) | R. YUSUPOV
Doctor of Technical Sciences, Professor, the RAS
Corresponding Member (St. Petersburg) |
| V. MAEVSKIY
Doctor of Economic Sciences, Professor (Moscow) | |
| N. MEL'NIKOV
Doctor of Technical Sciences,
Professor, the RAS Member (Apatity) | |

Editorial Board of the Series "Natural & Engineering Sciences"

- | | |
|---|--|
| O. BARYSHEVA
Doctor of Medical Sciences
(Petrozavodsk) | N. NEMOVA
Doctor of Biological Sciences,
Professor, the RAS Corresponding Member (Petrozavodsk) |
| A. BOLGOV
Doctor of Agricultural Sciences,
Professor (Petrozavodsk) | E. RAT'KOVA
Candidate of Technical Sciences,
Series Executive Secretary (Petrozavodsk) |
| V. VAPIROV
Doctor of Chemistry,
Professor (Petrozavodsk) | A. ROGOV
Doctor of Technical Sciences,
Professor (Petrozavodsk) |
| T. VOLKOVA
Doctor of Biological Sciences (Petrozavodsk) | G. STEFANOVICH
Doctor of Physical-Mathematical Sciences,
Professor (Petrozavodsk) |
| E. MARKOVSKAYA
Doctor of Biological Sciences,
Professor (Petrozavodsk) | V. SYSUN
Doctor of Physical-Mathematical Sciences,
Professor (Petrozavodsk) |
| A. MEYGAL
Doctor of Medical Sciences,
Professor (Petrozavodsk) | V. SHCHIPTSOV
Doctor of Geological-Mineralogical Sciences,
Professor (Petrozavodsk) |

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Андреев В. П., Зачиняева А. В.
Эндогенные и экзогенные модификаторы активности Na,K-АТФазы. 7
- Марковская Е. Ф., Дьячкова Т. Ю., Морозова К. В.
Анатомо-морфологические особенности *Nymphoides peltata* (S. G. Gmel.) O. Kuntze на северо-западной границе ареала. 17
- Тыркин И. А., Иванов С. И., Щуров И. Л., Широков В. А.
Воспроизводство атлантического лосося (*Salmo salar* L.) (Salmoniformes, Salmonidae) (пресноводная форма) на рекультивированном нерестово-выростном участке реки Суна. 23

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

- Масляков В. В., Громов М. С., Брызгунов А. В., Леонтьев В. Ю.
Оптимизация диагностики заболеваний правой подвздошной области с использованием трансрезонансной топографии. 29
- Сухин Ю. В., Логай В. А.
Разработка компьютерно-навигационной системы для лечения привычного вывиха плеча. 35
- Топчиева Л. В., Малышева И. Е., Курбатова И. В., Корнева В. А., Барышева О. Ю.
Содержание интерлейкина 6 у здоровых и больных эссенциальной артериальной гипертензией с разными генотипами по -572G>C полиморфному маркеру гена *IL6*. 39
- Кочетова Е. В.
Диффузионная способность легких и риск переломов у больных ХОБЛ. 45

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Гольдштейн Ю. Б.
Геометрические характеристики поперечных сечений тонкостенных стержней открытого профиля. 48
- Миряев Б. В., Миряева А. Б.
Оптимизированная строительная конструкция сечатого деревянного купола. 53
- Пеккоев А. Н., Лукашевич В. М., Селиверстов А. А., Суханов Ю. В.
Опыты с рубками ухода разной интенсивности в сосновых древостоях. 56
- Бодэ А. Б.
Фронтонные пояса в архитектуре деревянных церквей XVII–XVIII веков. 60

- Графова Е. О., Гольденберг П. Г., Евтифеев Ю. П.
Совершенствование системы очистки поверхностных стоков предприятия от фенольных загрязнений. 66

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Крупянский Д. С., Фофанов А. Д.
О влиянии точности арифметических расчетов на результаты молекулярно-динамического эксперимента. 72
- Пикулев В. Б., Прокопович П. Ф., Гуртов В. А.
Влияние озона на зарядоперенос в микрокристаллической целлюлозе. 77
- Степанова К. В., Яковлева Н. М., Кокатев А. Н., Петтерссон Х.
Нанопористые анодно-оксидные пленки на порошковом сплаве Ti-Al. 81
- Воронов Р. В., Галов А. С., Мощевикин А. П., Воронова А. М.
Задача привязки траектории объекта к плану помещения. 87
- Сеничев К. Н.
Задача поиска оптимального расписания одного станка с директивными сроками работ. 92

Семинар «Передовые методы информационных и коммуникационных технологий (AMICT – 2014)»

- Андреев А. А., Колосов А. С., Богоявленский Ю. А.
Автоматизация построения графа канального уровня ИКТ-инфраструктуры локального поставщика услуг Интернета. 97
- Богоявленская О. Ю.
Оценка дисперсии производительности алгоритма предотвращения насыщения в сети передачи данных. 103
- Вдовенко А. С., Корзун Д. Ж.
Управление интервалом проверки уведомлений по подписке мобильным клиентом в интеллектуальном пространстве. 108
- Марченков С. А., Корзун Д. Ж.
Определение присутствия пользователей в интеллектуальном зале на основе отслеживания активности в беспроводной сети. 114

Юбилей

- К 75-летию А. Е. Болгова. 120
- Научная информация. 121
- Информация для авторов. 122
- Contents. 124

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

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

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ РАН

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

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

Журнал и его архив размещаются в «Университетской библиотеке онлайн» по адресу <http://biblioclub.ru>

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

Учредитель: ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет»

Редактор С. Л. Смирнова. Корректор И. Н. Дьячкова. Переводчик Н. К. Дмитриева. Верстка С. П. Иванова

Подписано в печать 20.03.2015. Формат 60×90^{1/8}. Бумага офсетная. Печать офсетная.
10 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. (1-й завод – 150 экз.). Изд. № 66

Индекс 66093. Цена свободная.

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

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

УДК 612.822.1.015.36.014.46:615.357.452

ВЛАДИМИР ПЕТРОВИЧ АНДРЕЕВ

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

andreev@psu.karelia.ru

АННА ВЛАДИМИРОВНА ЗАЧИНЯЕВА

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

anvanna@aol.com

ЭНДОГЕННЫЕ И ЭКЗОГЕННЫЕ МОДИФИКАТОРЫ АКТИВНОСТИ Na,K-АТФАЗЫ*

Преинкубация гомогената мозга или печени крыс с ацетилхолином (норадреналином) приводит к уменьшению (увеличению) активности Na,K-АТФазы и высвобождению диализуемого низкомолекулярного активатора (ингибитора) фермента интактных микросом. Ацетилхолин (норадреналин) индуцирует синтез фактора-активатора (ингибитора) и вызывает ускорение (замедление) синтеза фермента. Низкомолекулярный ингибитор из мозга крупного рогатого скота выделен в индивидуальном состоянии и охарактеризован. Некоторые производные N-оксидов пиридина и хинолина в концентрациях 10^{-4} – 10^{-10} М ингибируют активность Na,K-АТФазы микросом мозга. Обнаружен новый активатор (N-оксид 2-(2,4-диметоксистирил)хинолина) Na,K-АТФазы, способный активировать фермент в концентрациях 10^{-6} – 10^{-9} М. Так как эти соединения изменяют активность фермента в очень низких концентрациях, они могут оказаться эффективными препаратами при лечении заболеваний, связанных с нарушениями функций Na,K-АТФазы.

Ключевые слова: Na,K-АТФаза, нейромедиаторы, ацетилхолин, норадреналин, эзерин, ингибиторы, активаторы, мозг, печень, гетероароматические N-оксиды

Предположение о прямом влиянии нейромедиаторов на процессы биосинтеза РНК и белков нервных клеток появилось в середине 60-х годов прошлого века. Оно основывалось на допущении возможности поступления этих соединений в нервные клетки, так как известно, что 20–30 % общего количества ацетилхолина (АХ) и норадреналина (НА) в нервной ткани составляет фонд так называемого свободного медиатора, находящегося в цитоплазме, содержание которого изменяется в зависимости от чередования возбуждения и покоя [9].

При изучении вопроса об их влиянии на процессы транскрипции было обнаружено, что АХ и НА в низких концентрациях (с максимумом при 10^{-7} – 10^{-5} М) изменяют включение предшественников в РНК клеточных ядер [9]. Однако для подтверждения вывода о прямом воздействии медиаторов на экспрессию генов нервных клеток необходимо было детальное исследование синтеза продуктов индивидуальных генов. В качестве такого объекта нами был выбран фермент Na,K-АТФаза.

Na,K-АТФаза – интегральный белок, встроенный в цитоплазматическую мембрану и обеспечивающий асимметричное распределение ионов Na^+ и K^+ между клеткой и внеклеточной средой, играет исключительно важную роль в поддержа-

нии процессов возбудимости и водно-солевого обмена в организме животных и человека. Поэтому не удивительно, что большое количество публикаций посвящено изучению механизмов регуляции функционирования этого фермента.

Особенное внимание в последнее время уделяется поиску и выделению эндогенных (природных) и экзогенных (искусственного происхождения) модификаторов активности Na,K-АТФазы, которые могут оказывать на нее как прямое, так и опосредованное воздействие. Решение этой проблемы имеет не только научное, но и практическое значение. В частности, изменение концентрации таких веществ в организме человека, как полагают, связано с развитием и течением гипертонии, сердечной недостаточности, некоторых форм рака и многих других заболеваний [27].

Имевшиеся до наших работ литературные данные [1] не давали основания для достаточно обоснованного заключения о возможности регуляции этими нейромедиаторами АТФазы *in situ*, так как, во-первых, были противоречивы, а во-вторых, действующие концентрации слишком высоки – 10^{-2} – 10^{-3} М [9]. Очевидно, что наблюдаемое *in vitro* обычно небольшое изменение активности фермента было обусловлено сдвигом ионных или буферных свойств среды при добавлении нейромедиатора, поскольку в таком же

диапазоне изменялась активность энзима в зависимости от природы буфера.

В качестве модельной системы, позволяющей выяснить механизмы воздействия на Na,K-АТФазу ацетилхолина, норадреналина и ксенобиотиков, мы выбрали гомогенат мозга крыс, в котором имеются все вещества и органеллы нервных клеток, необходимые для биосинтетических процессов.

Проведенные нами исследования [12] показали, что регуляторное влияние АХ на уровень активности Na,K-АТФазы в гомогенате мозга крыс заключается в индукции синтеза низкомолекулярного фактора-активатора при одновременном снижении синтеза самого фермента.

Однако в опытах *in vivo* нами было обнаружено, что внутрибрюшинное введение крысам эзерина в нетоксических дозах (0,2 и 0,4 мг/кг), но вызывающих многократное увеличение содержания АХ в мозге [26], оказывает действие, противоположное тому, которое АХ индуцирует в гомогенате: снижение Na,K-АТФазной активности недиализованных микросом и существенное увеличение активности диализованных.

Оказалось, что в этом случае добавление к интактным микросомам лиофилизированного материала, прошедшего через мембрану при диализе микросомно-цитоплазматической фракции, выделенной из мозга животных, получавших эзерин, вызывает снижение их Na,K-АТФазной активности, то есть при воздействии эзерина *in vivo* имеет место образование фактора-ингибитора и активация синтеза самого фермента.

Свидетельством того, что при воздействии эзерина происходит увеличение количества молекул фермента в мембранах, служит факт прироста числа центров связывания ^3H -уаина микросомами (рис. 1а). Обнаружено, что ^3H -уаин имеет два типа центров связывания в мембране с различным сродством (что соответствует лите-

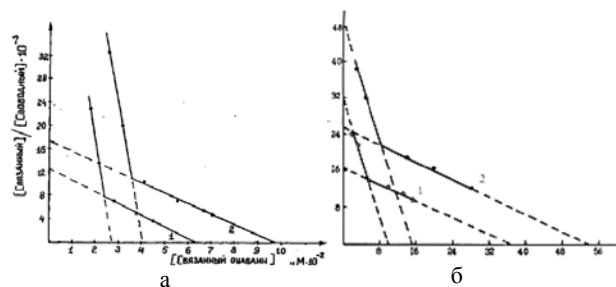


Рис. 1. Связывание ^3H -уаина (в координатах Скэтчарда) диализованными микросомами: (а) мозга контрольных животных (1) и животных, получавших эзерин (2), (б) контрольного гомогената (1) и гомогената, преинкубированного с НА в концентрации 10^{-4} М (2). По оси абсцисс – связанный уаин (а) в $\text{nM} \cdot 10^{-2}$, (б) в $\text{nM} \cdot 10^{-3}$, по оси ординат – отношение связанного уаина к свободному (а) $\cdot 10^{-3}$, (б) $\cdot 10^{-4}$

ратурным данным [19], [23]), причем количество тех и других увеличивается после воздействия эзерина.

Различия в действии эзерина *in vivo* и *in vitro* (в концентрациях, полностью подавляющих активность холинэстераз, его влияние в гомогенате подобно АХ) дают основание предположить, что при нарушении целостности мозга из процессов регуляции уровня активности Na,K-АТФазы исключаются какие-то звенья. Одним из них может быть нарушение межклеточных взаимодействий, например исчезновение влияния на холиноцептивные клетки вставочных нейронов, высвобождающих тормозные медиаторы (норадреналин, дофамин), оказывающих противоположное АХ действие на синтетические процессы [10], [11].

С целью проверить данное предположение мы изучили влияние преинкубации гомогената мозга крыс с норадреналином (НА) на активность Na,K-АТФазы микросом [2], [3] и обнаружили, что при этом происходит снижение активности фермента (табл. 1).

Таблица 1
Влияние преинкубации гомогената мозга и микросомно-цитоплазматической фракции с НА на активность Na,K-АТФазы микросом

Преинкубированная клеточная фракция	Добавленный агент и его концентрация	Условия обработки клеточной фракции	Активность фермента, % от контроля
Гомогенат	НА 10^{-6} М	Без диализа	93 ± 4 (4)
	НА 10^{-5} М		86 ± 7 (13)*
	НА 10^{-4} М		81 ± 6 (15)**
	НА 10^{-3} М		95 ± 4 (10)
	НА 10^{-4} М	Диализ	132 ± 10 (9)**
	НА 10^{-4} М + актиномицин D (50 мкг/мл)	Без диализа	128 ± 9 (6)*
	НА 10^{-4} М + актиномицин D (50 мкг/мл)	Диализ	127 ± 10 (9)*
	НА 10^{-4} М + рибонуклеаза (100 мкг/мл)	Без диализа	102 ± 8 (9)
Микросомно-цитоплазматическая фракция	НА 10^{-4} М + рибонуклеаза (100 мкг/мл)	Диализ	98 ± 8 (10)
	НА 10^{-4} М	Без диализа	126 ± 7 (9)*

Примечание. * – $P < 0,05$; ** – $P < 0,01$; в скобках – число опытов.

Эффект зависит от концентрации НА, и максимум угнетения наблюдается при концентрации 10^{-4} М. После диализа микросомно-цитоплазматической фракции, полученной из преинкубированного с норадреналином гомогената, изолированные микросомы обладают более высокой по сравнению с контролем Na,K-АТФазной активностью. Этот факт можно интерпретировать в том смысле, что при преинкубации гомогената с НА имеет место образование диализуемого ин-

гибитора Na,K-АТФазы; сам же фермент при этом претерпевает либо активацию, либо количество его в мембранах увеличивается. Справедливость настоящего предположения подтверждается тем, что: а) диализуемый материал при добавлении к intactным микросомам ингибирует их Na,K-АТФазную активность (на 30 %), б) преинкубация гомогената с НА на фоне ингибитора транскрипции актиномицина D вызывает увеличение активности фермента как у недиализированных, так и диализированных микросом (на 20–25 %) (см. табл. 1). Таким образом актиномицин D полностью препятствует появлению фактора-ингибитора Na,K-АТФазы и не затрагивает активирующее действие НА на фермент. Ингибитор же трансляции (рибонуклеаза) полностью снимает влияние норадреналина на активность Na,K-АТФазы как недиализированных, так и диализированных микросом.

Полученные нами экспериментальные результаты позволяют предполагать существование следующих путей воздействия норадреналина на уровень активности Na,K-АТФазы: ускорение синтеза фермента на уровне трансляции и одновременная индукция биосинтеза низкомолекулярного фактора-ингибитора с первичным эффектом норадреналина на уровне транскрипции.

Эффект норадреналина при преинкубации недиализованной микросомно-цитоплазматической фракции является подтверждением справедливости предлагаемой интерпретации. В этом случае наблюдалась активация фермента, то есть при удалении ядер из гомогената НА не индуцирует появление фактора-ингибитора, но сохраняется его активирующий эффект на Na,K-АТФазу.

Свидетельством того, что при воздействии НА происходит увеличение количества молекул Na,K-АТФазы в мембранах, служит факт прироста числа центров связывания ^3H -уабаина микросомами (рис. 1б). После преинкубации гомогената с НА (как и в опытах с эзерином *in vivo*) увеличивается количество центров связывания обоих типов.

Полученные результаты дают основание предполагать, что в нервных клетках существует система норадреналиновой регуляции уровня Na,K-АТФазной активности мембран, состоящая в активации синтеза фермента на уровне трансляции и одновременной индукции синтеза низкомолекулярного ингибитора его каталитической активности на уровне транскрипции.

Таким образом, нами показано, что *in vitro* и *in vivo* существует сложная система медиаторной регуляции уровня Na,K-АТФазной активности нервных клеток, основные черты которой можно представить следующим образом: при активации синтеза энзима параллельно синтезируется фактор-ингибитор, и наоборот – при угнетении синтеза Na,K-АТФазы образуется фактор-активатор. Очевидно, что эти разнонаправленные процессы

являются звеньями единой саморегулирующей системы поддержания активности фермента на оптимальном функционально обусловленном уровне.

С целью сравнить влияние нейромедиаторов на активность фермента нейрональных и других типов клеток мы провели опыты с гомогенатом печени крыс (табл. 2).

Как и ожидалось, в первом приближении биосинтетические процессы в печени и мозге довольно похожи. Например, преинкубация гомогената с АХ в обоих случаях индуцирует синтез низкомолекулярного диализуемого активатора(ов) Na,K-АТФазы и ингибирует процесс синтеза самого фермента. Внутривентрикулярное же введение эзерина крысам вызывает снижение активности энзима. Однако анализ данных табл. 2 позволяет сделать вывод, что при использовании печени эффект выражен более резко, чем для мозга: эзерин *in vivo* приводит к гораздо более сильному ингибированию (на 70 %), а АХ – к значительно ярче выраженной активации (на 42 %) фермента и несколько сильнее (на 13 %) подавляет синтез молекул Na,K-АТФазы.

Следует отметить, что данные факты не противоречат литературным данным. В кровь (вследствие их синаптической «утечки» при проведении нервного импульса) поступают АХ, НА и другие нейромедиаторы, которые в дальнейшем могут попадать в клетки тканей со слабо выраженной или отсутствующей медиацией соответствующего типа [9].

Согласно данным работы [13], действие АХ на активность ацетилхолинэстеразы микросом мозга и печени также идентично. Однако бесклеточная система печени более чувствительна к АХ, чем система мозга (хотя максимальный эффект

Таблица 2

Влияние эзерина *in vivo* и НА и АХ *in vitro* на активность Na,K-АТФазы микросом и РНКаз гомогената печени и мозга крыс

Условия опыта	Объект исследования			
	Печень		Мозг	
	Без диализа	Диализ	Без диализа	Диализ
Na,K-АТФазная активность				
Эзерин (0,2 мг/кг)	20 ± 8 (6)**	–	90 ± 3 (14)*	139 ± 6 (9)**
НА (10 ⁻⁴ М) гомогенат	–	–	95 ± 4 (10)	132 ± 10 (9)**
АХ (10 ⁻⁴ М) гомогенат	172 ± 21 (6)**	78 ± 9 (9)*	130 ± 7 (11)***	91 ± 4 (9)*
РНКазная активность				
Эзерин (0,2 мг/кг)	83 ± 4 (10)**	–	77 ± 3 (8)***	–
Эзерин (0,4 мг/кг)	85 ± 6 (7)*	–	87 ± 4 (7)**	–

Примечание. * – P < 0,05; ** – P < 0,01; *** – P < 0,001; в скобках – число опытов.

наблюдался при одной и той же концентрации АХ – 10^{-5} М). Этот факт имеет свой биологический смысл, учитывая, что содержание АХ в крови ниже, чем в нервной ткани.

Обратимый ингибитор холинэстераз эзерин в нетоксичной дозе, повышающей содержание АХ в крови, существенно снижает РНКазную активность гомогената как печени, так и мозга крыс (этот эффект подобен его влиянию на Na,K-АТФазу, табл. 2), но увеличивает [13] активность АХЭ микросом печени.

Нам представлялись закономерными постановка и решение вопроса о том, универсально ли действие обнаруженных низкомолекулярных факторов – модификаторов активности Na,K-АТФазы, или же они воздействуют на фермент только тех клеток, в которых сами вырабатываются, то есть не существуют ли для каждого типа клеток особые соединения – регуляторы. С этой целью материал, прошедший через мембраны при диализе микросомно-цитоплазматической фракции, полученной после преинкубации гомогената печени с АХ (10^{-4} М), инкубировали с микросомами мозга. Наблюдавшееся в этих опытах существенное увеличение активности Na,K-АТФазы (150 %, $n = 52$, $p < 0,0001$), по-видимому, свидетельствует о том, что фактор – активатор фермента не обладает строгой тканевой специфичностью.

Поскольку в организме животных и человека существуют различные типы низкомолекулярных модификаторов активности Na,K-АТФазы, мы попытались выделить соединения, обладающие подобными свойствами в индивидуальном состоянии.

На первом этапе очистки микросомно-цитоплазматическую фракцию, полученную из гомогената головного мозга крупного рогатого скота, диализовали против 10 объемов дистиллированной воды. Диализат концентрировали в вакууме и разделяли на колонке, заполненной силикагелем. Содержимое полученных фракций анализировали методом ТСХ на силуфоле (рис. 2а) и проверяли их способность изменять активность Na,K-АТФазы.

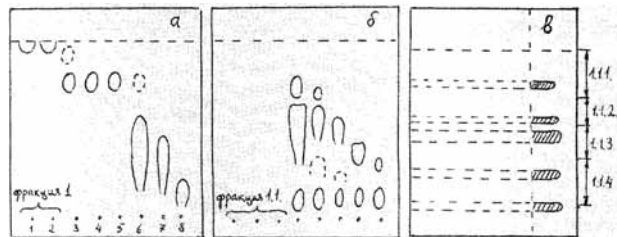


Рис. 2. Анализ методом ТСХ на силуфолах фракций, полученных при разделении колоночной хроматографией на силикагеле диализата микросомно-цитоплазматической (а) и элюата фракции 1 (б) и препаративное разделение на силуфолах соединений фракции 1.1 (в). Проявление: нингидрином (а, б), «боковое» парами йода (в). Подвижная фаза: вода (а), хлороформ–этанол–вода = 5 : 13 : 5 (б), хлороформ–этанол–вода = 13 : 20 : 5 (в)

Материал первой фракции, полученный с использованием в качестве элюента дистиллированной воды и обладающий способностью ингибировать фермент ($M = 66$ %, $n = 13$, $p < 0,01$), вновь фракционировали на силикагеле, используя в качестве подвижной фазы систему растворителей хлороформ – этанол – вода (5 : 13 : 5) (рис. 2б).

Далее содержимое фракции 1.1 ($M = 68$ %, $n = 8$, $p < 0,005$), не проявляемое нингидрином, разделяли методом ТСХ на силуфоле с использованием системы растворителей хлороформ – этанол – вода (13 : 20 : 5) (рис. 2в).

После «бокового» проявления парами йода вещества с пластинки элюировали водой и вновь анализировали их способность модифицировать активность Na,K-АТФазы (табл. 3).

Таблица 3
Влияние соединений, содержащихся в элюате с силуфола (см. рис. 2), на активность Na,K-АТФазы микросом мозга крупного рогатого скота

Фракции	Эффект в % к контролю	Число опытов	Коэф. Стюдента	Уровень значимости
1.1.1	100 ± 11	5	0,42	
1.1.2	63 ± 10	7	2,48	$< 0,05$
1.1.3	75 ± 5	9	5,77	$< 0,001$
1.1.4	74 ± 7	7	4,13	$< 0,005$

Согласно данным табл. 3, фракция 1.1 содержит или несколько веществ, способных ингибировать фермент, или одно соединение, существующее в нескольких формах [14].

Далее мы исследовали некоторые свойства компонентов фракции 1.1.3 (самое сильное проявление парами йода). Как было показано методом масс-спектрометрии, эта фракция включает хлористый аммоний, который может иметь как эндогенное, так и экзогенное (в химических лабораториях в воздухе всегда содержатся HCl и аммиак, которые при концентрировании больших объемов растворов загрязняют выделяемые соединения) происхождение. Использование цветной реакции между хлористым аммонием и реактивом Несслера [17] позволило количественно оценить содержание этой соли (70 %).

В ИК-спектре фракции 1.1.3 (рис. 3) наблюдаются следующие полосы поглощения (см^{-1}): 3600–2800 (шир., с.), 1615 (с.), 1400 (с.), 1110 (сл.), 1040 (сл.). Их положение соответствует наличию C-H, O-H, C-N и N-H (в аммонийной форме) связей.

При кратковременном нагревании компонентов данной фракции при 180°C вместо одной широкой полосы при 3140 см^{-1} появляются две (3430 и 3135 см^{-1}), что, возможно, вызвано разложением менее устойчивого, чем хлорид аммония, органического соединения, содержащего в своем составе аммонийные группы.

В спектре ^1H ЯМР ингибитора в D_2O (рис. 4) присутствуют дублет при 1,38 м. д. и мультиплет

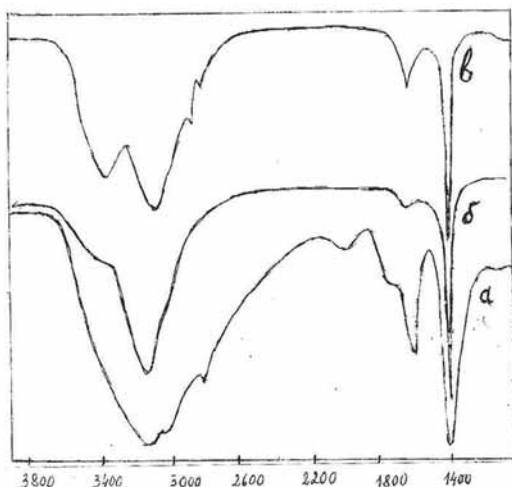


Рис. 3. ИК-спектры в КВг фракции 1.1.3 (а), NH_4Cl (б) и фракции 1.1.3, прогортой 20 секунд при 180 °С (в)

в области 3,31–3,82 м. д. (за счет электроотрицательных атомов, например азота и кислорода, дезэкранирующих протоны). Наличие широкого и мощного пика в области 4,0–5,5 м. д. обусловлено примесью HOD и H_2O в дейтерированном растворителе. Этот факт не позволил сделать однозначный вывод о наличии или отсутствии гидроксильных групп в исследуемом образце.

Спектр ^{13}C ЯМР фракции 1.1.3 в D_2O (рис. 5) содержит четыре сигнала при 20,66, 63,11, 69,02 и 72,68 м. д. (четыре типа атомов углерода); слабая интенсивность поглощения в ИК-спектре в области, соответствующей валентным колебаниям C-H связей (рис. 5), свидетельствует об их малом количестве. Регистрация спектра ^{13}C ЯМР в режиме $\text{dept } 135$ указывает на отсутствие четвертичных атомов углерода и позволяет сигнал при 63,11 м. д. приписать CH_2 группе, а остальные сигналы – CH и CH_3 группам.

Данные спектроскопии ^{13}C ЯМР однозначно указывают на то, что молекула ингибитора не содержит двойные связи и ароматические кольца ввиду отсутствия сигналов в соответствующих им слабых полях, но не исключают наличия гидроксильных, простых эфирных или аминогрупп, а также дизамещенной тройной связи. Однако поскольку все известные к настоящему времени природные ацетиленовые соединения имеют растительное происхождение, а мы выделили ин-

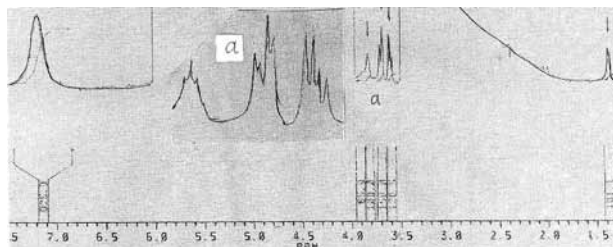


Рис. 4. Спектр протонного магнитного резонанса фракции 1.1.3 в D_2O

гибитор из мозга животных, присутствие в нем тройной связи кажется маловероятным. Кроме того, нагревание водного раствора ингибитора на кипящей водяной бане с 6N HCl в течение 30 мин. не приводит к изменениям в его хроматографическом поведении в тонком слое (ТСХ). Это указывает на отсутствие в молекуле фрагментов, способных к гидролизу или реакциям электрофильного присоединения (для ацетиленовых соединений характерны реакции A_E с галогенводородными кислотами).

Методом гель-хроматографии на молселекте Г-10 нам удалось освободиться от хлорида аммония во фракции 1.1.3 и оценить молекулярную массу ингибитора (около 200 Да). В качестве реперных веществ использовали глутатион, углекислый натрий и глицин.

После обработки 4 кг мозга крупного рогатого скота нами было выделено около 2 мг белого твердого вещества, содержащего активное начало фракции 1.1.3 и обладающего выраженной способностью ингибировать Na,K-ATFазу . Индивидуальность данного соединения доказана методами ТСХ, ВЭЖХ и гель-хроматографии. Оно хорошо растворимо в воде и метаноле и очень плохо в хлороформе.

Нами также были зарегистрированы масс-спектры самого ингибитора и его силилированного аналога (рис. 6), в которых не удалось идентифицировать пики молекулярных ионов. Интерпретация этих спектров согласуется с приведенными выше данными, а соотношение количеств изотопов кремния ^{28}Si , ^{29}Si и ^{30}Si указывает на то, что силилированию в молекуле исследуемого соединения, по-видимому, подверглись три функциональные группы.

Суммируя имеющиеся данные, мы склонны считать, что выделенный ингибитор содержит

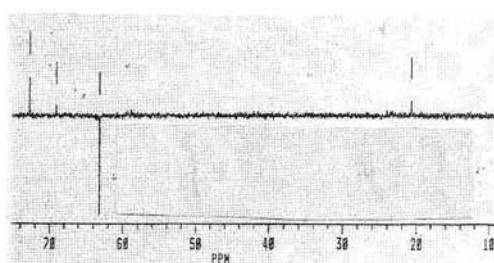
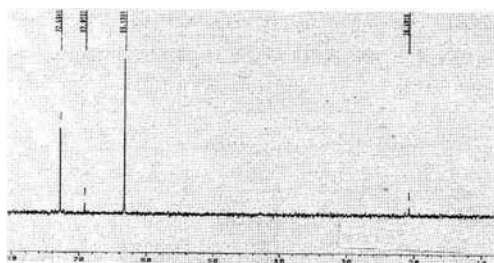


Рис. 5. Спектры ^{13}C ЯМР в обычных условиях (слева) и в режиме $\text{dept } 135$

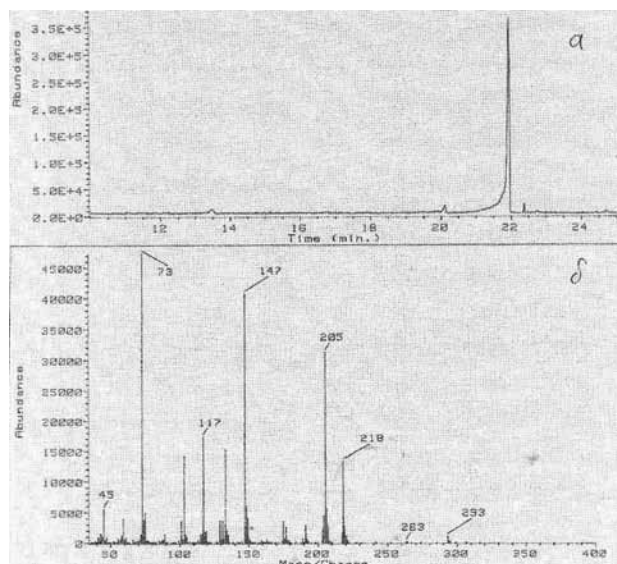


Рис. 6. Хроматограмма силилированного ингибитора (а) и его масс-спектр (б)

как минимум четыре атома углерода, три амино- (в аммонийной форме) и гидроксильн(ую)ые группы. Возможно, он является ациклическим аминокислотом или его производным, содержащим простую эфирную связь.

К настоящему времени известны различные эндогенные ингибиторы Na,K-АТФазы – катионы Ca^{2+} [16], [18], ванадат-ион [20], нейромедиаторы (ацетилхолин, норадреналин и др. [1], [3], [9], [12], [18]), гистидил-пролилдикетопиперазин [20] и «уабаинподобные» гликозиды [25]. В работе Елаева и Байгильдиной [14] сообщалось об эндогенном ингибиторе с молекулярной массой около 190 Да, который, по мнению авторов, является амидом, содержащим морфолиновую структуру.

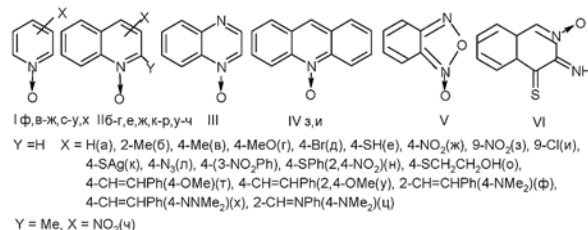
Анализ полученных нами данных позволяет сделать вывод о том, что выделенный нами из мозга крупного рогатого скота ингибитор [4] Na,K-АТФазы не имеет аналогов в литературе. Выяснение в деталях его структурной формулы, а также механизмов биосинтеза и взаимодействия с Na,K-АТФазой является предметом дальнейших наших исследований.

Кроме того, мы исследовали способность влиять на активность Na,K-АТФазы некоторых других кислород- и азотсодержащих экзогенных соединений.

Гетероароматические N-оксиды показывают широкий спектр биологической активности и образуются в организме животных и человека при инактивации гетероциклических соединений. Однако их влияние на Na,K-АТФазу практически не исследовалось. Мы нашли лишь несколько работ, в которых они используются как лекарственные препараты [1] и при изучении ЭПР-спектров (например, 5,5-диметил-1-пирролин N-оксид [25]), а N-оксид 2-гептил-4-гидроксихинолина

применяют как ингибитор цитохромных систем [21], [22].

Ввиду того, что нами в последние годы синтезировано большое количество гетероароматических N-оксидов (I–V), мы проверили способность соединений этого класса в физиологических концентрациях (10^{-4} – 10^{-10} М) изменять *in vitro* активность Na,K-АТФазы мозга крупного рогатого скота.



N-оксиды 4-метокси- и 4-бромпиридина, 2-метил, 4-метокси-, 4-меркапто-, 3-нитрофенокси, 4-стирил и 2-стирилхинолина, моно-N-оксида хиноксалина и соединение IV в концентрации 10^{-4} М не изменяли ($n = 10$) активность, и поэтому для них при более низких концентрациях исследования не проводили. Данные для других соединений представлены в табл. 4.

Полученные результаты [5] показали, что 16 из них являются ингибиторами (на 67–20 %) Na,K-АТФазы даже при концентрациях 10^{-8} М, что сопоставимо или превышает эффективность строфантин К и G. Активность 15 ингибиторов (за исключением № 9) сохраняется постоянной в диапазоне концентраций 10^{-4} – 10^{-8} М и только при дальнейшем уменьшении их концентрации претерпевает изменения. По-видимому, этот феномен можно объяснить образованием прочных комплексов N-оксидов с Na,K-АТФазой. Так, если предположить существование таких аддуктов состава 1 : 1, то до тех пор, пока число молекул N-оксида будет превышать число центров связывания фермента, его ингибирование не должно изменяться. Это мы и наблюдаем в указанном диапазоне концентраций. Как только число молекул N-оксида станет меньше числа молекул фермента, не связанные с ингибитором молекулы Na,K-АТФазы будут повышать общую активность энзима, и тем в большей степени, чем больше будет соотношение фермент / N-оксид. В этом случае даже двукратное изменение указанного соотношения должно приводить к заметным изменениям активности фермента. Например, для соединений № 5–7, 14, 20 при переходе от 10^{-8} к 10^{-9} М ингибиторный эффект пропадает полностью и только для № 14 активен даже при 10^{-10} М. Активирующее действие соединения № 9 при 10^{-4} М, по-видимому, является неспецифическим и может быть обусловлено значительной концентрацией ионов Ag^+ .

Особо следует отметить резко выраженный (180–190 %) активирующий эффект соединения

Таблица 4

Влияние гетероароматических N-оксидов на активность Na,K-АТФазы микросом

№		X	Активность фермента, % от контроля				
			Концентрация N-оксида				
			10 ⁻⁴ М	10 ⁻⁶ М	10 ⁻⁸ М	10 ⁻⁹ М	10 ⁻¹⁰ М
PyO							
1	4-Me	78 ± 1 (10)***	81 ± 2 (10)***	83 ± 1 (10)***			
2	4-NO ₂	91 ± 2 (9)***					
3	4-[CH=CHC ₆ H ₅ (4-OCH ₃)]	63 ± 2 (10)***	83 ± 1 (10)***	80 ± 1 (10)***			
4	2-[CH=CHC ₆ H ₅ (4-OCH ₃)]	96 ± 1 (10)**					
5	4-[CH=CHC ₆ H ₃ (2,4-OCH ₃)]	34 ± 3 (9)***	34 ± 1 (10)***	37 ± 1 (10)***	97 ± 2 (10)	97 ± 4 (15)	
6	4-[CH=CHC ₆ H ₄ (4-N(CH ₃) ₂)]	22 ± 2 (20)***	29 ± 1 (9)***	37 ± 1 (10)***	97 ± 2 (10)	102 ± 2 (10)	
QO							
7	H	39 ± 3 (10)***	22 ± 2 (10)***	27 ± 3 (10)***	99 ± 2 (10)	93 ± 5 (10)	
8	4-Me	104 ± 1 (10)**					
9	4-SAg	170 ± 5 (9)***	76 ± 3 (10)***	74 ± 3 (9)***			
10	4-N ₃	64 ± 1 (10)***	72 ± 1 (10)***	65 ± 9 (7)**			
11	4-Cl ^a	68	72	77		76	
12	4-Br ^a	75	77	85		82	
13	4-NO ₂	33 ± 2 (9)***	32 ± 1 (10)***	33 ± 1 (10)***		101 ± 4 (10)	
14	2-Me-4NO ₂	41 ± 1 (10)***	43 ± 1 (10)***	46 ± 1 (10)***	94 ± 2 (10)*	90 ± 4 (15)*	
15	4-SC ₆ H ₄ (2,4-NO ₂)	62 ± 3 (10)***	72 ± 1 (10)***	73 ± 1 (9)***			
16	4-SCH ₂ CH ₂ OH	91 ± 2 (10)**					
17	4-[CH=CHC ₆ H ₃ (2,4-OCH ₃)]	56 ± 4 (10)***	188 ± 2 (10)***	179 ± 1 (10)***	108 ± 2 (10)**	100 ± 2 (10)	
18	4-[CH=CHC ₆ H ₄ (4-(CH ₃) ₂)]	47 ± 1 (10)***	44 ± 1 (10)***	50 ± 1 (10)***		96 ± 4 (10)	
19	2-[CH=CHC ₆ H ₄ (4-N(CH ₃) ₂)]	59 ± 2 (10)***	58 ± 2 (10)***	69 ± 3 (10)***		104 ± 3 (10)	
20	2-[CH=NC ₆ H ₄ (4-N(CH ₃) ₂)]	56 ± 2 (10)***	60 ± 1 (10)***	57 ± 1 (10)***	98 ± 2 (10)	90 ± 2 (15)**	
AcrO							
21	9-NO ₂	87 ± 3 (10)**	104 ± 4 (10)	98 (10)		111 ± 5 (15)*	
22	9-Cl	108 ± 4 (15)*	99 ± 4 (10)	114 ± 5 (15)*		97 ± 2 (10)	
Другие соединения							
23	Фуросан IV	66 ± 1 (10)***	65 ± 1 (10)***	64 ± 1 (10)***		97 ± 3 (10)	
24	V	28 ± 1 (10)***	29 ± 1 (10)***	31 ± 1 (10)***		99 ± 2 (9)	
25	Фталимид	39 ± 3 (10)***	22 ± 2 (10)***	27 ± 3 (10)***	99 ± 2 (10)	93 ± 5 (10)	

Примечание. ^a Данные работы [15], n = 10, P < 0,05. * – P < 0,05; ** – P < 0,01; *** – P < 0,001; в скобках – число опытов.

№ 17 (№ 22 – менее активен), так как в настоящее время неизвестны вещества, обладающие подобным действием на фермент. Ввиду того что данное воздействие вызывается очень низкими его концентрациями (10⁻⁶–10⁻⁸М), можно предположить, что в составе Na,K-АТФазы имеется, по крайней мере, один особый центр, ответственный за взаимодействие с соединениями, активирующими фермент. Таким образом, следует ожидать открытия и других эндогенных активаторов данного энзима. Ингибирующая способность соединения № 17 при более высокой концентрации (на 42 % при 10⁻⁴М), по-видимому, является неспецифической.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Выделение эндогенного ингибитора Na,K-АТФазы

2 кг мозга, полученного на Петрозаводском мясокомбинате [4] в день забоя животных, гомогенизировали в дистиллированной воде (из расчета 1 мл на мозг). Гомогенат центрифугировали 15 мин. при

12000 g, супернатант диализовали против 10 объемов дистиллированной воды в течение 12 ч. при +4 °С. Полученный диализат концентрировали в вакууме при 30–35 °С до объема 10 мл и использовали для дальнейших исследований. Материал, не прошедший через мембраны, центрифугировали 60 мин. при 30000 g. Осадок микросом суспензировали в 0,05 М трис-НСl (рН 7,55) и хранили при –20 °С (в течение 1 месяца активность Na,K-АТФазы оставалась почти неизменной). Определение способности выделенных соединений модифицировать активность Na,K-АТФазы осуществляли, как описано ранее [12]. Выделение ингибитора из диализата состояло из следующих этапов.

1. В колонку диаметром 20 мм, содержащую 20 г силикагеля L 100/250 мкм фирмы Chemapol, вносили 1 мл диализата от 200 г мозга и элюировали водой, собирая аликвоты объемом 5 мл. Содержимое фракций анализировали методом ТСХ на силифоле (подвижная фаза – вода, проявление 0,1 % спиртовым раствором нингидрина, рис. 1а).

2. Материал первой фракции концентрировали до объема 1 мл, наносили на 20 г силикагеля L 40/100, помещенного в колонку диаметром 20 мм, и элюировали системой растворителей хлороформ – этанол – вода (5 : 13 : 5). Анализ содержимого фракций осуществляли методом ТСХ на силуфол (подвижная фаза хлороформ – этанол – вода (5 : 13 : 5), проявление 0,1 % спиртовым раствором нингидрина, рис. 1б). Для дальнейшей работы использовали непроявляемую нингидрином фракцию 1.1.
3. Содержимое фракции 1.1 высушивали в вакууме. Сухой остаток растворяли в 0,5 мл H_2O и разделяли методом ТСХ на силуфол (нанесение полоской, подвижная фаза хлороформ – этанол – вода (13 : 20 : 5), рис. 1в). После «бокового» проявления парами йода вещества с пластинки элюировали водой и анализировали их способность модифицировать активность Na,K -АТФазы.
4. Содержимое фракции 1.1.3 высушивали в вакууме, сухой остаток растворяли в 1 мл H_2O и вносили в колонку (2 × 75 см) с гелем молселект Г-10 (тонкий), уравновешенный дистиллированной водой. Элюирование проводили со скоростью 15 мл/ч, аликвоты объемом 2 мл отбирали с помощью коллатора фракций.

Доказательство индивидуальности выделенных веществ

Об индивидуальности выделенного нами ингибитора Na,K -АТФазы свидетельствует наличие лишь одного регистрируемого компонента при использовании описанных ниже хроматографических методов разделения.

1. ТСХ на силуфол (на силикагеле L 5/40 (фирмы Chemapol) с 13 % гипса. Использовали следующие системы растворителей: хлороформ – этанол – вода (13 : 20 : 5, 5 : 13 : 5), бензол – этанол (2 : 1), бутанол – уксусная кислота – вода (4 : 1 : 1). Проявление пластинок во всех случаях осуществляли парами йода.
2. ВЭЖХ (насос HPP-5001, УФ-детектор LCD 2040, самописец TZ 4620, фирмы Laboratorni pristroje, Praha, $\lambda = 235$ нм). Хроматографирование осуществляли с использованием колонок Separon C_{18} , CN, NH_2 и следующих систем растворителей: ацетонитрил – вода (84 : 16), вода, хлороформ – этанол – вода (13 : 20 : 5), хлороформ – этанол (10 : 1).

3. Газожидкостная хроматография:

а) Силилирование.

Смесь 0,2 мг сухого остатка (фракции 1.1.3), 1 мкл пиридина и 100 мкл N-метил-N-(триметилсилил) трифторацетамида (MSTFA) нагревали при 60 °C в течение 20 мин.

б) Условия ГЖХ-анализа.

Газовый хроматограф HP 5890 фирмы Hewlett-Packard (USA), оснащенный пламенно-ионизационным детектором и кварцевой капиллярной колонкой 12,5 м × 0,2 мм (внутренний диаметр), неподвижная фаза HP-1 с толщиной слоя 0,33 мкм.

Расход газа-носителя (гелий) – 1,5 см³/мин, водорода и воздуха к детектору – 25 и 250 см³/мин соответственно. Температуру колонки изменяли от 40 до 280 °C со скоростью 10 °C/мин. Температура испарителя и детектора – 250 и 300 °C соответственно. Объем вводимых проб составлял 0,5–1,0 мкл в режиме разделения потока 1 : 10. Регистрацию результатов проводили с использованием интегратора HP 3396A фирмы Hewlett-Packard (USA).

Исследование структуры ингибитора Na,K -АТФазы

ИК-спектр соединения, представленного фракцией 1.1.3, снимали в KBr на приборе Specord M 80, ПМР- и ¹³C ЯМР-спектры в D₂O – на приборе Bruker AM (500 МГц), масс-спектр ингибитора – на приборе MX 1321 (70 eV), а его силилированного производного – на хромато-масс-спектрометре GC/MS 5988A (70 eV) фирмы Hewlett-Packard (кварцевая капиллярная колонка 25 м × 0,32 мм, толщина пленки неподвижной фазы HP-1–0,52 мкм. Температуру колонки программировали от 40 до 270 °C со скоростью 4 °C/мин. Остальные условия аналогичны тем, которые описаны в разделе ГЖХ).

Гетероароматические N-оксиды были синтезированы в соответствии с методами, описанными в работах [1], [6], [7], [8]. Их способность *in vitro* модифицировать активность Na,K -АТФазы была исследована, как описано в работах [1], [2]. Написание данной статьи отчасти вызвано тем, что в работах [8], [15] были использованы экспериментальные данные, касающиеся выделения и характеристики ингибитора Na,K -АТФазы и влияния полученных нами гетероароматических N-оксидов на его активность, без разрешения авторов и без ссылок на соответствующие работы [4], [5].

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 химич. наук. Петрозаводск, 2007. 427 с.
2. Андреев В. П., Елаев Н. Р., Унжаков А. Р. Регуляция норадриналином биосинтеза Na,K -АТФазы и ее низкомолекулярного ингибитора // Нейрохимия. 1984. Т. 3. № 4. С. 443.
3. Андреев В. П., Елаев Н. Р., Унжаков А. Р. Регуляция норадриналином биосинтеза Na,K -АТФазы и ее низкомолекулярного ингибитора. Деп. в ВИНТИ 12.11.84, № 7248–84.
4. Андреев В. П., Платонов А. В. Выделение и характеристика нового эндогенного низкомолекулярного ингибитора Na,K -АТФазы из мозга крупного рогатого скота. Деп. в ВИНТИ 02.04.97, № 1066-B97.

5. Андреев В. П., Корвачева Е. Г., Нижник Я. П. О влиянии N-оксидов пиридина и хинолина на активность Na,K-АТФазы микросом мозга крупного рогатого скота // Химико-фармацевтический журнал. 2006. Т. 40. № 6. С. 96–97.
6. Андреев В. П., Батоцыренова Е. Г., Рыжаков А. В., Родина Л. Л. Процессы внутримолекулярного переноса заряда в ряду стирильных производных N-оксидов пиридина и хинолина // Химия гетероциклических соединений. 1998. № 8. С. 1093–1102.
7. Андреев В. П., Рыжаков А. В., Теканова С. Г. Стирильные производные N-оксида хинолина // Химия гетероциклических соединений. 1995. № 4. С. 518–521.
8. Батоцыренова Е. Г. Влияние эндогенных и экзогенных модификаторов на активность Na,K-АТФазы: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. СПб., 2005. 23 с.
9. Голиков С. Н., Долго-Сабуров В. Б., Елаев Н. Р., Кулешов В. И. Холинергическая регуляция биохимических систем клетки. М.: Медицина, 1985. 224 с.
10. Елаев Н. Р. О характере синаптической регуляции синтеза белков в нервных клетках // Доклады АН СССР. 1975. Т. 222. № 6. С. 1477–1479.
11. Елаев Н. Р. Норадrenalин как регулятор синтеза РНК и Na,K-АТФазы в нервных клетках // Проблемы эндокринологии. 1981. Т. 27. № 1. С. 58–62.
12. Елаев Н. Р., Андреев В. П., Шаврина Н. В. Эндогенные ингибиторы и активаторы Na,K-АТФазы // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 1983. Т. 95. № 2. С. 40–42.
13. Елаев Н. Р., Рылеева Е. А., Судакова Н. М., Онегина Л. К. Регуляция уровня АХЭ микросом печени и мозга как проявление трофической функции ацетилхолина // Физиологический журнал СССР. 1983. Т. 69. № 4. С. 554–556.
14. Елаев Н. Р., Байгильдина А. А. Ингибитор Na,K-АТФазы из мембраны нервных клеток. Выделение и общие характеристики // Биохимия. 1994. Т. 59. № 3. С. 389–394.
15. Комов В. П., Батоцыренова Е. Г. Влияние гетероароматических N-оксидов на активность мембранной Na⁺, K⁺-АТФазы // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 2008. № 2. С. 32–34.
16. Петруняк В. В., Панюшкина Е. А., Северина Е. П. Активация и ингибирование Na,K-АТФазы мембран эритроцитов эндогенными Ca²⁺-зависимыми регуляторами. Ca²⁺-зависимое действие убаина на Ca²⁺-АТФазу // Биологические мембраны. 1990. Т. 7. № 4. С. 352.
17. Резников А. А., Муликовская Е. П. Методы анализа природных вод. М., 1954. 135 с.
18. Abashidze S., Jariashvili T., Kometiani Z. The effect of EGTA and Ca⁺⁺ in regulation of the brain Na,K-ATPase by noradrenaline // BMC Biochemistry. 2001. Vol. 2. № 8. URL: <http://biomedcentral.com/471-209/2/8>
19. Adams M., Heffron J. J. Na⁺-K⁺-ATPase content of fast- and slow-twitch muscle fibres // Biochem. Soc. Trans. 1981. Vol. 9. № 2. P. 220.
20. Battani F., Peterkofsky A. // Biochem. Biophys. Res. Comm. 1980. Vol. 94. № 1. P. 240.
21. Dibrov P. A., Lazarova R. L., Skulachev V. P., Verkhovskaya M. L. The sodium cycle. I. Na⁺-dependent motility and modes of membrane energization in the marine alkalotolerant vibrio Alginolyticus // Biochim. Biophys. Acta. 1986. Vol. 850. № 3. P. 449–457.
22. Dibrov P. A., Lazarova R. L., Skulachev V. P., Verkhovskaya M. L. The sodium cycle. II. Na⁺-coupled oxidative phosphorylation in Vibrio alginolyticus cells // Biochim. Biophys. Acta. 1986. Vol. 850. № 3. P. 458–465.
23. Goodfrain T., de Poyer A., Lutete D. N. Identification with potassium and vanadate of two classes of specific ouabain binding sites in a Na⁺, K⁺-ATPase preparation from the guinea-pig heart // Biochem. Pharmacol. 1980. Vol. 29. № 8. P. 1195–1199.
24. Taga R., Okabe E. Hydroxyl radical participation in the in vitro effects of gram-negative endotoxin on cardiac sarcolemmal Na,K-ATPase activity // Jpn J. Pharmacol. 1991. Vol. 55. № 3. P. 339–349.
25. Schneider R., Wray V., Nimtz M., Lehmann W. D., Kirch U., Antolovic R. Schoner Bovine adrenals contain, in addition to ouabain, a second inhibitor of the sodium pump // The Journal of Biological Chemistry. 1998. Vol. 273. № 2. P. 784–792.
26. Torda C. Effect of convulsion inducing agents on the acetylcholine content and on the electrical activity of the brain // Am. J. Physiol. 1953. Vol. 173. № 1. P. 179–183.
27. Xie Z., Askari A. Na⁺-K⁺-ATPase as a signal transducer // Eur. J. Biochem. 2002. Vol. 269. P. 2434–2439.

Andreev V. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Zachinyaeva A. V., Military Medical Academy named after S. M. Kirov (St. Petersburg, Russian Federation)

ENDOGENOUS AND EXOGENOUS MODIFIERS OF Na,K-ATPASE ACTIVITY

Preincubation of the rat brain and liver homogenates with acetylcholine (noradrenaline) leads to a decrease (increase) in Na,K-ATPase activity and to a release of dialysate of the low-molecular factor activating (deactivating) Na,K-ATPase of intact microsomes. The acetylcholine (noradrenaline)-induced synthesis of activating (deactivating) factors and inhibition (activation) of Na,K-ATPase synthesis were revealed. A new low-molecular factor activating enzymes was isolated and characterized. Some N-oxides of pyridine and quinoline derivatives in concentrations ranging from 10⁻⁴ to 10⁻¹⁰ M inhibit Na,K-ATPase activity in cattle brain microsomes. A new Na,K-ATPase activator, 2-(2,4-dimethoxystyryl) quinoline-N-oxide, has been found, which is capable of acting at concentrations within 10⁻⁶–10⁻⁹ M. Since these compounds activate enzymes in very low concentrations, they can probably be effective in treatment of some disorders involving violation of the Na,K-ATPase function.

Key words: Na,K-ATPase, neurotransmitters, acetylcholine, noradrenaline, eserine, inhibitors, activators, brain, liver, heteroaromatic N-oxides

REFERENCES

1. Andreev V. P. *Molekulyarnye komplekсы geteroaromaticheskikh N-oksidov i atsetilenovykh aminov s v-aktseptorami kak model' issledovaniya nukleofil'nosti i osnovnosti soedineniy s prostranstvenno dostupnymi reaktsionnymi tsentrami: Diss. ... d-ra khim. nauk* [Molecular complexes of heteroaromatic N-oxides and acetylenic amines with v-acceptors as model

- of investigation of nucleophilicity and basicity of compounds with steric free reactive centers. Dr. chem. sci. diss.]. Petrozavodsk, 2007. 427 p.
2. Andreev V. P., Elaev N. R., Unzhakov A. R. Regulation of Na,K-ATPase biosynthesis with noradrenaline [Regulyatsiya noradrenalinom biosinteza Na,K-ATFazy i ee nizkomolekulyarnogo ingibitora]. *Neyrokhiimiya*. 1984. Vol. 3. № 4. P. 443.
 3. Andreev V. P., Elaev N. R., Unzhakov A. R. *Regulyatsiya noradrenalinom biosinteza Na,K-ATFazy i ee nizkomolekulyarnogo ingibitora* [Regulation of Na,K-ATPase biosynthesis with noradrenaline]. Departm. VINITI: 12.11.84, № 7248–84.
 4. Andreev V. P., Platonov A. V. *Vydelenie i kharakteristika novogo endogenno nizmolekulyarnogo ingibitora Na,K-ATFazy iz mozga krupnogo rogatogo skota* [Isolation and characterization of new endogeneous lowmolecular inhibitor of Na,K-ATPase from the brain of cow]. Departm. VINITI: 02.04.97, № 1066–B97.
 5. Andreev V. P., Korvacheva E. G., Nizhnik Ya. P. Molecular-biological problems of drug design and mechanism of drug action. *Pharmaceutical Chemistry Journal*. 2006. Vol. 40. № 7. P. 347–348.
 6. Andreev V. P., Batotsyrenova E. G., Ryzhakov A. V., Rodina L. L. Intramolecular charge transfer processes in a series of styryl derivatives of pyridine and quinoline N-oxides. *Chemistry of Heterocyclic Compounds*. 1998. Vol. 34. № 8. P. 941–949.
 7. Andreev V. P., Ryzhakov A. V., Tekanova S. V. Styryl derivatives of quinoline N-oxides. *Chemistry of Heterocyclic Compounds*. 1995. Vol. 31. № 4. P. 453–456.
 8. Batotsyrenova E. G. *Vliyanie endogennykh i ekzogennykh modifikatorov na aktivnost' Na,K-ATFazy: Avtoref. diss. ... kand. biol. nauk* [Influence of Endogenous and exogeneous modifiers on Na,K-ATPase activity. Author's abstract, PhD. biol. sci. diss.]. St. Petersburg, 2005. 23 p.
 9. Golikov S. N., Dolgo-Saburov V. B., Elaev N. R., Kuleshov V. I. *Kholinergicheskaya regulyatsiya biokhimicheskikh sistem kletki* [Holinergic regulation of biochemical systems of cell]. Moscow, Meditsina Publ., 1985. 224 p.
 10. Elaev N. R. About character of synaptic regulation of synthesis of protein in nervous cells [O kharaktere sinapticheskoy regulyatsii sinteza belkov v nervnykh kletkakh]. *Doklady AN SSSR*. 1975. Vol. 222. № 6. P. 1477–1479.
 11. Elaev N. R. Noradrenaline as regulator of Na,K-ATPase synthesis in nervous cells [Noradrenalin kak regulyator sinteza RNK i Na,K-ATFazy v nervnykh kletkakh]. *Problemy endokrinologii*. 1981. Vol. 27. № 1. P. 58–62.
 12. Elaev N. R., Andreev V. P., Shavrina N. V. Endogenous acetylcholine-induced Na,K-ATPase activators and inhibitors. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 1983. Vol. 95. № 2. P. 209–212.
 13. Elaev N. R., Ryleeva E. A., Sudakova N. M., Onegina L. K. Regulation of the acetylcholine level of microsomes of liver and brain as expression of trophic function of acetylcholine [Regulyatsiya urovnya atsetilkholinestazy mikrosom pecheni i mozga kak proyavlenie troficheskoy funktsii atsetilkholina]. *Fiziologicheskii zhurnal SSSR*. 1983. Vol. 69. № 4. P. 554–556.
 14. Elaev N. R., Baygil'dina A. A. Inhibitor of Na,K-ATPase from membrane of nervous cells/ Isolation and general characteristics [Ingibitor Na,K-ATFazy iz membrany nervnykh kletok. Vydelenie i obshchie kharakteristiki]. *Biokhiimiya*. 1994. Vol. 59. № 3. P. 389–394.
 15. Komov V. P., Batotsyrenova E. G. Influence of heteroaromatic N-oxides on activity of membranous Na,K-ATPase [Vliyanie geteroaromaticheskikh N-oksidov na aktivnost' membrannoy Na⁺, K⁺-ATFazy]. *Voprosy biologicheskoy, meditsinskoy i farmatsevticheskoy khimii*. 2008. № 2. C. 32–34.
 16. Petrunyaka V. V., Panyushkina E. A., Severina E. P. Activation and inhibition of membranous Na,K-ATPase of erythrocytes with endogenous Ca²⁺-dependent regulators. Ca-dependent action of ouabaine on Ca²⁺ATPase [Aktivatsiya i ingibirovanie Na,K-ATFazy membrane eritrotsitov endogennymi Ca²⁺-zavisimymi regulyatorami. Ca-zavisimoe deystvie ouabaina na Ca²⁺-ATFazu]. *Biologicheskie membrany*. 1990. Vol. 7. № 4. P. 352–358.
 17. Reznikov A. A., Mulikovskaya E. P. *Metody analiza prirodnnykh vod* [Methods of analysis of natural waters]. Moscow, 1954. 135 p.
 18. Abashidze S., Jariashvili T., Kometiani Z. The effect of EGTA and Ca⁺⁺ in regulation of the brain Na,K-ATPase by noradrenaline // *BMC Biochemistry*. 2001. Vol. 2. № 8. URL: <http://biomedcentral.com/471-209/2/8>
 19. Adams M., Heffron J. J. Na⁺-K⁺-ATPase content of fast- and slow-twitch muscle fibres // *Biochem. Soc. Trans.* 1981. Vol. 9. № 2. P. 220.
 20. Battani F., Peterkofsky A. // *Biochem. Biophys. Res. Comm.* 1980. Vol. 94. № 1. P. 240.
 21. Dibrov P. A., Lazarova R. L., Skulachev V. P., Verkhovskaya M. L. The sodium cycle. I. Na⁺-dependent motility and modes of membrane energization in the marine alkalotolerant vibrio *Alginolyticus* // *Biochim. Biophys. Acta*. 1986. Vol. 850. № 3. P. 449–457.
 22. Dibrov P. A., Lazarova R. L., Skulachev V. P., Verkhovskaya M. L. The sodium cycle. II. Na⁺-coupled oxidative phosphorylation in *Vibrio alginolyticus* cells // *Biochim. Biophys. Acta*. 1986. Vol. 850. № 3. P. 458–465.
 23. Goodfrain T., de Poyer A., Lutete D. N. Identification with potassium and vanadate of two classes of specific ouabain binding sites in a Na⁺, K⁺ ATPase preparation from the guinea-pig heart // *Biochem. Pharmacol.* 1980. Vol. 29. № 8. P. 1195–1199.
 24. Taga R., Okabe E. Hydroxyl radical participation in the in vitro effects of gram-negative endotoxin on cardiac sarcolemmal Na,K-ATPase activity // *Jpn J. Pharmacol.* 1991. Vol. 55. № 3. P. 339–349.
 25. Schneider R., Wray V., Nimtz M., Lehmann W. D., Kirch U., Antolovic R. Schoner Bovine adrenals contain, in addition to ouabain, a second inhibitor of the sodium pump // *The Journal of Biological Chemistry*. 1998. Vol. 273. № 2. P. 784–792.
 26. Torda C. Effect of convulsion inducing agents on the acetylcholine content and on the electrical activity of the brain // *Am. J. Physiol.* 1953. Vol. 173. № 1. P. 179–183.
 27. Xie Z., Askari A. Na⁺-K⁺-ATPase as a signal transducer // *Eur. J. Biochem.* 2002. Vol. 269. P. 2434–2439.

Поступила в редакцию 28.12.2011

ЕВГЕНИЯ ФЕДОРОВНА МАРКОВСКАЯ

доктор биологических наук, заведующий кафедрой ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
volev@sampo.ru

ТАМАРА ЮРЬЕВНА ДЬЯЧКОВА

кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
tdyachkova@mail.ru

КИРА ВЛАДИМИРОВНА МОРОЗОВА

кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
mkv25@bk.ru

АНАТОМО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ *NYMPHOIDES PELTATA* (S. G. GMEL.) O. KUNTZE НА СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ГРАНИЦЕ АРЕАЛА*

Представлены результаты изучения ценопопуляции охраняемого в Архангельской области вида растения *Nymphoides peltata* (S. G. Gmel.) O. Kuntze (Болотноцветника щитолистного). Вид был зарегистрирован в 2014 году у левого берега реки Северная Двина в деревне Анфимовская, в Емецком флористическом районе. Обнаружена популяция впервые, что дает основание считать данное местонахождение флористической находкой. Представлена карта нахождения вида, дано описание местобитания, приведены основные морфологические (количество и размеры основных вегетативных органов) и анатомические характеристики основных тканей надземных и подземных вегетативных органов растения. Характеристики вегетативных органов представлены для вегетативных рамет в разном возрастном состоянии. Популяция полночленная, находится на ранних этапах развития. Изложенные в статье результаты и выводы служат основой для организации мониторинга за состоянием выявленной популяции охраняемого в Архангельской области вида.

Ключевые слова: *Nymphoides peltata*, Архангельская область, ценопопуляция, рамета, морфологические и анатомические признаки

Nymphoides peltata (S. G. Gmel.) O. Kuntze (Болотноцветник щитолистный) – многолетнее травянистое растение из семейства *Menyanthaceae* (Вахтовые). Синонимы: *Limnanthemum peltatum* S. G. Gmelin; *Limnanthemum nymphoides* (L.) Hoffsgg. & Link.; *Nymphoides peltata* (S. G. Gmelin) Kuntze; *Menyanthes nymphoides* L. Гидрофит укореняющийся с плавающими простыми листьями округлой или яйцевидной формы с ползучими подводными побегами с вегетативными или генеративными почками [14]. Цветки размером 2–5 см, желтые, собраны в немногочетковые (чаще по 3) зонтиковидные пучки, выступают на поверхность и открываются последовательно. Плод – коробочка.

Это плюризональный циркумполярный вид, его ареал охватывает умеренную зону Европы, Малую и Среднюю Азию, Иран, Западную и Восточную (частично) Сибирь, Дальний Восток, Монголию, горы Центральной Азии, Северную Америку. На территории северо-востока европейской части России встречается в основном по

Северной Двине, отмечен в верхнем и нижнем течении Вычегды [16]. Нахождения вида в пределах его ареала спорадические, что позволяет рассматривать его как редкое растение. В ряде регионов вид подлежит охране как редкий или находящийся на грани исчезновения и занесен в Красные книги [6], [7], [8], [9], [10].

N. peltata рекомендуется для оформления больших водоемов, быстро покрывает поверхность воды в самом начале сезона. Растение лекарственное и используется как тонизирующее средство в традиционной китайской медицине, а также является пищевым растением: у него съедобны цветы, листья и семена [4].

Для развития этого вида очень важны колебания уровня воды в водоеме в период вегетации, к почвам нетребователен [3].

Сообщества *N. peltata* принадлежат к относительно редко встречающимся группировкам. В литературе имеются сведения о видовом составе и распространении растительных сообществ, в которых произрастает вид [1], [2], [12],

[15]. Конкретные описания фитоценозов с доминированием этого вида приведены в работах исследователей стран Западной Европы, большинство из Румынии [19], [20]. Ценотический анализ группировок с участием *N. peltata* проведен на Украине в трех устьевых областях Дуная, Днестра и Днепра с использованием принципов классификации растительности по Браун-Бланке. В пределах ассоциации *Nymphoidetum peltatae* (All. 1922) Oberd. Et Müller 1960 были выделены 4 субассоциации и 5 вариантов [5].

На территории Архангельской области *N. peltata* подлежит охране [18], приурочен к долине Северной Двины, распространен по реке от устья до г. Котласа, отмечен в следующих флористических районах: Беломорско-Кулойском, Онежском, Емецком, Северо-Двинском, Вычегодском, в четырех конкретных флорах: «Архангельск», «Усть-Пинега», «Верхняя Тойма», «Котлас» (рис. 1).



Рис. 1. Местонахождение выявленной ценопопуляции *Nymphaeoides peltata* (дер. Анфимовская, Архангельская область). Флористические районы: Нес. – Несский; Мез.-Косм. – Мезенско-Косминский; Бел.-Кул. – Беломорско-Кулойский; Пин.-Мез. – Пинежско-Мезенский; Вожг. – Вожгорский; Онеж. – Онежский; Кож. – Кожозерский; Ем. – Емецкий; Сев.-Дв. – Северо-Двинский; Лач. – Лачский; Нянд. – Няндомский; Выч. – Вычегодский

В августе 2014 года на левом берегу реки Северная Двина в Емецком флористическом районе в деревне Анфимовская (см. рис. 1) была обнаружена и изучена ценопопуляция *N. peltata* в небольшой заводи со стоячей водой глубиной до 30 см.

Вид в данном месте был обнаружен впервые, оно находится в 25 км от ближайшего известного пункта его произрастания [18], поэтому выявленное местопроизрастание можно считать новой

флористической находкой для данного флористического района Архангельской области.

Данные по популяционной биологии вида в известной нам литературе отсутствуют. В этой связи нами изучены популяционные и организменные особенности *N. peltata* в данном местобитании. Ценопопуляция находится на ранних этапах формирования, в 2014 году начат мониторинг за состоянием популяции этого вида, оценка будет проводиться по ряду популяционных (численность, пространственная и возрастная структура) и организменных детерминированных для вида морфологических и анатомических признаков.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено в течение августа – сентября 2014 года. Для оценки биоморфологии были отобраны раметы разного онтогенетического состояния: молодые вегетативные, виргинильные и генеративные. У них были проведены подсчеты вегетативных и генеративных органов, а также измерения морфологических показателей надземных и подземных органов (количество и длина придаточных корней, количество листьев, количество одновременно цветущих цветков, количество и линейные размеры листовых пластинок, длина черешков листьев).

Для изучения анатомической структуры вегетативных органов использована общепринятая методика [17]. Для проведения исследования органы растений фиксировали в 70 % этаноле. Анатомическую структуру вегетативных органов изучали на поперечных срезах при помощи светового микроскопа. Биометрические измерения анатомических показателей проводили с помощью окуляр-микрометра в 50-кратной повторности. Подсчет числа хлоропластов производили в суспензии после предварительной мацерации клеток [11] в 50 клетках палисадного и губчатого мезофилла листьев. Площади устьиц и устьичных щелей вычислялись по формуле: $S_{uc} = \pi \times D \times L/4$, где D – длина устьица (устьичной щели), L – ширина устьица (устьичной щели). Объем межклетников – $V_{kl} = \pi \times L \times D$, где L – ширина межклетника, D – длина межклетника.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В выявленном сообществе, кроме доминирующего *N. peltata*, с небольшим обилием отмечены следующие виды: *Sparganium emersum* Rehm., *Alisma plantago-aquatica* L., *Hippuris vulgaris* L., *Carex acuta*, *Eleocharis palustris* (L.) Roem & Schult., *Rorippa amphibia* (L.) Bess., *Agrostis stolonifera* L.

Площадь покрытия ценопопуляции составляет примерно 20 м², проективное покрытие плавающих листьев в данном водоеме – более 50 %, местами до 80 % (рис. 2). Растения укоренялись в илистом дне.

Рис. 2. Ценопопуляция *Nymphoides peltata*

В ценопопуляции, как было отмечено выше, изучены раметы разного онтогенетического возраста: молодые вегетативные (ювенильные и иматурные), виргинильные, генеративные – и во всех фазах сезонного развития: вегетирующие, с бутонами, цветущие и с зелеными плодами.

Взрослые вегетативные и генеративные раметы имели короткое корневище с хорошо развитыми мощными придаточными корнями, длина которых составляла от 15 до 25 см с многочисленными боковыми корешками.

Раметы разных возрастных состояний различаются количеством придаточных корней, количеством листьев в розетке, длиной черешка и линейными размерами листовых пластинок (табл. 1).

Таблица 1
Морфологические признаки рамет разных возрастных групп

Признаки	Возрастные состояния рамет		
	Молодые вегетативные min–max	Взрослые вегетативные min–max	Генеративные min–max
Количество придаточных корней, шт.	3–10	16–27	10–25
Длина корней, см	12–20	15–25	13–25
Количество листьев, шт.	2–4	5–9	4–7
Длина черешка листа, см	12–20	30–40	25–40
Длина листовой пластинки, см	4–5	5–7	5–7
Ширина листовой пластинки, см	3–4	4–6	4–6

Молодые вегетативные раметы имели 2–4 листа в розетке и от 3 до 10 придаточных корней, у взрослых вегетативных рамет число листьев было уже до 10, корней – до 25 и более.

Размножение осуществляется в основном вегетативным способом с помощью корневища и укореняющихся столонов. Розетки молодых растений на побеге (столоне) располагаются на расстоянии от 7 до 15 см от взрослых растений.

Число цветков у одного растения 3–4, редко формируется до 6 цветков. Цветение продолжительное и обильное, бутоны и цветки были отмечены еще в конце августа и начале сентября.

После опыления и оплодотворения плоды созревают под водой, то есть происходит втягивание формирующихся плодов под воду.

Анатомическая структура хорошо развитых, плавающих на поверхности воды листьев представлена верхней и нижней эпидермой, палисадным и губчатым мезофиллом (табл. 2). Листья плотные, достаточно толстые, с тонкой кутикулой на верхней стороне. Верхняя эпидерма однорядная и состоит из довольно толстостенных клеток с хорошо развитой кутикулой и многочисленными устьицами. Нижняя эпидерма отличается более крупными по размерам клетками и отсутствием устьиц. Клетки палисадного мезофилла прямоугольной формы, расположены плотно в 3 ряда. Клетки губчатой паренхимы расположены рыхло, и между ними формируются крупные межклетники, представляющие собой воздухоносные полости. В клетках палисадного мезофилла количество хлоропластов почти в 2 раза больше, чем в клетках губчатого мезофилла. Проводящие ткани – ксилема и флоэма – формируют открытые коллатеральные проводящие пучки.

Черешки листьев округлые и образованы такими тканями, как эпидерма, первичная кора, аэренхима, перицикл, элементами механической и проводящей тканей. Клетки эпидермы вытянутой формы и образуют один слой. Первичная кора сложена клетками прямоугольной формы, расположенными в 2 ряда. Аэренхима состоит из крупных клеток и межклетников, объем которых почти в 1,5 раза меньше, чем в губчатой паренхиме листьев. Наличие воздушных полостей в листьях и черешках обеспечивает плавучесть растения. В центре черешка находится один открытый коллатеральный проводящий пучок, который окружает один слой овальных клеток перицикла. Механическая ткань в виде склереидов – отдельных идиобластов четырехзвездчатой формы – расположена между воздухоносными камерами.

В стебле формируются аналогичные черешкам ткани. Эпидерма однослойная, состоит из прямоугольных клеток. Первичная кора двухслойная. Объем воздухоносных полостей почти в 4 раза меньше, чем в черешках, поэтому клетки аэренхимы расположены более плотно. Между межклетниками расположены звездчатые идиобласты. В центральной части стебля находятся 4 открытых коллатеральных проводящих пучка, между которыми образуются округлые клетки сердцевины. Проводящие пучки и сердцевина отделены от аэренхимы однослойным перициклом.

Анатомическая структура плавающего укореняющегося побега такая же, как у черешка и стебля. При этом у укореняющегося побега клетки первичной коры и межклетники значительно крупнее, чем в стебле, а клетки аэренхимы меньше. В центральной части побега отмечены 5 проводящих пучков.

Значения анатомических показателей листьев и стебля в основном варьируют слабо (табл. 2).

Таблица 2

Анатомическая характеристика вегетативных органов *Nymphoides peltata*

Показатели		М ± m	CV, %
Листья			
Толщина, мкм		984,4 ± 22,43	9,8
Количество устьиц в 1 мм ² площади, шт.		100,61 ± 2,12	15,0
Площадь устьиц, мкм ²		423,11 ± 15,40	25,7
Площадь устьичных щелей, мкм ²		54,68 ± 1,70	22,0
Верхняя эпидерма, мкм	длина	17,52 ± 0,36	14,1
	ширина	12,42 ± 0,27	12,8
Нижняя эпидерма, мкм	длина	19,70 ± 0,25	22,8
	ширина	14,92 ± 0,26	20,1
Палисадный мезофилл, мкм	длина	66,61 ± 1,83	19,4
	ширина	24,59 ± 0,55	16,0
Губчатый мезофилл, мкм	длина	59,57 ± 1,90	26,6
	ширина	39,48 ± 0,85	18,0
Объем межклетников, мкм ³		1089,07 ± 49,82	38,2
Количество хлоропластов, шт.	палисадный мезофилл	48,52 ± 0,84	12,3
	губчатый мезофилл	27,06 ± 0,61	16,0
Черешки листьев			
Диаметр, мкм		330,75 ± 3,07	6,5
Эпидерма, мкм	длина	16,20 ± 0,35	15,3
	ширина	12,40 ± 0,20	10,7
Первичная кора, мкм	длина	33,15 ± 0,6	13,0
	ширина	24,05 ± 0,6	17,5
Аэренхима, мкм	длина	72,20 ± 1,90	18,8
	ширина	54,60 ± 1,20	15,3
Перицикл, мкм	длина	21,55 ± 0,7	22,7
	ширина	13,6 ± 0,37	19,3
Объем межклетников, мкм ³		750,28 ± 70,90	66,8
Стебель			
Диаметр, мкм		360,20 ± 5,47	10,7
Эпидерма, мкм	длина	20,45 ± 0,51	17,5
	ширина	14,05 ± 0,32	16,0
Первичная кора, мкм	длина	26,5 ± 0,6	15,8
	ширина	21,2 ± 0,42	14,0
Аэренхима, мкм	длина	223,60 ± 8,00	25,2
	ширина	175,20 ± 6,50	26,2
Перицикл, мкм	длина	34,45 ± 0,54	11,2
	ширина	25,95 ± 0,52	14,1
Сердцевина, мкм		45,10 ± 1,02	17,1
Объем межклетников, мкм ³		193,44 ± 9,19	29,6
Укореняющийся (плавающий) побег			
Диаметр, мм		4,10 ± 0,01	5,4
Эпидерма, мкм	длина	20,80 ± 0,55	19,0
	ширина	14,20 ± 0,30	14,0
Первичная кора, мкм	длина	46,70 ± 1,17	17,8
	ширина	39,05 ± 1,06	19,2
Аэренхима, мкм	длина	76,36 ± 2,03	21,6
	ширина	60,60 ± 1,41	19,0
Перицикл, мкм	длина	32,80 ± 0,50	11,0
	ширина	26,05 ± 0,42	11,5
Сердцевина, мкм		47,20 ± 1,42	21,4
Объем межклетников, мкм ³		710,62 ± 38,22	38,0
Придаточные корни			
Диаметр, мм		4,01 ± 0,03	4,6
Эпиблема, мкм	длина	39,05 ± 1,08	19,5
	ширина	27,50 ± 0,74	19,2
Первичная кора, мкм	длина	71,05 ± 2,10	21,0
	ширина	37,90 ± 1,18	22,0
Паренхима, мкм	длина	79,75 ± 2,93	26,0
	ширина	60,45 ± 2,30	27,0
Перицикл, мкм	длина	23,35 ± 0,33	10,0
	ширина	12,85 ± 0,17	9,5

При этом более высоким коэффициентом варьирования (CV) отличается объем межклетников: в листьях 38,2 %, в черешках 66,8 %, в стеблях 29,6 %, в укореняющихся побегах 38,0 %.

Придаточные корни образованы эпиблемой, первичной корой, паренхимой, перициклом. Эпиблема однослойная, первичная кора двухслойная. Клетки этих тканей прямоугольные. Клетки паренхимы почти округлой формы и расположены плотно. В центре придаточного корня находится один радиальный проводящий пучок, окруженный однослойным перициклом с овальными клетками.

Значения анатомических показателей у придаточных корней варьируют незначительно (см. табл. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что поскольку популяция была обнаружена только в 2014 году, то можно предположить, что она находится на ранних этапах формирования. Ценопопуляция полночленная, представлена ракетами разного возрастного состояния.

Окончание цветения наблюдалось в начале сентября, при этом образование молодых листьев еще продолжалось, что свидетельствует о высокой холодоустойчивости процессов вегетативного развития. Плоды, даже в конце вегетации, содержали еще незрелые семена, что дает

основание предположить, что репродуктивное развитие ограничивается низкими температурами в исследуемом районе и основным способом размножения является вегетативное.

Анатомо-морфологическое исследование показало, что общая схема строения отдельных вегетативных органов *N. peltata* сходна с другими водными растениями с плавающими листьями (*Nymphaea tetragona* Georgi., *Nuphar pumila* (Timm.) DC) [13]. При сопоставлении этих видов выявлено, что листья *N. peltata* более толстые и с меньшим числом устьиц, у них более крупные клетки губчатого мезофилла и большой объем межклетников, низкий уровень вариации всех параметров за исключением объема межклетников. Можно предположить, что выявленные отличия свидетельствуют о более высокой степени адаптации вида к значительным колебаниям уровня воды в местообитании, которое характерно в условиях прибрежных территорий вдоль р. Северная Двина на протяжении вегетационного сезона. Это отмечается и в литературе [3] как отличительная особенность вида. Относительно большая площадь водной территории, которую освоила данная ценопопуляция за небольшой период времени, ее полночленность, некоторые структурные особенности и длительный период активной вегетации могут быть причиной агрессивности вида, которая отмечается в литературе [4].

* Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (проект № 6.724.2014/к).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азовский М. Г. Особенности распространения высшей водной растительности вдоль западного берега озера Байкал // География и природные ресурсы. 2006. № 3. С. 62–68.
2. Азовский М. Г. Особенности распространения высших водных растений вдоль восточного берега озера Байкал // География и природные ресурсы. 2007. № 2. С. 59–64.
3. Дубына Д. В. Сезонное развитие болотноцветника щитовидного *Nymphoides peltata* (S. G. Gmel.) O. Kuntze. в бассейнах ЦРБС АН УССР // Богатства флоры – народному хозяйству: Материалы науч. конф. «Проблемы изучения и использования в народном хозяйстве растений природной флоры». М., 1979. С. 330–332.
4. Грудзинская Л. М., Гемеджиева Н. Г. Список лекарственных растений Казахстана. Алматы: Изд-во Института ботаники и фитоинтродукции КН МОН РК, 2012. Т. 18 (4). 62 с.
5. Клоков В. М., Карпова Г. А. Применение методов школы Браун-Бланке для классификации сообществ болотноцветника щитовидного *Nymphoides peltata* на Украине // Ботанический журнал. 1988. Т. 73, № 6. С. 845–849.
6. Красная книга Камчатки. Т. 2. Растения, грибы, термофильные микроорганизмы. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2007. 342 с.
7. Красная книга Самарской области. Т. 1: Редкие виды растений, лишайников, грибов. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2007. 372 с.
8. Красная книга Республики Татарстан (животные, растения, грибы). Казань: «Природа – Тоо «Стар», 1995. 452 с.
9. Красная книга Республики Беларусь: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения дикорастущие виды растений. Минск: Беларуская Энцыклапедыя імяні Пятруся, 2005. 456 с.
10. Красная книга Ханты-Мансийского автономного округа: животные, растения, грибы. Екатеринбург: Изд. дом «Пакрус», 2003. 376 с.
11. Мокроносов А. Т., Борзенкова Р. А. Методика количественной оценки структуры функциональной активности фотосинтезирующих тканей и органов // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 1978. Т. 61. Вып. 3. С. 119–133.
12. Раченкова Е. Г. Водная и прибрежно-водная растительность озера Белужье // Вестник Оренбургского государственного университета. 2008. № 87 (май). С. 101–105.
13. Соколова А. В., Выборнова Я. А. Особенности анатомического строения листьев растений-гидрофитов // Проблемы экологии Верхнего Приамурья: Сб. науч. тр. Благовещенск: Изд-во БГПУ, 2009. Вып. 11. С. 78–85.
14. Соловьева В. В., Лапиров А. Г. Гидробиотика: Учеб. пособие. Самара: Изд-во ПГСГА, 2013. 354 с.
15. Таран Г. С., Седельникова Н. В., Писаренко О. Ю., Голомолзин В. В. Флора и растительность Елизаровского государственного заказника (нижняя Обь). Новосибирск: Наука, 2004. 212 с.
16. Флора северо-востока европейской части СССР. Т. IV. Л.: Наука, 1977. 312 с.
17. Фурст Г. Г. Методы анатомо-гистохимического исследования растительных тканей. М.: Наука, 1979. 155 с.
18. Шмидт В. М. Флора Архангельской области. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2005. 346 с.
19. Krausch H. D. Vegetationskundliche Beobachtungen in Donaudelta // Limnologica. 1965. Bd. 3. Hf 3. S. 271–313.
20. Nedelcu A. D. Flora si vegetatia acvatica si palustra a citorva lacuri din Cimpia Româna unele consideratii morfologice. Bucuresti: Ed. Acad. R. S. R., 1969. 232 p.
21. Pop I. Flora si vegetatia Cimpierii Crisurilor. Bucuresti: Ed. Acad. R. S. R., 1968. 228 p.

Markovskaya E. F., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
D'yachkova T. Yu., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Morozova K. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

ANATOMICAL AND MORPHOLOGICAL FEATURES OF *NYMPHOIDES PELTATA* (S. G. GMEL.) O. KUNTZE IN NORTHWESTERN BORDER PART OF DISTRIBUTION AREA

The research results pertaining cenopopulation study of *Nymphoides peltata* (S. G. Gmel.) O. Kuntze a protected species found in Arkhangelsk region, are presented. The species was found on the left bank of the Northern Dvina River in the village Anfimovskaya (Emetsk floristic region) in 2014. The cenopopulation of this species was found in this area for the first time, which allows considering this location a floristic discovery. The map of the species' location, description of the habitats, as well as the main morphological (number and size of the main vegetative organs) and anatomical characteristics of the main tissues of different organs of the plant are presented. Characteristics of different vegetative parts are provided. Descriptions of versatile vegetative ramets of different age are given. The registered species' population, represented by the full age range, was at the early stage of its development. The obtained research results can be used as a basis for a subsequent monitoring procedure concerning the issue of the species' population in Arkhangelsk region.

Key words: *Nymphoides peltata*, Arkhangelsk region, cenopopulation, morphological and anatomical features

REFERENCES

1. A z o v s k i y M. G. Distribution characteristics of higher aquatic vegetation along the western shore of Baikal Lake [Osobennosti rasprostraneniya vysshey vodnoy rastitel'nosti vdol' zapadnogo berega ozera Baykal]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and natural resources]. 2006. № 3. P. 62–68.
2. A z o v s k i y M. G. Distribution characteristics of higher aquatic vegetation along the eastern shore of Baikal Lake [Osobennosti rasprostraneniya vysshih vodnykh rasteniy vdol' vostochnogo berega ozera Baykal]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and natural resources]. 2007. № 2. P. 59–64.
3. D u b y n a D. V. Seasonal growth of *Nymphoides peltata* (S. G. Gmel.) O. Kuntze in pools of CRBS UkSSR [Sezonnoe razvitiye bolotnotsvetnika shchitolistnogo *Nymphoides peltata* (S. G. Gmel.) O. Kuntze v basseynakh TsRBS AN USSR]. *Bogatstva flory – narodnomu khozyaystvu: Materialy nauchnoy konferentsii "Problemy izucheniya i ispol'zovaniya v narodnom khozyaystve rasteniy prirodnoy flory"* [Richness of flora to the national economy: Materials of scientific conference "Problems of study and use in national economy of the plants of natural flora"]. Moscow, 1979. P. 330–332.
4. G r u d z i n s k a y a L. M., G e m e d z h i e v a N. G. *Spisok lekarstvennykh rasteniy Kazakhstana* [The list of medicinal plants of Kazakhstan]. Almaty, Publishing house of the institute of botany and phytointroduction KN MON RK, 2012. Vol. 18 (4). 62 p.
5. K l o k o v V. M., K a r p o v a G. A. Application of the methods of school Braun-Blance for classification of *Nymphoides peltata* communities on the Ukraine [Primeneniye metodov shkoly Braun-Blanke dlya klassifikatsii soobshchestv bolotnotsvetnika shchitolistnogo *Nymphoides peltata* na Ukraine]. *Botanicheskiy zhurnal* [Botanical journal]. 1988. Vol. 73, № 6. P. 845–849.
6. *Krasnaya kniga Kamchatki. Tom 2. Rasteniya, griby, termofil'nye mikroorganizmy* [Red Data Book of Kamchatka. Vol. 2. Plants, fungi, thermophilic microorganisms]. Petropavlovsk-Kamchatsky, Publishing house of the Kamchatsky print court, 2007. 342 p.
7. *Krasnaya kniga Samarskoy oblasti. Tom 1. Redkie vidy rasteniy, lishaynikov, gribov* [Red Data Book of Samara region. Vol. 1: Rare species of the plants, lichen, fungi]. Tolyatti, IEVB RAN Publ., 2007. 372 p.
8. *Krasnaya kniga Respubliki Tatarstan (zhivotnye, rasteniya, griby)* [Red Data Book of Tatarstan (animals, plants, fungi)]. Kazan, "Nature – Too "Star" Publ., 1995. 452 p.
9. *Krasnaya kniga Respubliki Belarus: Redkie i nakhodyashchiesya pod ugrozoy ischeznoeniya dikorastushchie vidy rasteniy* [Red Data Book of Republic of Belarus: Rare and endangered wild species of the plants]. Minsk, Беларуская Энцыклапедыя імяні Петруся Publ., 2005. 456 p.
10. *Krasnaya kniga Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga: zhivotnye, rasteniya, griby* [Red Data Book of Khanty-Mansi Autonomous Area: animals, plants, fungi]. Yekaterinburg, Publishing house "Pakrys" Publ., 2003. 376 p.
11. M o k r o n o s o v A. T., B o r z e n k o v a R. A. Methods of quantitative assessment of the functional activity of photosynthetic tissues and organs [Metodika kolichestvennoy otsenki struktury funktsional'noy aktivnosti fotosinteziruyushchikh tkaney i organov]. *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii* [P. on applied botany, genetics and selection]. 1978. Vol. 61. Issue 3. P. 119–133.
12. R a c h e n k o v a E. G. Water and coastal aquatic vegetation of the Lake Beluge [Vodnaya i pribrezhno-vodnaya rastitel'nost' ozera Beluzh'e]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* [Messenger of Orenburg state university]. 2008. № 87 (May). P. 101–105.
13. S o k o l o v a A. V., V y b o r n o v a Y a . A. Feature of anatomical structure of the leaves of plants-hydrophytes [Osobennosti anatomicheskogo stroeniya list'ev rasteniy-gidrofytov]. *Problemy ekologii Verkhnego Priamur'ya* [Problems of the ecology of upper Priamurya. Collection of scientific transaction]. Blagoveshchensk, Publishing house BGPY Publ., 2009. Issue 11. P. 78–85.
14. S o l o v ' e v a V. V., L a p i r o v A. G. *Gidrobotanika: Uchebnoe posobie* [Hydrobotany: Textbook]. Samara, Publishing house PGSGA, 2013. 354 p.
15. T a r a n G. S., S e d e l ' n i k o v a N. V., P i s a r e n k o O. Y u ., G o l o m o l z i n V. V. *Flora i rastitel'nost' Elizarovskogo gosudarstvennogo zakaznika (nizhnaya Ob')* [Flora and vegetation of Elizarovskiy state reserve (lower Ob)]. Novosibirsk, Publishing house "Science", 2004. 212 p.
16. *Flora severo-vostoka evropeyskoy chasti SSSR* [Flora of the Northeast of European part of USSR]. Vol. IV. Leningrad, Publishing house "Science", 1977. 312 p.
17. F u r s t G. G. *Metody anatomo-gistokhimicheskogo issledovaniya rastitel'nykh tkaney* [Methods of anatomo-histochemical research of plant tissue]. Moscow, Publishing house "Science", 1979. 155 p.
18. S h m i d t V. M. *Flora Arkhangel'skoy oblasti* [Flora of Arkhangelsk region]. St. Petersburg, Publishing house of the St. Petersburg University, 2005. 346 p.
19. K r a u s c h H. D. Vegetationskundliche Beobachtungen in Donaudelta // *Limnologica*. 1965. Bd. 3. Hf 3. S. 271–313.
20. N e d e l c u G. A. Flora si vegetatia acvatică si palustră a cîtorva lacuri din Cîmpia Românăcu unele consideratii morfologice. Bucuresti: Ed. Acad. R. S. R., 1969. 232 p.
21. P o p I. Flora si vegetatia Cimpierii Crisurilor. Bucuresti: Ed. Acad. R. S. R., 1968. 228 p.

Поступила в редакцию 13.02.2015

УДК 597.552.511(470.22)

ИГОРЬ АЛЕКСАНДРОВИЧ ТЫРКИН

кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории популяционной экологии лососевых рыб Северного научно-исследовательского института рыбного хозяйства, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
igor7895@yandex.ru

СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ ИВАНОВ

заместитель директора по международным связям Северного научно-исследовательского института рыбного хозяйства, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
esi@sampo.ru

ИГОРЬ ЛЬВОВИЧ ЩУРОВ

кандидат биологических наук, заведующий лабораторией популяционной экологии лососевых рыб Северного научно-исследовательского института рыбного хозяйства, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
shurov@research.karelia.ru

ВЯЧЕСЛАВ АНАТОЛЬЕВИЧ ШИРОКОВ

научный сотрудник лаборатории популяционной экологии лососевых рыб Северного научно-исследовательского института рыбного хозяйства, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
shirokov@research.karelia.ru

**ВОСПРОИЗВОДСТВО АТЛАНТИЧЕСКОГО ЛОСОСЯ (*SALMO SALAR* L.)
(*SALMONIFORMES*, *SALMONIDAE*) (ПРЕСНОВОДНАЯ ФОРМА)
НА РЕКУЛЬТИВИРОВАННОМ НЕРЕСТОВО-ВЫРОСТНОМ УЧАСТКЕ РЕКИ СУНА**

Исследованы плотности распределения молоди на нерестово-выростных участках (НВУ) после рекультивации и численность производителей пресноводного лосося. В 2005 году плотность расселения молоди на НВУ составила 3,7 экз./100 м², в 2006 году 49,7 экз./100 м², молодь была представлена тремя возрастными группами (0+ ... 2+). Далее плотности расселения постепенно увеличивались, достигнув максимума в 240 экз./100 м² суммарно для всех возрастных групп в 2008 году. В дальнейшем плотности расселения варьировали на уровне 194,3 экз./100 м² в 2012 и 192 экз./100 м² в 2013 году со снижением до 150,6 экз./100 м² в 2012-м. За период наблюдений возрастной состав молоди стабилизировался. По линейным и весовым показателям молодь лосося реки Суна возрастных групп 0+ и 1+ превосходит молодь из других притоков Онежского (Шуя, Кумса, Немина, Пяльма) и Ладожского озер (Хийтола). По темпу роста молодь лосося реки Суна не уступает молоди из других притоков Онежского озера. Суточный привес сеголетков составляет 29,54 мг/сут и 140,36 мг/сут для пестряток (1+). Ежегодно на НВУ под водопадом Кивач в нересте участвуют до 45 особей.

Ключевые слова: пресноводный лосось, площадь нерестово-выростных участков, плотность расселения молоди

В настоящее время ихтиофауна водоемов Северо-Запада России испытывает сильный антропогенный прессинг, что привело к сокращению численности многих видов рыб, среди которых пресноводная форма атлантического лосося (*Salmo salar* L.). Но именно в этом регионе находятся основные нерестовые реки и крупнейшие популяции пресноводного лосося на Европейском континенте, обитающие в озерах Онежском и Ладожском.

Воздействие группы таких факторов, как: гидростроительство, лесосплавные работы, вырубка лесов вдоль русел рек, бытовые загрязнения, а в последние десятилетия – любительский

и бесконтрольный лов – привело к потере былого репродуктивного потенциала нерестовых рек бассейна Онежского озера.

В целях гидроэнергетики сток реки Суна был изменен. После сооружения Гирвасского гидроузла сток реки был переброшен посредством Суно-Пальеозерского канала на каскад ГЭС Пальеозерскую, Кондопожскую и после в Кондопожскую губу Онежского озера. В результате таких изменений верхний и средний участки реки протяженностью в 217 км остались нетронутыми. Участок русла реки длиной 63 км от устья до Гирвасской плотины стал представлять отдельную реку с площадью водосбора 1830 км²,

именуемую Нижняя Суна [9], [14]. Густота речной сети в районе старого русла $0,12 \text{ км/км}^2$, озерность 2,5 % [9].

В прошлом на реке Нижняя Суна производился молевой лесосплав (россыпью) от п. Гирвас до устья, который был прекращен в 1973 году. Для этого из Гирвасского водохранилища через плотину сбрасывали воду в объеме $85 \text{ млн м}^3/\text{год}$, что позволяло водотоку реки придать импульсный характер для увеличения ее несущей способности во время сплава [14], [15], [16]. Сейчас плановый пуск воды в Нижнюю Суну не производится, только при технологической необходимости. Средний многолетний расход воды – $4,97 \text{ м}^3/\text{с}$ (1981–2002 годы), то есть уменьшился в 13,9 раза после переключения стока [9].

Проводимый молевой сплав привел к нарушению гидрологического, гидрохимического и гидробиологического режима реки. Помимо механического разрушения русла бревнами происходило химическое загрязнение вод за счет диффузии минеральных и органических веществ из сплаваемой древесины в воду. В процессе сплава на дно оседало огромное количество коры, бревен и других древесных остатков. В реке происходила быстрая деградация нерестово-выростных участков лососевых рыб. Особенно быстро это происходит при отсутствии производителей на нерестилищах. Седиментация взвесей на НВУ привела к уплотнению нерестовых грунтов и зарастанию водной растительностью. Вследствие этого процесса нерест и строительство нерестовых бугров производителями стало невозможным. Последствия лесосплава для рыб, обитающих в реке Суна, были настолько катастрофическими, что даже прекращение сплава и частичная очистка русла от продуктов лесосплава не привели к восстановлению утраченной популяции лосося. Полное прекращение воспроизводства лосося было отмечено в 1962 году [15].

В итоге для сохранения существующих и восстановления утраченных популяций пресноводного лосося требуется проведение срочных охранных мероприятий, одним из эффективных способов увеличения естественного воспроизводства в реках является искусственная мелиорация (восстановление) НВУ.

Цель данной работы – исследовать состояние естественного воспроизводства лосося на рекультивированном НВУ в реке Суна, под водопадом Кивач. Рассчитать темп роста молоди в возрасте 0+ и 1+, в также численность стада на рекультивированном пороге.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Начиная с 2004 года нами ежегодно проводятся контрольные обловы на восстановленном НВУ, расположенном в 27,9 км от устья Кондопожской губы Онежского озера. Протяженность облавливаемого участка – 15 м при ширине в 3 м. Молодь

отлавливалась электроловом «ФА-3» (Норвегия) по стандартной методике [8], [20] и двумя сачками с диаметром входного отверстия 0,5 м, длиной кута 0,5 м и ячейей 4 мм. НВУ облавливался три раза для максимального изъятия молоди лосося. В процессе облова молодь собиралась в емкость с водой объемом 15 л. После облова производился подсчет общего числа экземпляров. Для определения возраста брали несколько чешуй [7]. У всей рыбы измеряли длину (AB, AC, AD) и вес [10]. В дальнейшем молодь выпускалась живой на месте вылова. Расчеты плотности заселения НВУ молодью проводили по методу Зиппина [21]. Расчет численности производителей, участвующих в нересте на рекультивированном НВУ, производился с учетом особенности конкретной реки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Бассейн реки Суна расположен на северо-западном побережье Онежского озера. Истоком реки является оз. Кивиярви, а впадает она в Кондопожскую губу Онежского озера. Протяженность реки составляет 280 км, площадь водосбора – 7670 км^2 [4], это вторая по протяженности река в Карелии, средний уклон – 1,6 ‰, общее падение – 352,2 м, средний многолетний расход воды – $76,06 \text{ м}^3/\text{с}$. Река образует озерно-речную систему, одна треть которой приходится на озеро, самыми крупными являются Гимольское и Суккозеро. На реке имеется три водопада. Один из них – Кивач, расположенный в 34 км от устья. Водопад является естественной преградой для лосося, выше он не поднимается.

Ранее Суна имела большое рыбопромысловое значение, производился промысел лосося из реки Суна. Так, Н. А. Бородин [1] сообщает об улове в 220 особей, по данным Н. И. Кожина [5], в 1926 году улов составил около 400–500 рыб, а по материалам М. Б. Зборовской [2], в 1930 году – 500–600 особей. По оценке Ю. А. Смирнова [12], численность стада лосося реки Суна могла составлять до 1000 шт. В 30-х годах прошлого века уловы лосося в реке достигали 3 т. После гидростроительства в 1952 году всякое воспроизводство лосося в реке Суна стало невозможным. В последний раз нерестующих лососей видели в 1962 году на НВУ под водопадом Кивач [14], [15].

В мае 1997 года выполнен первый этап практической работы по восстановлению популяции лосося в реке Суна. Выпущена партия 2-годовиков лосося (4,5 тыс. шт.) стада реки Лижма с навеской 50 г в районе д. Большое Вороново на расстоянии около 16 км от устья. Поскольку численность стада лосося реки Лижма резко сократилась, в дальнейшем зарыбление проводили молодью лосося стада реки Шуя. Следующий выпуск партии годовиков (10 тыс. шт.) с усредненной навеской в 4,8 г состоялся в 2000 году в районе д. Большое Вороново, 17 км от устья [14], [15].

В начале 2004 года были начаты рекогносцировочные работы по рекультивации НВУ под

водопадом Кивач. Рекультивационные работы были проведены в конце ноября – начале декабря 2005 года. После рекультивации НВУ в реку была выпущена партия 2-годовиков лосося (27,4 тыс. шт.) стада реки Шуя в мае 2005 года, выращенных на Кемском РЗ. 1/3 партии была выпущена на рекультивированном НВУ под водопадом, а 2/3 партии в районе д. Большое Вороново [15].

НВУ. Анализ русла реки и порогов на участке, доступных для подъема производителей, показал, что до зарегулирования реки площадь НВУ лосося составляла 50000 м² [13]. По оценке Ю. А. Смирнова [14], текущая площадь НВУ, доступная для нереста лосося, составляет около 20000 м². По нашим данным, непосредственно под водопадом Кивач в 28 км от устья располагается нерестовый участок площадью 4500 м² после рекультивации.

Плотность расселения. В 2005 году нами были сделаны пробные обловы, плотность расселения сеголеток (0+) составила всего 3,7 экз./100 м², а общая – 21,8 экз./100 м² (табл. 1). На восстановленном НВУ началось естественное воспроизводство лосося, но оно не было стабильным, поскольку численность сеголеток очень низкая, почти в 5 раз меньше пестряток. Обловы 2006 года показали общую плотность расселения молоди в 49,7 экз./100 м², молодь была представлена тремя возрастными группами (0+ ... 2+). Количество сеголеток увеличилось по сравнению с предыдущим годом, но оставалось ниже старших возрастных групп. Эта молодь произошла от нереста возвратившихся производителей и молоди первых выпусков, поскольку длительность нагульного периода у рекрутов длится не менее 4 лет, в массе 5–6 лет [12]. В дальнейшем рекультивированный порог нами обследовался ежегодно по 2013 год, за исключением 2011 года. Так, в период 2006–2008 годов численность сеголеток постепенно увеличивалась, в 2007 году она превысила численность пестряток (1+ и старше), достигнув максимальных значений 197,5 экз./100 м² в 2008 году, а общая плотность расселения составила 240 экз./100 м² в четырех возрастных группах (0+ ... 3+). На пороге стабилизировалось естественное воспроизводство. В 2009 году отсутствовала возрастная группа 3+ по сравнению с предыдущим годом, общая численность молоди постепенно снижалась до 150,6 экз./100 м² в 2012 году, при этом возрастная группа 2+ в уловах отсутствовала. Отсутствие возрастных групп 3+ и 2+ объясняется длительностью речного периода жизни, который имеет протяженность до 2–3 лет, но большая часть молоди мигрирует на нагул в озеро в возрасте 2+. В 2013 году плотность расселения сеголеток является самой низкой начиная с 2008 года, а увеличение общей плотности расселения произошло за счет старших возрастных групп, что составило 192 экз./100 м². Плотности

расселения молоди 1+ и старше в 2013 были самыми высокими за весь период наблюдения.

Таблица 1
Плотность расселения молоди лосося на восстановленном НВУ реки Суна, 2005–2013 годы

Год	Плотность по возрастным группам, экз./100 м ²		
	0+	1+ и старше	Общая
2005	3,7	18,1	21,8
2006	11,6	38,1	49,7
2007	75,4	33,0	108,4
2008	197,5	42,5	240,0
2009	154,4	35,3	189,7
2010	156,1	38,2	194,3
2012	138,0	12,6	150,6
2013	124,0	68,0	192,0

Контрольные обловы проводились на рекультивированном участке, благодаря этому получены высокая численность распределения, до 240 экз./100 м², чего не скажешь о других притоках Онежского озера, используемых лососем для нереста (рис. 1). Так, на долю реки Шуя, которая является основным нерестовым водотоком в бассейне Онежского озера, ранее приходилось 75 % уловов лосося по озеру [6], [11]. На реке производился молевой сплав древесины, в 1990–2000-х годах на части порогов выполнялась рекультивация, максимальная плотность расселения молоди суммарно для всех возрастных групп составила в 2010 году 44,8 экз./100 м², а средние за 5 лет с 2005 года – 32,5 экз./100 м², что значительно меньше, чем в реке Суна. В других нерестовых притоках плотности расселения ниже, чем в Суне, и не превышают 100 экз./100 м². Река Лижма раньше была самой продуктивной из лососевых Онежского озера, плотности расселения молоди самые низкие среди других притоков, 16 экз./100 м² (2009–2010 годы). Для реки Кумса максимальные плотности отмечены в 2010 году – 98,6 экз./100 м², а средние – 58,6 экз./100 м². Ста-

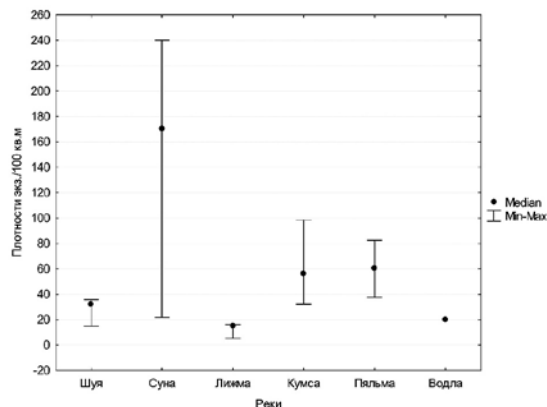


Рис. 1. Плотность расселения молоди на НВУ притоков Онежского озера в 2005–2013 годах

до лосося реки Пяльма ранее было третьим по численности в озере, максимальные плотности отмечены в 2010 году – 82,6 экз./100 м², а средние – 68,4 экз./100 м². Лосось реки Водла занимал второе место по численности, основные нерестилища расположены в притоках, так, плотность расселения в реке Колода составила 40 экз./100 м² в 2008 году [18].

Линейные размеры, масса и темп роста. По темпу весового и линейного роста молодь лосося возрастных групп 0+ и 1+ реки Суна превосходит по весовым и линейным показателям молодь из рек Шуя, Кумса, Немина, Пяльма (рис. 2, 3). Так, сеголетки лосося в реке Хийтола (приток Ладожского озера) в сентябре – начале октября достигают массы тела $3,81 \pm 0,11$ г при длине $7,08 \pm 0,08$ см [3]. Сеголетки в реке Суна при весе 4,29 г и длине 7,48 см несколько превосходят молодь лосося из реки Хийтола (табл. 2). Это свидетельствует о достаточной кормовой базе и благоприятных условиях обитания, питания и роста молоди лосося на рекультивированном участке Суны.

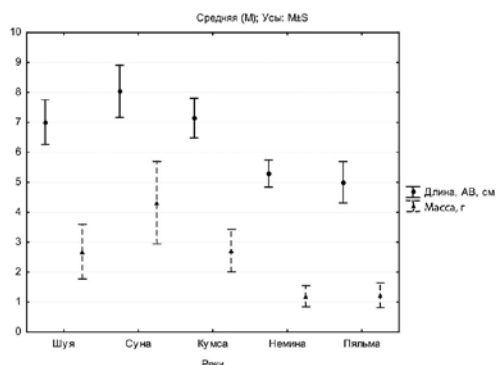


Рис. 2. Диаграмма размаха длины и массы молоди лосося 0+

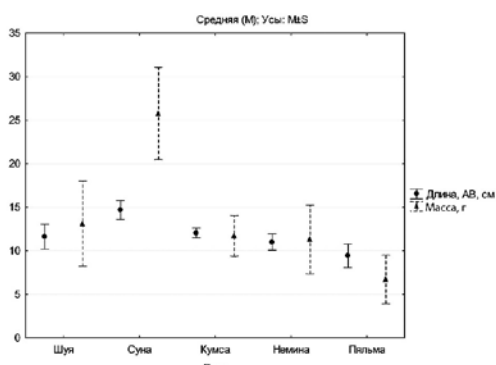


Рис. 3. Диаграмма размаха длины и массы молоди лосося 1+

Суточный привес молоди лосося реки Суна рассчитывался по материалам, собранным в период 8.04–08.09.2009 и составил 29,54 мг/сут [17], что в 2,5 раза выше по сравнению с темпом роста молоди в период 17.10–20.11.2012 (табл. 3). Снижение темпа роста к ноябрю является нормой, так как к этому времени снижается кормовая база за счет отсутствия воздушных насекомых,

Таблица 2
Биологические показатели молоди лосося
р. Суна

Возр. гр.	n	Длина АВ, см M ± S	Длина АС, см M ± S	Длина АД, см M ± S	Масса, г. M ± S
0+	70	8,00 ± 0,82	7,48 ± 0,76	6,85 ± 0,75	4,29 ± 1,30
1+	38	12,97 ± 3,20	12,12 ± 2,96	11,26 ± 2,80	20,61 ± 11,14
2+	3	17,90 ± 2,07	16,73 ± 2,16	15,67 ± 1,96	53,63 ± 23,91
3+	2	23,35 ± 0,35	22,40 ± 0,71	20,60 ± 0,42	108,35 ± 21,43

а также понижения температуры воды, которая сказывается на снижении активности сеголеток и скорости метаболизма. Для пестрятки возраста 1+ 2009 года суточный привес составил 140,36 мг/сут, что в 2,5 раза ниже по сравнению с 2012 годом. Мы ожидали снижения темпа роста пестряток, как и сеголеток, к ноябрю, но получили обратные результаты. Причиной служат малая выборка (4 экз.), особенность распределения пестряток на облавливаемом нами участке НВУ и сезонные изменения гидрологического режима. К концу осени усиливается количество атмосферных осадков, водность реки увеличивается. Сложившиеся гидрологические условия приводят к тому, что остаются только крупные пестрятки, которые могут противостоять скорости течения, менее крупные особи 1+ вынуждены менять свою позицию в сторону меньших скоростей течения.

Численность. По данным И. Л. Щурова с соавторами [19], до зарегулирования реки численность нерестового стада могла составлять около 500 особей. По оценке [14], численность нерестового стада – 100–150 рыб. Согласно нашим расчетам, на НВУ под водопадом Кивач площадью 4500 м² ежегодно нерестится 35–45 особей.

Таблица 3
Средние значения суточного прироста,
2009, 2012 годы

Возр. гр.	Период нагула			
	08.04–08.09.2009 [17]		17.10–20.11.2012	
	n	Привес в сут., мг	n	Привес в сут., мг
0+	13	29,54	24	11,57
1+	14	140,36	4	354,90

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время последствия лесосплава устранены, произведена успешная рекультивация НВУ под водопадом Кивач площадью 4500 м², которая была завершена в 2005 году. Для зарыбления использовалась молодь стада реки Лижма, а в дальнейшем – реки Шуя.

Результаты контрольных обловов свидетельствуют о том, что рекультивация НВУ в сочетании с рыбоводными работами обеспечивает восстановление естественного воспроизводства лосося, которое было утрачено. С 2005 по 2008 год плотности расселения молоди на НВУ постепенно увеличивались, достигнув максимума в

240 экз./100 м² суммарно для всех возрастных групп в 2008 году. В дальнейшем плотности расселения постепенно снижались, достигнув в 2012 году 150,6 экз./100 м². В 2013 году плотность расселения восстановилась до уровня 2009–2010 годов – 192 экз./100 м². За период наблюдений возрастной состав молодежи стабилизировался, численность молодежи остается высокой по сравнению с другими притоками Онежского озера.

По линейным и весовым показателям молодь лосося реки Суна опережает молодь из других

притоков Онежского и Ладожского озер (р. Хийтола). Суточный привес сеголетков составляет 29,54 мг/сут и 140,36 мг/сут для пестряток (1+). Согласно нашим расчетам, на НВУ под водопадом Кивач в нересте участвуют до 45 особей.

Это еще раз доказывает, что рекультивация НВУ является одним из самых эффективных способов, позволяющих гарантированно восстановить численность лосося на реках, которые из-за деятельности человека утратили нерестовые участки, ранее используемые лососем для нереста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородин Н. А. О рыболовстве на р. Суна в связи с вопросом об уничтожении водопада Кивач // Вестник Рыбопромышленности. 1916. № 10. С. 511–520.
2. Зборовская М. Б. Материалы по промыслу и биологии лосося Онежского озера // Труды Карельской научно-исследовательской рыбохозяйственной станции. Л., 1935. Т. 1. С. 257–280.
3. Ивантер Д. Э., Щуров И. Л., Широков В. А. Река Хийтола как перспективный объект рыболовного туризма. Петрозаводск: Скандинавия, 2002. 46 с.
4. Каталог озер и рек Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 290 с.
5. Кожин Н. И. Материалы к познанию Онежского рыболовства. Рыбные промыслы нижнего течения р. Суны // Труды Бородинской пресноводной биологической станции. Т. 5. Л., 1927. С. 225–440.
6. Костылев Ю. В. Шуйский озерно-речной лосось как объект искусственного разведения // Биологические основы рационального использования рыбных ресурсов Онежского озера и повышения его рыбопродуктивности: Сб. науч. трудов. Вып. 216 / Под ред. канд. биол. наук В. В. Покровского. Л., 1984. С. 41–49.
7. Мартынов В. Г. Сбор и первичная обработка биологических материалов из промысловых уловов атлантического лосося: Методические рекомендации. Сыктывкар, 1987. 36 с.
8. Маслов С. Е. Применение электроловов ранцевого типа в ихтиологических исследованиях на лососевых реках // Тезисы докладов республиканской конференции. Петрозаводск, 1989. С. 22–28.
9. Попова Э. К., Сухов А. В. Изменение видового состава ихтиофауны водоемов заповедника «Кивач» под влиянием антропогенных факторов // Труды Государственного природного заповедника «Кивач». Вып. 6. Петрозаводск, 2013. С. 120–132.
10. Правдин И. Ф. Руководство по изучению рыб. М.: Пищепромиздат, 1966. 270 с.
11. Рыжков Л. П., Костылев Ю. В. Состояние запасов лосося в бассейне Онежского озера // Биологические основы рационального использования рыбных ресурсов Онежского озера и повышения его рыбопродуктивности: Сб. науч. трудов. Вып. 216 / Под ред. канд. биол. наук В. В. Покровского. Л., 1984. С. 36–41.
12. Смирнов Ю. А. Лосось Онежского озера. Биология, воспроизводство, использование. Л.: Наука, 1971. 143 с.
13. Смирнов Ю. А. Соображения о возможности использования останца р. Суны для улучшения любительского рыболовства и рекреации. Петрозаводск: Изд-во ОАО «Карелэнерго», 2000. 15 с.
14. Смирнов Ю. А. Из опыта рекультивации нерестово-выростных угодий озерной формы атлантического лосося (*Salmo salar* L.) в останце реки Суна после молевого лесосплава // Труды Государственного природного заповедника «Кивач». Вып. 3. Петрозаводск, 2006. С. 127–138.
15. Смирнов Ю. А. Справка к истории починки нерестово-выростных угодий лосося (*Salmo salar* L.) в останце реки Суна // Труды Государственного природного заповедника «Кивач». Вып. 4. Петрозаводск, 2008. С. 150–153.
16. Смирнов Ю. А. Роль энергетики в истории воссоздания популяции лосося в р. Суне // Природные процессы и явления в уникальных условиях среднетаежного заповедника: Материалы научно-практ. конф., посвящ. 80-летию ФГБУ «Государственный природный заповедник «Кивач». Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. С. 167–175.
17. Тыркин И. А. Темп роста молоди пресноводного лосося (*Salmo salar* L.) в реке Суна // Современное состояние биоресурсов внутренних водоемов: Материалы докладов I Всерос. конф. с междунар. участием. 12–16 сентября 2011 г., Борок, Россия. М.: Акварос, 2011. Т. 2. С. 779–784.
18. Тыркин И. А., Щуров И. Л., Широков В. А., Гайда Р. В. Состояние искусственного и естественного воспроизводства пресноводного лосося *Salmo Salar* L. (Salmonidae, Salmoniformes) в притоках Онежского озера // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2011. № 8 (121). С. 19–23.
19. Щуров И. Л., Широков В. А., Смирнов Ю. А. Восстановление популяций лосося в реке Суна // Труды Государственного природного заповедника «Кивач». Вып. 3. 2006. С. 139–140.
20. Karlstrom O. Quantitative Methods in Electrical Fishings in Swedish Salmon Rivers // ZOOH. 1976. Vol. 4. P. 53–63.
21. Zippin C. An evaluation of removal method of estimating animal populations // Biometrics. 1956. Vol. 12. P. 163–169.

Tyrkin I. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Ivanov S. I., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Shchurov I. L., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Shirokov V. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

REPRODUCTION OF ATLANTIC SALMON (*SALMO SALAR* L.) (SALMONIFORMES, SALMONIDAE) (FRESHWATER FORMS) IN REMEDIATED SPAWNING AND REARING SECTION OF SUNA RIVER

The distribution density of juveniles in DDP after remediation and the number of producers of freshwater salmon are studied. In 2005, the density of settlements of juveniles in DDP was 3,7 ind./100 м², in 2006, 49,7 ind./100 м² juveniles were represented by three age groups (0 + ... 2 +). Further, the density of settlements gradually increased reaching a maximum in 240 ind./100 м²

in total for all age groups in 2008. In the future, the density of settlements varied at the level of 194,3 ind./100 m² in 2012 and 192 ind./100 m² in 2013, with the marked decrease to 150,6 ind./100 m² in 2012. During the period of observation the age composition of juveniles stabilized. On linear and weight parameters juvenile salmon of the river Suna in the age groups of 0+ and 1+ exceeded juveniles from other tributaries of Onega (Shuya, Coombs, Nemina, Pyalma) and Ladoga lakes (p. Hiitola). The growth rate of the young salmon from Suna river is comparable to the growth rate of the juvenile from other tributaries of Lake Onega. The daily gain of fingerlings is 29,54 mg/day and 140,36 mg/day for parr (1+). Annual participation in spawning involves 45 fish species coming from the waters adjacent to the Waterfall Kivach.

Key words: freshwater salmon, spawning and rearing area sites, density of juveniles' settlement

REFERENCES

1. Borodin N. A. On fishing on the river Suna in connection with the destruction of the waterfall Kivach [O rybolovstve na r. Suna v svyazi s voprosom ob unichtozhenii vodopada Kivach]. *Vestnik Rybopromyshlennosti*. 1916. № 10. P. 511–520.
2. Zborovskaya M. B. Materials from the fishery and biology of salmon of the Lake Onega [Materialy po promyslu i biologii lososya Onezhskogo ozera]. *Trudy Karel'skoy nauchno-issledovatel'skoy rybokhozyaystvennoy stantsii*. Vol. 1. Leningrad, 1935. P. 257–280.
3. Ivantsev D. E., Shchurov I. L., Shirokov V. A. *Reka Khiytola kak perspektivnyy ob'ekt rybolovnogo turizma* [River Hiitola as a promising object of fishing tourism]. Petrozavodsk, Skandinavskiy Publ., 2002. 46 p.
4. *Katalog ozer i rek Karelii* [Catalog of the lakes and rivers of Karelia]. Petrozavodsk, KarNTs RAN Publ., 2001. 290 p.
5. Kozhin N. I. Materials to the knowledge of Onega fishing. Fisheries of the lower reaches of the river. Suna [Materialy k poznaniyu Onezhskogo rybolovstva. Rybnye promysly nizhnego techeniya r. Suny]. *Trudy Borodinskoy presnovodnoy biologicheskoy stantsii*. Vol. 5. Leningrad, 1927. P. 225–440.
6. Kostylev Yu. V. Shuya lake-river salmon as an object of artificial breeding [Shuyskiy ozero-rechnoy losos' kak ob'ekt iskusstvennogo razvedeniya]. *Biologicheskie osnovy ratsional'nogo ispol'zovaniya rybnykh resursov Onezhskogo ozera i povysheniya ego ryboproduktivnosti: Sbornik nauchnykh trudov*. Issue 216. Leningrad, 1984. P. 41–49.
7. Martynov V. G. *Sbor i pervichnaya obrabotka biologicheskikh materialov iz promyslovnykh ulovov atlanticheskogo lososya: metodicheskie rekomendatsii* [Collection and primary processing of biological materials from commercial catches of Atlantic salmon (guidelines)]. Syktyvkar, 1987. 36 p.
8. Maslov S. E. *Primenenie elektrolovov rantsevoogo tipa v ikhtiologicheskikh issledovaniyakh na lososevykh rekakh* [The use of electrofishing backpack type in ichthyological research on salmon rivers]. Petrozavodsk, 1989. P. 22–28.
9. Popova E. K., Sukhov A. V. Changes in species composition of the fish fauna of the reserve "Kivach" under the influence of anthropogenic factors [Izmeneniye vidovogo sostava ikhtiofauny vodoemov zapovednika "Kivach" pod vliyaniem antropogennykh faktorov]. *Trudy Gosudarstvennogo prirodnogo Zapovednika "Kivach"*. Issue 6. Petrozavodsk, 2013. P. 120–132.
10. Pravdin I. F. *Rukovodstvo po izucheniyu ryb* [Fish Study Guide]. Moscow, Pishchepromizdat Publ., 1966. 270 p.
11. Ryzhkov L. P., Kostylev Yu. V. The state of salmon stocks in the basin of Lake Onega [Sostoyaniye zapasov lososya v basseynе Onezhskogo ozera]. *Biologicheskie osnovy ratsional'nogo ispol'zovaniya rybnykh resursov Onezhskogo ozera i povysheniya ego ryboproduktivnosti: Sbornik nauchnykh trudov*. Issue 216. Leningrad, 1984. P. 36–41.
12. Smirnov Yu. A. *Losos' Onezhskogo ozera. Biologiya, vosproizvodstvo, ispol'zovanie* [Salmon Lake Onega. Biology, reproduction, use]. Leningrad, Nauka Publ., 1971. 143 p.
13. Smirnov Yu. A. *Soobrazheniya o vozmozhnosti ispol'zovaniya ostantsa r. Suny dlya uluchsheniya lyubitel'skogo rybolovstva i rekreatsii* [Considerations on possibilities of using the river Suna to improve recreational fishing and recreation]. Petrozavodsk, Izd-vo OAO "Karelergo" Publ., 2000. 15 p.
14. Smirnov Yu. A. From the experience of spawning and rearing reclaiming land lake forms of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in the outliars after The Suna River Rafting Molev [Iz opyta rekul'tivatsii nerestovo-vyrostnykh ugodiy ozernoy formy atlanticheskogo lososya (*Salmo salar* L.) v ostantse reki Suna posle molevogo lesosplava]. *Trudy Gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika "Kivach"*. Issue 3. Petrozavodsk, 2006. P. 127–138.
15. Smirnov Yu. A. A reference to the history of repairing spawning farms for salmon (*Salmo salar* L.) on Suna river [Spravka k istorii pochinki nerestovo-vyrostnykh ugodiy lososya (*Salmo salar* L.) v ostantse reki Suna]. *Trudy Gosudarstvennogo prirodnogo Zapovednika "Kivach"*. Issue 4. Petrozavodsk, 2008. P. 150–153.
16. Smirnov Yu. A. The role of energy in the history of rebuilding salmon population in the river. Suna [Rol' energetiki v istorii vossozdaniya populyatsii lososya v r. Sune]. *Prirodnye protsessy i yavleniya v unikal'nykh usloviyakh srednetazhnogo zapovednika*. Petrozavodsk, KarNTs RAN Publ., 2012. P. 167–175.
17. Tyркин I. A. The growth rate of juvenile freshwater salmon (*Salmo salar* L.) in the river Suna [Temp rosta molodi presnovodnogo lososya (*Salmo salar* L.) v reke Suna]. *Sovremennoe sostoyaniye bioresursov vnutrennikh vodoemov*. Moscow, Akvaros Publ., 2011. Vol. 2. P. 779–784.
18. Tyркин I. A., Shchurov I. L., Shirokov V. A., Gayda R. V. State of artificial and natural reproduction of freshwater salmon *Salmo salar* L. (Salmonidae, Salmoniformes) in tributaries of Lake Onega [Sostoyaniye iskusstvennogo i estestvennogo vosproizvodstva presnovodnogo lososya *Salmo salar* L. (Salmonidae, Salmoniformes) v pritokakh Onezhskogo ozera]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences]. 2011. № 8 (121). P. 19–23.
19. Shchurov I. L., Shirokov V. A., Smirnov Yu. A. Restored populations of salmon in the river Suna [Vosstanovleniye populyatsiy lososya v reke Suna]. *Trudy Gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika "Kivach"*. Issue 3. 2006. P. 139–140.
20. Karlstrom O. Quantitative Methods in Electrical Fishing in Swedish Salmon Rivers // ZOOH. 1976. Vol. 4. P. 53–63.
21. Zippin C. An evaluation of removal method of estimating animal populations // Biometrics. 1956. Vol. 12. P. 163–169.

Поступила в редакцию 10.12.2014

УДК 616.346.2–002–1–079.4:615.471

ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ МАСЛЯКОВ

доктор медицинских наук, профессор, проректор по научной работе и связям с общественностью, заведующий кафедрой клинической медицины, Саратовский медицинский институт «РЕАВИЗ» (Саратов, Российская Федерация)

*maslyakov@inbox.ru***МИХАИЛ СЕРГЕЕВИЧ ГРОМОВ**

доктор медицинских наук, профессор, ректор, Саратовский медицинский институт «РЕАВИЗ» (Саратов, Российская Федерация)

*saratov@reaviz.ru***АНДРЕЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ БРЫЗГУНОВ**

аспирант кафедры хирургических болезней, Саратовский медицинский институт «РЕАВИЗ» (Саратов, Российская Федерация)

*saratov@reaviz.ru***ВЯЧЕСЛАВ ЮРЬЕВИЧ ЛЕОНТЬЕВ**

аспирант кафедры хирургических болезней, Саратовский медицинский институт «РЕАВИЗ» (Саратов, Российская Федерация)

saratov@reaviz.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ ПРАВОЙ ПОДВЗДОШНОЙ ОБЛАСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРАНСРЕЗОНАНСНОЙ ТОПОГРАФИИ

Основу работы составил анализ 605 исследований результатов трансрезонансного функционального топографа, выполненных с февраля 2002 по март 2009 года. Группа сравнения состояла из относительно здоровых добровольцев. Исследования проводились на трансрезонансных топографах. Из 605 больных, поступивших с направительным диагнозом «острый аппендицит», диагноз подтвердился у 363 пациентов (60 %). В результате проведенных исследований установлено, что при флегмонозных формах аппендицита у 118 человек величина РО составляла в среднем 6,1V. Стандартное отклонение (σ , SD) – 0,2V. Все формы острого аппендицита были подтверждены гистологическими исследованиями. Для гангренозного аппендицита, выявленного после операции у 30 человек, среднее значение РО составило 4,4V. Стандартное отклонение – 0,68V. Значения для флегмонозного перекрываются полностью диапазоном величин РО гангренозного аппендицита. У 129 больных, диагноз которых был изменен на мезаденит, среднее значение РО в той же точке составило 7,3V. Стандартное отклонение – 0,16V. Для 107 больных с дискинезией кишечника среднее значение РО в той же точке – 8,6V. Стандартное отклонение (σ , SD) – 0,16V. У больных с катаральным аппендицитом, выявленным после операции у 111 больных, среднее значение РО в той же точке составило 10,38V. Стандартное отклонение – 0,32V. Изменение величины РО в точке аппендикса менее 6,6V и наличие болей в правой подвздошной области и над лобком свидетельствуют о наличии деструктивной формы аппендицита. Чувствительность критерия: «величина РО менее 6,6V + боли в правой подвздошной области и/или над лобком» для деструктивных заболеваний правой подвздошной области составила 100 %. Специфичность и безошибочность при этих условиях – 98 %.

Ключевые слова: острый аппендицит, диагностика, трансрезонансный функциональный топограф

ВВЕДЕНИЕ

Диагностика деструктивных форм острых заболеваний брюшной полости без ее вскрытия остается одной из самых актуальных проблем неотложной хирургии, от которой зависит своевременность оказания хирургического пособия пациентам. Острый аппендицит (ОА) считается хирургическим заболеванием лишь в лечебном плане. В диагностическом плане он выходит за пределы хирургической специальности. Для хирурга важен ответ на вопрос: нужна ли данному

пациенту в настоящее время операция или нет. Хирурги в большинстве своем придерживаются в отношении подозрения на острый аппендицит оперативной тактики. Не секрет, что число гистологически не подтвержденных диагнозов ОА достигает 30–60 % и более [1]. Клинико-лабораторные данные позволяют подтвердить диагноз ОА только в 74,8 % случаев [2]. К сожалению, в настоящее время отсутствуют те методы, применяя которые можно было бы в считанные минуты с уверенностью подтвердить или от-

вергнуть диагноз ОА. В связи с этим для диагностики воспалительных процессов предложен метод трансрезонансного функционального топографа [3].

Цель исследования – улучшить диагностику острого аппендицита с помощью использования трансрезонансного функционального топографа.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено в строгом соответствии с требованиями GCP (Good Clinical Practice, надлежащая клиническая практика – международный стандарт этических норм и качества научных исследований, описывающий правила разработки, проведения, ведения документации и отчетности об исследованиях, которые подразумевают участие человека в качестве испытуемого). Все пациенты получали информационный листок пациента и форму информированного согласия. Основу работы составил анализ 605 исследований результатов трансрезонансного функционального топографа (ТРФТ), выполненных с февраля 2002 по март 2009 года. Возраст исследованных варьировал от 16 до 89 лет, в среднем составлял 37,8 года, из них 76,1 % – мужчины, 23,9 % – женщины. Группа сравнения состояла из 56 относительно здоровых добровольцев, сопоставимых по возрасту и полу с основной группой, из них мужчин было 38, женщин – 18¹.

Исследования проводились на трансрезонансных топографах. Данные аппараты имеют сертификат соответствия РОСС RU.ИМ18.В00131 6943001, выданный Федеральной службой по надзору в сфере здравоохранения и социального развития № ФС 022а2005/1919 от 15.06.2005 г. ТРФТ состоит из приемно-излучающего модуля (ПИМ), радиометрического приемника, блока управления и обработки информации, персонального компьютера и программного обеспечения. Зондирующие КВЧ (мм) радиоволны от источника на фиксированной водной резонансной частоте 65 ГГц КВЧ (мм) диапазона и низкой плотности мощности – не более 10 мкВт/см², направляемые в течение 5 секунд на соответствующую топографическую область, взаимодействуют с внутренними молекулярными структурами водной компоненты биологической ткани и возбуждают в биологической ткани дополнительное, вторичное радиоизлучение на другой, более низкой резонансной частоте 1 ГГц СВЧ (дм) диапазона крайне низкой мощности $\sim 10^{-14}$ – 10^{-13} Вт/см², но превышающей тепловую $\sim 10^{-17}$ Вт. При этом волны приобретают информацию о структурно-функциональном состоянии внутренних органов и систем организма, находящихся в обследуемой зоне. Эти вторичные волны ретранслируются из глубины к поверхности тела, где и принимаются ПИМ. Для их регистрации используется высокочувствительный порядка $P \sim 10^{-18}$ – 10^{-17} Вт радиоприем-

ник, так называемый радиометр, настроенный на прием радиоволн на резонансной частоте 1 ГГц в полосе приема ± 25 МГц. Сенсором, непосредственно воспринимающим радиосигнал с поверхности тела, служит расположенная в модуле миниатюрная (диаметром ≈ 3 см), согласованная с телом и водой двухвибраторная полуволновая полосковая контактная антенна-аппликатор, настроенная на прием магнитной компоненты электромагнитных волн. В зависимости, как мы считаем, от активности клеточного метаболизма изменяется концентрация свежепродуцированной кластерной воды, соответственно, меняется интенсивность диагностического радиоотклика биоткани в большую или меньшую сторону. В отличие от радиотермографии, регистрирующей в области кожного покрова слабые температурные контрасты в пределах нескольких градусов, которые не всегда адекватны функциональному состоянию биоткани организма, в ТРФ-топографии напрямую отслеживается динамическое состояние клеточного метаболизма. При этом диагностический сигнал радиоотклика биоткани по величине в 1000 раз превосходит низкий ($\sim 10^{-17}$ – 10^{-16} Вт/см²) радиотермографический уровень. Перед началом исследования выполнялась калибровка прибора на круглом металлическом эталоне специально подобранного диаметра. После калибровки прибора в компьютере запускалась программа для исследования и ее результаты представлялись в виде цветных картин функциональной топограммы тела пациента в двух видах – передней и задней, а также гистограммы уровней принятых радиосигналов с исследованных топографических областей на формализованных бланках. Экспериментальные результаты зависели от конфигурации электромагнитного волнового поля, создаваемого в среде взаимным расположением излучающей КВЧ-антенны на резонансной частоте 65 ГГц и приемной СВЧ аппликаторной антенны на частоте 1 ГГц. В топографе была применена конструкция их совмещенного асимметричного расположения в едином приемно-излучающем модуле, так что контактные поверхности обеих антенн одновременно соприкасаются с телом. Приемно-излучающий модуль ставился перпендикулярно к поверхности тела и ориентировался таким образом, чтобы излучающая антенна располагалась строго в каудальном направлении. После чего ПИМ прижимался к телу испытуемого. Давление, оказываемое на ПИМ, должно было быть несильным для того, чтобы не нарушить микроциркуляцию в подлежащих тканях и не получить ложные данные. Показания величины радиоотклика с исследуемой точки на передней брюшной стенке выводились на компьютер через каждые 0,1 секунды в виде ряда данных. Измерение продолжалось около 5 секунд и из полученных данных автоматически за счет встроенной

программы на компьютере вычислялось среднее значение в момент стабилизации сигнала РО. При исследовании более 5 секунд на одной точке проявлялся лечебный эффект электромагнитного излучения крайне высокой частоты и показатели приближались к диапазону группы здоровых. Измерения проводились в вольтах (V), в связи с тем что мощность РО составляла величину порядка 10^{-15} Вт/см². Для регистрации требовалось значительное усиление величины РО, которое было непрактично для написания. Результаты измерения радиометром технически выводились в единицах напряжения на дисплей, и исследователь чаще сталкивался с этими цифрами, поэтому было решено РО измерять в соответствующих его мощности (Вт/см²) значениях шкалы дисплея, выдаваемых в вольтах (V). От начала работы прибора до окончания исследования больного проходило не менее 5 минут. Выбранная конструкция ПИМ имела преимущества по сравнению с ранее практиковавшимся разделным расположением приемной и передающей антенн, так как исключала неопределенность в их взаимном положении, уменьшала влияние внешней среды и повышала стандартность условиям диагностирования. Из-за того что точно локализовать проекцию очага деструкции на переднюю брюшную стенку сложно (смещаемость соседних органов, подвижность кишечника, атипичное расположение очага деструкции, спланхноптоз), мы использовали 36 точек измерения на передней и задней поверхности брюшной стенки, чтобы максимально захватить возможные участки деструкции. Основу данной методики составили ранее наработанные нами схемы по диагностике острого аппендицита. В завершающей части исследования мы подошли к выбору одной точки на передней брюшной стенке, в которой наиболее полно отражались изменения, происходившие при деструкции в исследуемом органе, которая располагалась в 2 см ниже и на 2 см правее пупка. Данная точка наиболее полно отражала изменения при заболеваниях в правой подвздошной области.

Достоверность результатов обследования была обеспечена применением стандартных диагностических исследований и методик, гистологических исследований, обработкой данных с помощью компьютерных программ для статистического анализа данных. Результаты исследования были статистически обработаны на персональном компьютере с помощью пакета статистических программ (ПСП) «Statistica v.10». В процессе статистического анализа результатов исследования применялись параметрические статистические критерии (методы). Применению этих методик предшествовала проверка на неппротиворечие нормальному закону распределения результатов исследований. Для проверки на согласованность нормальному закону

результатов измерения использовался критерий W Шапиро – Уилка (Shapiro – Wilks test). Решение о неппротиворечии нормальному закону принималось в том случае, если величина уровня значимости критерия W статистики превышает критический. Критическим уровнем значимости полагали уровень $p = 0,05$. Для критерия d Колмогорова – Смирнова/Лиллифорса критическим уровнем считали $p = 0,2$. При описании общих свойств полученных результатов использовались описательные статистики, такие как выборочная средняя (M), стандартная ошибка, дисперсия выборки (δ), стандартное отклонение (σ , SD), медиана (Me), мода (Mo), максимальное и минимальное значение (Max, Min), эксцесс, асимметричность, доверительный интервал (95 % доверительный интервал (ДИ)).

Результаты исследования, подчиняющиеся нормальному закону распределения, представлены как M (средняя арифметическая) $\pm$ границы 95 % ДИ средних значений изучаемых величин (95 % ДИ).

Для выявления связи между отдельными показателями нами применялся метод линейного корреляционного анализа (коэффициент корреляции Пирсона, в связи с нормальным распределением в выборках). Значимость коэффициента корреляции оценивали с помощью t-критерия Стьюдента (У. Госсет) или с использованием Z-критерия Фишера.

При сравнении результатов исследования между собой использовались процедуры дисперсионного анализа. В нашем случае нормально распределенных результатов использовался параметрический вариант дисперсионного анализа. В случае множественных сравнений использовался многофакторный дисперсионный анализ. В этих же процедурах при необходимости оценивались частные (парциальные) и множественные корреляции.

С целью классификации наблюдений и построения формализованных диагностических правил использовался многомерный анализ зависимостей – дискриминантный анализ. Применению указанного метода также предшествовала проверка на нормальность распределения исходной матрицы измерений. В процессе анализа проверялись гипотезы о равенстве внутригрупповых дисперсий и ковариаций.

Для оценки статистической мощности (чувствительности) разрабатываемых диагностических критериев использовались как процедуры интервального оценивания, так и точечные оценки уровня значимости.

С целью определения оптимальной точки разделения предлагаемых диагностических критериев нами был использован анализ построенных характеристических кривых (ROC-кривых) метода с помощью ПСП SPSS 12.

Таким образом, перечисленные методы исследований и диагностики позволили собрать достоверный статистический материал и качественно его проанализировать.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обследование и лечение больных проводили в соответствии со стандартами оказания неотложной помощи. Из 605 больных, поступивших с направительным диагнозом «острый аппендицит», диагноз подтвердился у 363 пациентов (60 %).

Всем больным с гангренозным, флегмонозным и катаральным аппендицитом были выполнены оперативные вмешательства. Из 104 больных с аппендикулярным инфильтратом (АИ) оперативные вмешательства были выполнены у 80 пациентов (76,9 % от общего числа АИ) сразу в связи с небольшим сроком заболевания, наличием рыхлого инфильтрата или осложнения в виде образования абсцесса. Остальным 24 (23,1 % от общего числа АИ) пациентам были проведены отсроченные аппендэктомии в период стихания воспалительных процессов. Катаральный аппендицит был обнаружен у 111 (18 %) больных, флегмонозный – у 118 (20 %), гангренозный – у 30 (5 %) пациентов, что было подтверждено гистологическим исследованием удаленных червеобразных отростков. После обследования остальных 242 (40 %) пациентов был установлен окончательный диагноз «мезаденит» у 135 (22 %) и «дискинезия кишечника» у 107 (18 %) больных. Распределение пациентов с ОА, обследованных с помощью ТРФ-топографии, представлено на рис. 1.



Рис. 1. Распределение по нозологиям больных с направительным диагнозом «острый аппендицит»: КА – катаральный аппендицит, ФА – флегмонозный, ГА – гангренозный, рАИ – рыхлый аппендикулярный инфильтрат, пАИ – плотный аппендикулярный инфильтрат, ДК – дискинезия кишечника, М – мезаденит

Из общего количества пациентов червеобразный отросток располагался типично в 359 наблюдениях (89,9 %). У двух пациентов аппендикс имел длинную брыжейку и находился в малом тазу, у одного из них ретроперитонеально, у двух размещался подпеченочно.

Описательная статистика полученных данных по величине РО у больных с направительным диагнозом «острый аппендицит» и в группе сравнения приведена в таблице.

Из данных, представленных в таблице, видно, что медиана, мода практически соответствуют среднему значению и не отклоняются более чем на 20 %. Асимметричность не превышает 0,01, что подтверждает нормальное распределение в выборках, возможность использования крите-

Описательная статистика величин РО у больных с направительным диагнозом «острый аппендицит» и группы сравнения в первой точке

Исследуемые значения	АИ	ГА	ФА	М	ДК	КА	ГС
Среднее	5,25*	4,42*	6,1*	7,28	8,59*	10,38*	7,14
Стандартная ошибка	0,03	0,12	0,02	0,01	0,02	0,03	0,03
Медиана (середина множества чисел)	5,25	4,35	6,09	7,28	8,59	10,38	7,16
Мода (число, наиболее часто встречающееся в данном множестве чисел)	4,75	Мало данных	5,71	7,22	8,45	10,84	6,9
Стандартное отклонение (разброс относительно среднего)	0,3	0,68	0,21	0,17	0,16	0,32	0,35
Дисперсия выборки	0,91	4,64	0,46	0,27	0,26	1,02	1,25
Экссесс (сглаженность)	-0,1	-0,1	-0,09	-0,1	-0,11	-0,11	-0,11
Асимметричность	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Интервал	1,09	2,5	0,79	0,59	0,58	1,09	1,29
Минимум	4,7	3,19	5,71	7,0	8,31	9,8	6,5
Максимум	5,79	5,69	6,5	7,59	8,89	10,89	7,79
Сумма	546,1	132,62	719,31	939,71	919,58	1152,32	863,65
Случаи	104	30	118	129	107	111	121
Уровень надежности (95,0 %)	0,06	0,25	0,04	0,03	0,03	0,06	0,06

Примечание. * – различия с группой сравнения достоверно больше 95 % ($p \leq 0,05$).

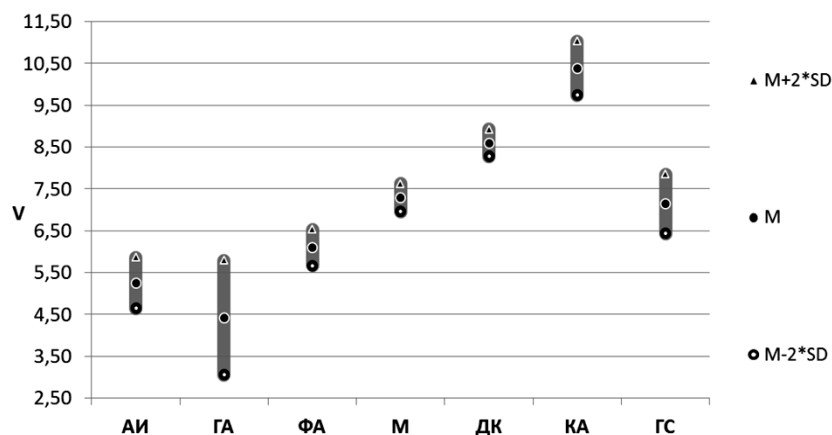


Рис. 2. Диапазоны распределений величин РО у больных с направительным диагнозом «острый аппендицит» и в группе сравнения

рия Стьюдента и графического способа для сравнения этих выборок. В результате проведенных исследований установлено, что при флегмонозных формах аппендицита у 118 человек величина РО составляла в среднем 6,1V. Стандартное отклонение (σ , SD) составило 0,2V. Все формы ОА были подтверждены гистологическими исследованиями. Для гангренозного аппендицита, выявленного после операции у 30 человек, среднее значение РО составило 4,4V. Стандартное отклонение – 0,68V. Значения для флегмонозного перекрываются полностью диапазоном величин РО гангренозного аппендицита. У 129 больных, диагноз которых был изменен на мезаденит, среднее значение РО в той же точке составило 7,3V. Стандартное отклонение – 0,16V. Для 107 больных с дискинезией кишечника среднее значение РО в той же точке составило 8,6V. Стандартное отклонение (σ , SD) – 0,16V. У больных с катаральным аппендицитом, выявленным после операции у 111 больных, среднее значение РО в той же точке составило 10,38V. Стандартное отклонение – 0,32V.

Величины РО этих четырех заболеваний (мезаденит, дискинезия кишечника, катаральный аппендицит) с достоверностью более 95 % различались от величин РО заболеваний, протекавших с деструкцией. А величины РО дискинезии кишечника и катарального аппендицита почти полностью перекрывались друг другом.

Аппендикулярные инфильтраты, хотя и встречались редко, показывали результаты РО, сходные с деструктивными формами заболеваний аппендикса. Среднее значение РО при них составило 5,25V. Стандартное отклонение – 0,3V. Приведенные данные полностью описывают данную выборку. В первые сутки инфильтраты оставались рыхлыми и позволяли выполнить удаление деструктивно измененного отростка. В последующие сутки развивался плотный аппендику-

лярный инфильтрат, разрушение которого могло привести к распространению внутрибрюшной инфекции. Критерием необходимости оперативного вмешательства в этом случае служило время от начала приступа болей и наличие осложнений.

Диапазон величин РО, характерных для группы сравнения, был характерен и для деструктивных форм заболеваний, где среднее значение РО составило 7,14V. Но для этой группы отмечалось отсутствие боли при осмотре, что и было взято для признака дифференциальной диагностики от деструктивных форм заболеваний.

На основании этих данных построена диаграмма, представленная на рис. 2, отражающая диапазоны распределения величины РО у больных, поступивших с направительным диагнозом «острый аппендицит» и в группе сравнения.

Чувствительность критерия «величина РО менее 6,6V + боли в правой подвздошной области и/или над лобком» для деструктивных заболеваний правой подвздошной области составила 100 %. Специфичность и безошибочность при этих условиях – 98 %.

Таким образом, представленная методика с большой долей достоверности позволяет дифференцировать основные заболевания правой подвздошной области.

ВЫВОДЫ

1. Изменение величины РО в точке аппендикса менее 6,6V и наличие болей в правой подвздошной области и над лобком свидетельствуют о наличии деструктивной формы аппендицита.

2. Чувствительность критерия «величина РО менее 6,6V + боли в правой подвздошной области и/или над лобком» для деструктивных заболеваний правой подвздошной области составила 100 %. Специфичность и безошибочность при этих условиях – 98 %.

ПРИМЕЧАНИЕ

¹ В связи с тем, что как в основной группе, так и в группе сравнения имеются женщины, у которых достаточно часто имеет место вторичный острый аппендицит вследствие воспаления придатков, результаты этой группы пациенток в данной статье не представлены, так как она требует отдельного изучения. Все представленное в статье может быть полностью применено лишь у мужчин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джумабаев Э. С., Ахлиддинов О. А. Острый катаральный аппендицит: нужна ли аппендэктомия? // Хирургия. Журнал им. Н. И. Пирогова. 2004. № 2: 70. С. 12–18.
2. Масляков В. В., Терехов И. В., Петросян В. И. и др. Дифференциальная диагностика заболеваний грудной клетки с помощью трансрезонансной функциональной топографии // Вестник медицинского института «РЕАВИЗ»: Реабилитация, Врач и Здоровье. 2013. № 3. С. 18–27.
3. Торгунаков А. П. Что делать при простом (катаральном) аппендиците? // Хирургия. Журнал им. Н. И. Пирогова. 2005. № 7. С. 60–62.

Maslyakov V. V., Saratov medical institute “REAVIZ” (Saratov, Russian Federation)

Gromov M. S., Saratov medical institute “REAVIZ” (Saratov, Russian Federation)

Bryzgunov A. V., Saratov medical institute “REAVIZ” (Saratov, Russian Federation)

Leont'ev V. Yu., Saratov medical institute “REAVIZ” (Saratov, Russian Federation)

OPTIMIZATION OF RIGHT ILIAC AREA DISEASE DIAGNOSIS BY USE OF TRANS-RESONANT TOPOGRAPHY

The paper is concerned with the analysis of 605 research results obtained with the use of the trans-resonant functional topographer in the period from February, 2002 to March, 2009. An experimental group of patients consisted of rather healthy volunteers. The research was conducted with the help of trans-resonant topographers. From 605 patients diagnosed with acute appendicitis the diagnosis was confirmed in 363 patients (60 %). As a result of the research it was established that in 118 patients with phlegmonous appendicitis the level of RO amounted to 6,1V. The standard deviation (σ , SD) made 0,2V. All cases of acute appendicitis were confirmed by means of histologic examinations. For 30 cases with gangrenous appendicitis, revealed after surgical treatment, the average value of RO amounted to 4,4V. The standard deviation (σ , SD) made 0,68V. In 129 patients, whose diagnosis was changed to mesenteric adenitis, the average value of RO amounted to 7,3V. The standard deviation (σ , SD) made 0,16V. For 107 patients with intestine dyskinesia the average value of RO amounted to 8,6V. The standard deviation (σ , SD) – 0,16V. In 111 patients with catarrhal appendicitis, revealed after surgical treatment, the average value of RO amounted to 10,38V. The standard deviation (σ , SD) made 0,32V. The change of the RO level by less than 6,6V and persisting pain in the right iliac area and over the pubis is indicative of destructive forms of appendicitis. Sensitivity of criterion: “the level of RO less than 6,6V + pain in the right iliac area and/or over a pubis” for destructive diseases of the right iliac area made 100 %. Specificity and accuracy under these circumstances amounts to 98 %.

Key words: acute appendicitis, diagnostics, trans-resonant topographer

REFERENCES

1. Dzhumabaev E. S., Akhliddinov O. A. Acute catarrhal appendicitis: whether the appendectomy is necessary? [Ostryy kataral'nyy appenditsit: nuzhna li appendektomiya]. *Khirurgiya. Zhurnal im. N. I. Pirogova* [Surgery. The magazine of N. I. Pirogov]. 2004. № 2: 70. P. 12–18.
2. Maslyakov V. V., Terekhov I. V., Petrosyan V. I. i dr. Differential diagnosis of thorax diseases by means of trans-resonant functional topography [Differentsial'naya diagnostika zabolevaniy grudnoy kletki s pomoshch'yu transrezonansnoy funktsional'noy topografii]. *Vestnik meditsinskogo instituta "REAVIZ": Reabilitatsiya, Vrach i Zdorov'e* [Bulletin of medical institute “REAVIZ”: Rehabilitation, Doctor and Health]. 2013. № 3. P. 18–27.
3. Torgunakov A. P. What to do in cases of simple (catarrhal) appendicitis? [Chto delat' pri prostom (kataral'nom) appenditsite?]. *Khirurgiya. Zhurnal im. N. I. Pirogova* [Surgery. The magazine of N. I. Pirogov]. 2005. № 7. P. 60–62.

Поступила в редакцию 13.11.2014

ЮРИЙ ВИТАЛЬЕВИЧ СУХИН

доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой травматологии и ортопедии, Одесский национальный медицинский университет (Одесса, Украина)
suhinodessa@mail.ru

ВЯЧЕСЛАВ АРТУРОВИЧ ЛОГАЙ

аспирант кафедры травматологии и ортопедии, Одесский национальный медицинский университет (Одесса, Украина)
ericdraven@rambler.ru

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНО-НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ ПРИВЫЧНОГО ВЫВИХА ПЛЕЧА

Малоинвазивное хирургическое лечение привычного вывиха плеча – это оптимальный выход для пациентов, преимущественно старших возрастных групп, которым противопоказаны традиционные методики оперативного лечения ввиду наличия тяжелых сопутствующих соматических заболеваний, повышающих степень операционного риска. Разработка компьютерно-навигационной системы для предложенного метода лечения привычного вывиха плеча – это первый шаг к внедрению компьютерных и инженерных систем в хирургическую практику. Благодаря разработанному компьютерно-аппаратному комплексу стало возможным проведение хирургического лечения привычного вывиха плеча закрыто. Это позволит уменьшить продолжительность операции, объем операционной травмы, операционные риски и избежать длительных сроков реабилитации.

Ключевые слова: привычный вывих плеча, малоинвазивное оперативное лечение, компьютерно-навигационное оборудование

ВВЕДЕНИЕ

В XXI веке компьютерные системы различных модификаций прочно заняли одно из ведущих мест в жизни каждого человека. И это касается уже не только промышленных, научных и исследовательских аспектов. Сегодня уже невозможно представить себе современную медицину без использования компьютерных технологий, так как они являются неотъемлемым рабочим инструментом в различных сферах медицинской деятельности. Внедрение компьютерных технологий в медицину обеспечило высокую точность и скорость проведения различных исследований и медицинских осмотров. Усовершенствование старых, испробованных и действенных методик лечения с помощью компьютерных технологий для достижения большей эффективности, точности и надежности – это своего рода переходный этап перед открытием и апробацией принципиально новых техник в травматологии и ортопедии, основанных уже непосредственно на инновационных технологиях будущего.

АКТУАЛЬНОСТЬ

Частота привычного вывиха плеча после первичного травматического вывиха варьирует от 16,3 до 60 %, составляя в среднем 22,4 % [2]. Такой высокий процент осложнений после первичного травматического вывиха плеча обусловлен анатомическими особенностями плечевого сустава,

высокими функциональными требованиями, предъявляемыми к данному суставу в процессе физической активности человека, и неправильным оказанием медицинской помощи при первичном травматическом вывихе.

Первичный травматический вывих плеча, в связи с анатомо-физиологическими особенностями плечевого сустава, отличается значительной тяжестью и полиморфностью повреждений структур, стабилизирующих сустав, таких как вращательная манжета плеча и хрящевая губа лопатки, что приводит к возникновению привычного вывиха плеча. В связи с этим, по данным литературы, у 15,6–35,4 % больных результаты лечения неудовлетворительны, а в 4,2–5,9 % случаев неудовлетворительные результаты приводят к инвалидности [12], [13].

В настоящее время единственным методом лечения привычного вывиха плеча признан хирургический, поскольку консервативное лечение этой патологии в 31,2 % случаев заканчивается рецидивом вывиха, а у молодых, физически активных пациентов этот процент повышается до 70–100 % [8]. Однако огромное количество хирургических методик и постоянное появление новых хирургических способов лечения свидетельствуют о неудовлетворенности результатами. По данным отечественных и зарубежных авторов, процент рецидивов после реконструктивно-восстановительных операций в связи с привычным вывихом плеча составляет от 2,8 до 30 % [1], [3], [4], [9], [11], [14], [15]. Наимень-

шее количество рецидивов наблюдается после операций Банкарта – 6–13 % [10], [16], [17] и после операции открытого подвешивания плеча в оптимальных точках – 0–2 % [5]. Методика открытого подвешивания плеча в оптимальных точках предложена и разработана в Донецком государственном медицинском университете им. М. Горького. Она заключается в открытом подвешивании плечевой кости к акромиальному отростку лопатки в оптимальных точках. Точки располагаются на расстоянии 25 мм от переднего, 5 мм от наружного края акромиона и на 20 мм кзади от межбугорковой борозды по ходу анатомической шейки плечевой кости. Эти точки были определены в эксперименте из-за того, что при максимальных движениях в плечевом суставе они наименее отдаляются друг от друга. Поэтому при создании искусственной связки между ними длины этой связки будет недостаточно для повторных вывихов плеча; при прохождении одной точки строго под другой, что является минимальным расстоянием между ними, гофре связки также будет недостаточным для вывиха плеча (рис. 1).

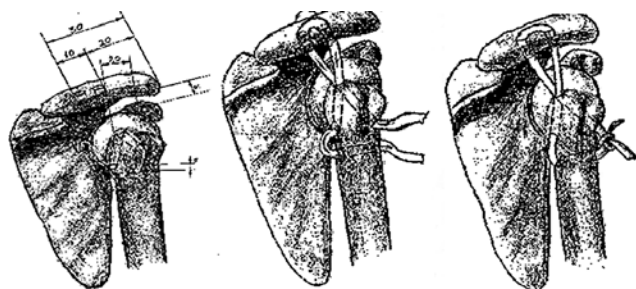


Рис. 1. Проведение лавсановой ленты в каналах проксимального отдела плеча и акромиального отростка лопатки

Кроме того, искусственная связка не ограничивает движений в плечевом суставе и надежно фиксирует плечо относительно суставной впадины лопатки. Отдаленные результаты лечения показали полное отсутствие рецидивов привычного вывиха плеча. Однако данное оперативное вмешательство имело ряд существенных недостатков, таких как высокая травматичность, значительная продолжительность по времени и сложность в исполнении, что напрямую сказывается на сроках реабилитации и невозможности проведения этой операции у больных с соматическими патологиями, определяющими степень операционного риска. В связи с этим стоит отметить, что при выборе метода хирургического лечения необходимо учитывать не только число рецидивов вывиха, но и малоинвазивность самого метода и соматическое состояние больного, что, в свою очередь, влияет на сроки реабилитации после оперативного вмешательства. Для решения этих проблем и повышения качества и надежности хирургического лечения привычного вывиха плеча мы разработали методику закрытого под-

вешивания плеча с применением компьютерно-навигационной системы [6].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Нами разработан малоинвазивный метод подвешивания плечевой кости к акромиальному отростку лопатки в оптимальных точках. Отличительной чертой предложенной методики является закрытое проведение анкерного фиксатора через оптимальные точки при помощи компьютерно-навигационного оборудования. Анкер ввинчивается через акромиальный отросток лопатки в анатомическую шейку плечевой кости в оптимальных точках, а нити завязываются на специальной пуговице на акромиальном отростке лопатки [7]. Для проведения этого малоинвазивного оперативного вмешательства была создана компьютерно-навигационная система на базе принципов дополненной реальности (рис. 2).

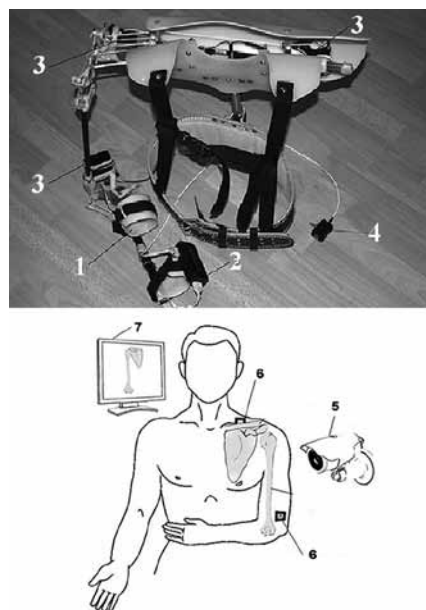


Рис. 2. Компьютерно-навигационная система: 1 – механизированная шина, 2 – контроллер, 3 – двигатели, 4 – источник питания, 5 – камера, 6 – металлизированные маркеры, 7 – компьютер

Разработанный компьютерно-аппаратный комплекс состоит из механизированной шины, контроллера с программным обеспечением для связи с персональным компьютером, трех шнековых двигателей для позиционирования руки, камеры и маркеров для определения нужного положения плечевой кости относительно акромиального отростка лопатки, источника питания и компьютера для обработки изображения и генерирования сигнала отклонения от необходимого положения.

Навигационная система реализуется следующим образом. На этапе подготовки на руке пациента фиксируют металлизированные маркеры и делают компьютерную томографию поврежденного сустава. Полученные файлы

срезом области плечевого сустава загружаются в компьютер, где по ним делается трехмерная реконструкция сустава и смежных костей. На трехмерной модели врачом отмечаются две оптимальные точки: на 25 мм от переднего, 5 мм от наружного края акромиона и на 20 мм кзади от межбугорковой борозды по ходу анатомической шейки плечевой кости, которые должны расположиться одна под другой. Рука пациента размещается в механизированной шине. Изображение с камеры обрабатывается программным обеспечением компьютера. Математический алгоритм по взаимному расположению маркеров генерирует координаты, в которых должны располагаться модели костей пациента, полученные на томографии. Программа также рассчитывает углы в трех плоскостях, на которые нужно отклонить руку пациента для того, чтобы необходимые врачу точки расположились одна под другой. Рассчитанные углы передаются с компьютера к контроллеру, который с помощью двигателей разме-

щает руку пациента в положении, необходимом для проведения операции, точку и направление введения анкерного винта указывает лазерный луч. Под местной анестезией проводится анкерный винт, концы нитей завязываются на акромиальном отростке лопатки.

ВЫВОДЫ

Благодаря разработанному компьютерно-навигационному комплексу была получена возможность впервые провести подвешивание плечевой кости к акромиальному отростку лопатки в оптимальных точках закрыто. Данный способ лечения привычного вывиха плеча позволяет в значительной степени уменьшить продолжительность операции до нескольких минут, минимизировать объем операционной травмы, снизить операционные риски и сократить сроки реабилитации, а также надежно фиксировать плечо относительно суставной впадины лопатки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В е р е щ а г и н Н. А. Отдаленные результаты оперативного лечения привычного вывиха плеча // Новые технологии в хирургии крупных суставов: Материалы науч.-практ. конф. Н. Новгород, 2001. С. 15.
2. З у е в - Р а т н и к о в С. Д. Комплексный подход в лечении нестабильности плечевого сустава // Актуальные вопросы травматологии и ортопедии: Материалы студенческой науч. межвуз. конф. М., 2008.
3. Л и т в и н Ю. П., Ч а б а н е н к о И. П., П и в е н ь Ю. Н. Повреждение стабилизирующих структур плечевого сустава при травматических вывихах плеча // Ортопедия, травматология и протезирование. 2005. № 1. С. 114–120.
4. С к а к у н П. Г. Отдаленные результаты лечения привычного вывиха плеча // Травматология и ортопедия: современность и будущее: Материалы междунар. конгресса. М., 2003. С. 157–158.
5. С у х и н Ю. В. Разработка способа оперативного лечения повторяющегося вывиха плеча // Новое в решении актуальных проблем травматологии и ортопедии: Сб. научн. трудов конф. молодых ученых. М., 2000. С. 105–106.
6. С у х и н Ю. В., Л о г а й В. А. Лечение повторяющегося вывиха плеча у людей пожилого и старческого возраста // Травма. Донецк, 2012. Т. 13. № 2. С. 132–133.
7. С у х и н Ю. В., Л о г а й В. А., С у х и н В. П. Метод лечения повторяющегося вывиха плеча у людей с высоким операционным риском // Літопис травматології та ортопедії. Киев, 2013. № 3–4. С. 41–42.
8. Ш а п о в а л о в В. М. Артроскопия в хирургическом лечении передней нестабильности плечевого сустава // Новые технологии в травматологии и ортопедии: Седьмой Рос. нац. конгресс. СПб., 2002. С. 42–43.
9. Ш а п о в а л о в В. М. Артроскопия в обосновании стабилизирующих операций при передних вывихах плеча (клинико-экспериментальное исследование) // Травматология и ортопедия России. 2002. № 1. С. 16–18.
10. B e r g E. E., E l l i s o n A. E. The inside-out Bankart procedure // Am J. Sports Med. 1990. № 18. P. 129–133.
11. B r o x J. Satisfactory long-term results after Eden-Hybbinette-Alvik operation for recurrent anterior dislocation of the shoulder: 6–20 years' follow-up of 52 patients // Acta Orthop. Scand. 2003. Vol. 74. № 2. P. 180–185.
12. C o n n o l l y S. Irreducible Anterior Dislocation of the Shoulder Due to Soft Tissue Interposition of Subscapularis Tendon // Skeletal Radiology. 2008. Vol. 37. № 1. P. 63–65.
13. H o v e l i u s L., S a n d s t r ö m B., S a e b ö M. One hundred eighteen Bristow-Latarjet repairs for recurrent anterior dislocation of the shoulder prospectively followed for fifteen years: study II-the evolution of dislocation arthropathy // J. Shoulder Elbow Surg. 2006. Vol. 15. № 3. P. 279–289.
14. J a k o b s e n B. W. Primary repair versus conservative treatment of first-time traumatic anterior dislocation of the shoulder: a randomized study with 10-year follow-up // Arthroscopy. 2007. Vol. 23. № 2. P. 118–123.
15. N i n k o v i c S. The surgical treatment of the recurrent dislocation on the shoulder joint with minimum invasion anterior approach // Med. Pregl. 2008. Vol. 61. № 1–2. P. 49–54.
16. S t e i n b e c k J., J e r o s c h J. Open Bankart repair using suture anchors in posttraumatic shoulder instability: 2 to 5-year results // Unfallchirurg. 1997. № 100 (12). P. 938–942.
17. V a r m a r k e n J. E., J e n s e n C. H. Recurrent anterior dislocation of the shoulder. A comparison of the results after the Bankart and the Putti-Platt procedures // Orthopedics. 1989. № 12 (3). P. 453–455.

Sukhin Yu. V., Odessa National Medical University (Odessa, Ukraine)

Logay V. A., Odessa National Medical University (Odessa, Ukraine)

COMPUTER-BASED NAVIGATION SYSTEM DEVELOPMENT FOR TREATMENT OF RECURRENT SHOULDER DISLOCATION

Minimally invasive surgical treatment of recurrent shoulder dislocation is the best solution for patients of older age groups. Traditional methods of surgical treatment are contraindicated in such groups of patients due to the presence of comorbid somatic

diseases that increase possible operational risks. Development of computer-based navigation systems for proposed treatment of recurrent shoulder dislocation is the first step towards introduction of computer and engineering systems in surgical practice. Due to the use of developed computer-hardware complex contemporary surgical treatment of recurrent shoulder dislocation has become less invasive. Employment of this complex reduces duration period of the operation, the volume of surgical trauma, and possible operational risks. It will also help to avoid long periods of rehabilitation.

Key words: recurrent shoulder dislocation, minimally invasive surgery, computer-navigation equipment

REFERENCES

1. Vereshchagin N. A. Long-term results of surgical treatment of recurrent shoulder dislocation [Otdalennyye rezul'taty operativnogo lecheniya privychnogo vyvikh plecha]. *Novye tekhnologii v khirurgii krupnykh sustavov: Materialy nauch.-prakt. konf.* [Proc. scien. & pract. conf. "New technologies in surgery of large joints"]. N. Novgorod, 2001. P. 15.
2. Zuev-Ratnikov S. D. An integrated approach in the treatment of shoulder instability [Kompleksnyy podkhod v lechenii nestabil'nosti plechevogo sustava]. *Aktual'nye voprosy travmatologii i ortopedii: Materialy studencheskoy nauch. mezhvuz. konf.* [Proc. VIII stud. scien. internation. conf. "Topical issues of Traumatology and Orthopedics"]. Moscow, 2008.
3. Litvin Yu. P., Chabanenko I. P., Piven' Yu. N. Damage to the stabilizing structures of the shoulder joint in traumatic dislocation of the shoulder [Povrezhdenie stabiliziruyushchikh struktur plechevogo sustava pri travmaticheskikh vyvikhakh plecha]. *Ortopediya, travmatologiya i protezirovanie* [Orthopaedics Traumatology and Prosthetics]. 2005. № 1. P. 114–120.
4. Skakun P. G. Long-term results of treatment of habitual shoulder dislocation [Otdalennyye rezul'taty lecheniya privychnogo vyvikh plecha]. *Travmatologiya i ortopediya: sovremennost' i budushchee: Materialy mezhdunar. kongressa* [Proc. internation. congr. "Traumatology and Orthopedics: Present and Future"]. Moscow, 2003. P. 157–158.
5. Sukhin Yu. V. Development of the method of surgical treatment of recurrent shoulder dislocation of the shoulder [Razrabotka sposoba operativnogo lecheniya povtoryayushchegosya vyvikh plecha]. *Novoe v reshenii aktual'nykh problem travmatologii i ortopedii: Sb. nauchn. trudov konf. molodykh uchenykh* [New in solving urgent problems of traumatology and orthopedics: Proc. scien. conf.]. Moscow, 2000. P. 105–106.
6. Sukhin Yu. V., Logay V. A. Treatment of recurrent shoulder dislocation by patients in elderly and senile age [Lechenie povtoryayushchegosya vyvikh plecha u lyudey pozhilogo i starcheskogo vozrasta]. *Travma* [Trauma]. Donetsk, 2012. Vol. 13. № 2. P. 132–133.
7. Sukhin Yu. V., Logay V. A., Sukhin V. P. Method of treatment of recurrent dislocation of the shoulder by people with high operational risk [Metod lecheniya povtoryayushchegosya vyvikh plecha u lyudey s vysokim operatsionnym riskom]. *Litopis travmatologii ta ortopedii* [Annals of Traumatology and Orthopedics]. Kiev, 2013. № 3–4. P. 41–42.
8. Shapovalov V. M. Arthroscopy in the surgical treatment of anterior instability of the shoulder [Artrioskopiya v khirurgicheskom lechenii peredney nestabil'nosti plechevogo sustava]. *Novye tekhnologii v travmatologii i ortopedii: Sed'moy Ros. nats. kongr.* [Proc. VII rus. nation. congr. "New technologies in traumatology and orthopedics"]. St. Petersburg, 2002. P. 42–43.
9. Shapovalov V. M. Arthroscopy in the justification of stabilizing operations at the front shoulder dislocation (clinical and experimental research) [Artrioskopiya v obosnovanii stabiliziruyushchikh operatsiy pri perednikh vyvikhakh plecha (kliniko-eksperimental'noe issledovanie)]. *Travmatologiya i ortopediya Rossii* [Traumatology and orthopedics of Russia]. 2002. № 1. P. 16–18.
10. Berg E. E., Ellison A. E. The inside-out Bankart procedure // *Am J. Sports Med.* 1990. № 18. P. 129–133.
11. Brox J. Satisfactory long-term results after Eden-Hybbinette-Alvik operation for recurrent anterior dislocation of the shoulder: 6–20 years' follow-up of 52 patients // *Acta Orthop. Scand.* 2003. Vol. 74. № 2. P. 180–185.
12. Connolly S. Irreducible Anterior Dislocation of the Shoulder Due to Soft Tissue Interposition of Subscapularis Tendon // *Skeletal Radiology*. 2008. Vol. 37. № 1. P. 63–65.
13. Hovelius L., Sandström B., Saebö M. One hundred eighteen Bristow-Latarjet repairs for recurrent anterior dislocation of the shoulder prospectively followed for fifteen years: study II-the evolution of dislocation arthropathy // *J. Shoulder Elbow Surg.* 2006. Vol. 15. № 3. P. 279–289.
14. Jakobsen B. W. Primary repair versus conservative treatment of first-time traumatic anterior dislocation of the shoulder: a randomized study with 10-year follow-up // *Arthroscopy*. 2007. Vol. 23. № 2. P. 118–123.
15. Ninovic S. The surgical treatment of the recurrent dislocation on the shoulder joint with minimum invasion anterior approach // *Med. Pregl.* 2008. Vol. 61. № 1–2. P. 49–54.
16. Steinbeck J., Jerosch J. Open Bankart repair using suture anchors in posttraumatic shoulder instability: 2 to 5-year results // *Unfallchirurg*. 1997. № 100 (12). P. 938–942.
17. Varma J. E., Jensen C. H. Recurrent anterior dislocation of the shoulder. A comparison of the results after the Bankart and the Putti-Platt procedures // *Orthopedics*. 1989. № 12 (3). P. 453–455.

Поступила в редакцию 16.12.2014

УДК 577.112.856:577.212:616.1(470.22)

ЛЮДМИЛА ВЛАДИМИРОВНА ТОПЧИЕВА

кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории генетики, Институт биологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
topchieva67@mail.ru

ИРИНА ЕВГЕНЬЕВНА МАЛЫШЕВА

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории генетики, Институт биологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
i. e. malysheva@yandex.ru

ИРИНА ВАЛЕРЬЕВНА КУРБАТОВА

кандидат биологических наук, младший научный сотрудник лаборатории генетики, Институт биологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
irina7m@yandex.ru

ВИКТОРИЯ АЛЕКСЕЕВНА КОРНЕВА

кандидат медицинских наук, доцент кафедры факультетской терапии, фтизиатрии, инфекционных болезней и эпидемиологии Медицинского института, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
vikkorneva@mail.ru

ОЛЬГА ЮРЬЕВНА БАРЫШЕВА

доктор медицинских наук, профессор кафедры госпитальной терапии Медицинского института, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
olvar@karelia.ru

СОДЕРЖАНИЕ ИНТЕРЛЕЙКИНА 6 У ЗДОРОВЫХ И БОЛЬНЫХ ЭССЕНЦИАЛЬНОЙ АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИЕЙ С РАЗНЫМИ ГЕНОТИПАМИ ПО –572G>C ПОЛИМОРФНОМУ МАРКЕРУ ГЕНА *IL6**

В настоящее время большое количество исследований посвящено роли полиморфных вариантов гена провоспалительного цитокина интерлейкина 6 (*IL6*) в этиологии и патогенезе сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ). Наиболее изучено влияние –174G>C полиморфизма на развитие кардиоваскулярных расстройств, в том числе и эссенциальной артериальной гипертензии (ЭАГ). Менее изучен в этом отношении –572G>C полиморфизм гена *IL6*. Рядом авторов получены противоречивые данные как по содержанию данного белка в зависимости от генотипа по указанному маркеру, так и его ассоциации с развитием ССЗ. Целью исследования явилось изучение связи полиморфного маркера –572G>C гена *IL6* с содержанием *IL6* и развитием ЭАГ (I–II стадии) (на примере жителей Карелии). Для определения концентрации *IL6* в плазме крови использован иммуноферментный анализ. Для определения аллелей и генотипов по –572G>C маркеру гена *IL6* использован ПЦР–ПДРФ анализ. Исследовано содержание *IL6* в плазме здоровых и больных эссенциальной артериальной гипертензией людей в зависимости от генотипа по полиморфному маркеру –572G>C гена *IL6*. Показано небольшое повышение в плазме крови этого цитокина у пациентов с ЭАГ. Уровень белка у здоровых и больных доноров, имеющих разные генотипы по исследуемому маркеру, не отличался. Ассоциация полиморфного маркера –572G>C гена *IL6* с развитием ЭАГ (I–II стадии) у русских, вепсских и карельских жителей Республики Карелия не обнаружена.

Ключевые слова: интерлейкин 6 (*IL6*), ген *IL6*, полиморфизм, эссенциальная артериальная гипертензия

В последнее время появляется все больше данных о том, что провоспалительные цитокины, в том числе и интерлейкин 6 (*IL6*), могут вносить значительный вклад в этиологию и патогенез различных ССЗ [14]. Так, у здоровых доноров, имеющих повышенный уровень *IL6*, отмечено увеличение риска развития ишемической болезни сердца (ИБС), инфаркта миокарда (ИМ)

и гипертонии [11]. В плазме пациентов с различными кардиоваскулярными расстройствами концентрация данного цитокина, как правило, выше, чем у доноров контрольной группы [10]. Более того, повышенная продукция этого белка часто ассоциируется с неблагоприятным прогнозом для пациентов с ССЗ, например пациентов, перенесших инсульт и инфаркт миокарда [20]. По всей

видимости, IL6 играет важную роль и в развитии ЭАГ. Так, в ряде исследований выявлена корреляция уровня этого белка со значениями систолического и диастолического давления у здоровых доноров и гипертоников [2], [4]. Известно, что экспрессия гена *IL6* и концентрация кодируемого им белка в плазме могут определяться не только развитием воспалительного процесса в организме, но и наличием однонуклеотидных замен в разных областях гена [7], [15]. Мутации в промоторе гена могут привести к изменению связывания с этой областью ДНК транскрипционных факторов и в итоге к снижению или, напротив, повышению его транскрипционной активности [15]. Наиболее изучено влияние $-174\text{G}>\text{C}$ полиморфизма гена *IL6* на уровень его экспрессии и развитие ряда сердечно-сосудистых патологий [7]. Связь однонуклеотидной замены в положении -572 промоторной части этого гена с ССЗ исследована в меньшей степени. Показано влияние $-572\text{ G}>\text{C}$ полиморфизма на продукцию IL6 как *in vivo*, так и *in vitro* [15], что предполагает наличие генетической предрасположенности доноров, имеющих соответствующие генотипы по данному полиморфному маркеру, к ряду заболеваний, в том числе и заболеваниям, сопровождающимся повышением кровяного давления. Тем не менее выяснилось, что сведения о содержании IL6 в плазме крови в зависимости от генотипа, так же как и данные о связи $-572\text{G}>\text{C}$ полиморфного маркера гена *IL6* с развитием ряда сердечно-сосудистых патологий, весьма противоречивы [13], [19], [22]. Контрастные результаты по ассоциации этого полиморфизма с развитием ССЗ получены для одних и тех же популяций [22]. Добавим к тому же, что исследования, посвященные изучению роли данного полиморфизма в развитии ЭАГ, малочисленны. В связи с этим целью исследования явилось изучение связи полиморфного маркера $-572\text{G}>\text{C}$ гена *IL6* с содержанием IL6 и развитием ЭАГ (I–II стадии) (на примере жителей Карелии).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для генотипирования доноров русской национальности использовано 266 образцов крови (139 образцов из контрольной группы (возраст $51,6 \pm 3,9$ года); 127 образцов из группы пациентов с ЭАГ (I–II стадии) (возраст $57,9 \pm 2,3$ года)). Диагноз ЭАГ был установлен впервые врачами ГБУЗ «Больница скорой медицинской помощи» г. Петрозаводска в соответствии и с учетом клинических рекомендаций Всероссийского научного общества кардиологов [1]. Обследование доноров, включенных в дальнейшем в контрольную группу, проводилось также врачами ГБУЗ «Больница скорой медицинской помощи» г. Петрозаводска в ходе диспансеризации. Образцы крови у представителей карельской и вепсской национальностей были собраны в ходе плановой диспан-

серизации врачами Республиканской больницы им. Баранова в 2013 году. Возраст обследованных групп: карелы – $56,6 \pm 1,88$ года, вепсы – $57,5 \pm 2,48$ года. Критерии исключения из исследования: наличие сахарного диабета, перенесенные в последний месяц инфекционно-воспалительные заболевания, курение табака, беременность и лактация, алкогольная зависимость, индекс массы тела $\geq 30\text{ кг/м}^2$. Дополнительный критерий исключения из биохимического анализа – гипотензивная терапия. ДНК выделяли с помощью набора AxyPrep Blood Genomic DNA Miniprep Kit («Axygen», США). Генотипирование проводилось методом ПЦР–ПДРФ. Для амплификации -572 промоторной части гена *IL6* использовали праймеры, описанные в работе [16]. Полимеразную цепную реакцию (ПЦР) проводили в амплификаторе iCycler iQ5 (Bio-Rad, США), используя реакционную смесь Master Mix (ThermoFisher, Германия). ПЦР-продукты обрабатывали эндонуклеазой рестрикции MbiI (1 е. а.) («Fermentas», Латвия) в течение 3 ч. при 37°C и разделяли в 2 % агарозном геле, используя трис-ацетатный буфер. Содержание IL6 в плазме крови определяли иммуноферментным методом (ИФА) с использованием тест-систем «Вектор-Бест» (Россия). Забор крови проводили утром натощак. Результаты исследования регистрировались на анализаторе «Sunrise» («Tecan», Швейцария). Для ИФА группы сравнения составили: 39 здоровых жителей Республики Карелия, подобранных по принципу случайной выборки, не имевших на момент обследования клинических признаков гипертонии (из них 10 мужчин и 29 женщин), и 26 пациентов с установленным диагнозом ЭАГ (I–II стадии) (из них 13 мужчин и 13 женщин). Возраст доноров контрольной группы составил $35,7 \pm 7,3$ года, пациентов с диагнозом ЭАГ $40,6 \pm 2,66$ года. Статистическая обработка материала проведена с использованием программного обеспечения StatGraphics 2.1. Достоверность различий частот аллелей и генотипов в группах оценивали с помощью критерия χ^2 , биохимических показателей между группами с помощью непараметрического критерия U Вилкоксона – Манна – Уитни. Различия считали достоверными при значении $p < 0,05$. Показатели концентрации IL6 приведены в виде средних, со стандартной ошибкой средних для двух выборок.

Исследования выполнены на оборудовании ЦКП ИБ КарНЦ РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате исследования показано, что уровень IL6 у пациентов с ЭАГ (I–II стадии) был выше, чем у доноров контрольной группы (табл. 1). Однако эти различия оказались статистически недостоверны ($p = 0,06$). Повышенное содержание данного цитокина у лиц, страдающих ЭАГ, регистрировали как у мужчин, так

и у женщин (табл. 1). Содержание IL6 в плазме крови доноров всех исследуемых групп, имеющих разные генотипы по $-572G>C$ маркеру гена *IL6*, достоверно не различалось ($p = 0,82$) (табл. 2).

Таблица 1
Содержание IL6 в контрольной группе и группе пациентов с ЭАГ

Группа	Концентрация IL6, среднее значение, пг/мл	Медиана	Минимум	Максимум
Контроль (n = 39)	14,61 ± 1,63	11,25	1,69	40,7
ЭАГ (n = 26)	16,71 ± 1,52	16,13	5,89	32,13
Мужчины контроль (n = 10)	14,22 ± 2,53	15,95	1,69	25,75
Мужчины ЭАГ (n = 13)	16,44 ± 2,31	15,38	5,89	32,13
Женщины контроль (n = 29)	14,74 ± 2,06	11,07	2,5	40,7
Женщины ЭАГ (n = 13)	16,96 ± 2,17	17,38	7,5	28,5

Таблица 2
Содержание IL6 в контрольной группе и группе пациентов с ЭАГ в зависимости от генотипа по $-572G>C$ полиморфному маркеру гена *IL6*

Генотип	Концентрация IL6, среднее значение, пг/мл	Медиана	Минимум	Максимум
GG (n = 50, 71 %)	15,4 ± 1,34	13,12	1,7	40,7
GC + CC (n = 20, 29 %)	9,14 ± 2,69	6,14	3,4	21,75

Проанализированы частоты $-572G>C$ полиморфного маркера гена *IL6* в контрольной группе и группе пациентов с ЭАГ (I–II стадии), а также среди лиц русской, вепсской и карельской национальностей. Частоты аллелей и генотипов по $572G>C$ полиморфному маркеру гена *IL6* не различались во всех исследуемых этнических группах (табл. 3). Значения χ^2 (соответственно для аллелей и генотипов): при сравнении группы русских и вепсских жителей Республики Карелия – 0,404 ($df = 1$, $p > 0,05$), 1,890 ($df = 2$, $p > 0,05$); при сравнении группы русских и карелов – 1,090 ($df = 1$, $p > 0,05$), 4,040 ($df = 2$, $p > 0,05$); при сравнении группы вепсов и карелов – 0,083 ($df = 1$, $p > 0,05$), 0,805 ($df = 2$, $p > 0,05$).

В исследуемых группах нами проводился тест на соответствие распределения равновесию Харди – Вайнберга. Несоответствие распределения равновесию Харди – Вайнберга по маркеру $-572G>C$ обнаружено во всех исследуемых группах. Русские (контроль + ЭАГ): $\chi^2 = 58,28$ ($df = 2$, $p < 0,001$); русские (контроль): $\chi^2 = 20,04$ ($df = 2$, $p < 0,001$); русские (ЭАГ): $\chi^2 = 18,87$ ($df = 2$, $p < 0,001$); вепсы: $\chi^2 = 26,69$ ($df = 2$, $p < 0,001$); карелы: $\chi^2 = 194,40$ ($df = 2$, $p < 0,001$).

Таблица 3
Распределение аллелей и генотипов по полиморфному маркеру $-572G>C$ гена *IL6* в группе людей, страдающих ЭАГ, и в контрольной группе русской, вепсской и карельской национальностей

Национальность	Группы	Аллели			Генотипы		Критерий χ^2	
		G	C	GG	GC	CC	аллели	генотипы
Русские	Контроль (n = 127)	0,93	0,07	0,9	0,07	0,03	0,474 ($df = 1$, $p > 0,05$)	0,400 ($df = 2$, $p > 0,05$)
	ЭАГ (n = 139)	0,95	0,05	0,92	0,06	0,02		
Вепсы	Контроль (n = 18)	0,94	0,06	0,89	0	0,11	0,995 ($df = 1$, $p > 0,05$)	3,103 ($df = 2$, $p > 0,05$)
	ЭАГ (n = 24)	0,84	0,16	0,83	0,13	0,04		
Карелы	Контроль (n = 25)	0,92	0,08	0,94	0	0,06	0,649 ($df = 1$, $p > 0,05$)	2,190 ($df = 2$, $p > 0,05$)
	ЭАГ (n = 17)	0,84	0,16	0,81	0,06	0,125		

Как видно из табл. 4, распределение частот аллелей и генотипов полиморфного маркера $-572G>C$ гена *IL6* не отличалось в группах здоровых и больных ЭАГ. Встречаемость аллелей и генотипов у пациентов с диагнозом ЭАГ и здоровых доноров достоверно не различалась во всех этнических группах (табл. 3, 4).

Таблица 4
Распределение аллелей и генотипов по полиморфному маркеру $-572G>C$ гена *IL6* в русской, вепсской и карельской этнических группах

		Русские (n = 266)	Вепсы (n = 45)	Карелы (n = 42)
Аллели	G	0,94	0,915	0,897
	C	0,06	0,085	0,103
Генотипы	GG	0,91	0,86	0,88
	CG	0,06	0,07	0,03
	CC	0,03	0,07	0,09

ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется значению воспалительных процессов в развитии и прогрессировании атеросклероза и различных серечечно-сосудистых патологий, в том числе артериальной гипертензии и ишемической болезни сердца [8]. Одним из провоспалительных цитокинов является IL6, синтезирующийся фибробластами, моноцитами, адипоцитами, эндотелиальными клетками, Т- и В-лимфоцитами [14]. Он способен стимулировать продукцию белков острой фазы воспаления, а также усиливать адгезию клеток эндотелия сосудов. Повышенный уровень IL6 может вызвать увеличение концентрации активных форм кислорода, изменения в составе липидов и их окисленных форм, способствуя атерогенезу [6]. К тому же этот цитокин может модулировать

уровень компонентов ренин-ангиотензин-альдостероновой системы, контролирующей давление крови в организме. Например, он индуцирует усиление экспрессии рецепторов ангиотензина II, способствует увеличению содержания ангиотензин-превращающего фермента и альдостерона в плазме крови [12]. Поэтому не удивительно, что повышенный уровень IL6 в плазме крови здоровых молодых мужчин и женщин может в будущем увеличить риск развития инфаркта миокарда [11]. О роли данного провоспалительного белка в этиологии и патогенезе ССЗ свидетельствует ряд фактов. Так, у больных с некоторыми сердечно-сосудистыми патологиями наблюдается гиперпродукция этого цитокина [10]. Плохой прогноз для пациентов, перенесших инсульт и инфаркт, может определяться плазменным уровнем IL6 [20]. Вероятно, IL6 играет определенную роль в развитии ЭАГ. Так, у мышей, нокаутных по гену *IL6*, наблюдали более низкое систолическое давление после воздействия холода по сравнению с контрольными животными [5]. У гипертензивных пациентов, принимавших антагонист рецепторов ангиотензина II, ирбесартан, снижение артериального давления происходило одновременно с понижением в плазме IL6 [18]. У гипертоников отмечается увеличение содержания в плазме данного цитокина [3], однако не всегда достоверное [18]. В нашем исследовании отмечено небольшое повышение концентрации IL6 у больных ЭАГ по сравнению со здоровыми донорами.

Известно, что содержание цитокинов в плазме может изменяться с возрастом и зависеть от гормонального статуса доноров [14]. В связи с этим мы проанализировали уровень IL6 в плазме крови здоровых и больных ЭАГ доноров в зависимости от половой принадлежности. Содержание этого белка у мужчин и женщин в контрольной группе и группе с диагнозом ЭАГ практически совпадало. Причем как у мужчин, так и у женщин, больных ЭАГ, отмечено небольшое повышение уровня IL6. Полученные данные могут свидетельствовать о протекании воспалительных процессов в организме при данном заболевании [8].

Интересно, что базовый уровень IL6 у здоровых доноров может коррелировать со значениями систолического и диастолического давления крови [4]. В связи с этим предполагается, что повышение его содержания у здоровых доноров – один из факторов, обеспечивающих у них высокую вариабельность параметров кровяного давления и увеличение риска развития ЭАГ [4]. Уровень IL6 у здоровых людей может быть обусловлен генетически. Мутации в разных областях гена *IL6* способны влиять как на уровень его транскрипционной активности, так и на содержание кодируемого им белка [15]. Так, замена гуанина на цитозин в –174 позиции промотора сопровождается снижением транскрипции этого гена [7]. Менее понятно влияние замены гуанина

на цитозин в –572 позиции промотора гена *IL6* на уровень его экспрессии. По данным Walston с соавторами, у белокожих американцев, носителей СС генотипа, уровень белка в плазме значительно выше, чем у лиц, имеющих GG генотип [19]. У здоровых жителей Кореи повышенный уровень IL6 ассоциировался с наличием GG генотипа [13]. В другом исследовании влияние однонуклеотидной замены в –572 положении промотора гена *IL6* на содержание IL6 было выявлено у пациентов с болезнью коронарных артерий только после процедуры шунтирования аорты, которая, вероятно, стимулировала воспалительные процессы в организме [3]. Следовательно, данные о содержании этого белка в плазме крови в зависимости от генотипа весьма противоречивы.

Мы проанализировали содержание IL6 в плазме крови здоровых и больных ЭАГ доноров в зависимости от генотипа по –572G>C полиморфному маркеру гена *IL6*. У обследованных нами доноров концентрация этого цитокина в плазме крови не зависела от генотипа.

Как отмечалось выше, в литературе встречаются противоположные данные и по ассоциации –572G>C полиморфного маркера гена *IL6* с наличием ряда сердечно-сосудистых патологий. Так, в ряде исследований, проведенных среди представителей азиатских народов, показано увеличение риска развития ряда ССЗ у носителей G аллеля по данному полиморфному маркеру [9], [22]. Однако для белокожих европейцев и американцев ассоциация –572G>C полиморфизма гена *IL6* с развитием кардиоваскулярных патологий не выявлена [19]. В своем исследовании мы проанализировали частоты –572G>C полиморфного маркера гена *IL6* в контрольной группе и группе пациентов с ЭАГ. Показано, что частоты аллелей G и C, а также соответствующих им генотипов в двух сравниваемых группах среди русских, вепсов и карелов достоверно не отличаются. Следовательно, нами не выявлена ассоциация –572G>C полиморфного маркера гена *IL6* с развитием ЭАГ (I–II стадии) у жителей Карелии. Отсутствие связи развития гипертонии с носительством того или иного генотипа по данному маркеру показано и в работе Wong с соавторами [21]. Противоречивые данные по связи указанного полиморфного маркера с кардиоваскулярными расстройствами как внутри, так и между европейской и азиатской популяциями можно объяснить различной частотой G и C аллелей. В азиатских популяциях G аллель является минорным [22]. Его относительная частота составляет 0,2–0,3 [9]. Среди представителей европейцев более распространен аллель G, а встречаемость аллеля C очень низкая [17], [19]. Вероятно, именно это и является основной причиной, по которой не удается выявить ассоциативную связь между носительством аллеля G или C и развитием кардиоваскулярных расстройств у европейцев и белокожих американцев. При-

веденные факты говорят о том, что этническая принадлежность играет немаловажную роль в генетической предрасположенности к ССЗ. В связи с этим нами проведена оценка частот $-572G>C$ полиморфного маркера среди представителей трех этнических групп Республики Карелия: русских, вепсов и карелов. Сравнительный анализ полученных результатов с данными литературы показал, что частоты аллелей и генотипов $-572G>C$ маркера гена *IL6* в трех представленных этнических группах Карелии близки к частотам, характерным для коренных европейцев [17]. Распределение частот аллелей и генотипов по данному маркеру среди русских, вепсских и карель-

ских жителей Республики Карелия достоверно не различалось.

В целом, исходя из полученных результатов, можно заключить, что развитие ЭАГ (I–II стадии) сопровождается небольшим повышением уровня *IL6* в плазме крови. Схожее распределение частот аллелей и генотипов по $-572G>C$ полиморфному маркеру гена *IL6* в двух группах сравнения, а также отсутствие различий в концентрации данного белка у доноров, имеющих разные генотипы, позволяют предположить, что исследуемый полиморфизм не вовлечен в генетическую предрасположенность русского, вепсского и карельского населения Карелии к развитию ЭАГ.

* Статья написана в рамках выполнения темы НИР ИБ КарНЦ РАН, № г. р. 0120135834 и при финансовой поддержке программы Президиума РАН на 2012–2014 гг. «Фундаментальные науки – медицине», № г. р. 01201262105; Гранта Правительства РФ по постановлению № 220, ГК № 11.G34.31.0052 (вед. ученый А. Н. Полторак).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диагностика и лечение артериальной гипертензии. Российские рекомендации (IV пересмотр) / Российское медицинское общество по артериальной гипертонии. Всероссийское научное общество кардиологов // Системные гипертензии. 2010. № 3. С. 5–26.
2. Bautista L. E., Vera L. M., Arenas I. A., Gamarra G. Independent association between inflammatory markers (C-reactive protein, interleukin-6, and TNF- α) and essential hypertension // J. Hum. Hypert. 2005. Vol. 19. P. 149–154.
3. Brull D. J., Montgomery H. E., Sanders J., et al. Interleukin-6 gene $-174G>C$ and $-572G>C$ promoter polymorphisms are strong predictors of plasma interleukin-6 levels after coronary artery bypass surgery // Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol. 2001. Vol. 21. P. 1458–1463.
4. Chae C. U., Lee R. T., Rifai N., Ridker P. M. Blood pressure and inflammation in apparently healthy men // Hypertension. 2001. Vol. 38. P. 399–403.
5. Crosswhite P., Sun Z. RNAi knockdown of Interleukin-6 attenuates cold-induced Hypertension // Hypertension. 2010. Vol. 55. № 6. P. 1484–1491.
6. Fernández-Real J. M., Broch M., Vendrell J., et al. Interleukin 6 gene polymorphism and lipid abnormalities in healthy subjects // J. Clin. Endocrinol. Metab. 2000. Vol. 85. P. 1334–1339.
7. Fishman D., Faulds G., Jeffery R., et al. The effect of novel polymorphisms in the interleukin 6 (*IL-6*) gene on *IL-6* transcription and plasma *IL-6* levels, and an association with systemic-onset juvenile chronic arthritis // J. Clin. Invest. 1998. Vol. 102. P. 1369–1376.
8. Harrison D. G., Guzik T. J., Lob H., et al. Inflammation, Immunity and Hypertension // Hypertension. 2011. Vol. 57. № 2. P. 132–140.
9. Jang Y., Kim O. Y., Hyun Y. J., et al. Interleukin-6–572C>G polymorphism – association with inflammatory variables in Korean men with coronary artery disease // Translational Research. 2008. Vol. 151. № 3. P. 154–161.
10. Mendall M. A., Asante M., Ballam L., et al. Relation of serum cytokine concentrations to cardiovascular risk factors and coronary heart disease // Heart. 1997. Vol. 78. P. 273–277.
11. Ridker P. M., Hennekens C. H., Buring J. E., Rifai N. C-reactive protein and other markers of inflammation in the prediction of cardiovascular disease in women // N. Engl. J. Med. 2000. Vol. 342. № 12. P. 836–843.
12. Samuelsson A.-M., Alexanderson C., Mölne J., et al. Prenatal exposure to interleukin-6 results in hypertension and alterations in the renin-angiotensin system of the rat // J. Physiol. 2006. Vol. 575. № 3. P. 855–867.
13. Shin K.-K., Jang Y., Koh S. J., et al. Influence of the *IL-6*–572C>G polymorphism on inflammatory markers according to cigarette smoking in Korean healthy men // Cytokine. 2007. Vol. 39. P. 116–122.
14. Stoner L., Lucero A. A., Palmer B. R., et al. Inflammatory biomarkers for predicting cardiovascular disease // Clinical Biochem. 2013. Vol. 46. P. 1353–1371.
15. Terry C. F., Loukacis V., Green F. R. Cooperative influence of genetic polymorphisms on interleukin-6 transcriptional regulation // J. Biol. Chem. 2000. Vol. 275. P. 18138–18144.
16. Timasheva Y. R., Nasibullin T. R., Zakirova A. N., Mustafina O. E. Association of Interleukin-6, Interleukin-12, and Interleukin-10 Gene Polymorphisms with Essential Hypertension in Tatars from Russia // Biochem. Genet. 2008. Vol. 46. P. 64–74.
17. Vargas-Alarcon G., Ramírez-Bello J., Juárez-Cedillo T., et al. Distribution of the *IL-1RN*, *IL-6*, *IL-10*, *INF-c*, and *TNF-a* gene polymorphisms in the mexican population // Genetic testing and molecular biomarkers. 2012. Vol. 16. № 10. P. 1246–1253.
18. Vázquez-Oliva G., Fernández-Real J. M., Zamora A., et al. Lowering of blood pressure leads to decreased circulating interleukin-6 in hypertensive subjects // J. Hum. Hypertens. 2005. Vol. 19. P. 457–462.
19. Walston J. D., Fallin M. D., Cushman M., et al. *IL-6* gene variation is associated with *IL-6* and C-reactive protein levels but not cardiovascular outcomes in the Cardiovascular Health Study // Hum. Genet. 2007. Vol. 122. P. 485–494.
20. Whiteley W., Jackson C., Lewis S., et al. Inflammatory markers and poor outcome after stroke: A prospective cohort study and systematic review of interleukin-6 // PLoS Med. 2009. Vol. 6. № 9. e1000145. Available at: www.plosmedicine.org/vol6/issue9/
21. Wong L. Y., Leung R. Y., Ong K. L., Cheung B. M. Plasma levels of fibrinogen and C-reactive protein are related to interleukin-6 gene $-572C>G$ polymorphism in subjects with and without hypertension // J. Hum. Hypertens. 2007. Vol. 21. P. 875–882.
22. Zheng G. H., Chen H. Y., Xiong S. Q. Polymorphisms of $-174G>C$ and $-572G>C$ in the interleukin 6 (*IL-6*) gene and coronary heart disease risk: a meta-analysis of 27 research studies // PLoS One. 2012. Vol. 7. e34839. Available at: www.plosone.org/vol7/issue4/

Topchieva L. V., Institute of Biology of Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)
Malysheva I. E., Institute of Biology of Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)
Kurbatova I. V., Institute of Biology of Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)
Korнева V. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Barysheva O. Yu., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

ASSESSMENT OF INTERLEUKIN 6 LEVEL IN HEALTHY AND HYPERTENSIVE SUBJECTS WITH DIFFERENT GENOTYPES BY -572G>C POLYMORPHIC MARKER OF *IL6* GENE

Currently, a large number of studies are concerned with the role of polymorphic variants of the pro inflammatory cytokine gene *Interleukin 6* (*IL6*) in the etiology and pathogenesis of cardiovascular diseases development (CVD). The influence of -174G>C polymorphism in the development of cardiovascular disorders including essential hypertension (EH) is well studied. In this regard -572G>C gene polymorphism of *IL6* is less studied. A number of authors have received conflicting information regarding the content of protein depending on the genotype of this marker and its association with the development of CVD. The aim of the study was to examine existing correlations between the -572G>C polymorphic marker of *IL6* gene and development of EH (stage I–II) (on the example of some national groups of population inhabiting Karelia). ELISA was used to determine the level of *IL6* concentration in plasma. PCR-RFLP analysis was used for the estimation of alleles and genotypes of -572G>C marker of *IL6* gene. The level of interleukin 6 in plasma of healthy subject and hypertensive donors depending on the genotype of the -572G>C polymorphism of *IL6* was investigated. A slight increase of its level in the plasma of patients with essential hypertension was shown. The level of protein in donors with different genotypes on the studied marker did not differ. No association of -572G>C polymorphism of *IL6* gene with essential hypertension development (stage I–II) in Russian, Vepsian, and Karelian residents of Karelia was not found.

Key words: Interleukin 6 (*IL6*), *IL6* gene, polymorphism, essential hypertension

REFERENCES

1. Diagnosis and treatment of hypertension. The Russian recommendation (IV review) / Russian medical society on hypertension. Russian scientific society of Cardiology [Diagnostika i lechenie arterial'noy gipertenzii. Rossiyskie rekomendatsii (IV peresmotr) / Rossiyskoe meditsinskoe obshchestvo po arterial'noy gipertonii. Vserossiyskoe nauchnoe obshchestvo kardiologov]. *Sistemnye gipertenzii*. 2010. № 3. P. 5–26.
2. Bautista L. E., Vera L. M., Arenas I. A., Gamarra G. Independent association between inflammatory markers (C-reactive protein, interleukin-6, and TNF- α) and essential hypertension // *J. Hum. Hypert.* 2005. Vol. 19. P. 149–154.
3. Brull D. J., Montgomery H. E., Sanders J., et al. Interleukin-6 gene -174G>C and -572G>C promoter polymorphisms are strong predictors of plasma interleukin-6 levels after coronary artery bypass surgery // *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol.* 2001. Vol. 21. P. 1458–1463.
4. Chae C. U., Lee R. T., Rifai N., Ridker P. M. Blood pressure and inflammation in apparently healthy men // *Hypertension*. 2001. Vol. 38. P. 399–403.
5. Crosswhite P., Sun Z. RNAi knockdown of Interleukin-6 attenuates cold-induced Hypertension // *Hypertension*. 2010. Vol. 55. № 6. P. 1484–1491.
6. Fernández-Real J. M., Broch M., Vendrell J., et al. Interleukin 6 gene polymorphism and lipid abnormalities in healthy subjects // *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 2000. Vol. 85. P. 1334–1339.
7. Fishman D., Faulds G., Jeffery R., et al. The effect of novel polymorphisms in the interleukin 6 (*IL-6*) gene on *IL-6* transcription and plasma *IL-6* levels, and an association with systemic-onset juvenile chronic arthritis // *J. Clin. Invest.* 1998. Vol. 102. P. 1369–1376.
8. Harrison D. G., Guzik T. J., Lob H., et al. Inflammation, Immunity and Hypertension // *Hypertension*. 2011. Vol. 57. № 2. P. 132–140.
9. Jang Y., Kim O. Y., Hyun Y. J., et al. Interleukin-6-572C>G polymorphism – association with inflammatory variables in Korean men with coronary artery disease // *Translational Research*. 2008. Vol. 151. № 3. P. 154–161.
10. Mendall M. A., Asante M., Ballam L., et al. Relation of serum cytokine concentrations to cardiovascular risk factors and coronary heart disease // *Heart*. 1997. Vol. 78. P. 273–277.
11. Ridker P. M., Hennekens C. H., Buring J. E., Rifai N. C-reactive protein and other markers of inflammation in the prediction of cardiovascular disease in women // *N. Engl. J. Med.* 2000. Vol. 342. № 12. P. 836–843.
12. Samuelsson A.-M., Alexanderson C., Mölne J., et al. Prenatal exposure to interleukin-6 results in hypertension and alterations in the renin-angiotensin system of the rat // *J. Physiol.* 2006. Vol. 575. № 3. P. 855–867.
13. Shin K.-K., Jang Y., Koh S. J., et al. Influence of the *IL-6*-572C>G polymorphism on inflammatory markers according to cigarette smoking in Korean healthy men // *Cytokine*. 2007. Vol. 39. P. 116–122.
14. Stoner L., Lucero A. A., Palmer B. R., et al. Inflammatory biomarkers for predicting cardiovascular disease // *Clinical Biochem.* 2013. Vol. 46. P. 1353–1371.
15. Terry C. F., Loukacis V., Green F. R. Cooperative influence of genetic polymorphisms on interleukin-6 transcriptional regulation // *J. Biol. Chem.* 2000. Vol. 275. P. 18138–18144.
16. Timasheva Y. R., Nasibullin T. R., Zakirova A. N., Mustafina O. E. Association of Interleukin-6, Interleukin-12, and Interleukin-10 Gene Polymorphisms with Essential Hypertension in Tatars from Russia // *Biochem. Genet.* 2008. Vol. 46. P. 64–74.
17. Vargas-Alarcon G., Ramírez-Bello J., Juárez-Cedillo T., et al. Distribution of the *IL-1RN*, *IL-6*, *IL-10*, *INF- γ* , and *TNF- α* gene polymorphisms in the Mexican population // *Genetic testing and molecular biomarkers*. 2012. Vol. 16. № 10. P. 1246–1253.
18. Vázquez-Oliva G., Fernández-Real J. M., Zamora A., et al. Lowering of blood pressure leads to decreased circulating interleukin-6 in hypertensive subjects // *J. Hum. Hypertens.* 2005. Vol. 19. P. 457–462.
19. Walston J. D., Fallin M. D., Cushman M., et al. *IL-6* gene variation is associated with *IL-6* and C-reactive protein levels but not cardiovascular outcomes in the Cardiovascular Health Study // *Hum. Genet.* 2007. Vol. 122. P. 485–494.
20. Whiteley W., Jackson C., Lewis S., et al. Inflammatory markers and poor outcome after stroke: A prospective cohort study and systematic review of interleukin-6 // *PLoS Med.* 2009. Vol. 6. № 9. e1000145. Available at: www.plosmedicine.org/vol6/issue9/
21. Wong L. Y., Leung R. Y., Ong K. L., Cheung B. M. Plasma levels of fibrinogen and C-reactive protein are related to interleukin-6 gene -572C>G polymorphism in subjects with and without hypertension // *J. Hum. Hypertens.* 2007. Vol. 21. P. 875–882.
22. Zheng G. H., Chen H. Y., Xiong S. Q. Polymorphisms of -174G>C and -572G>C in the interleukin 6 (*IL-6*) gene and coronary heart disease risk: a meta-analysis of 27 research studies // *PLoS One*. 2012. Vol. 7. e34839. Available at: www.plosone.org/vol7/issue4/

ЕКАТЕРИНА ВИКТОРОВНА КОЧЕТОВА

кандидат медицинских наук, доцент кафедры госпитальной терапии Медицинского института, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
67011@mail.ru

ДИФфуЗИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ ЛЕГКИХ И РИСК ПЕРЕЛОМОВ У БОЛЬНЫХ ХОБЛ

Целью настоящего исследования было изучение диффузионной способности легких, состояния минеральной плотности костной ткани (МПКТ) и оценка риска переломов по программе FRAX у больных хронической обструктивной болезнью легких (ХОБЛ). Обследованы 125 больных ХОБЛ. Исследуемую группу составляли мужчины, имеющие длительный стаж курения. Оценка десятилетнего риска остеопоротических переломов рассчитывалась с помощью компьютерной программы FRAX. Исследование ФВД проводили на многомодульной установке типа «MasterLab/Jaeger». Исследовалась диффузионная способность легких (DL_{CO}). Результаты: больные с ХОБЛ были разделены на 3 группы: 1-я группа с $DL_{CO} < 40\%$, 2-я группа с $DL_{CO} 40-60\%$, 3-я группа с $DL_{CO} > 60\%$. Показатели диффузионной способности легких DL_{CO} (% д. в.) у пациентов с ХОБЛ при 2-й стадии ХОБЛ составляли $70,62 \pm 20,28$. У пациентов с ХОБЛ 3-й стадии наблюдалось значительное достоверное снижение DL_{CO} (% д. в.) – $53,98 \pm 17,64$ ($p < 0,01$). Самые низкие уровни DL_{CO} (% д. в.) были обнаружены у пациентов ХОБЛ 4-й стадии – $35,97 \pm 15,39$ ($p < 0,01$). В группе больных с резким снижением диффузионной способности легких ($DL_{CO} < 40\%$) у 62,5 % лиц был выявлен высокий риск перелома шейки бедра по программе FRAX. В группе больных с $DL_{CO} 40-60\%$ высокий риск перелома шейки бедра диагностирован у 29,62 %. Таким образом, высокий риск переломов бедра достоверно чаще встречался у пациентов с тяжелой степенью снижения диффузионной способности легких ($p < 0,01$). Коэффициент корреляции между DL_{CO}/VA и риском перелома шейки бедра был $-0,44$ ($p < 0,05$).

Ключевые слова: ХОБЛ, диффузионная способность легких, остеопороз, FRAX

ВВЕДЕНИЕ

Хроническая обструктивная болезнь легких является гетерогенным заболеванием, связанным с несколькими коморбидными состояниями, включая рак легких, сердечно-сосудистые заболевания и остеопороз [1], [2], [3], [4], [5], [6]. Становится все более очевидным, что некоторые сопутствующие заболевания ХОБЛ преимущественно связаны с различными фенотипами ХОБЛ. Например, остеопороз ассоциирован с эмфизематозным фенотипом ХОБЛ [4]. Диффузионная способность легких достаточно информативна при оценке эмфиземы легких [3]. Представляет интерес изучение взаимосвязи между диффузионной способностью легких и состоянием костной системы у больных ХОБЛ. Кроме того, актуальным является оценка риска переломов у больных ХОБЛ с помощью компьютерной программы FRAX.

Современным инструментом оценки 10-летнего риска остеопоротических переломов является компьютерная программа FRAX, предложенная в 2008 году J. A. Kanis. Используя компьютерную программу FRAX, можно рассчитать 10-летнюю вероятность перелома для шейки бедра и других типичных переломов, связанных с остеопорозом [7], [8], [9].

Целью настоящего исследования было изучение диффузионной способности легких, состояния минеральной плотности костной ткани

и оценка риска переломов по программе FRAX у больных ХОБЛ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обследованы 125 больных (48 больных ХОБЛ 2-й стадии, 61 больной ХОБЛ 3-й стадии, 16 больных ХОБЛ 4-й стадии). Исследуемую группу составляли мужчины, имеющие длительный стаж курения (индекс курильщика 240 и стаж курения (пачек/лет) 40). Средний возраст больных ХОБЛ 2-й стадии составлял $57,72 \pm 4,5$ года, средний возраст больных ХОБЛ 3-й стадии был $61,16 \pm 5,7$ года, у пациентов с ХОБЛ 4-й стадии – $61,08 \pm 7,1$ года. При сравнении данных групп достоверных различий по возрасту получено не было ($p > 0,05$).

При постановке диагноза руководствовались классификацией глобальной стратегии диагностики, лечения и профилактики ХОБЛ (Global Initiative for chronic obstructive lung disease – Gold 2009 год).

Из исследования были исключены лица, получавшие в качестве базисной терапии системные глюкокортикоиды и имевшие другие сопутствующие заболевания, которые могли оказывать самостоятельное влияние на метаболизм костной ткани.

Исследование ФВД проводили на многомодульной установке типа «MasterLab/Jaeger». Газообмен оценивался с помощью комплекса

EasyBlood (Gas/Medica), а также пульсоксиметров. Исследовались следующие параметры: статистические объемы легких, параметры кривой поток – объем максимального выдоха, усилие дыхательных мышц вдоха и выдоха, альвеоло-капиллярная диффузия (DL_{CO}), отношение диффузионной способности легких к альвеолярному объему (DL_{CO}/VA), газообмен (PaO_2 , $PaCO_2$, SaO_2), толерантность к нагрузке (6MWD, м), степень одышки (шкала MRC).

Исследование минеральной плотности костной ткани поясничного отдела позвоночника в прямой проекции и проксимального отдела бедренной кости (шейка, область Варда, большой вертел) проводили методом рентгеновской абсорбиометрии на денситометре «Lunar DPX-NT». МПКТ выражали в стандартных отклонениях (SD) от нормативных показателей пиковой костной массы (Т-критерий). Остеопения диагностировалась при значениях Т-критерия от –1 до –2,5 SD, остеопороз – при SD менее –2,5.

Оценка десятилетнего риска остеопоротических переломов рассчитывалась с помощью компьютерной программы FRAX. У всех пациентов оценивали факторы риска остеопороза, включенные в методику оценки десятилетнего риска остеопоротических переломов (FRAX, 2008): возраст, пол, предшествующие переломы; перелом бедренной кости у родителей; курение, злоупотребление алкоголем; прием стероидов, ревматоидный артрит. Для расчета риска по методике FRAX использовали Т-критерий по шейке бедренной кости.

Результаты исследования обрабатывались с помощью IBM-совместимого компьютера с процессором Pentium с использованием Microsoft Office Excel 2003 и пакета статистических программ Statistica 6.0. Перед проведением статистического анализа количественные признаки проверялись на нормальность распределения с помощью критерия Шапиро – Уилка. Для нормально распределенных признаков определялись средние величины и стандартное отклонение ($M \pm s$, где M – среднее арифметическое, s – стандартное отклонение), для признаков, распределенных отлично от нормального, – медиана и интерквартильный размах ($A (L - H)$, где A – медиана, L – нижний квартиль, H – верхний квартиль). Статистический анализ проводился непараметрическими методами – сравнение методами ANOVA Краскела – Уоллиса (для 3 и более независимых групп), Манна – Уитни (для 2 независимых групп), Вилкоксона (для 2 зависимых групп) и анализ корреляции методом Спирмена (О. Ю. Реброва, 2003).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В зависимости от степени снижения диффузионной способности (DL_{CO}) легких больные ХОБЛ были разделены на 3 группы: 1-я группа с легким

снижением $DL_{CO} > 60\%$, 2-я группа характеризовалась средней степенью тяжести снижения DL_{CO} 40–60 %, 3-я группа с тяжелой степенью снижения $DL_{CO} < 40\%$.

Среди больных ХОБЛ 2-й стадии не было выявлено пациентов со снижением $DL_{CO} < 40\%$, у 34,29 % отмечен уровень DL_{CO} 40–60 %, у 65,71 % больных уровень DL_{CO} был $> 60\%$.

В группе больных ХОБЛ 3-й стадии у 33,33 % пациентов выявлено резкое снижение $DL_{CO} < 40\%$, у 42,44 % больных уровень DL_{CO} 40–60 %, у 24,25 % DL_{CO} был $> 60\%$. Таким образом, при ухудшении стадии ХОБЛ достоверно возрастала доля пациентов с тяжелой и средней степенью снижения диффузионной способности легких.

Показатели диффузионной способности легких DL_{CO} (% д. в.) у пациентов с ХОБЛ 2-й стадии составляли $70,62 \pm 20,28$. У пациентов с ХОБЛ 3-й стадии наблюдалось значительное достоверное снижение DL_{CO} (% д. в.) $53,98 \pm 17,64$ ($p < 0,01$). Самые низкие уровни DL_{CO} (% д. в.) были обнаружены у пациентов с ХОБЛ 4-й стадии – $35,97 \pm 15,39$ ($p < 0,01$) (табл. 1).

Показатели DL_{CO}/VA достоверно снижались по мере прогрессирования стадии ХОБЛ от $78,11 \pm 24,96$ (при 2-й стадии ХОБЛ) до $52,84 \pm 29,42$ (при 4-й стадии ХОБЛ) (см. табл. 1).

Таблица 1
Показатели диффузионной способности легких у больных ХОБЛ

DL_{CO}	ХОБЛ 2-я стадия	ХОБЛ 3-я стадия	ХОБЛ 4-я стадия
DL_{CO} (% д. в.)	$70,62 \pm 20,28$	$53,98 \pm 17,64^{**}$	$35,97 \pm 15,39^{**}$
DL_{CO}/VA (% д. в.)	$78,11 \pm 24,96$	$62,36 \pm 17,012^*$	$52,84 \pm 29,42^*$

Примечание. * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$.

В группе больных с резким снижением диффузионной способности легких ($DL_{CO} < 40\%$) у 62,5 % лиц был выявлен высокий риск перелома шейки бедра (> 3) по программе FRAX.

В группе больных с уровнем диффузионной способности легких DL_{CO} 40–60 % высокий риск перелома шейки бедра диагностирован у 29,62 %. Таким образом, высокий риск переломов бедра достоверно чаще встречался у пациентов с тяжелой степенью снижения диффузионной способности легких ($p < 0,001$).

Частота остеопороза шейки бедра, по данным денситометрии, в группе больных ХОБЛ с уровнем $DL_{CO} < 40\%$ составила 46,15 %. В группе больных с DL_{CO} 40–60 % – 19,35 %. При $DL_{CO} > 60\%$ – 3,03 %. Частота остеопороза шейки бедра возрастала по мере снижения диффузионной способности легких.

При исследовании корреляционных связей между DL_{CO}/VA и риском переломов по программе FRAX (табл. 2) установлены достоверные корреляционные связи между DL_{CO}/VA и риском ос-

новных переломов (обратная связь средней силы $r = -0,35$, $p < 0,05$), а также достоверные корреляции между DL_{CO}/VA и риском перелома бедра (обратная связь средней силы $r = -0,44$, $p < 0,05$).

ВЫВОДЫ

1. В группе больных ХОБЛ с тяжелой степенью снижения диффузионной способности легких ($DL_{CO} < 40\%$) у 62,5 % лиц был выявлен высокий риск перелома шейки бедра по программе FRAX.
2. В группе больных со средней степенью снижения диффузионной способности легких ($DL_{CO} 40-60\%$) высокий риск перелома шейки бедра диагностирован у 29,62 %.
3. Частота остеопороза шейки бедра, по данным денситометрии, в группе больных ХОБЛ с уровнем $DL_{CO} < 40\%$ составила 46,15 %.
4. При средней степени снижения DL_{CO} частота остеопороза шейки бедра была 19,35 %.
5. Установлены достоверные корреляционные связи между DL_{CO}/VA и риском переломов.

Таблица 2

Корреляционные связи у больных ХОБЛ

Показатели	Риск основных переломов (FRAX)		Риск перелома шейки бедра (FRAX)	
	r	p	r	p
DL_{CO}/VA	-0,35	$p < 0,05$	-0,44	$p < 0,05$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bon J., Fuhrman C. R., Weissfeld J. L. et al. Radiographic emphysema predicts low bone mineral density in a tobacco-exposed cohort // *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2011. Vol. 183. № 7. P. 885–890.
2. Bon J. M., Zhang Y., Duncan S. R. et al. Plasma inflammatory mediators associated with bone metabolism in COPD // *COPD*. 2010. Vol. 7. № 3. P. 186–191.
3. Gould G. A., Redpath A. T. et al. Lung CT density correlates with measurements of airflow limitation and the diffusing capacity // *Eur. Respir. J.* 1991. Vol. 4. P. 141–146.
4. Han M. K., Agusti A., Calverley P. M. et al. Chronic obstructive pulmonary disease phenotypes: the future of COPD // *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2010. Vol. 182. № 5. P. 598–604.
5. Man W. D., Kemp P., Moxham J., Polkey M. I. Skeletal muscle dysfunction in COPD: clinical and laboratory observations // *Clin. Sci. (Lond.)*. 2009. Vol. 117. № 7. P. 251–264.
6. McAllister D. A., MacLay J. D., Mills N. L. et al. Arterial stiffness is independently associated with emphysema severity in patients with chronic obstructive pulmonary disease // *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2007. Vol. 176. № 12. P. 1208–1214.
7. Kanis J. A., Gluer C. C. For the Committee of Scientific Advisors, International Osteoporosis Foundation. An update on the diagnosis and assessment of osteoporosis with densitometry // *Osteoporosis Int.* 2000. № 11. P. 192–202.
8. Kanis J. A., Black D., Cooper C. et al. A new approach to the development of assessment guidelines for osteoporosis // *Osteoporosis Int.* 2002. № 3. P. 527–536.
9. Kanis J. A., Johnell O., Oden A., Johanson H. and McCloskey E. FRAX™ and the assessment of fracture probability in men and women from the UK // *Osteoporosis Int.* 2008. Vol. 19. № 4. P. 385–397.

Kochetova E. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

PULMONARY DIFFUSING CAPACITY AND RISKS OF FRACTURES IN PATIENTS WITH COPD

The purpose of this research was to study pulmonary diffusing capacity, a condition of bone mineral density (BMD), and fracture risk assessment program FRAX in patients with COPD. 125 patients with chronic obstructive pulmonary disease (COPD) were observed. The investigated group consisted of men with long experience of smoking. The assessment of risks of osteoporotic fractures was calculated by means of computer program FRAX. A research of the external breath function was carried out by means of the multi modular installation of "Master-Lab/Jaeger" type. The pulmonary diffusing capacity (DL_{CO}) was studied. Results of the study were obtained in the course of conducted experiment. The patients were divided into 3 groups: $DL_{CO} < 40\%$, $DL_{CO} 40-60\%$, $DL_{CO} > 60\%$. Indicators of DL_{CO} in patients with COPD of the 2d stage were $70,62 \pm 20,28$. There was a significant decrease of DL_{CO} in the patients with COPD of the 3d stage – $53,98 \pm 17,64$ ($p < 0,01$). The lowest level of DL_{CO} was detected in patients with COPD of the 4d stage $35,97 \pm 15,39$ ($p < 0,01$). A high risk of hip fracture was revealed in 62,5 % of patients with the sharp decrease of DL_{CO} . In the group of patients with $DL_{CO} 40-60\%$ the high risk of hip fracture was diagnosed in 29,62 % of patients. Therefore, a high risk of hip fracture was significantly more common in patients with severe pulmonary diffusion capacity reduction ($p < 0,01$). The correlation coefficient between DL_{CO}/VA and the risk of hip fracture was $r = -0,44$ ($p < 0,05$).

Key words: COPD, pulmonary diffusing capacity, osteoporosis, FRAX

REFERENCES

1. Bon J., Fuhrman C. R., Weissfeld J. L. et al. Radiographic emphysema predicts low bone mineral density in a tobacco-exposed cohort // *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2011. Vol. 183. № 7. P. 885–890.
2. Bon J. M., Zhang Y., Duncan S. R. et al. Plasma inflammatory mediators associated with bone metabolism in COPD // *COPD*. 2010. Vol. 7. № 3. P. 186–191.
3. Gould G. A., Redpath A. T. et al. Lung CT density correlates with measurements of airflow limitation and the diffusing capacity // *Eur. Respir. J.* 1991. Vol. 4. P. 141–146.
4. Han M. K., Agusti A., Calverley P. M. et al. Chronic obstructive pulmonary disease phenotypes: the future of COPD // *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2010. Vol. 182. № 5. P. 598–604.
5. Man W. D., Kemp P., Moxham J., Polkey M. I. Skeletal muscle dysfunction in COPD: clinical and laboratory observations // *Clin. Sci. (Lond.)*. 2009. Vol. 117. № 7. P. 251–264.
6. McAllister D. A., MacLay J. D., Mills N. L. et al. Arterial stiffness is independently associated with emphysema severity in patients with chronic obstructive pulmonary disease // *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2007. Vol. 176. № 12. P. 1208–1214.
7. Kanis J. A., Gluer C. C. For the Committee of Scientific Advisors, International Osteoporosis Foundation. An update on the diagnosis and assessment of osteoporosis with densitometry // *Osteoporosis Int.* 2000. № 11. P. 192–202.
8. Kanis J. A., Black D., Cooper C. et al. A new approach to the development of assessment guidelines for osteoporosis // *Osteoporosis Int.* 2002. № 3. P. 527–536.
9. Kanis J. A., Johnell O., Oden A., Johanson H. and McCloskey E. FRAX™ and the assessment of fracture probability in men and women from the UK // *Osteoporosis Int.* 2008. Vol. 19. № 4. P. 385–397.

Поступила в редакцию 02.02.2015

ЮРИЙ БОРИСОВИЧ ГОЛЬДШТЕЙН

кандидат технических наук, профессор кафедры общетехнических дисциплин Института лесных, инженерных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
ybgol@psu.karelia.ru

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ

Напряженное состояние стержневой конструкции характеризуется ее потенциальной энергией деформации. Интегральная формула этой энергии при наличии в составе конструкции тонкостенных стержней насчитывает 11 слагаемых, каждое из которых содержит хотя бы одну геометрическую характеристику поперечного сечения стержня. В государственных стандартах прокатных профилей, разработанных более двадцати лет тому назад, приводятся значения далеко не всех требуемых для современных расчетов характеристик сечения. Для определения не попавших в стандарты величин предлагается использовать приближенные формулы, имеющиеся в учебной и справочной литературе. В настоящей работе предложена методика вычисления геометрических характеристик, учитывающая реальное очертание контура сечения, и приводится сопоставление полученных результатов с результатами, найденными по приближенным формулам. Различие для двутавров и швеллеров, имеющих наклон внутренних граней полок, оказалось весьма существенным.

Ключевые слова: геометрические характеристики, тонкостенные стержни, коэффициенты формы, наклонные грани

Призматические тонкостенные стержни открытого профиля широко используются в каркасах многопролетных и многоэтажных зданий, а также в качестве отдельных элементов сооружений. Однако полноценные силовые расчеты пространственных конструкций, содержащих тонкостенные стержни, до сих пор выполнять не удается. Точнее, нет возможности корректно рассчитать многостержневую конструкцию, ибо анализ напряженно-деформированного состояния отдельного элемента всегда можно выполнить численно, перейдя, например, от модели стержня к модели складчатой оболочки либо применив прием, изложенный в монографии [1; 381]. Что же касается введения в модель конструкции узла с семью степенями свободы, то пока в этом направлении продвинуться не удалось. Поэтому имеет смысл заняться предварительными исследованиями, направленными на анализ процедур, которые неизбежно будут использоваться при оценке работоспособности конструкций, испытывающих стесненное кручение в совокупности с другими деформациями. В частности, интерес представляет процедура вычисления перемещений по формуле Мора. Эта формула может быть получена по теореме Кастильяно, если известно выражение для потенциальной энергии W деформации конструкции. Полная формула для энергии W на страницах публикаций по механике твердого деформируемого тела – гость крайне редкий, хотя вывод ее не такой уж и сложный. Найти ее можно в монографии [3; 336]. Приводимая ниже запись несколько отличается от записи, содержащейся в публикации [3]. Итак,

$$W = \frac{1}{2} \int_L \left(\frac{N^2}{EF} + \frac{M_z^2}{EI_z} + \frac{M_y^2}{EI_y} + \frac{M_x^2}{GI_x} + \frac{B_\omega^2}{EI_\omega} + \frac{\mu_z Q_z^2}{GF} + \frac{\mu_y Q_y^2}{GF} + \frac{\mu_\omega M_\omega^2}{GI_\omega^*} + \frac{\mu_{zy} Q_y Q_z}{GF} + \frac{\mu_{z\omega} Q_y M_\omega}{GS_z^*} + \frac{\mu_{y\omega} Q_z M_\omega}{GS_y^*} \right) ds. \quad (1)$$

Этот интеграл берется по всему осевому контуру L конструкции.

Обозначения в формуле (1) для всех усилий, площади поперечного сечения, моментов инерции и коэффициентов формы традиционные. Через $I_\omega^* = I_\omega / F$ обозначен удельный секториальный момент инерции сечения, а S_z^* и S_y^* – наибольшие по модулю значения осевых статических моментов сечения. Коэффициенты формы поперечного сечения определяются следующими интегралами:

$$\begin{aligned} \mu_z &= \frac{F}{I_z^2} \int_F \frac{S_z^2}{\delta^2} dF, \mu_y = \frac{F}{I_y^2} \int_F \frac{S_y^2}{\delta^2} dF, \mu_\omega = \frac{1}{FI_\omega} \int_F \frac{S_\omega^2}{\delta^2} dF, \\ \mu_{yz} &= \frac{2F}{I_y I_z} \int_F \frac{S_y S_z}{\delta^2} dF, \mu_{y\omega} = -\frac{2S_y^*}{I_y I_\omega} \int_F \frac{S_y S_\omega}{\delta^2} dF, \quad (2) \\ \mu_{z\omega} &= -\frac{2S_z^*}{I_z I_\omega} \int_F \frac{S_z S_\omega}{\delta^2} dF. \end{aligned}$$

Толщина δ скорлупы тонкостенного сечения может быть функцией координат y и z , тогда как во всех других публикациях, в том числе и в книге [3], размер δ считается неизменным, по крайней мере в пределах любого характерного участка профиля.

Последние три слагаемые в формуле (1) являются следствием возведения в квадрат определенной суммы касательных напряжений. Множитель 2 при парных произведениях отнесен к коэффициентам формы (см. формулы (2)). К двум последним коэффициентам формы отнесен также знак минус, порождаемый отрицательным знаком в формуле, связывающей касательные напряжения стесненно-го кручения с изгибно-крутильным моментом M_{ω} .

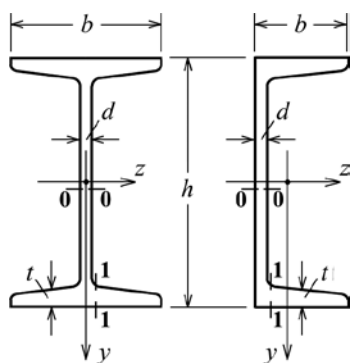


Рис. 1. Исследуемые профили

Можно показать, что для поперечных сечений, имеющих две оси симметрии (в частности, для двутавра, изображенного на рис. 1), выполняются равенства: $\mu_{yz} = \mu_{y\omega} = \mu_{z\omega} = 0$, а при наличии лишь одной оси симметрии в нуль обращаются только два коэффициента формы. Для швеллера на рис. 1 это будут коэффициенты μ_{yz} и $\mu_{z\omega}$.

Вычисления геометрических характеристик прокатных профилей громоздки, поэтому желательно выполнить их раз и навсегда и внести результаты в таблицы ГОСТ. Так это всегда и делалось, но, к сожалению, в те времена, когда речь шла лишь о расчетах на изгиб. Однако в упомянутых таблицах отсутствуют данные не только о всех геометрических характеристиках, связанных со свободным и стесненным кручением, но даже о тех коэффициентах формы сечения, которые имеют отношение к изгибу. Конечно, деформация сдвига влияет на значение потенциальной энергии деформации намного меньше, нежели деформация изгиба, но все же сдвиг для тонкостенных сечений чувствительнее, чем для сечений массивных. В любом случае, вопрос о том, какие слагаемые в формуле (1) играют существенную роль, а какими можно пренебречь, требует исследования. Найти какие-либо сведения на этот счет в литературе автору данной работы не удалось.

Однако заняться выяснением роли каждого из слагаемых, входящих в правую часть формулы (1), можно будет только после получения ответа

на вопрос, насколько корректна при вычислении геометрических характеристик сечения замена стандартного контура полки на прямоугольный контур. Дело в том, что при такой замене существенно смещается центр тяжести полки у швеллера и полуполки у двутавра. Особенно существенно это обстоятельство проявляется для профилей, внутренние грани полки которых имеют наклон. Смещение же центра тяжести сказывается на статических моментах и моментах инерции относительно центральных осей, и в первую очередь – относительно оси Oy . Все это в той или иной степени отразится на геометрических характеристиках сечения. (Кроме тех немногих, которые указаны в стандарте и пересчету не подлежат.) Все, что излагается ниже, посвящено анализу именно этой задачи.

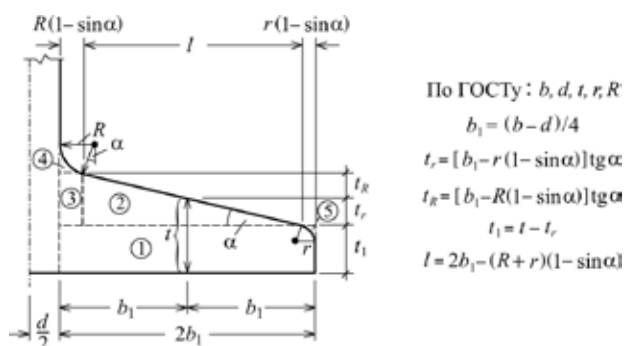


Рис. 2. Разбиение полки двутавра (швеллера) на простые фигуры

Исследованию подлежали профили двутавра и швеллера с полками, внутренние грани которых имеют наклон (ГОСТ 8239–89). Полка профиля разбивается на 5 частей так, как это показано на рис. 2. По данным, представленным на рис. 2 и 3, все геометрические характеристики сечения могут быть определены при условии, что известен угол α . Однако в стандартах этот угол не указан. О том, как он в настоящей работе определялся только по тем данным, которые указаны в ГОСТ, рассказывается ниже. Пока же приводятся формулы, имеющие отношение к рис. 3.



Рис. 3. Геометрия криволинейных треугольников

Через f на рисунке обозначена площадь криволинейного треугольника, который дополняет

закругления профиля до квадрата; система локальных координат размещена в центре тяжести фигуры. Задаваемые стандартом радиусы R и r внутреннего и внешнего закруглений полков представлены в приводимых ниже формулах символом ρ . Итак:

$$f = k\rho^2, \quad k = 1 - \frac{\pi}{4} = 0,2146; \quad c = m\rho,$$

$$m = \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \frac{1}{k} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{2}{3} \right) \right] = 0,2234;$$

$$I_v = I_u = e\rho^4, \quad e = \frac{1}{3} - \frac{\pi}{16} - k(1-m)^2 = 7,545 \cdot 10^{-3};$$

$$\Delta f = g\rho^2, \quad g = 1 - \cos \alpha + \frac{1}{4} \sin 2\alpha - \frac{\pi \alpha^0}{360};$$

$$c_z = m_z \rho, \quad m_z = \frac{g}{k-g} \cdot (0,5 - m); \quad c_y = m_y \rho,$$

$$m_y = \frac{g}{k-g} \cdot (m - 0,5 + 0,5 \cos \alpha).$$

Теперь можно обратиться к подбору угла α , осуществляемому в два этапа. В первом приближении величина тангенса этого угла подбиралась так, чтобы площадь полки, найденная как сумма площадей всех пяти ее участков (при $F_5(\alpha) < 0$), равнялась величине, полученной по имеющимся в стандарте значениям площади F сечения и его размеров h и d :

$$\sum_{i=1}^5 F_i(\alpha) = 0,25 \cdot (F - h \cdot d).$$

Затем величина $\operatorname{tg} \alpha$ варьировалась таким образом, чтобы погрешности величин F , I_y , I_z и $\max S_z$ в процентном отношении сохранялись на уровне погрешностей округления этих же величин в стандарте. В результате площадь F сечения, найденная по подобранному углу α , отличалась от указанной в самом стандарте величины в среднем на 0,1 % при наибольшем отклонении для одного из 23 профилей стандарта на 0,39 % и наименьшем – на 0,01 %. Усреднение проводилось по модулям процентных отклонений. Эти же показатели для остальных приведенных в стандартах величин таковы: для $\max S_z$ – 0,07 %, 0,31 %, 0,01 %; для осевого момента инерции I_y – 0,16 %, 0,83 %, 0,01 %; для осевого момента инерции I_z – 0,11 %, 0,28 %, 0,01 %.

Путь к вычислению всех тех геометрических характеристик поперечных сечений двутавра и швеллера, которые в стандартах не упомянуты, открыт. Кроме шести коэффициентов формы, определяемых формулами (2), сюда относятся секториальный момент инерции, максимальное по модулю значение секториального статического момента, а также момент инерции свободного

кручения. Для швеллера число геометрических характеристик чуть больше: необходимо еще указать положение центра изгиба и значения двух характерных ординат эпюры секториальных площадей. Эти величины, как и коэффициенты (2), находят, вычисляя определенные интегралы, содержащие под своим знаком толщину скорлупы δ . Если грани полков имеют наклон, то толщина скорлупы в пределах полки является функцией координаты z . Вычисления этих интегралов выполнялись при замене реального профиля полки редуцированным трапецевидным профилем, показанным на рис. 4. По рисунку видно, что отличие редуцированного сечения от реального заключается только в том, что в первом из них отсутствуют внутреннее и внешнее закругления.

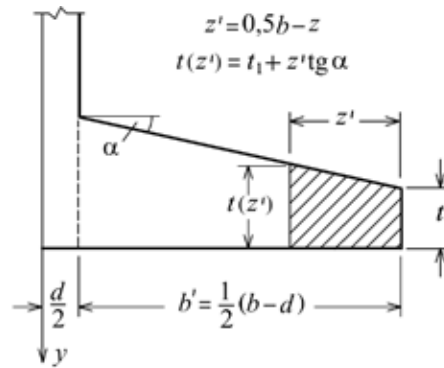


Рис. 4. Спрямолинейная внутренняя грань правой части полки двутавра

При помощи рис. 4 вычислялась, в частности, и доля момента инерции свободного кручения, приходящаяся на половину полки:

$$I_x^{sh} = \frac{1}{3} b' \int_0^{b'} (t_1 + z' \operatorname{tg} \alpha)^3 dz' =$$

$$= \frac{b'}{3} (t_1^3 + 1,5 t_1^2 b' \operatorname{tg} \alpha + t_1 b'^2 \operatorname{tg}^2 \alpha + 0,25 b'^3 \operatorname{tg}^3 \alpha).$$

Полученные значения моментов инерции свободного кручения двутавра и швеллера следует увеличить соответственно в 1,2 и 1,12 раза.

Несколько сложнее находить коэффициенты формы сечения. Так, доля коэффициента μ_z , обусловленная действием касательных напряжений изгиба относительно оси Oz в половине полки двутавра, определяется интегралом

$$I^{sh} = \int_F \frac{S_z^2}{t^2(z')} dF = \int_0^{b'} \frac{S_z^2}{t(z')} dz'$$

при

$$t(z') = t_1 + z' \operatorname{tg} \alpha,$$

$$S(z') = \frac{t_1 z'}{2} (h - t_1) + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{4} (h - 2t_1) z'^2 - \frac{\operatorname{tg}^3 \alpha}{6} z'^3.$$

Геометрические характеристики двутаврового профиля, у которого внутренние грани полок имеют наклон (ГОСТ 8239–89)

I	tgα	I _x	max S _y	max S _ω	I _ω	μ _z	μ _y	μ _ω
		см ⁴	см ³	см ⁴	см ⁶			
10	0,1530	2,7942 (-13,0)	5,3025 (6,8)	11,890 (6,2)	386,04 (11,3)	3,0142 (11,3)	1,2593 (34,3)	0,2070 (21,8)
12	0,1361	2,8009 (-15,3)	7,1868 (8,2)	20,630 (2,1)	941,64 (7,6)	3,0480 (6,9)	1,3493 (36,4)	0,2245 (24,1)
14	0,1334	3,5122 (-15,8)	9,4855 (9,3)	30,226 (9,5)	1833,6 (16,4)	2,7395 (-1,2)	1,1819 (47,4)	0,2389 (28,2)
16	0,1370	4,5083 (-18,3)	11,974 (10,6)	43,226 (12,6)	3315,5 (20,7)	2,6501 (-3,6)	1,0914 (53,7)	0,2464 (31,8)
18	0,1305	5,5658 (-18,0)	15,252 (11,0)	71,855 (-1,9)	6971,8 (4,3)	3,2238 (15,0)	1,4023 (42,6)	0,2700 (28,2)
18a	0,1308	6,5872 (-19,6)	18,927 (12,4)	90,540 (-1,6)	9694,5 (5,2)	3,6085 (16,1)	1,2966 (47,0)	0,3011 (30,8)
20	0,1352	7,1051 (-20,9)	19,177 (12,7)	97,270 (3,6)	11564 (11,1)	3,0861 (10,1)	1,2238 (52,2)	0,2804 (33,1)
20a	0,1286	8,1987 (-21,2)	23,495 (13,4)	111,70 (5,8)	15323 (14,0)	3,2747 (7,9)	1,1217 (55,7)	0,3110 (34,6)
22	0,1317	8,1051 (-20,9)	23,872 (13,3)	127,59 (9,0)	18276 (17,9)	2,8891 (4,1)	1,0959 (58,4)	0,2905 (36,1)
22a	0,1273	8,7209 (-22,4)	28,706 (14,2)	161,09 (5,0)	25163 (13,5)	3,3176 (9,7)	1,1234 (57,0)	0,3231 (35,9)
24	0,1317	11,458 (-19,8)	28,644 (12,7)	163,23 (10,9)	26722 (19,7)	2,8099 (1,1)	1,0760 (58,1)	0,2811 (35,2)
24a	0,1273	13,370 (-20,1)	34,580 (13,2)	207,23 (6,3)	36895 (14,5)	3,2545 (7,3)	1,1184 (55,8)	0,3102 (34,3)
27	0,1290	14,199 (-20,5)	34,809 (13,2)	249,32 (-0,1)	50359 (7,2)	3,1102 (14,9)	1,3334 (50,6)	0,2930 (32,7)
27a	0,1246	16,725 (-20,6)	41,943 (13,5)	297,01 (1,6)	64598 (9,2)	3,2468 (13,2)	1,2576 (52,7)	0,3165 (33,3)
30	0,1299	18,049 (-21,3)	42,112 (13,9)	331,98 (1,4)	80298 (9,4)	2,9268 (13,6)	1,3135 (53,7)	0,2910 (34,7)
30a	0,1242	21,352 (-21,0)	50,724 (13,8)	378,09 (7,6)	97757 (16,4)	2,9166 (6,3)	1,1450 (58,3)	0,3097 (36,1)
33	0,1301	24,202 (-19,5)	50,312 (12,8)	409,15 (6,9)	112920 (15,2)	2,6184 (6,2)	1,2320 (55,8)	0,2707 (34,6)
36	0,1325	33,157 (-19,9)	59,683 (12,3)	571,09 (-1,6)	179650 (5,1)	2,8593 (15,7)	1,4751 (46,5)	0,2602 (30,5)
40	0,1311	42,937 (-18,6)	72,552 (12,1)	756,50 (-0,1)	282850 (6,8)	2,6529 (13,7)	1,4862 (47,8)	0,2526 (31,0)
45	0,1344	58,688 (-18,7)	85,299 (11,5)	960,65 (3,1)	417520 (10,2)	2,4079 (9,3)	1,4683 (49,0)	0,2307 (31,0)
50	0,1334	78,369 (-17,1)	104,13 (11,1)	1189,2 (11,9)	607920 (20,3)	2,0558 (-1,3)	1,3124 (55,4)	0,2170 (33,2)
55	0,1310	106,43 (-15,4)	128,17 (10,4)	1695,4 (5,1)	1017400 (12,2)	2,1534 (5,8)	1,5326 (48,1)	0,2115 (29,8)
60	0,1334	144,38 (-15,7)	154,94 (10,2)	2386,6 (-2,0)	1657700 (4,3)	2,3028 (13,7)	1,7760 (40,9)	0,2049 (27,7)

Интеграл I^h вычислялся по формуле Симпсона при разбиении длины полуполки на 16 равных частей.

Результаты вычислений отсутствующих в стандарте геометрических характеристик двутавровых сечений с полками, внутренние грани которых имеют наклон, сведены в таблице. Сразу за значениями вычисленных величин в круглых скобках указаны их отклонения (в процентах) от тех значений, которые получаются при замене трапециевидных полок на прямоугольные. Знак плюс у погрешности означает, что данная геометрическая характеристика у профиля с полками постоянной толщины больше. Как видно, различия между геометрическими характеристиками сопоставляемых профилей существенны, а в большинстве случаев даже очень существенны. Это, как уже отмечалось выше, объясняется в первую очередь тем, что положения центров тяжести полок швеллера (или полуполок двутавра) у трапеции и прямоугольника заметно отличаются друг от друга даже тогда, когда угол α невелик. Следовательно, заметно будут отличаться друг

от друга и значения осевых статических моментов отсеченных частей сопоставляемых сечений. А так как эти моменты входят, например, во все коэффициенты формы сечения в квадрате, то погрешность при вычислении только усугубляется.

Любопытно следующее. В задачах плоского изгиба коэффициент μ_z , который учитывает влияние формы сечения на составляющую потенциальной энергии деформации, порождаемую сдвигом, предлагается вычислять по приближенной формуле: $\mu_z = F/F^{wl}$, где F – площадь всего сечения, а F^{wl} – площадь стенки двутавра (см., например, [2; 32]). Результаты вычислений по этой формуле сильно отличаются от тех, которые приводятся в таблице. Но они прекрасно отвечают значениям коэффициента μ_z , полученным в предположении, что грани полок наклонов не имеют.

В заключение можно отметить, что для контроля все геометрические характеристики сечений со спрямленными полками вычислялись как самостоятельно, так и при помощи общих формул, в которых принималось, что угол α равен нулю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Киев: Сталь, 2002. 596 с.
2. Рабинович И. М. Курс строительной механики. Ч. II. М.: Госстройиздат, 1954. 544 с.
3. Сливкер В. И. Строительная механика. Вариационные основы. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2005. 708 с.

Gol'dshteyn Yu. B., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

GEOMETRICAL CHARACTERISTICS OF THIN-WALLED RODS OF OPEN PROFILE

The stress state of the rod structure is characterized by its potential deformation energy. When thin-walled rods are presented in the structure, the integral formula for this energy consists of 11 terms, and each of them contains at least one geometrical characteristic of the rods' cross-section. The state standards for rolled cross-sections, developed more than 20 years ago, do not contain all cross-section values required for modern computations. To determine characteristics that were not included into the state standards' description a few approximation formulas existing in academic and reference books are proposed. A new method of cross-section geometrical characteristics' calculation is proposed. This method takes into account the real shape of the section profile. The obtained results are compared with the results calculated by approximation formulas. Differences for the I-beams and C-beams with sloped internal faces turned out to be very significant.

Key words: geometrical characteristics, thin-walled rods, shape coefficients, sloped faces

REFERENCES

1. Perel'muter A. V., Slivker V. I. *Raschetnye modeli sooruzheniy i vozmozhnost' ikh analiza* [The estimated model structures and their analysis]. Kiev, Stal' Publ., 2002. 596 p.
2. Rabinovich I. M. *Kurs stroitel'noy mekhaniki* [The course of structural mechanics]. Part II. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1954. 544 p.
3. Slivker V. I. *Stroitel'naya mekhanika. Variatsionnye osnovy* [Structural mechanics. The variational framework]. Moscow, Izd-vo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov Publ., 2005. 708 p.

Поступила в редакцию 05.02.2015

БОРИС ВАСИЛЬЕВИЧ МИРЯЕВ

кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций Инженерно-строительного института, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (Пенза, Российская Федерация)
office@pguas.ru

АННА БОРИСОВНА МИРЯЕВА

студентка VI курса факультета заочного и открытого образования, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (Пенза, Российская Федерация)
office@pguas.ru

ОПТИМИЗИРОВАННАЯ СТРОИТЕЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ СЕТЧАТОГО ДЕРЕВЯННОГО КУПОЛА

Излагается методика решения задачи условной оптимизации сетчатых деревянных куполов по критерию стоимости. Получены оптимальные параметры купола с ребрами из древесины. Рассмотрено применение оптимизированной конструкции в качестве купольного покрытия кафе.

Ключевые слова: сетчатый деревянный купол, оптимизация

Сетчатые купола относятся к пространственным конструкциям покрытий, применение которых в ряде случаев обеспечивает как архитектурную выразительность, так и рациональное использование строительных материалов [5], [9]. Некоторые вопросы прочности, жесткости и устойчивости таких конструкций исследованы в работах [6], [7]. В данной статье рассматривается методика оптимизации данных конструкций с металлическими узловыми деталями по критерию стоимости. При этом геометрическая схема сетчатых деревянных куполов строится на основе правильных многогранников или правильной сети Чебышева по аналогии с металлическими куполами [2; 275–279]. Несущими элементами покрытия являются прямолинейные стержни (ребра). Ребра соединены в узлах на сферической поверхности и образуют сеть, ячейки которой близки к равносторонним треугольникам (рис. 1).

Несущие ребра при сравнительно небольшой их длине изготавливаются из цельной древесины (рис. 2), в остальных случаях применяется клееная древесина [5]. Деревянные ребра соединяются в узлах, как правило, с помощью стальных узловых деталей.

Задача оптимизации по критерию стоимости рассматриваемых сетчатых куполов относится к классу задач условной оптимизации. В данном случае поиск глобального экстремума был выполнен методом сканирования [5], [6]. Исследование проводилось для куполов из цельной древесины при диаметре 20–30 м и для куполов из клееной древесины при диаметре 35–50 м с помощью специальной программы «Optcupol» [5]. Во всех случаях отношение высоты к диаметру купола H/D принималось равным 0,25. Величина снеговой нагрузки соответствовала III снеговому району. Геометрическая схема купольных покрытий формировалась на основе правильной сети Чебышева при количестве ярусов от 4 до 7. В качестве целевой функции была принята стоимость купола $C_{куп} = C_d + C_{уз} + C_m$, где C_d , $C_{уз}$ и C_m – стоимость деревянных элементов, стальных узловых деталей и монтажа купола соответственно. В качестве ограничений приняты условия прочности деревянных элементов и стальных узловых деталей, условия жесткости деревянных элементов и условие местной устойчивости купола [5]. Параметры, характеризующие геометрическую поверхность купола, являются взаимосвязанными величинами. Количество и длина несущих



Рис. 1. Купольное покрытие кафе диаметром 20 м

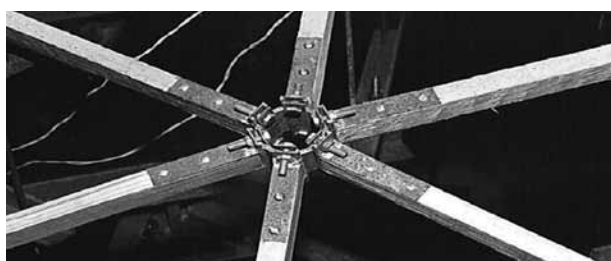


Рис. 2. Узел соединения ребер купола

элементов будут зависеть от выбранной геометрической схемы купола. Размеры узловой детали определяются размерами несущих ребер. Исходя из этих соображений, в качестве варьируемых параметров были приняты следующие величины: $l_{\text{ср}}/R$ – средняя относительная длина несущих ребер; h – высота сечения несущих ребер; b – ширина сечения несущих ребер.

В ходе исследования количество ярусов варьировалось от 4 до 7, при этом средняя относительная длина ребер менялась от 0,24 до 0,14. Параметры b и h изменялись дискретно, так как регламентируются сортаментом пиломатериалов. Ширина ребер из цельной древесины варьируется от 4 до 15 см, высота – от 5 до 25 см. Для клееных ребер ширина была принята равной ширине доски минус 1 см (припуск на фрезерование) и варьировалась от 6,5 до 24 см. При этом градация изменения высоты сечения принята равной 33 мм, что соответствует толщине фрезерованной доски [5].

В расчетах были приняты следующие значения стоимости материалов конструкций с учетом изготовления: 20000 руб./м³ – для клееной древесины, 7000 руб./м³ – для цельной древесины, 32000 руб./т – для стали. Расчетное сопротивление древесины назначалось как для древесины 2-го сорта с учетом коэффициентов условий работы. Предельная величина относительного прогиба принята: для несущих балок – $l_0/300$, для прогонов – $l_0/200$. По итогам исследования были определены оптимальные геометрические параметры несущих ребер куполов. В частности, среднюю длину ребер из цельной древесины рекомендовано назначать равной $(0,19 \div 0,21) R$ при $h = (1/19 \div 1/21) l_{\text{ср}}$. С момента проведенного исследования существенно возросли цены на материалы и на изготовление конструкций. Так, например, для г. Пензы в настоящее время стоимость цельнодеревянных строганых балок равна в среднем 10500–11500 руб./м³, а стоимость стальных узловых деталей – 72000–80000 руб./т. Учитывая,

что цены на деревянные и стальные изделия возросли в разной степени, было проведено дополнительное исследование, результаты которого были использованы при разработке эскизного проекта купольного покрытия кафе (см. рис. 1). В соответствии с заданием на проектирование кафе диаметр купола был принят равным 20 м. Расчеты выполнялись по вышеописанной методике, дополнительным варьируемым параметром являлось отношение H/D , которое изменялось от 1/6 до 1/4. Стоимости цельнодеревянных ребер и стальных узловых деталей были приняты равными 11000 руб./м³ и 76000 руб./т соответственно.

В результате исследования получены оптимальные параметры купола: $H/D = 0,22–0,24$, количество ярусов 4, средняя длина несущих ребер $l_{\text{ср}} = (0,20 \div 0,21) R$. Высота проектируемого купола была назначена равной 4,5 м при количестве ярусов 4. Поперечное сечение деревянных ребер было принято 45×195 мм. Ребра раскреплялись посередине треугольными связями и соединялись с узловой деталью с помощью фасонных шайб, накладок и приваренных к ним шпилек. Узловая деталь была выполнена из отрезка трубы 159×5 , что позволило соединить ребра под различными углами.

Разработанное узловое соединение прошло экспериментальную проверку при испытаниях крупномасштабной модели и фрагментов купольного покрытия [8]. Новизна соединения подтверждена авторским свидетельством на изобретение № 1652481. Экспериментально-теоретические исследования деревянных элементов купола подтвердили возможность их практического применения [5], [7]. Здание с купольным покрытием (см. рис. 1) может быть рекомендовано, например, для использования в объектах инфраструктуры туристских комплексов [4], а задачи оптимизации могут быть темой научно-исследовательской работы студентов [1], [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев С. Б., Девятникова Л. А., Колесников Г. Н., Симонова И. В. Технологические решения для реализации потенциала ресурсосбережения при переработке круглых лесоматериалов на щепу. Петрозаводск, 2013. 92 с.
2. Горев В. В., Уваров Б. Ю., Филиппов В. В. и др. Металлические конструкции. Т. 2: Конструкции зданий. М.: Высш. шк., 2002. 528 с.
3. Зайцева М. И., Девятникова Л. А., Никонова Ю. В., Колесников Г. Н. Информационные технологии в научно-исследовательской работе студентов технических факультетов // Информационная среда вуза XXI века: Материалы VII Междунар. научно-практ. конф. Петрозаводск, 2013. С. 86–89.
4. Колесников Н. Г., Петрова Н. В., Шевченко В. И. Объекты инфраструктуры туризма как элементы туристских дестинаций // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 9–3. С. 173–174.
5. Миряев Б. В. Методы расчета и конструктивные решения сетчатых куполов из дерева и пластмасс. Пенза, 2005. 150 с.
6. Миряев Б. В., Данилова М. В. Оптимизация основных несущих элементов сетчатых деревянных куполов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2003. № 12. С. 4–7.
7. Миряев Б. В., Толушов С. А. Экспериментально-теоретические исследования сжато-изгибаемых деревянных элементов купола в предельном состоянии // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. № 1 (661). С. 108–116.
8. Миряев Б. В., Толушов С. А., Савенков А. А. Кратковременные испытания модели сетчатого купола // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: Сб. ст. VIII Междунар. научно-техн. конф. / ПГУАС. Пенза, 2008. С. 141–146.

9. Malek S., Wierzbicki T., Ochsendorf J. Buckling of spherical cap gridshells: A numerical and analytical study revisiting the concept of the equivalent continuum // *Engineering Structures*. 2014. Vol. 75. P. 288–298.

Miryaev B. V., Penza State University of Architecture and Construction (Penza, Russian Federation)

Miryaeva A. B., Penza State University of Architecture and Construction (Penza, Russian Federation)

OPTIMIZED CONSTRUCTION DESIGN OF WOODEN DOME GRID

A technique for solving the problem of constrained optimization of mesh wooden domes depending upon their cost is presented. The optimal parameters of the dome are defined. Employment of the dome's optimized design for the purpose of roofing an adjacent catering area is offered. The variable parameter is the ratio of the height to the diameter: from 1/6 to 1/4.

Key words: optimization, mesh wooden dome

REFERENCES

1. Vasil'ev S. B., Devyatnikova L. A., Kolesnikov G. N., Simonova I. V. *Tekhnologicheskie resheniya dlya realizatsii potentsiala resursosberezheniya pri pererabotke kruglykh lesomaterialov na shchepu* [Technological solutions for the realization of potential research in the processing of round timber to chips]. Petrozavodsk, 2013. 92 p.
2. Gorev V. V., Uvarov B. Yu., Filippov V. V. i dr. *Metallicheskie konstruksii. Tom 2: Konstruksii zdaniy* [Metal structures. Volume 2: Construction of Buildings]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2002. 528 p.
3. Zaytseva M. I., Devyatnikova L. A., Nikonova Yu. V., Kolesnikov G. N. Information technology in researches of engineering students [Informatsionnye tekhnologii v nauchno-issledovatel'skoy rabote studentov tekhnicheskikh fakul'tetov]. *Informatsionnaya sreda vuza XXI veka: Materialy VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [University Infomedia XXI Century. Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference]. Petrozavodsk, 2013. P. 86–89.
4. Kolesnikov N. G., Petrova N. V., Shevchenko V. I. Tourism infrastructure elements as tourist destinations [Ob'ekty infrastruktury turizma kak elementy turistskikh destinatsiy]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research]. 2014. № 9–3. P. 173–174.
5. Miryaev B. V. *Metody rascheta i konstruktivnye resheniya setchatykh kupolov iz dereva i plastmass* [Methods of calculation and design solutions of reticulated domes made of wood and plastics]. Penza, 2005. 150 p.
6. Miryaev B. V., Danilova M. V. Optimization of the main load-bearing elements of the mesh wooden domes [Optimizatsiya osnovnykh nesushchikh elementov setchatykh derevyannykh kupolov]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo* [Proceedings of the higher educational institutions]. 2003. № 12. P. 4–7.
7. Miryaev B. V., Tolushov S. A. Experimental and theoretical studies of compressed-bent wooden elements of the dome in the ultimate limit state [Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya szhato-izgibaemykh derevyannykh elementov kupola v predel'nom sostoyanii]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo* [Proceedings of the higher educational institutions. building]. 2014. № 1 (661). P. 108–116.
8. Miryaev B. V., Tolushov S. A., Savenkov A. A. Short tests of the model mesh dome [Kratkovremennyye ispytaniya modeli setchatogo kupola]. *Effektivnye stroitel'nye konstruksii: teoriya i praktika: Sbornik statey VIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [The collection of articles of the VIII International Scientific Conference: Effective constructions: theory and practice] / PGUAS. Penza, 2008. P. 141–146.
9. Malek S., Wierzbicki T., Ochsendorf J. Buckling of spherical cap gridshells: A numerical and analytical study revisiting the concept of the equivalent continuum // *Engineering Structures*. 2014. Vol. 75. P. 288–298.

Поступила в редакцию 12.01.2015

АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ПЕККОЕВ

кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник лаборатории динамики и продуктивности таежных лесов, Институт леса Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
pek-aleksei@list.ru

ВИКТОР МИХАЙЛОВИЧ ЛУКАШЕВИЧ

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и организации лесного комплекса Института лесных, инженерных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
lvn-dov@mail.ru

АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ СЕЛИВЕРСТОВ

кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных и технологических машин и оборудования Института лесных, инженерных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
alexander@psu.karelia.ru

ЮРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ СУХАНОВ

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии и организации лесного комплекса Института лесных, инженерных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
yurii_ptz@bk.ru

ОПЫТЫ С РУБКАМИ УХОДА РАЗНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ В СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЯХ*

Представлены результаты первого этапа исследования по использованию современных технологий рубок ухода на пробных площадях учебно-лабораторного комплекса Петрозаводского государственного университета. В приспевающих сосновых древостоях заложена серия постоянных пробных площадей, на которых выполнен комплекс лесотаксационных работ, проведены рубки ухода разной интенсивности по различным технологиям, дана оценка качества проведенных рубок. Интенсивность выборки по запасу на пробных площадях колебалась от 23 до 39 %, что в перспективе дает возможность оценить влияние умеренного и сильного разреживания на рост и устойчивость древостоя. При проведении рубок ухода количество поврежденных деревьев не превысило 3 %, что является допустимой величиной для технологических процессов проходных рубок в эксплуатационных лесах. Близость к городу и удобное расположение пробных площадей позволяет использовать их в учебных целях.

Ключевые слова: интенсивное лесное хозяйство, рубки ухода, образовательная деятельность

В лесном фонде Республики Карелия наблюдаются негативные тенденции: снижается удельный вес насаждений с преобладанием хвойных пород, уменьшаются площади спелых насаждений при низкой доле приспевающих (согласно Государственному докладу о состоянии окружающей среды РК в 2012 году, Лесному плану РК до 2018 года и [1]). Это создает проблему обеспечения предприятий лесопромышленного комплекса качественным древесным сырьем в настоящее время и в дальнейшей перспективе [9]. Одним из выходов из сложившейся ситуации может быть переход на интенсивные методы ведения лесного хозяйства, которые невозможно представить без широкого применения рубок ухода. Данное лесохозяйственное мероприятие позволяет улучшить качественный состав древостоя и повысить его

общую производительность. Однако ошибки при назначении интенсивности ухода за лесом могут привести к снижению устойчивости или даже гибели древостоя, например, от ветровала. Кроме того, успешный рост оставшихся после рубки деревьев зависит от качества проведения рубок ухода. Необходимо стремиться к уменьшению числа поврежденных деревьев и снижению вредного воздействия на почвенный покров. В нашей стране и за рубежом накоплен значительный научный и производственный опыт по проведению рубок ухода [1], [2], [5], [8], [10]. При интенсификации лесного хозяйства нужно использовать этот опыт в максимальной степени с учетом экологических требований и экономических условий региона.

В настоящее время лесоинженерный факультет Петрозаводского государственного

университета принимает участие в научном проекте ППС ЕИСП «Карелия» «Новые трансграничные решения в области интенсификации ведения лесного хозяйства и повышения степени использования топливной древесины в энергетике» (<http://www.idanmetsatieto.info/rus/?ID=688&news=view&newsID=2435>). В рамках проекта для изучения современных методов и технологий рубок ухода на территории учебно-лабораторного комплекса ПетрГУ в припевающих сосновых древостоях была заложена серия постоянных пробных площадей [7]. Для уточнения таксационных характеристик опытных древостоев на пробных площадях размером 0,1 га выполнялся сплошной пересчет деревьев с измерением диаметров на высоте груди. Средняя высота деревьев находилась путем измерения в натуре высот 25–30 деревьев по ступеням толщины и построения графика высот. Запасы древостоев определялись по объемным таблицам, разработанным для условий Карелии. В дальнейшем совместно с группой экспертов из Лесного центра Финляндии и Северной Карелии из семи пробных площадей была выбрана контрольная площадь, а для остальных шести назначены интенсивности рубок ухода и системы машин для проведения ухода за лесом. Интенсивность рубки назначалась исходя из таксационных характеристик древостоя с учетом предупреждения возможного ветровала, а система машин – исходя из грунтовых условий участка.

Рубки ухода были проведены летом 2013 года. На первой и второй пробных площадях лесозаготовительные операции проводились харвестером John Deere 1270E и форвардером John Deere 1210E; на третьей и четвертой – бензопилой

Husqvarna 254 и форвардером John Deere 1110D; на пятой и шестой – харвестером John Deere 1070D и форвардером John Deere 1110D. Начало работ совпало с проведением международной выставки «Интерлес-2013» (<http://www.petrso.ru/news.html?action=single&id=9822>), благодаря чему лесозаготовители, ученые, преподаватели и студенты могли увидеть процесс и результат проведения рубок ухода с использованием современной техники и технологий.

После рубок ухода на пробных площадях проведен повторный пересчет.

В составе древостоя до рубки доля сосны составляла 60–80 %, березы – 10–20 % (таблица). Ель и осина, как правило, находились в качестве примеси. Общий запас древесины колебался от 267 до 364 м³/га при относительной полноте, близкой к единице.

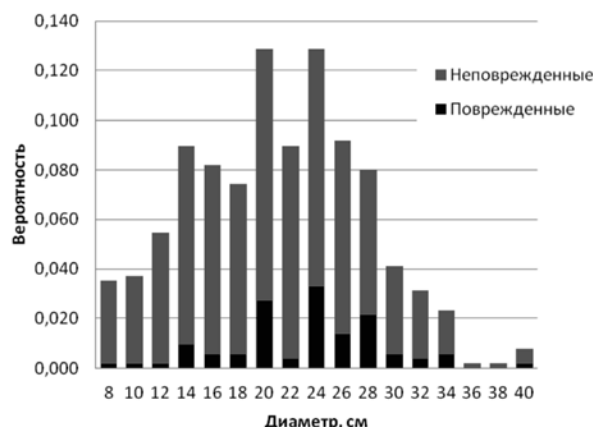
Интенсивность выборки по запасу на пробных площадях колебалась от 23 до 39 %, что в перспективе дает возможность оценивать влияние умеренного и сильного разреживания на рост и устойчивость древостоя. Объем вырубленной древесины в зависимости от интенсивности рубки составлял от 74 до 134 м³/га. Преимущественно удалялись деревья сосны из подчиненной части полога, а также ослабленные и угнетенные более крупные экземпляры. Присутствие незначительного количества березы (10–20 %) в составе древостоя не имеет отрицательного влияния на рост сосны, поэтому часть экземпляров березы оставлена.

Для оценки качества выполненных работ у оставленных на дорастивание деревьев проведен учет механических повреждений. При этом у поврежденных деревьев измерялся диаметр на

Таксационная характеристика древостоев на пробных площадях до и после проведения рубок ухода различной интенсивности

№ п/п	Описание древостоя	Интенсивность выборки по запасу, %	Состав древостоя	Число деревьев, шт./га	Средние*		Абс. полнота, м ² /га	Запас, м ³ /га
					диаметр 1,3 м, см	высота, м		
1	До рубки	28	7С2Б1Е	1590	19,2	20,8	33,5	309
	После рубки		9С1Е ед.Б	710	19,7	21,0	24,7	222
2	До рубки	39	8С2Б ед.Е	1370	19,1	20,5	35,5	340
	После рубки		8С2Б ед.Е	590	20,7	21,3	19,7	216
3	До рубки	23	8С2Б ед.Е	1590	20,3	19,4	38,0	317
	После рубки		8С2Б ед.Е	820	23,3	21,1	29,9	243
4	До рубки	30	8С2Б ед.Ос	1750	22,1	21,0	41,3	362
	После рубки		9С1Б ед.Ос	650	24,6	22,1	33,0	254
5	До рубки	35	6С2Б1ЕОс	1370	23,3	21,1	30,8	267
	После рубки		8С2Б ед.Е	510	24,6	22,0	23,7	171
6	До рубки	22	8С1Б1Е	1490	20,6	20,1	39,2	364
	После рубки		9С1Е ед.Б	690	24,6	21,5	29,4	285
7	Контрольная площадь	–	7С2Б1Е	1550	21,9	21,0	38,2	360

Примечание. * – показатели по преобладающей породе.



Повреждения деревьев при рубках ухода

высоте груди, устанавливалась высота обдира и вычислялась его площадь. Установлено, что повреждения, полученные при рубке, в основном приходились на деревья центральной ступени толщины с диаметром 20–28 см (рисунок).

Основную часть повреждений (более 60 %) получили деревья, расположенные в пределах 4 метров от оси волока. В целом количество поврежденных деревьев при проведении рубок ухода не превысило 3 %, что считается допустимой величиной для технологических процессов проходных рубок в эксплуатационных лесах [4], [6].

Следует отметить, что удобное расположение пробных площадей позволяет использовать их в образовательном процессе у студентов Петрозаводского государственного университета, обучающихся на лесных специализациях [3]. В ходе учебно-практических занятий студенты знакомятся с современными технологиями рубок ухода, а также отрабатывают навыки лесной таксации. Наблюдения за ходом роста древостой будут проводиться ежегодно, вплоть до заключительной рубки древостоя, что позволит оценить эффективность проходных рубок различной интенсивности в приспевающих сосновых насаждениях.

* Статья подготовлена в рамках научного проекта ППС ЕИСП «Карелия» «Новые трансграничные решения в области интенсификации ведения лесного хозяйства и повышения степени использования топливной древесины в энергетике» и в соответствии с Программой стратегического развития ПетрГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карьялайнен Т., Лейнонен Т., Герасимов Ю., Хуссо М., Карвинен С. Интенсификация лесопользования и совершенствование лесозаготовок на Северо-Западе России // Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 134. Йоенсуу, 2009. 162 с.
2. Кудряшова А. М., Безверхов П. В., Киселева И. Ю. Коммерческие рубки ухода для модели интенсивного и устойчивого ведения лесного хозяйства: Учеб. материалы для спец. лесн. хоз-ва. СПб., 2008. 72 с.
3. Лукашевич В. М., Суханов Ю. В., Катаров В. К., Пеккоев А. Н. Организация и совершенствование образовательного процесса на лесотехническом факультете государственного университета в рамках международного сотрудничества // Alma mater (Вестник высшей школы). 2014. № 2. С. 59–63.
4. Новиков Б. Н. Что могут дать рубки ухода // Лесная промышленность. 1993, № 5–6. С. 23–26.
5. Основы лесного хозяйства в Финляндии / [Т. Фредрикссон и др.; пер. с фин.: А. Юнтунен, М. Лейнонен]. Хяменлинна: Metsäkeskus Oy, 2006. 231 с.
6. Промежуточное пользование лесом на Северо-Западе России / В. А. Ананьев, А. Асикайнен, Э. Вяльккю, Ю. Ю. Герасимов, К. К. Демин, Л. Сиканен, В. С. Сюнев, О. Н. Тюкина, В. К. Хлюстов, Ю. А. Ширнин. Йоэнсуу: НИИ леса Финляндии, 2005. 150 с.
7. Селиверстов А. А., Суханов Ю. В., Лукашевич В. М., Пеккоев А. Н., Катаров В. К., Кузнецов А. В., Ковалева Н. В. Ведение интенсивного лесного хозяйства в технопарке ПетрГУ // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы Международной научно-техн. конф. Вологда: ВоГУ, 2014. С. 27–30.
8. Сеннов С. Н. Рубки ухода за лесом. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 160 с.
9. Соколов А. И. Лесовосстановление на вырубках Северо-Запада России. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2006. 215 с.
10. Huuskonen S., Hynynen J. Timing and intensity of precommercial thinning and their effects on the first commercial thinning in Scots pine stands // Silva Fennica. 2006. № 40 (4). P. 645–662.

Pekkoev A. N., Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of RAS
(Petrozavodsk, Russian Federation)

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

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

Sukhanov Yu. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

EXPERIMENTS ON DIFFERENT INTENSITY THINNING OF PINE STANDS

The first stage research results on the application of modern thinning technology on the sample plots of the study-lab facility of Petrozavodsk State University are presented. A series of permanent sample plots with pine stands was established. A set of forest mensuration works was carried out. Thinning of varying intensity was implemented using different technologies. Subsequent

assessment on the quality of thinning was conducted. The stock removal rate ranged from 23 % to 39 % potentially providing a possibility to estimate the effect of moderate and heavy removal on the stands' growth and resistance. The number of trees damaged during thinning ranged within 3 %, which is considered an acceptable amount for late thinning in managed forests. The sample plots can be used for educational purposes due to their convenient location and close proximity to the city.

Key words: intensive forestry, thinning, educational act

REFERENCES

1. Kar'yalaynen T., Leynonen T., Gerasimov Yu., Khusso M., Karvinen S. Intensification of forest management and enhancement of logging practices in Northwest Russia [Intensifikatsiya lesopol'zovaniya i sovershenstvovanie lesozagotovok na Severo-Zapade Rossii]. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute* 134. Joensuu, 2009. 162 p.
2. Kudryashova A. M., Bezverkhov P. V., Kisileva I. Yu. *Kommercheskie rubki ukhoda dlya modeli intensivnogo i ustoychivogo vedeniya lesnogo khozyaystva* [Commercial thinning practices for the intensive and sustainable forestry model: study material for forestry specialists]. St. Petersburg, 2008. 72 p.
3. Lukashevich V. M., Sukhanov Yu. V., Katarov V. K., Pekkoiev A. N. Organization and improvement of the educational process at the Forest Engineering faculty of the State university within international cooperation arrangements [Organizatsiya i sovershenstvovanie obrazovatel'nogo protsessa na lesoinzhenernom fakul'tete gosudarstvennogo universiteta v ramkakh mezhdunarodnogo sotrudnichestva]. *Alma mater (Vestnik vysshey shkoly)*. 2014. № 2. P. 59–63.
4. Novikov B. N. What are the benefits of forest thinning [Chto mogut dat' rubki ukhoda]. *Lesnaya promyshlennost'*. 1993. № 5–6. P. 23–26.
5. *Osnovy lesnogo khozyaystva v Finlyandii* [The fundamentals of forestry in Finland] / [T. Fredriksson i dr.; per. s fin.: A. Jun-tunen, M. Lejnenen]. Hjamenlinna: Metsakustannus Oy Publ., 2006. 231 p.
6. *Promezhtochnoe pol'zovanie lesom na Severo-Zapade Rossii* [Intermediate forest uses in the Northwest] / V. A. Anan'ev, A. Asikyaynen, E. Vyal'kkyu, Yu. Yu. Gerasimov, K. K. Demin, L. Sikanen, V. S. Syuneyev, O. N. Tyukina, Khlyustov V. K., Shirnin Yu. A. Joensuu, NII lesa Finlyandii Publ., 2005. 150 p.
7. Seliverstov A. A., Sukhanov Yu. V., Lukashevich V. M., Pekkoiev A. N., Katarov V. K., Kuznetsov A. V., Kovaleva N. V. Intensive forestry practice of Petrozavodsk State University Technopark [Vedenie intensivnogo lesnogo khozyaystva v tekhnoparke PetrGU]. *Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Vologda, VoGU Publ., 2014. P. 27–30.
8. Sennov S. N. *Rubki ukhoda za lesom* [Forest tending]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 160 p.
9. Sokolov A. I. *Lesovosstanovlenie na vyrubkakh Severo-Zapada Rossii* [Reforestation of felled sites in Northwest Russia]. Petrozavodsk, Karel'skiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2006. 215 p.
10. Huuskonen S., Hynynen J. Timing and intensity of precommercial thinning and their effects on the first commercial thinning in Scots pine stands // *Silva Fennica*. 2006. № 40 (4). P. 645–662.

Поступила в редакцию 17.10.2014

АНДРЕЙ БОРИСОВИЧ БОДЭ

кандидат архитектуры, советник РААСН, заведующий сектором «Деревянное зодчество», Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры (Москва, Российская Федерация)
bode-niitag@yandex.ru

ФРОНТОННЫЕ ПОЯСА В АРХИТЕКТУРЕ ДЕРЕВЯННЫХ ЦЕРКВЕЙ XVII–XVIII ВЕКОВ

Фронтонные пояса составляют местную традицию в архитектуре деревянных церквей Обонежья XVII–XVIII веков. Рассмотрены архитектурные и конструктивные решения фронтонных поясов. В их развитии выявлен процесс преобразования конструктивных элементов в декоративные. Высказаны предположения относительно происхождения фронтонных поясов и их связи с формами каменных церквей XVI–XVII веков. Проанализированы различия в устройстве фронтонных поясов в зависимости от местоположения объекта и времени его постройки. Ареал распространения фронтонных поясов сопоставлен с территорией бывших северных владений Новгорода. Выявлено, что конструктивные фронтонные пояса по мере удаления от Новгорода сменяются декоративными. На этой же территории зафиксировано использование других архитектурных форм, связанных с древними новгородскими традициями. Если на примере других форм отмечено угасание традиций, то использование фронтонных поясов демонстрирует ее развитие. Многообразие архитектурных решений с использованием фронтонных поясов и наиболее длительное их сохранение в народном зодчестве объясняются особенностями развития культуры в разнотнической среде.

Ключевые слова: русское деревянное зодчество, местные традиции, архитектурное формообразование, древние традиции

Фронтонными поясами в русском деревянном зодчестве называют особое устройство перехода от одного яруса к другому, при котором образуется ряд, состоящий из небольших повторяющихся двускатных покрытий. В статье рассматриваются архитектурные решения с использованием фронтонных поясов, анализируются их различия в зависимости от местоположения объекта и времени его постройки, высказываются предположения относительно их происхождения и развития. В устройстве фронтонных поясов видятся отголоски храмостроительных традиций древнего Новгорода. В своих исследованиях автор базируется на предположении, что в архитектуре деревянных храмов Новгородской земли и Московского княжества существовали свои характерные особенности. Эти особенности оставили свой след в развитии деревянного зодчества Русского Севера и в силу консервативности народной культуры продолжали в различных формах существовать и в XVII–XVIII веках.

Большинство объектов, в архитектуре которых присутствуют фронтонные пояса, составляют храмы с основанием в виде восьмерика на четверике. Самая ранняя известная подобная постройка – Петропавловская церковь 1620 года в деревне Лычный Остров на озере Сандал. Первоначально основной сруб состоял из четверика, переходящего в равный ему по ширине восьмерик, который в середине XVIII века был надстроен. Фронтонный пояс Петропавловской церкви представляет собой накладной декоративный элемент, размещающийся между четвериком

и восьмериком и состоящий из трех двускатных покрытий по каждому фасаду. Покрытия углов четверика – двускатные с ендовой посередине, что соответствует угловым частям фронтонного пояса.

Нельзя обойти вниманием изображение церкви в Нарве (по А. Олеарию) [4; 104] (рис. 1). Основной четверик нарвской церкви показан без повала со двоянным двускатным покрытием. Над четвериком возвышался второй ярус, имевший несколько неправдоподобную форму, но самое главное для нас в рассматриваемом рисунке – это покрытие четверика, зигзагообразное очертание которого аналогично фронтонным поясам и по сути указывает на происхождение последних от подобного типа конструкции.

Об архитектурном решении Никольской церкви в селе Линдозеро, датируемой 1634 годом, мы можем судить только по старым фотографиям, где она запечатлена с обшивкой сруба [5; 120]. Видимо, первоначально здание имело фронтонный пояс (или пояса), упрощенным повторением которого были накладные дощатые треугольники с резьбой, прибитые поверх обшивки на повал четверика.

Никольская церковь в селе Деревянском 1683 года [6; 150] по общему архитектурному решению напоминает лычноостровскую на первом строительном этапе с тем отличием, что основной четверик завершался повалом. Аналогичную структуру основного храмового столпа имела Ильинская церковь 1685 года Горне-Шелтозерского прихода [6; 164]. Здесь фронтонный пояс

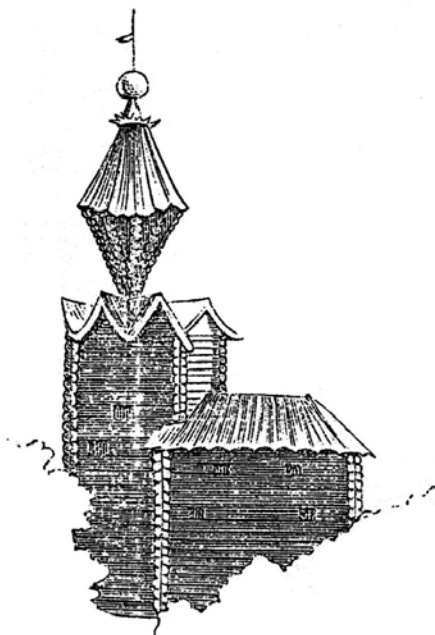


Рис. 1. Изображение церкви в Нарве по А. Олеарию, XVII век

выполнен в виде декоративных дощатых накладок поверх обшивки на середине высоты восьмерика. В пропорциональном строе церквей в Деревянском и Горнем Шелтозере еще нет той устремленности ввысь, что мы видим на примере несколько более поздней постройки – Ильинской церкви 1692 года в селе Самино. Сруб церкви дошел до нашего времени в обшивке, но на нем имеются следы двух фронтонных поясов [12; 104].

Богородицкая церковь 1695 года в селе Гимрека [5; 121–123] в верхней части четверика имеет фронтонный пояс, состоящий из очень мелких элементов. На середине высоты восьмерика находится промежуточный повал с таким же измельченным фронтонным поясом, стены выше которого не расширяются, а продолжают в габаритах нижележащего сруба. Такое решение основного храмового столпа В. П. Орфинский называет «пульсирующим» [9; 46]. Варлаамовская церковь Рыборецкого погоста 1697 года очень близка по архитектурному решению к постройке в Гимреке [7; 242].

Варваринская церковь в деревне Яндомозеро была построена в середине XVII века как небольшой клетской храм, но в начале XVIII века в результате надстройки основной сруб приобрел вид восьмерика на четверике. Облик церкви, сложившийся после перестройки, можно увидеть на графической реконструкции Е. В. Вахрамеева, где изображены два фронтонных пояса [2; 84].

Покровская церковь XVII–XVIII веков Кижского погоста, так же как и яндомозерская церковь, прошла ряд аналогичных строительных этапов. Этому памятнику посвящено немало исследований, среди которых работы Л. М. Лисенко, В. А. Гушиной, В. А. Крохина, А. Т. Яске-

ляйна. На основном срубе заметны следы двух фронтонных поясов над повалом четверика и на восьмерике.

Церковь Александра Свирского 1769 года в селе Космозеро имеет верхний фронтонный пояс под повалом восьмерика и нижний – «пунктирный», состоящий из фрагментов. Оба пояса чисто декоративные. Воскресенская церковь 1780 года в селе Типиницы примерно на середине высоты восьмерика имела также следы декоративного фронтонного пояса.

Успенская церковь 1774 года в Кондопоге обладает характерными для западного Прионежья промежуточными повалами (рис. 2). Верхний промежуточный повал традиционно сочетается с фронтонным поясом. Над повалом четверика также имеются следы от фронтонного пояса.

Среди восьмигранных храмов с фронтонными поясами отличаются только две известные постройки, расположенные в Посвирье. Одна из них – Никольская церковь 1696 года в селе Согиницы (рис. 3). В ее основе двухъярусный восьмерик с пофронтонным покрытием нижнего яруса. Другая аналогичная церковь – утраченная Преображенская 1696 года в селе Пидьма [6; 144–145]. Обе церкви представляют примеры конструктивных фронтонных поясов.

Нельзя обойти вниманием Знаменскую церковь, изображенную на плане Тихвинского посада 1678 года. По-видимому, она имела три яруса и соответственно два фронтонных пояса [8; 120]. На плане города Олонца первой половины 1690-х годов можно увидеть церковь Николаевского погоста [8; 121]. В основании ее шатра изоб-



Рис. 2. Успенская церковь 1774 года в Кондопоге. Рисунок автора



Рис. 3. Никольская церковь 1696 года в д. Согиницы.
Рисунок автора

ражены два зигзага, в которых узнаются фронтонные пояса.

Все рассматриваемые постройки различаются, во-первых, по форме плана (четырёхугольные и восьмиугольные), во-вторых, по количеству ярусов (два или три, включая основание) и соответствующему ему числу фронтонных поясов (один или два). Важной сравнительной характеристикой является соотношение ярусов по их ширине: от сужающихся сверху к равношироким и расширяющимся. Сходный, но более развернутый типологический ряд есть в классификации В. П. Орфинского [9; 96–98], однако в данном случае мы выделяем из него лишь те приемы, при которых изменяется (или не изменяется) ширина основного сруба в сочетании с использованием фронтонных поясов. Далее можно выделить такие признаки, как наличие или отсутствие повала на нижнем ярусе (основании), конструктивное или декоративное устройство фронтонных поясов и, наконец, количество изломов фронтонного пояса, приходящееся на одну сторону сруба, увеличение числа которых также свидетельствует об усилении декоративности.

Распространение фронтонных поясов, как мы видим на примерах достоверно известных построек, четко ограничивается Посвирьем и Обонежьем (рис. 4). Особенности распространения вариантов основных решений прослеживаются достаточно четко. Сужающиеся сверху ярусные структуры образуют конструктивные фронтонные пояса, имеющие функцию покрытия, а расширяющиеся, напротив, превращают их в декоративные элементы, только очертаниями напоминающие о своем первоначальном назначении. Сужающиеся сверху ярусные решения



Рис. 4. Карта-схема распространения фронтонных поясов

встречаются только в западной части ареала – в Посвирье. Равноширокий сруб в виде восьмики на четверике в сочетании с фронтонным поясом имеется только на лычноостровской церкви. На всех остальных аналогичных по структуре постройках четверики завершаются повалом и таким образом переходят в более широкие восьмики. Немногочисленная группа церквей с двумя промежуточными повалами находится примерно в середине ареала на западном побережье Онежского озера. Среди них две постройки с равноширокими «пульсирующими» восьмиками (в Гимреке и Рыбреке) и две постройки с дважды расширяющимся основным срубом (в Лычном Острове и Кондопоге).

Наиболее отчетливую картину мы наблюдаем, оценивая фронтонные пояса по степени их конструктивности. На юго-западе ареала (в Посвирье) встречаются только конструктивные фронтонные пояса, в середине ареала (в западном Прионежье) – и конструктивные, и декоративные решения, и, наконец, на северо-востоке мы видим примеры только декоративных поясов. Определенно, по мере удаления от Новгорода конструктивные фронтонные пояса сменяются декоративными.

Обращаясь ко времени постройки объектов, заметим, что наиболее ранние храмы типа «восьмерик на четверике» имеют относительно простые решения основного объема. Древнейшая известная из них (на Лычном острове) не имеет повала на четверике. Все более поздние объекты имеют четверики, завершающиеся повалами, и соответственно расширяющиеся восьмики над ними. Похоже, что отсутствие повала в со-

четании с фронтонными поясами относится к архаичным признакам.

Храмы с двумя промежуточными повалами составляют особую группу. Первые достоверно известные примеры членения верхнего восьмерика путем устройства промежуточных повалов относятся к концу XVII века. В это же время наблюдается изменение пропорций основных храмовых столпов: они становятся выше и стройнее. На 1680-е годы приходится строительство еще относительно невысоких церквей с одним промежуточным повалом (в Деревянском и Горнем Шелтозере). Церковь в Линдозере 1634 года хронологически стоит особняком. Высотность в сочетании с дважды расширяющимся основным срубом за счет дополнительного повала посередине восьмерика зафиксирована лишь во второй половине XVIII века (церкви в Лычном Острове, Кондопоге).

В Заонежье в XVIII веке были наиболее распространены храмы с одним промежуточным повалом между четвериком и восьмериком (в Яндомозере, Кижях, Космозере). О возможности членения верхнего восьмерика на два яруса напоминают декоративные накладные фронтонные пояса.

Тенденция преобразования конструктивных фронтонных поясов в декоративные как в пространстве, так и во времени просматривается достаточно четко. В качестве примеров, характеризующих основные стадии этого процесса, приведем следующие: церкви Посвирья с конструктивными фронтонными поясами, имеющими крупный шаг, храмы юго-западного Прионежья с «пульсирующим» храмовым столпом и фронтонными поясами с большим количеством изломов и последние – постройки Заонежья с чисто декоративным накладным фронтонным поясом.

Диапазон наблюдаемых различий в решениях фронтонных поясов очень велик. Это традиция незначительная по масштабу, однако получившая очень динамичное и плодотворное развитие в рамках относительно небольшой территории.

Исходной формой в развитии рассматриваемых решений, очевидно, были покрытия основного сруба, подобные тому, что мы видим на рисунке церкви в Нарве, которые сопоставимы с позакмарными покрытиями. Церкви с аналогичными, но трехчастными завершениями основного сруба изображены на нескольких рисунках А. Олсена. По внешнему облику они еще более напоминают крестово-купольный храм с тремя закомарами по верху каждой стены. Фронтонные пояса с такими же тремя изломами зафиксированы на самых ранних церквях типа «восьмерик на четверике» (в Лычном Острове и Деревянском). На всех более поздних постройках фронтонные пояса при переходе от четверика к восьмерику измельчаются и имеют по четыре излома и более.

В развитии архитектуры каменных церквей XVI–XVII веков мы видим собственно тот же процесс преобразования конструктивных элементов в декоративные. Ряд закомар, будучи изначально завершением стен основания, в более поздних башнеобразных постройках превращается в декоративный пояс кокошников, фиксирующий переход от одного объема к другому. Криволинейные очертания закомар или кокошников на каменных постройках в ряде случаев также спрямляются (церкви Бориса и Глеба в Плотниках в Новгороде, Успенская в Клину, Успенская в Соловецком монастыре, Духовская в Новгороде).

Деревянные церкви с подобными позакмарными прямоскатными покрытиями появлением своим, очевидно, обязаны стремлению почти буквально повторить каменные образцы. Однако, имея большое количество разжелобков и тем самым не обеспечивая надежное покрытие, данные формы в дереве не получили устойчивого распространения.

Ареал распространения фронтонных поясов сопоставим с территориями, заселенными различными этносами. Восьмигранные храмы с фронтонными поясами расположены в зоне расселения русских. Церкви с основанием в виде восьмерика на четверике встречаются в зонах расселения северных вепсов (юго-западный берег Онежского озера), карел-людигов (западное Обонежье), а также русских (южное Прионежье, Заонежье) [3; 116].

Различия в построении основного объема западно-прионежских храмов В. П. Орфинский соотносит с ареалами людигов и вепсов. Для территории расселения первых характерны слитно-ярусные решения восьмерика, при которых расширение достигается путем постановки вышележащего сруба на повал нижележащего. На территории, заселенной вепсами, встречаются расчлененно-ярусные решения восьмерика, при которых вышележащий сруб вставляется в «раструб» повала, но сохраняет габариты нижележащего сруба [10].

В. П. Орфинский не заостряет внимание на фронтонных поясах, а рассматривает только объемное решение основного храмового столпа западно-прионежских построек, сопоставляя его с различными тенденциями формообразования. Высотность деревянных церквей Русского Севера достигалась либо путем повышения срубного основания, либо – покрытия. Первый прием, как выявлено исследователем, характерен для северо-западных земель и, видимо, несет отголоски новгородских храмостроительных традиций. Второй – получает распространение на северо-востоке и связывается с московскими влияниями, приобретающими после сложения единого централизованного государства общерусский характер. Ярусное решение основного храмового столпа, свойственное рассматриваемым пос-

тройкам, В. П. Орфинский относит к особенностям деревянного зодчества древнего Новгорода и приводит ряд примеров, иллюстрирующих различные варианты ярусных решений, известных на Новгородчине (церкви в Мякишево, Ширково, Рышево). Длительному сохранению древних традиций и своеобразной их переработке в архитектуре западно-прионежских церквей, по мнению В. П. Орфинского, способствовали особые условия для творческой конкуренции разноэтничного состава населения Обонежья. Заимствованный у русских прием развития объема в высоту и членения его на ярусы в зонах этнических контактов обострялся и приобретал значение этнодифференцирующего признака [11; 17–18].

Результаты исследований В. П. Орфинского, подкрепленные идентичными выводами, полученными в рамках различных научных дисциплин, в целом убедительны. Храмы, имеющие промежуточный повал посередине восьмерика (в Лычном Острове, Кондопоге), действительно, находятся на территории, заселенной карелами-людиками, и других аналогичных примеров, кроме как здесь, нигде не зафиксировано. Но в том же самом ареале находится и линдозерская церковь – постройка загадочная, исчезнувшая практически не обследованной. Возвышающаяся над повалом часть восьмерика была либо шире нижележащей части, либо вставлена в «раструб». В первом случае архитектурное решение линдозерской церкви будет полностью соответствовать традициям карел-людилов, во втором – традициям вепсов, что ставит под сомнение гипотезу об этноархитектурных предпочтениях последних. По очертаниям восьмерика линдозерская церковь более всего близка к церкви в Гимреке, когда ее сруб был покрыт обшивкой. Кроме того, в ареале расселения вепсов также находится церковь Горне-Шелтозерского прихода. Имела ли она под обшивкой промежуточный повал на восьмерике, неизвестно. Во всяком случае этнодифференцирующие признаки храмов, строившихся вепсами, неоднозначны.

Применение фронтовых поясов при переходе от одного яруса к другому значительно отличается от традиций устройства каскадных и крещатых прямоскатных покрытий, рассматривавшихся автором как характерные особенности деревянного зодчества Новгородской земли [1; 50–54]. Во-первых, различны масштабы их распространения, во-вторых – предполагаемая

нижняя граница хронологических ареалов. Если существование каскадных и крещатых прямоскатных покрытий в период самостоятельности Новгорода вполне допустимо, то фронтовые пояса, по-видимому, составляют традицию более позднего времени. В этом нас убеждает то, что столпообразные высотные храмы, в архитектуре которых использовались фронтовые пояса, характерны для периода объединенного русского государства. То есть применение фронтовых поясов, родственных ряду кокошников (закомар), при переходе от одного объема к другому в структуре храмового столба – традиция общерусская. Между тем сама форма поясов, состоящая из прямоскатных элементов, была предпочитаема в новгородском зодчестве.

Если сравнить время исчезновения рассматриваемых приемов, то использование каскадных и крещатых покрытий практически прекращается в конце XVII – первых двух десятилетиях XVIII века, а использование фронтовых поясов продолжается вплоть до третьей четверти XVIII века. В распространении каскадных покрытий и фронтовых поясов общим является то, что наиболее долго эти приемы сохранялись в Заонежье – на маргинальной территории, где разными исследователями зафиксирована особая устойчивость многих древних традиций.

Многообразие приемов использования фронтовых поясов, известное по памятникам второй половины XVII–XVIII веков, свидетельствует о том, что рассматриваемые архитектурные решения к этому времени уже прошли достаточно долгий путь развития. Родственная связь прототипов – позакомарных покрытий и производных – фронтовых поясов узнаваема, но между этими формами должно быть немало промежуточных стадийальных решений.

Ареалы распространения фронтовых поясов сопоставимы с частью бывших северных новгородских владений, наиболее приближенной к Новгороду. Здесь же зафиксировано использование каскадных и крещатых прямоскатных покрытий. Но если на примере этих форм в известный период мы отметили угасание традиций, то применение фронтовых поясов демонстрирует самое живое ее развитие. Многообразие архитектурных решений с использованием фронтовых поясов и наиболее длительное их сохранение в народном зодчестве объясняется особенностями развития культуры в разноэтничной среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бодэ А. Б. Древние новгородские влияния в деревянном зодчестве северо-западных областей XVI–XVIII веков // Академия № 1. 2014. С. 50–54.
2. Вахрамеев Е. В. Новые исследования Варваринской церкви в д. Яндомозеро Карельской АССР (проблемы реставрации) // Проблемы исследования, реставрации и использования архитектурного наследия Русского Севера. Петрозаводск: РИО ПетрГУ, 1988. С. 81–94.
3. Гришина И. Е. Резные кронштейны в деревянном зодчестве южной Карелии // Народное зодчество: Межвузовский сборник. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1998. С. 115–129.
4. Даль Л. В. Историческое исследование памятников русского зодчества // Зодчий. 1872. № 7. С. 102–105.

5. Забелло С., Иванов В., Максимов П. Русское деревянное зодчество. М.: Государственное архитектурное издательство Академии архитектуры СССР, 1942. 216 с.
6. Известия Императорской археологической комиссии. Вып. 57. Пг.: Типография департамента уделов, 1915. 198 с.
7. Красовский М. В. Курс истории русской архитектуры. Ч. I. Деревянное зодчество. СПб.: Сатис держава, 2005. 384 с. (Репринт).
8. Мильчик М. И., Ушаков Ю. С. Деревянная архитектура Русского Севера. Страницы истории. Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1981. 128 с.
9. Орфинский В. П., Гришина И. Е. Типология деревянного культового зодчества Русского Севера. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2004. 280 с.
10. Орфинский В. П. К вопросу о типологии этнокультурных контактов в сфере архитектуры // Проблемы российской архитектурной науки: Сборник трудов членов отделения архитектуры РААСН. М.: РИО РААСН, 1999. С. 85–87.
11. Орфинский В. П. Отголоски храмостроительных традиций Древнего Новгорода на восточной периферии бывшей Новгородской земли (XVI–XIX вв.) // Православие в Карелии: Материалы 2-й науч. конф., посвящ. 775-летию крещения карелов. Петрозаводск: РИО КарНЦ РАН, 2003. С. 17–23.
12. Савандер К. Ю. К вопросу о пропорционировании деревянных шатровых храмов Российского Севера // Народное зодчество: Межвузовский сборник. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1999. С. 99–114.

Bode A. B., Research Institute of the Theory and History of Architecture and Town Planning (Moscow, Russian Federation)

GABLE BELTS IN ARCHITECTURE OF WOODEN CHURCHES OF XVII–XVIII CENTURIES

Employment of gable belts in the architecture of the wooden churches of Obonezhe in XVII–XVIII centuries is a local tradition. The article considers some architectural solutions realized by means of gable belts. A conversion process of the structural elements into decorative elements was identified. Some suggestions concerning the origin of the gable belts and their relation to the forms of stone churches of the XVI–XVII centuries are given. The differences in the solutions of gable belts' structure depending on the location of the object and the time of its erection are analyzed. The area of gable belts' distribution is associated with the Northern territories of ancient Novgorod. It was revealed that most of the objects with gable belts in their structure are located close to Novgorod. The use of other architectural forms associated with ancient Novgorod traditions is noted. If, for example, other forms pointed to fading traditions, the use of gable belts demonstrates its development. A variety of architectural solutions with gable belts employment and a long-term preservation of this architectural feature in the folk architecture are explained by peculiarities of cultural development in different ethnic environment.

Key words: Russian wooden architecture, local traditions, architectural morphology, ancient traditions

REFERENCES

1. Bode A. B. Ancient Novgorod influence in the wooden architecture of the North-Western regions of the XVI–XVIII centuries [Drevnie novgorodskie vliyaniya v derevyannom zodchestve severo-zapadnykh oblastey XVI–XVIII vekov]. *Academiya* № 1. 2014. P. 50–54.
2. Vakhrameev E. V. New research St. Barbara's Church in village Yandomozero the Karelian ASSR (problems of restoration) [Nove issledovaniya Varvarinskoy tserkvi v d. Yandomozero Karel'skoy ASSR (problemy restavratsii)]. *Problemy issledovaniya, restavratsii i ispol'zovaniya arkhitekturnogo naslediya Russkogo Severa* [Problems of research, restoration and use of the architectural heritage of the Russian North]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 1988. P. 81–94.
3. Grishina I. E. Carved brackets in wooden architecture of South Karelia [Reznye kronshteyny v derevyannom zodchestve yuzhnoy Karelii]. *Narodnoe zodchestvo: Mezhvuzovskiy sbornik* [Folk architecture. Interuniversity collection]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 1998. P. 115–129.
4. Dal' L. V. Historical study of the monuments of Russian architecture [Istoricheskoe issledovanie pamyatnikov russkogo zodchestva]. *Zodchiy* [Architect]. 1872. № 7. P. 102–105.
5. Zabello S., Ivanov V., Maksimov P. *Russkoe derevyannoe zodchestvo* [Russian wooden architecture]. Moscow, Publishing house of the Academy of architecture of the USSR, 1942. 216 p.
6. *Izvestiya Imperatorskoy arkheologicheskoy komissii* [Proceedings of the Imperial archaeological Commission]. Issue 57. St. Petersburg, Typography of the appanage Department Publ., 1915. 198 p.
7. Krasovskiy M. V. *Kurs istorii russkoy arkhitektury. Chast' I. Derevyannoe zodchestvo* [The course on the history of Russian architecture. Part I. Wooden architecture]. St. Petersburg, Satis derzhava Publ., 2005. 384 p.
8. Mil'chik M. I., Ushakov Yu. S. *Derevyannaya arkhitektura Russkogo Severa. Stranitsy istorii* [Wooden architecture of the Russian North. Pages of the history]. Leningrad, Stroyizdat, Leningrad branch Publ., 1981. 128 p.
9. Orfinskiy V. P., Grishina I. E. *Tipologiya derevyannogo kul'tovogo zodchestva Russkogo Severa* [Typology of wooden architecture of the Russian North]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2004. 280 p.
10. Orfinskiy V. P. To the question of typology of ethnic and cultural contacts in the field of architecture [K voprosu o tipologii etnokul'turnykh kontaktov v sfere arkhitektury]. *Problemy rossiyskoy arkhitekturnoy nauki: Sbornik trudov chlenov otdeleniya arkhitektury RAASN* [Problems of Russian architectural science: selected papers of members of the Department of architecture of RAACS]. Moscow, RIO RAASN Publ., 1999. P. 85–87.
11. Orfinskiy V. P. Echoes hramostroitelstva traditions of Ancient Novgorod on the Eastern periphery of the former Novgorod land (XVI–XIX centuries) [Otgoloski khramostroitel'nykh traditsiy Drevnego Novgoroda na vostochnoy periferii byvshey Novgorodskoy zemli (XVI–XIX vv.)]. *Pravoslaviye v Karelii: Materialy 2-y nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 775-letiyu kreshcheniya karelov* [Orthodoxy in Karelia: proceedings of the 2nd scientific conference devoted 775 anniversary of the baptism of Karelians]. Petrozavodsk, RIO KarNC RAN Publ., 2003. P. 17–23.
12. Savander K. Yu. To the question of proportionality wooden tent churches of the Russian North [K voprosu o proporcionirovani derevyannykh shatrovykh khramov Rossiyskogo Severa]. *Narodnoe zodchestvo: Mezhvuzovskiy sbornik* [Folk architecture. Interuniversity collection]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 1999. P. 99–114.

Поступила в редакцию 27.02.2015

ЕЛЕНА ОЛЕГОВНА ГРАФОВА

кандидат технических наук, доцент кафедры организации строительного производства Института лесных, инженерных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
jethel@rambler.ru

ПОЛИНА ГЕННАДЬЕВНА ГОЛЬДЕНБЕРГ

государственный инспектор РФ по надзору в области использования и охраны водных объектов по РК, Управление Росприроднадзора по Республике Карелия (Петрозаводск, Российская Федерация)
goldenberg2008@inbox.ru

ЮРИЙ ПАВЛОВИЧ ЕВТИФЕЕВ

кандидат технических наук, доцент кафедры организации строительного производства Института лесных, инженерных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
yup@psu.ka.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТОКОВ ПРЕДПРИЯТИЯ ОТ ФЕНОЛЬНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ*

Деревообрабатывающая промышленность является лидирующей в Карелии, обладающей огромными запасами древесных ресурсов. Производство древесных материалов связано с применением фенольных смол. Несвершенство технологии производства и транспортировки сырья приводит к сбросу в водные объекты повышенных количеств вредных химикатов. Анализ производственных процессов и совершенствование схемы водоотведения позволяют снизить негативную нагрузку на водоем. Усовершенствование системы доочистки заключается в ведении комбинированного коагулирования и устройстве медленного фильтра доочистки. Приведен пример расчета размера вреда, причиненного Онежскому озеру. Стоимость строительства системы доочистки составляет 25 % от размера штрафных санкций природоохранных служб за сброс недостаточно очищенных стоков.

Ключевые слова: нормативно-правовое регулирование, расчет размера вреда, электрокоагуляция, медленное фильтрование, фенолы, оборотная система, охрана озер, комбинированное коагулирование

ВВЕДЕНИЕ

В Карелии насчитывается около 400 предприятий, использующих поверхностные водные объекты. Их хозяйственная деятельность довольно водоемка [4]. Значительное число предприятий специализируются на деревообработке. В 2003 году запущен завод по производству древесно-стружечных плит мощностью до 100 м³/сут с цехом собственного производства синтетических смол. Промплощадка завода расположена на северо-восточном берегу Онежского озера. На территории предприятия предусмотрена система сбора дренажно-ливневых сточных вод. С момента ввода завода в эксплуатацию поверхностные сточные воды без очистки сбрасывались в Онежское озеро.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Согласно технологии производства, в качестве связующего материала применяются фенольные смолы [3]. Через некоторое время эксплуатации предприятия стали очевидны случаи несовершенства вентиляционной системы и технологических недостатков транспортировки при-

готовленных химических реагентов в производственные цеха.

В результате возникали утечки вредных газов и веществ, в том числе фенола и формальдегида. Распространяясь в атмосферу и оседая на поверхностях покрытий, смываемые поверхностными стоками химикаты попадали в ливневую канализацию и далее в Онего.

По результатам лабораторных измерений природоохранными службами Карелии в 2005 году зафиксировано содержание загрязняющих веществ в поверхностных сточных водах, превышающее предельно-допустимые концентрации (ПДК) в водоеме: по азоту аммонийному в 17 раз, нитритам в 4 раза, нефтепродуктам в 3 раза, железу в 30 раз, фенолам в 20 раз, формальдегиду в 50 раз.

После соответствующего предписания надзорного органа в конце 2006 года на предприятии построены и введены в эксплуатацию очистные сооружения ливневых стоков. По результатам работы сооружений отмечены снижения нагрузки на озеро, но незначительные.

Коммунальное хозяйство городов применяет схему очистки поверхностного стока, включаю-

щую: аккумулирующую емкость, пенополиуретановые или полистирольные фильтры и сорбционные фильтры, например медленные песчаные фильтры, то есть очистка осуществляется в три ступени [7].

Согласно проекту, поверхностный сток поступает в резервуары-усреднители и далее на очистные комплексы «УКОС-Д-20» производительностью 40 м³/ч. Принцип очистки основан на процессе электрокоагуляции, электрофлотации и механического фильтрования через полимерную загрузку и адсорбции на активированном угле.

Несмотря на затраты предприятия на строительство очистных сооружений, качество очищаемой воды все еще не соответствовало качеству сброса в рыбохозяйственный водоем по тем же показателям.

За период с 2006 по 2014 год предприятие неоднократно подвергалось административным наказаниям, а также возмещению вреда, причиненного Онежскому озеру [1].

Согласно лабораторным результатам химического анализа воды, средние концентрации вредных загрязняющих веществ в сточных водах на выпуске за 2007 год представлены в табл. 1.

Онежское озеро внесено в Государственный реестр водных объектов Российской Федерации, относится к бассейну Балтийского моря и является водным объектом рыбохозяйственного значения высшей категории водопользования.

Расчет суммы вреда, причиненного окружающей среде сбросом загрязняющих веществ, произведен на основании «Методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательс-

тва» от 30.03.2007 № 71, «Собрания законодательства РФ» от 04.11.2006 № 46, ст. 4791:

$$Y = K_{\text{вг}} K_{\text{дл}} K_{\text{в}} K_{\text{ин}} \sum_{i=1}^n H_i M_i K_{\text{из}},$$

где Y – размер вреда, тыс. руб.;

$K_{\text{вг}}$ – коэффициент, учитывающий природно-климатические условия в зависимости от времени года;

$K_{\text{дл}}$ – коэффициент, учитывающий длительность негативного воздействия вредных (загрязняющих) веществ на водный объект при непринятии мер по его ликвидации;

$K_{\text{в}}$ – коэффициент, учитывающий экологические факторы (состояние водных объектов);

$K_{\text{ин}}$ – коэффициент индексации, учитывающий инфляционную составляющую экономического развития;

M_i – масса сброшенного i -го вредного (загрязняющего) вещества, определяется по каждому ингредиенту загрязнения, раздел IV;

H_i – таксы для исчисления размера вреда от сброса i -го вредного вещества в водные объекты;

$K_{\text{из}}$ – коэффициент, учитывающий интенсивность негативного воздействия из вредных веществ на водный объект.

Расчет размера вреда очищенных сточных вод:

$K_{\text{вг}} = 1,15$; $K_{\text{дл}} = 5,0$ (более 500 часов); $K_{\text{в}} = 2,10$ (для рек бассейна Онежского озера); $K_{\text{ин}} = 1,0$ (на 2007 год).

Масса сброшенного загрязняющего вещества в составе сточных вод определяется по каждому ингредиенту загрязнения, а именно по формуле:

$$M_i = Q (C_{\text{фи}} - C_{\text{дл}}) T \times 10^{-6}, \text{ т},$$

Таблица 1
Концентрации вредных загрязняющих веществ в сточных водах на выпуске

№ п/п	Наименование показателей	Единицы измерения	ПДК	Август	Ноябрь	Концентрация, Сф средняя Выпуск № 1	Превышение ПДК (раз)
				Выпуск № 1	Выпуск № 1		
1.	Взвешенные вещества	мг/дм³	Фон 3,0 ± 0,25	13,2	3	8,1	2,5
2.	БПК ₅	мгО₂/дм³	2,0	3,2	1,76	2,48	1,2
3.	БПК _{полн}	мгО₂/дм³	3,0	4,8	2,64	3,72	1,2
4.	Хлориды	мг/дм³	300,0	11,2	3,63	7,42	0
5.	Сульфаты	мг/дм³	100,0	9,78	5,62	7,7	0
6.	Фосфаты	мг/дм³	0,05	0,01	0,01	0,01	0
7.	Азот аммонийный	мг/дм³	0,39	6,78	0,516	3,65	9,35
8.	Азот нитритный	мг/дм³	0,02	0,15	0,006	0,078	3,9
9.	Азот нитратный	мг/дм³	9,1	0,36	0,169	0,265	0
10.	АПАВ	мг/дм³	0,1	–	0,046	0,046	0
11.	Нефтепродукты	мг/дм³	0,05	0,066	0,018	0,042	0
12.	Железо	мг/дм³	0,1	0,208	0,2	0,204	2,0
13.	Фенолы	мг/дм³	0,001	0,0038	0,0012	0,0025	2,5
14.	Метанол	мг/дм³	0,1	0,19	0,1	0,145	1,45
15.	Формальдегид	мг/дм³	0,1	1,83	0,144	0,987	9,9

где Q – расход сточных вод с превышением содержания i -го вредного вещества, определяется по приборам учета, а при их отсутствии – расчетным путем:

$$Q = 9678 \text{ м}^3 : 2989 \text{ час.} = 3,2 \text{ м}^3/\text{час.}$$

$T = 2989$ часов (с 11 часов 29.08.2007 по 31.12.2007) (4 месяца);

C_{di} – концентрация i -го вредного (загрязняющего) вещества в водоприемнике – Онежском озере – равна 0, так как сброс ливневых сточных вод является несанкционированным.

Нормативы ПДК вредных веществ для Онежского озера приведены из [8]. Расчет общей суммы размера вреда представлен в табл. 2.

Таким образом, сумма вреда, причиненного загрязнением водного объекта – Онежского озера, составляет 277,92 тысячи рублей за 4 месяца сброса недостаточно очищенных сточных вод.

Учитывая то, что сброс недостаточно очищенных сточных вод осуществлялся с января 2007 по ноябрь 2014 года (95 месяцев), общий размер вреда за весь период составил 6600,60 тысячи рублей.

С учетом крупных штрафов и негативной нагрузки на водоем возникла необходимость скорейшего проведения усовершенствования существующей системы очистки поверхностных стоков.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработке технологических решений предшествовала работа по обследованию промплощадки, поиску вариантов снижения грязевой нагрузки и выполнению природоохранных мероприятий, нацеленных на снижение загрязнения территории предприятия.

Таким образом, проведены следующие природоохранные мероприятия:

1. Анализ процесса формирования загрязнений: места транспортировки химикатов, складирования сырья для приготовления смол, состояние сетей и сооружений дождевой канализации;

2. Анализ эффективности очистки поверхностных стоков на очистных сооружениях.

По результатам обследования выявлено, что необходимо провести организационные мероприятия по снижению распространения загрязнений на предприятии, в том числе:

- Очистить от загрязнений колодцы и резервуары дождевой канализации;
- Провести благоустройство территории промплощадки для исключения попадания в ливневую канализацию смол и нефтепродуктов;
- Анализ работы очистных сооружений показал, что низкая температура, низкая минерализация и недостаток щелочного резерва дождевой воды не приводят к образованию хлопьев с зарядом, достаточным для укрупнения и адсорбции загрязнений в процессе электрокоагуляции. Поэтому с водой из резервуаров-усреднителей проведена пробная коагуляция для определения характеристик, необходимых для оптимального процесса коагуляции.

Проведенные природоохранные мероприятия позволили выявить зоны и источники поступления загрязнения в дождевую сеть и снизить грязевую нагрузку на сети и сооружения, определить данные по дозам реагентов и определиться с технологией доочистки.

Совершенствование схемы очистки состоит из следующих этапов:

1. Перераспределение балансов водных потоков с устройством оборотных систем.
2. Наладка электрокоагуляционной системы очистки.
3. Устройство медленного фильтра доочистки.

Таблица 2

Расчет суммы размера вреда Онежскому озеру за 2007 год

Наименование загрязняющего вещества	$C_{ф}$, мг/л	C_{di} , мг/л	$C_{ф}-C_{di}$	Q , м ³ /ч	M_i , т	N_i	Размер вреда, Y_i , тыс. руб.
Взвешенные вещества	8,1	1	7,1	3,2	0,08	45,0	36,9
БПК _{полн}	3,72	2,16	1,56	3,2	0,014	170,0	30,63
Хлориды	7,42	2	5,42	3,2	0,051	6,0	3,75
Сульфаты	7,7	7,7	0	3,2	0,000	6,0	0,00
Фосфаты	0,01	0	0,01	3,2	0,0001	670,0	0,77
Азот аммонийный	3,65	0,03	3,62	3,2	0,034	280,0	117,06
Азот нитритов	0,078	0,002	0,076	3,2	0,0007	670,0	5,88
Азот нитратов	0,265	0,19	0,075	3,2	0,0007	12,0	0,10
АПАВ	0,046	0	0,046	3,2	0,0004	510,0	2,71
Нефтепродукты	0,042	0,01	0,032	3,2	0,0003	670,0	2,47
Железо	0,204	0,03	0,174	3,2	0,0016	510,0	10,24
Фенолы	0,0025	0,002	0,0005	3,2	0,0000	12100,0	0,7
Метанол	0,145	0	0,145	3,2	0,0013	510,0	8,54
Формальдегид	0,987	0	0,987	3,2	0,0094	510,0	58,13
Итого							277,92

Рассмотрим перечисленные этапы более подробно.

1. Перераспределение балансной схемы водопользования.

На сегодняшний день предприятие сбрасывает в водоем 44000 м³ сточной воды в год.

Согласно балансной схеме водопотребления и водоотведения предприятия, из Онежского озера для хозяйственно-бытовых и производственных целей забирается 180 000 м³ воды в год. Из них на производство направляется 126000 м³ воды в год, в частности на приготовление смол для производства ДСП необходимо 114000 м³ воды в год.

Требования к качеству производственной воды невысокие: отсутствие крупных загрязнений, цветности, низкое содержание взвешенных веществ, железа.

Для снижения объемов забираемой воды из озера и снижения на него негативной нагрузки, оказываемой в результате сброса не полностью очищенных поверхностных вод, целесообразно направлять очищенные поверхностные воды на производство смол. С учетом годовых объемов поверхностных вод коэффициент разбавления воды (при смешении водопроводной и оборотной воды) составит 2,5, то есть очищенная поверхностная разбавляется водой из озера. Качество полученной водной смеси приемлемо для производства смол.

Реализация подачи очищенных поверхностных стоков осуществляется путем подключения к существующим трубопроводам системы водоснабжения цеха смол.

2. Наладка электрокоагуляционной системы очистки УКОС–Д 20.

Для оптимизации процесса коагуляции необходимо введение реагентов: сульфата алюминия и кальцинированной соды [5].

Коагулянт сульфат алюминия с содержанием активной части в товарном продукте $p_k = 53,6\%$. По данным пробного коагулирования, доза коагулянта сульфата алюминия без электрокоагулирования составляет 100 мг/л. При совместной работе электрофлотатора и коагулянта его доза $D_{к1}$ составляет 30 мг/л.

Суточный расход сточных вод – 360 м³ [6]:

$$G_k = \frac{Q \cdot D_k}{C_p} = \frac{360 \cdot 100}{1000 \cdot 0,536} = 67,2 \text{ кг},$$

$$G_k = \frac{Q \cdot D_{к1}}{C_p} = \frac{360 \cdot 30}{1000 \cdot 0,536} = 20,1 \text{ кг},$$

где $Q = 360 \text{ м}^3/\text{сут}$ – производительность сооружений очистки,

$D_k = 100 \text{ мг/л}$ – доза коагулянта без электрокоагуляции,

$D_{к1} = 30 \text{ мг/л}$ – доза коагулянта с электрокоагуляцией.

Итого необходимое количество реагентов в месяц составит:

– без электрокоагуляции $67,2 \times 30 = 2016,0 \text{ кг}$,
– с электрокоагуляцией $20,1 \times 30 = 603,0 \text{ кг}$.

Доза добавляемых реагентов при совместной работе дозирующей и электрокоагуляционной установок может быть снижена.

Кальцинированная сода с содержанием активной части в товарном продукте $p_k = 99,5\%$. Доза кальцинированной соды составляет 40 мг/л.

Суточный расход сточных вод – 360 м³.

$$G_k = \frac{Q \cdot D_k}{C_p} = \frac{360 \cdot 40}{1000} = 14,4 \text{ кг},$$

где $Q = 360 \text{ м}^3/\text{сут}$ – производительность сооружений очистки,

$D_k = 40 \text{ мг/л}$ – доза кальцинированной соды.

Итого необходимое количество реагентов в месяц составит:

$$14,4 \times 30 = 432 \text{ кг}.$$

Для эффективного удаления полученной гидроокиси производится удаление и уплотнение осадка.

Промывная вода с осадком отводится в емкость для смешивания с реагентом, где осадок уплотняется. Осадок утилизируется в специально отведенные места, осветленная надосадочная вода сливается в приемные резервуары.

3. Устройство медленного фильтра доочистки.

Для организации доочистки поверхностных вод принимается переоборудование одной из существующих емкостей, предусмотренной для накопления чистой воды под медленный фильтр. Строительство медленных фильтров достаточно просто и может быть выполнено невысококвалифицированным персоналом [11].

Медленные фильтры осветляют воду при помощи пленки, образующейся из отложившихся взвешенных частиц на мелкопористой фильтрующей поверхности [9]. В медленных фильтрах перегородкой является слой мелкозернистой загрузки. Пленочное фильтрование обеспечивает задержание до 98 % загрязнений. Высота надзагрузочного слоя 1,2–1,5 м [2], [10].

Принимается скорость фильтрования 0,2 м/час, двухслойная загрузка: шунгит и шунгизит. Применение двухслойной загрузки позволит увеличить скорость фильтрования без изменения качества очистки воды и поднять производительность в 2 раза.

Так как для медленного фильтрования используются существующий резервуар-накопитель, то площадь фильтрования известна:

$$F_\phi = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2,$$

где D – внутренний диаметр резервуара, м;

для резервуара емкостью 250 м³ и диаметром 9 м:

$$F_\phi = \pi \cdot \left(\frac{9}{2}\right)^2 = 3,14 \cdot \left(\frac{9}{2}\right)^2 = 63,59 \text{ м}^2.$$

При заданной скорости и известной площади фильтрования требуемая скорость фильтрования обеспечивается путем откачивания воды из фильтра с определенным расходом:

$$Q_{\text{час2}} = F_{\phi} \cdot v_{\phi} = 63,59 \cdot 0,2 = 12,72 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

После очистки вода собирается дренажной системой, установленной в фильтре, и перекачивается по напорной линии на производство смол.

В качестве регулирующей емкости используется надводное пространство медленного фильтра [11].

Обычно в качестве загрузки медленного фильтра используется отмытый песок фракцией не менее 0,063–0,2 мм и гравийного постилающего слоя 4,75–12,0 мм [12].

Загрузочный материал медленного фильтра укладывается слоями в определенной последовательности снизу вверх (табл. 3).

Таблица 3

Высота и последовательность
фильтрующих слоев

№ слоя	Наименование	Слой загрузки, мм	Объем загрузки, м ³
1	Поддерживающий – гравий	200	13
2	Шунгит дробленый	300	19
3	Шунгизит дробленый	500	31

Шунгит – фильтрующий материал природного происхождения с плотностью 2,25–2,84 г/см³. Порода обладает сорбционными и каталитическими свойствами. Объем загрузки, необходимый для фильтрования, составляет 19 м³.

Шунгизит – искусственный пористый материал, получаемый при обжиге шунгитсодержащих пород с плотностью 1,84–1,98 г/см³. Объем загрузки верхнего слоя, необходимый для фильтрования, – 31 м³.

Уровень воды над загрузкой принимается 1,5 м. Как известно, биологические процессы луч-

ше проходят в теплой воде. Для повышения температуры воды в надплечном объеме предусмотрен сброс теплой воды из системы охлаждения в медленный фильтр.

Ориентировочная стоимость реализации проекта для предприятия составила 1,5 млн рублей, что примерно в 4 раза меньше предписанных штрафов. Срок реализации проекта – 6 месяцев.

ВЫВОДЫ

1. Анализ производственных процессов и снижения грязевой нагрузки на водосборные поверхности показал, что возможнократно снизить концентрации загрязнений в стоках, поступающих на очистку.

2. Собственникам производства необходимо уменьшить выбросы вредных веществ на уровне производства в соответствии с действующими регламентами.

3. Необходимо адекватно сбалансировать схему водоснабжения и водоотведения, чтобы обеспечить эффективность ресурсосбережения предприятия. По возможности применить оборотную схему водоснабжения с доочисткой.

4. Вследствие низкой минерализации и щелочного резерва дождевой воды при коагуляции необходимо применение реагентов. Комбинирование реагентной и элетрокоагуляции позволяет снизить затраты на реагенты при высоком качестве очистки.

5. Оптимальной для доочистки поверхностных стоков от загрязнений является технология медленного фильтрования с применением двухслойной загрузки (шунгит, шунгизит).

6. На сегодняшний день непроведение мероприятий по очистке (доочистке) сточных вод, в том числе поверхностных, приводит к штрафам, многократно превышающим затраты на реализацию этих мероприятий.

* Статья подготовлена в рамках Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аюкаев Р. И., Гольденберг П. Г., Графова Е. О. Совершенствование методов контроля эффективности работы канализационных очистных сооружений службами Росприроднадзора // Международная конференция «Новые исследования в областях водоснабжения, водоотведения. Гидравлика и охрана водных ресурсов» (ПГУПС, 31.03.2011 года). СПб.: ОМ-Пресс, 2011. С. 46–50.
2. Аюкаев Р. Р., Графова Е. О., Аюкаев Р. И., Веницианов Е. В. Математическое моделирование в исследовании процессов водоочистки. Сообщение 1. Медленное фильтрование // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: «Естественные и технические науки». 2009. № 5 (99). С. 14–20.
3. Вигдорович В. И., Пудовкина А. Ю. Экологическая характеристика фенола, его миграция и очистка сточных вод, содержащих оксibenзол // Вопросы современной науки и практики. Ун-т им. В. И. Вернадского. 2011. № 2. С. 33.
4. Гольденберг П. Г. Проблемы повышения эффективности государственного контроля и надзора за использованием и охраной водных объектов на территории Республики Карелия // Современные технологии и оборудование систем водоснабжения и водоотведения (26 марта 2013 года). Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2014. С. 13–17.
5. Драгинский В. Л., Алексеева Л. П., Гетманцев С. В. Коагуляция в технологии очистки природных вод. М.: ППП «Типография «Наука», 2005. 576 с.
6. Евтифеев Ю. П. Примеры расчета очистных сооружений питьевой воды: Учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2011. 76 с.
7. Коринько И. В., Вороненко В. А., Лукашенко В. М. Энергосберегающая технология очистки городского поверхностного стока // Коммунальное хозяйство городов. Харьков: Харьк. нац. ун-т гор. хозяйства им. А. Н. Бекетова, 2009. № 86. С. 185–188.
8. Шиленко Н. А. Перечень рыбохозяйственных нормативов предельно-допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М.: ВНИРО, 1999. 304 с.

9. Юровский А. В., Лукашева Г. Н. Формирование хемосорбционного слоя фильтрующей загрузки медленного самоочищающегося фильтра обезжелезивания // Сервис в России и за рубежом. М.: Российский государственный университет туризма и сервиса, 2011. С. 274–278.
10. Calvo-Bado L. A. et al. Spatial and temporal analysis of the microbial community in slow sand filters used for treating horticultural irrigation water // Applied and environmental microbiology. 2003. Vol. 69. № 4. P. 2116–2125.
11. Logsdon G., Kohne R., Solomon A. Slow sand filtration for small water systems // J. Environ. Eng. Sci. 2002. 1. P. 339–348.
12. El-Taweel G. E., Ali G. H. Evaluation of roughing and slow sand filters for water treatment // Water, Air and Soil Pollution. 2000. 120 (1–2). P. 21–28.

Grafova E. O., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Gol'denberg P. G., Department of the Russian Natural Resources Management in Karelian Republic
(Petrozavodsk, Russian Federation)
Evtifeev Yu. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

IMPROVEMENT OF INDUSTRIAL PHENOL POLLUTED SURFACE RUNOFF TREATMENT SYSTEM

Timber manufacturing industry is one of the leading industries in Karelia possessing huge reserves of wood resources. Industrial manufacture of wood materials involves the use of phenolic resins. Imperfection of technological production and transportation of raw materials lead to water pollution by increased amounts of harmful chemicals. Analysis of the existing manufacturing technologies and drainage scheme improvement can reduce negative effects on water reserves. Improvement of the secondary treatment system involves introduction of the combined coagulation system and employment of the slow filtering device. An example of calculating the amount of harm caused to the Lake Onega is provided. The cost of construction for additional cleaning makes up 25 % of the total amount of charged penalties presented by environmental services for the discharge of inadequately treated sewage.

Key words: legal regulation, calculation of the amount of caused damage, electrocoagulation, slow filtration, phenols, recirculating water system, protection of lakes, combined coagulation

REFERENCES

1. Ayukaev R. I., Gol'denberg P. G., Grafova E. O. Improvement of monitoring methods' effectiveness of sewage treatment facilities by environment supervision conservation service (Rosprirodnadzor) [Sovershenstvovanie metodov kontrolya ehffektivnosti raboty kanalizatsionnykh ochistnykh sooruzheniy sluzhbam Rosprirodnadzora]. *Mezhdunarodnaya konferentsiya "Novye issledovaniya v oblastiakh vodosnabzheniya, vodootvedeniya. Gidravlika i okhrana vodnykh resursov"* [PGUPS, International Conference "New research in the areas of water supply and sewerage. Hydraulics and protection of water resources"]. St. Petersburg, 2011. P. 46–50.
2. Ayukaev R. I., Grafova E. O., Ayukaev R. I., Venitsianov E. V. Mathematical modeling in research of treatment processes. 1. Slow message filtering [Matematicheskoe modelirovanie v issledovanii protsessov vodoochistki. Soobshchenie 1. Medlennoe fil'trovaniye]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences]. 2009. № 5 (99). P. 14–20.
3. Vigdorovich V. I., Pudovkina A. Yu. Ecological characteristics of phenol and its migration and wastewater containing oksibenzol [Ekologicheskaya kharakteristika fenola, ego migratsiya i ochistka stochnykh vod, sodержashchikh oksibenzol]. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Un-t im. V. I. Vernadskogo* [Problems. lies. science and practice]. 2011. № 2. P. 33.
4. Gol'denberg P. G. Problems of the state control efficiency and supervision effectiveness over the use and protection of water bodies in the territory of the Republic of Karelia [Problemy povysheniya ehffektivnosti gosudarstvennogo kontrolya i nadzora za ispol'zovaniem i okhranoy vodnykh ob'ektov na territorii Respubliki Kareliya]. *Sovremennye tekhnologii i oborudovanie sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya* [Modern technologies and equipment water and wastewater systems]. Petrozavodsk, 2014. P. 13–17.
5. Draginskiy V. L., Alekseeva L. P., Getmantsev S. V. *Koagulyatsiya v tekhnologii ochistki prirodnnykh vod* [Coagulation in water purification technology]. Moscow, 2005. 576 p.
6. Evtifeev Yu. P. *Primery rascheta ochistnykh sooruzheniy pit'evoy vody: Ucheb. posobie* [Examples of calculation of drinking water treatment plants: Textbooks]. Petrozavodsk, PSU Publ., 2011. 76 p.
7. Korin'ko I. V., Voronenko V. A., Lukashenko V. M. Saving treatment technology of urban surface runoff [Energoberegayushchaya tekhnologiya ochistki gorodskogo poverkhnostnogo stoka]. *Kommunal'noe khozyaystvo gorodov* [Utilities cities]. Kharkiv, 2009. № 86. P. 185–188.
8. Shilenko N. A. *Perechen' rybokhozyaystvennykh normativov predel'no-dopustimyykh kontsentratsiy (PDK) i orientirovochno bezopasnykh urovney vozdeystviya (OBUV) vrednykh veshchestv dlya vody vodnykh ob'ektov, imeyushchikh rybokhozyaystvennoe znachenie* [List of fishery standards of maximum permissible concentration (MPC) and occupational exposure limits (OEL) for hazardous substances in water bodies having fishery significance]. Moscow, VNIRO Publ., 1999. 304 p.
9. Yurovskiy A. V., Lukashcheva G. N. Formation of chemisorption filter layer of slow deferrization self-cleaning filter [Formirovanie khemosorbtsionnogo sloya fil'truyushchey zagruzki medlennogo samoochishchayushchegosya fil'tra obez-zhelezivaniya]. *Servis v Rossii i za rubezhom* [Service in Russia and abroad]. Moscow, 2011. P. 274–278.
10. Calvo-Bado L. A. et al. Spatial and temporal analysis of the microbial community in slow sand filters used for treating horticultural irrigation water // Applied and environmental microbiology. 2003. Vol. 69. № 4. P. 2116–2125.
11. Logsdon G., Kohne R., Solomon A. Slow sand filtration for small water systems // J. Environ. Eng. Sci. 2002. 1. P. 339–348.
12. El-Taweel G. E., Ali G. H. Evaluation of roughing and slow sand filters for water treatment // Water, Air and Soil Pollution. 2000. 120 (1–2). P. 21–28.

Поступила в редакцию 28.01.2015

ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ КРУПЯНСКИЙ
аспирант кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
krupjanski@rambler.ru

АНАТОЛИЙ ДМИТРИЕВИЧ ФОФАНОВ
доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
afofanov@psu.karelia.ru

О ВЛИЯНИИ ТОЧНОСТИ АРИФМЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА*

Рассматриваются результаты молекулярно-динамических экспериментов по кристаллизации атомного кластера MgO. В качестве стартовой конфигурации использовалось случайное распределение 500 ионов магния и 500 ионов кислорода по объему куба со стороной 35Å. Моделирование проводилось с использованием потенциала межчастичного взаимодействия в форме Борна – Майера – Хиггенса с интегрированием уравнений движения по схеме Верле. При прочих равных условиях расчеты производились с одинарной и двойной точностью. Для обоих случаев представлены результаты исследования динамики изменения структуры моделируемого объекта. На основе полученных данных сделан вывод о критическом влиянии точности арифметических расчетов на течение процесса упорядочения атомной структуры модельного кластера. Дана рекомендация об использовании двойной точности вычислений.

Ключевые слова: точность вычислений, ошибки округления, молекулярная динамика

ВВЕДЕНИЕ

Метод молекулярной динамики (МД) является одним из наиболее распространенных вычислительных методов, применяемых для моделирования атомных и молекулярных систем. Суть метода МД состоит в численном решении уравнений движения с использованием ЭВМ [8], [9], [10]:

$$m \frac{dr_i}{dt} = p_i, \quad \frac{dp_i}{dt} = \sum_{i \neq j} F(r_{ij}).$$

В совокупности с начальными положениями и скоростями частиц эти уравнения представляют собой задачу Коши, для решения которой наиболее часто используется алгоритм Верле [4]:

$$r_i^{n+1} = r_i^n + v_i^n \cdot \Delta t + 0,5 \cdot a_i^n \cdot (\Delta t)^2,$$

$$v_i^{n+1} = v_i^n + 0,5 \cdot (a_i^{n+1} + a_i^n) \cdot \Delta t.$$

Значение ускорения i -й частицы получается из второго закона Ньютона $a_i = F_i(t) / m$, где m – масса частицы, а $F_i(t)$ – суммарная сила, действующая на i -ю частицу со стороны остальных. Сила взаимодействия между частицами вычисляется из потенциала межчастичного взаимодействия по формуле $f_{ij} = -\text{grad}U(r_{ij})$.

Результатами проведения МД-эксперимента являются координаты и скорости частиц моде-

лируемого кластера на каждом временном шаге, а также значения потенциальной и кинетической энергии. Особый интерес для исследования структуры материала представляет равновесная конфигурация атомов, получаемая после завершения эксперимента.

При моделировании системы, состоящей из N частиц, для решения каждого уравнения необходимо рассчитать $N(N-1)/2$ парных взаимодействий, то есть временные затраты на проведение МД-эксперимента растут пропорционально квадрату количества частиц в системе и для достаточно больших систем могут оказаться неприемлемо высокими.

Одним из наиболее доступных способов сокращения времени моделирования является применение графических процессоров (ГП) для параллельного расчета парных взаимодействий [1], [2], [6]. Использование ГП позволяет получать значительный прирост производительности [3] даже на недорогих моделях графических ускорителей. При этом необходимо помнить об архитектурных особенностях этих вычислительных устройств, таких как падение производительности вычислений при использовании двойной точности.

При проведении расчетов на центральном процессоре (ЦП) ощутимой разницы временных затрат при использовании одинарной (single

precision) и двойной (double precision) точности не обнаруживается. Поэтому вопрос об использовании одинарной точности в МД-расчетах оставался неактуальным. Однако расчеты с двойной точностью на ГП проводятся в несколько раз медленнее, чем с одинарной. Авторами [5], [6], [12], [14] приводятся данные, свидетельствующие о 2–8-кратном падении производительности при выполнении double-операций на современных графических ускорителях.

В настоящей статье приведены результаты исследования о возможности использования арифметики с одинарной точностью для расчетов методом молекулярной динамики.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки степени влияния точности вычислений на результаты молекулярно-динамического расчета был проведен ряд экспериментов с различными условиями и стартовыми конфигурациями. Объектами исследований являлись наноразмерные кластеры, состоящие из: оксида кремния в аморфном и кристаллическом состоянии, оксида магния, оксида кобальта, а также легированные кобальтом ксерогели жидкого стекла. При использовании одинарной точности в некоторых экспериментах наблюдались изменения структуры моделируемых объектов, отсутствующие в аналогичных экспериментах, проведенных с двойной точностью. Наилучшим образом такие изменения видны в экспериментах, моделирующих фазовый переход со сменой полиморфной модификации или с изменением степени упорядоченности (кристаллизация). При моделировании неупорядоченных структур влияние точности вычислений на поведение структуры атомных кластеров не выявлено из-за сложностей численного описания таких структур. Наблюдаемое в экспериментах появление структурных различий связано с ошибками округления [13], [15], являющимися общей проблемой расчетов с плавающей запятой, не связанной с конкретным типом вычислительных устройств [11].

Влияние точности расчетов на результаты моделирования продемонстрировано на примере наиболее показательного эксперимента, в ходе которого происходит кристаллизация модельного кластера. Результаты экспериментов, полученные с разной точностью, сравнивались с помощью методики, описанной в статье [7] (<http://mmp.vestnik.susu.ac.ru/pdf/v7n2st4.pdf>). Также в настоящей статье приводятся соответствующие кривые потенциальной энергии, отражающие изменения в структуре моделируемого объекта.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Стартовая конфигурация представляла собой кластер, имеющий форму куба со стороной 35 Å и состоящий из 1000 случайно распределенных по объему атомов кислорода и магния в равном стехиометрическом соотношении. Единственное

ограничение, накладываемое на взаимное расположение частиц, заключается в том, что расстояние между двумя атомами не должно быть меньше 1,5 Å. В расчетах использовался потенциал в форме Борна – Майера – Хиггинза:

$$U_{ij} = \frac{q_i q_j e_0^2}{r_{ij}} + A_{ij} \exp \left(-\frac{r_{ij}}{\rho_{ij}} \right) - \frac{C_{ij}}{r_{ij}^6}.$$

Исследуемый кластер помещался в центр модельного объема в виде куба со стороной 150 Å, что было в несколько раз больше размеров исходного атомного кластера. Таким образом, поверхность кластера могла принимать энергетически наиболее выгодную форму. Во всех модельных экспериментах радиус обрезания потенциалов был равен 70 Å, что позволило учесть взаимодействие каждого атома со всеми остальными атомами моделируемой системы. Один временной шаг соответствовал 10^{-15} с модельного времени, всего было рассчитано 100 000 шагов. В ходе эксперимента происходило зарождение центров кристаллизации с дальнейшим ростом новой фазы по всему объему кластера.

Моделирование проводилось с использованием параллельной реализации метода молекулярной динамики для графического процессора NVIDIA [6] (<http://elibrary.ru/item.asp?id=20318865>) с одинарной и двойной точностью на следующей конфигурации:

Процессор: Intel Core i7–3770L 3500 МГц
ОЗУ: 8096 Гб DDR3–2133
Видеокарта: 2 Гб GeForce GTX 660, compute capability 3.0
Компиляторы: g++ 4.6.3, nvcc 5.0
Библиотеки: cuda runtime, libquadmath, igraph с library 0.7.1

Полученные результаты были проверены с помощью реализации МД для процессора с архитектурой x86 с четверной точностью (библиотека gcc libquadmath) при прочих равных условиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе МД-эксперимента, проведенного с двойной точностью, образуется упорядоченный кластер, имеющий правильную решетку типа NaCl (две ГЦК-подрешетки из катионов и анионов, сдвинутых друг относительно друга на половину телесной диагонали элементарной ячейки) (рис. 1а). При проведении расчетов с одинарной точностью полученный в результате эксперимента кластер представляет собой агрегат из мелких кристаллитов, сросшихся друг с другом под разными углами (рис. 1б). В данном случае более низкая точность расчета влечет за собой потерю вклада удаленных частиц при расчете сил взаимодействия, что негативно сказывается на общей упорядоченности структуры модельного кластера.

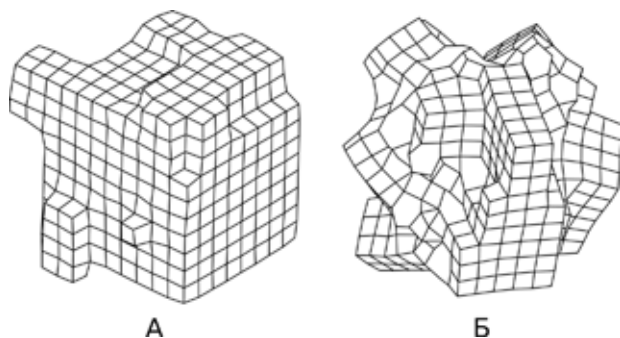


Рис. 1. Схематичное изображение структуры модельного кластера, полученного при расчетах с двойной (а) и одинарной (б) точностью

На рис. 2 представлен график изменения потенциальной энергии модельного кластера в ходе экспериментов с одинарной и двойной точностью. Первые 3000 шагов модельного времени кривые полностью совпадают. В момент времени $t = 3000$ на графике заметно незначительное расхождение кривых, после которого они снова практически совпадают.

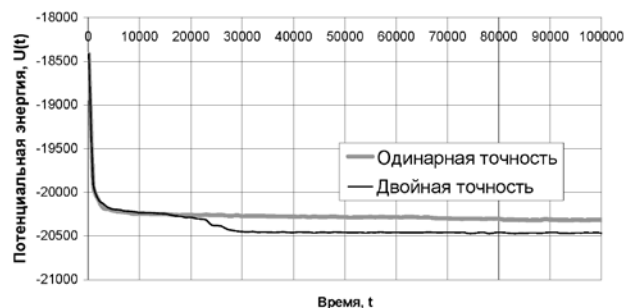


Рис. 2. Графики изменения потенциальной энергии при расчетах с разной точностью

Значительное расхождение кривых начинается после 20 000 шагов МД-эксперимента. Величина потенциальной энергии при моделировании с одинарной точностью продолжает равномерно убывать вплоть до окончания эксперимента, а более резкое снижение значений этого параметра при расчете с двойной точностью свидетельс-

твует о существенных изменениях в структуре моделируемого объекта – кристаллизации.

К моменту времени $t = 20000$ структуры кластеров, полученных с различной точностью, практически неразличимы – оба кластера содержат некоторое количество упорядоченных областей (зародыши кристаллизации). Далее, при использовании двойной точности вычислений один из зародышей становится центром кристаллизации всего кластера. Атомы, окружающие эту область, начинают упорядочиваться, происходит фазовый переход. Так как в расчете сил учитываются взаимодействия каждой частицы со всеми остальными, суммарный вклад удаленных частиц является значимой величиной. Поэтому зародыши, не ставшие центром кристаллизации, под действием силы со стороны уже упорядоченных атомов естественным образом встраиваются в растущую структуру. При использовании одинарной точности вклад одной частицы, расположенной на достаточном расстоянии, может оказаться настолько малым, что будет потерян при округлении. Таким образом, частицы, расположенные на противоположных концах кластера, практически не взаимодействуют друг с другом. В этом случае с момента времени $t = 20000$ каждый зародыш начинает формировать собственный центр кристаллизации. Близкие центры, взаимодействующие друг с другом, срастаются в один кристаллит, а более дальние срастаются «неправильно», то есть разориентированы друг относительно друга.

Графики на рис. 2 отражают качественные различия в течение процесса моделирования, обусловленные исключительно различной точностью выполнения расчетов. Для более детального анализа этих различий было проведено исследование структурных изменений моделируемого кластера в соответствии с методикой, изложенной в [7]. На каждом шаге МД-эксперимента был построен граф g , описывающий структуру модельного кластера. Вершинам графа g соответствуют найденные в кластере магний-кислородные октаэдры, ребро соединяет две вершины, если соответствующие им многогранники имеют

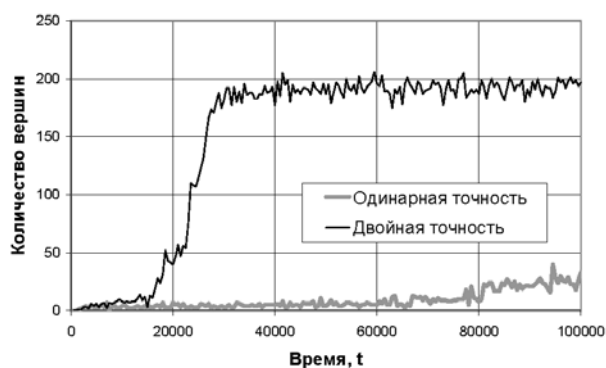
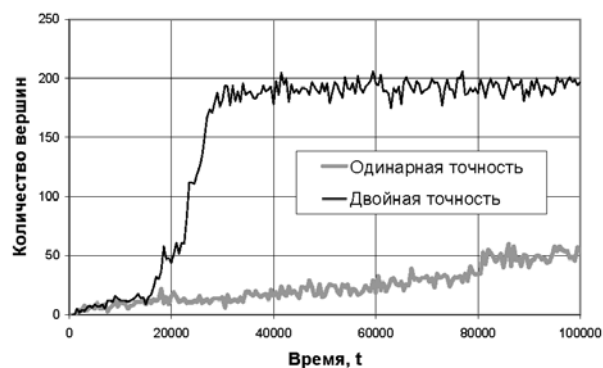


Рис. 3. Графики изменения порядка графа g (слева) и его гигантской компоненты (справа)

общее ребро. Затем с помощью библиотеки *igraph* был рассчитан порядок гигантской компоненты связности этого графа – инвариант, чувствительный к процессам изменения структуры кластера, происходящим при кристаллизации.

Результаты расчетов инвариантов графа *g* для одинарной и двойной точности приведены на рис. 3. При расчете с двойной точностью кривые порядка графа *g* и порядка его гигантской компоненты практически совпадают. Это говорит о том, что в большинстве случаев каждая новая вершина графа *g* присоединяется к гигантской компоненте. На кривых хорошо виден резкий подъем, соответствующий процессу фазового перехода. Рост кристалла в этом случае происходит из одного центра кристаллизации. При расчете с одинарной точностью порядок графа *g* растет без значительных скачков, при этом порядок гигантской компоненты этого графа осциллирует около некоторого постоянного значения вплоть до момента времени $t = 60000$. Таким образом, гигантская компонента в этом случае не формируется. За 80 000 шагов модельного времени образуется около десятка связанных компонент, имеющих порядок от 1 до 10 вершин, которые за последние 20 000 шагов эксперимента срastaются в две. Рост кристалла происходит из нескольких центров кристаллизации. Образовавшиеся кристаллиты срastaются под различными углами.

По графикам потенциальной энергии, представленным на рис. 2, можно было бы сделать вывод об адекватности данных, полученных с одинарной точностью за первые 15 000–20 000 шагов модельного времени. Однако графики на рис. 3 свидетельствуют о накоплении заметной ошибки уже за первые 10 000–15 000 шагов.

ВЫВОДЫ

Проведено множество молекулярно-динамических экспериментов с одинарной и двойной точностью арифметических расчетов для наноразмерных кластеров на основе оксида кремния, оксида магния и оксида кобальта. Результаты большинства проведенных вычислительных экспериментов качественно соответствуют результатам эксперимента, описанного в настоящей работе. Собранные данные свидетельствуют о критическом влиянии точности выполнения расчетов на конечную структуру моделируемых атомных кластеров.

На примере кристаллизации кластера на основе оксида магния показано, что использование одинарной точности в молекулярно-динамических расчетах приводит к потере вклада удаленных частиц при расчете сил межатомного взаимодействия, что выражается в снижении степени упорядоченности структуры моделируемого объекта. При моделировании неупорядоченных кластеров выявить различия в ходе экспериментов, проводимых с различной точностью, не удалось в силу сложности численного сравнения структуры этих кластеров.

Результаты всех вычислительных экспериментов, проведенных с двойной точностью, соответствуют результатам аналогичных экспериментов, проведенных с четверной точностью с использованием библиотеки *gcc libquadmath*. Следовательно, двойную точность для данной задачи и схемы интегрирования можно считать достаточной. Использование одинарной точности расчета может качественно изменить ход вычислительного эксперимента и не может быть оправдано приростом производительности, получаемой на таких вычислительных устройствах, как графические процессоры.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боярченков А. С., Поташников С. И. Использование графических процессоров и технологии CUDA для задач молекулярной динамики // *Вычислительные методы и программирование*. 2009. Т. 10. С. 9–23.
2. Боярченков А. С., Поташников С. И. Параллельная молекулярная динамика с суммированием Эвальда и интегрированием на графических процессорах // *Вычислительные методы и программирование*. 2009. Т. 10. С. 158–175.
3. Галимов М. Р., Биряльцев Е. В. Некоторые технологические аспекты применения высокопроизводительных вычислений на графических процессорах в прикладных программных системах // *Вычислительные методы и программирование*. 2010. Т. 11. С. 77–93.
4. Гельчинский Б. Р., Мирзоев А. А., Воронцов А. Г. *Вычислительные методы микроскопической теории металлических расплавов и нанокластеров*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 200 с.
5. Кривов М. А., Казеннов А. М. Сравнение вычислительных возможностей графических ускорителей NVidia при решении различных классов задач // *Труды Всероссийской научно-практической конференции «Применение гибридных высокопроизводительных вычислительных систем для решения научных и инженерных задач»*. Н. Новгород, 2011. С. 18–24.
6. Крупянский Д. С., Лобов Д. В., Осауленко Р. Н. Реализация метода молекулярной динамики посредством технологии Nvidia CUDA // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. Сер. «Естественные и технические науки». 2013. № 2 (131). С. 84–86.
7. Крупянский Д. С., Фофанов А. Д. Алгоритм поиска точечных подмножеств и его применение для анализа атомной структуры модельных кластеров // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Сер. «Математическое моделирование и программирование». Челябинск, 2014. Т. 7. № 2. С. 46–54.
8. Рит М. *Наноконструирование в науке и технике: введение в мир нанорасчета* / Пер. с англ. Э. М. Эпштейна. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. 160 с.
9. Хеерман Д. В. *Методы компьютерного эксперимента в теоретической физике* / Под ред. С. А. Ахманова. М.: Наука, 1990. 176 с.

10. Холмуродов Х. Т., Алтайский М. В., Пузынин И. В., Дардин Т., Филатов Ф. П. Методы молекулярной динамики для моделирования физических и биологических процессов // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. 2003. Т. 34, вып. 2. С. 472–515.
11. Goldberg D. What every computer scientist should know about floating-point arithmetic // *ACM Computing Surveys*. 1991. Vol. 23. P. 5–48.
12. Itu L. M., Moldoveanu F., Suciu C., Postelnicu A. Comparison of single and double floating point precision performance for Tesla architecture GPUs // *Bulletin of the Transilvania University of Braşov*. 2011. Vol. 4 (53). № 2. P. 131–138.
13. NVIDIA Corporation. NVIDIA CUDA C Best Practices Guide ver. 6.0. Santa Clara, CA, 2014.
14. Wezowicz M., Saunder D., Taufer M. Dealing with performance/portability and performance/accuracy trade-offs in heterogeneous computing systems: A case study with matrix multiplication modulo primes // *In Proc. SPIE 8403, Modeling and Simulation for Defense Systems and Applications VII*. 2012. P. 8–18.
15. Whitehead N., Fit-Florea A. Precision and Performance: Floating Point and IEEE 754 Compliance for NVIDIA GPUs // *Technical white paper by NVIDIA*. 2011.

Krupyanskiy D. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Fofanov A. D., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

IMPACT OF ARITHMETIC PRECISION ON RESEARCH RESULTS OF MOLECULAR-DYNAMIC SIMULATION

Research results of molecular-dynamic simulations, in which crystallization of atomic cluster MgO occurs, are considered in the article. 500 ions of magnesium and 500 ions of oxygen were randomly placed into a cube with a side of 35 Å as an initial configuration. In the study we used Born – Mayer – Huggins interatomic potential and Verlet scheme for integration of equations of motion. The Simulations were conducted with the single and double precision *ceteris paribus*. The changes in structural dynamics of the modeled objects are presented for both cases. Based on the obtained results we came to a conclusion that the calculation accuracy significantly influences the progress of ordering the atomic structure of the modeled object. We have shown that molecular-dynamic simulations require strict accuracy provided by double precision.

Key words: calculations accuracy, rounding errors, molecular dynamics

REFERENCES

1. Boyarchenkov A. S., Potashnikov S. I. The Use of GPUs and CUDA Technology for Molecular Dynamics Applications [Ispol'zovanie graficheskikh protsessorov i tekhnologii CUDA dlya zadach molekulyarnoy dinamiki]. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye*. 2009. Vol. 10. P. 9–23.
2. Boyarchenkov A. S., Potashnikov S. I. Parallel Molecular Dynamics with Evald's Summation and Integration on GPUs [Parallel'naya molekulyarnaya dinamika s summirovaniem Eval'da i integririrovaniem na graficheskikh protsessorakh]. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye*. 2009. Vol. 10. P. 158–175.
3. Galimov M. R., Biryal'tsev E. V. Some Technological Aspects of Application of High-performance Calculations on Graphic Processors in Applied Program Systems [Nekotorye tekhnologicheskie aspekty primeneniya vysokoproizvoditel'nykh vychisleniy na graficheskikh protsessorakh v prikladnykh programmnykh sistemakh]. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye*. 2010. Vol. 11. P. 77–93.
4. Gel'chinskiy B. R., Mirzoev A. A., Vorontsov A. G. *Vychislitel'nye metody mikroskopicheskoy teorii metallicheskh rasplavov i nanoklasterov* [Computational Methods in Microscopic Theory of Metal Melts and Nanoclusters]. Moscow, 2011. 200 p.
5. Krivov M. A., Kazennov A. M. Comparison of Computing Capabilities of NVidia Graphic Accelerators in the Solution of Various Classes of Tasks [Svravnenie vychislitel'nykh vozmozhnostey graficheskikh uskoriteley NVidia pri reshenii razlichnykh klassov zadach]. *Trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Primenenie gibridnykh vysokoproizvoditel'nykh vychislitel'nykh sistem dlya resheniya nauchnykh i inzhenernykh zadach"* [Proc. All-Russian scientific and practical conference "Application of hybrid high performance computing systems for solving scientific and engineering problems"]. Nizhniy Novgorod, 2011. P. 18–24.
6. Krupyanskiy D. S., Lobov D. V., Osaulenko R. N. Implementation of Molecular Dynamics Method Using Nvidia CUDA Technology [Realizatsiya metoda molekulyarnoy dinamiki posredstvom tekhnologii Nvidia CUDA]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University, Natural and Engineering Sciences]. 2013. № 2 (131). P. 84–86.
7. Krupyanskiy D. S., Fofanov A. D. An Algorithm Searching for Point Subsets with Applications to the Analysis of the Atomic Structure of Modelled Clusters [Algoritm poiska tochechnykh podmnozhestv i ego primeneniye dlya analiza atomnoy struktury model'nykh klasterov]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Matematicheskoe modelirovaniye i programmirovaniye"*. 2014. Vol. 7, № 2. P. 46–54.
8. Rit M. *Nanokonstruirovaniye v nauke i tekhnike: vvedeniye v mir nanorascheta* [Nano-Engineering in Science and Technology: An Introduction to the World of Nano-Design]. Moscow; Izhevsk, 2005. 160 p.
9. Heerman D. V. *Metody komp'yuternogo eksperimenta v teoreticheskoy fizike* [Computer Simulations Method in Theoretical Physics]. Moscow, 1990. 176 p.
10. Kholmurodov Kh. T., Altayskiy M. V., Puzynin I. V., Dardin T., Filatov F. P. Molecular dynamics method for simulations of physical and biological processes [Metody molekulyarnoy dinamiki dlya modelirovaniya fizicheskikh i biologicheskikh protsessov]. *Fizika elementarnykh chasti i atomnogo yadra*. 2003. Vol. 34, № 2. P. 472–515.
11. Goldberg D. What every computer scientist should know about floating-point arithmetic. *ACM Computing Surveys*. 1991. Vol. 23. P. 5–48.
12. Itu L. M., Moldoveanu F., Suciu C., Postelnicu A. Comparison of single and double floating point precision performance for Tesla architecture GPUs. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov*. 2011. Vol. 4 (53). № 2. P. 131–138.
13. NVIDIA Corp. NVIDIA CUDA C Best Practices Guide ver. 6.0. Santa Clara, CA, 2014.
14. Wezowicz M., Saunder D., Taufer M. Dealing with performance/portability and performance/accuracy trade-offs in heterogeneous computing systems: A case study with matrix multiplication modulo primes. *In Proc. SPIE 8403, Modeling and Simulation for Defense Systems and Applications VII*. 2012. P. 8–18.
15. Whitehead N., Fit-Florea A. Precision and Performance: Floating Point and IEEE 754 Compliance for NVIDIA GPUs. *Technical white paper by NVIDIA*. 2011.

ВИТАЛИЙ БОРИСОВИЧ ПИКУЛЕВ

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
pikulev@petrsu.ru

ПАВЕЛ ФЕДОРОВИЧ ПРОКОПОВИЧ

аспирант кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
proxy88@petrsu.ru

ВАЛЕРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ ГУРТОВ

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
vgurt@petrsu.ru

ВЛИЯНИЕ ОЗОНА НА ЗАРЯДОПЕРЕНОС В МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЕ*

Исследованы эффекты зарядопереноса в микро- и нанокристаллической целлюлозе при воздействии озона, проинтерпретированы механизмы зарядопереноса в диэлектрике в рамках модели перколяционной проводимости. Показано, что ток через контакт «медь – целлюлоза» в условиях атмосферы квазилинейно возрастает при постоянной величине потока озона вблизи поверхности целлюлозы, а при прекращении озонового воздействия релаксирует к исходно малому значению. Высказано предположение, что данный эффект связан с генерацией озоном дополнительного количества ионов гидроксония на сетке водяных мостиков, с увеличением концентрации воды в порах, а также с нейтрализацией избыточных протонов при диссоциации молекулы озона вблизи отрицательно заряженного медного электрода. Полученные результаты позволяют использовать данный эффект для обнаружения озона, начиная с его естественной атмосферной концентрации.

Ключевые слова: газовый сенсор, перколяционная проводимость, ион гидроксония

Хорошо известно, что озон является для человека чрезвычайно важным соединением: в больших количествах он используется как окислитель в микроэлектронике, бумагоделательном производстве и других отраслях промышленности; атмосферный озон формирует условия жизнедеятельности человека и сохраняет биосферу Земли. Формально не являясь радикалом, озон имеет одно из наиболее высоких значений стандартного редокс-потенциала (после атома фтора, атома кислорода и гидроксильного радикала), в связи с чем он, как и продукты его распада, выступает в качестве окислителя для многочисленных классов органических и неорганических материалов [1], [2]. С другой стороны, озон является опасным для здоровья газом при несоблюдении технологических норм и превышении допустимых концентраций. Предельно допустимая концентрация (ПДК) озона в воздухе составляет $0,1 \text{ мг/м}^3$ (см. ГОСТ № 12.1.005–88).

Детекторы озона, используемые в настоящее время, достаточно разнообразны по принципам работы: оптические, химические, электрохимические, абсорбционные. К последним можно отнести ряд широкозонных полупроводниковых

соединений, в которых адсорбция молекул озона приводит к изменению электропроводности. Как стационарные, так и компактные детекторы технологически сложны в изготовлении и эксплуатации и, следовательно, дороги. При этом по селективности и стабильности портативные датчики значительно уступают референсной спектроскопической методике [1], [5].

Суть представленного в данной работе исследования состоит в обнаружении эффекта увеличения электрического тока, проходящего через таблетку пористого полимера, в присутствии озоновых молекул, начиная с концентраций, существенно меньших ПДК. Образцы получены нами методом прессования либо химически чистой микрокристаллической целлюлозы (МКЦ), либо полученной из нее нанокристаллической целлюлозы (НКЦ, степень кристалличности $70 \pm 5 \%$) под давлением 26 МПа в нормальных условиях. Способ приготовления и свойства НКЦ были подробно рассмотрены нами в работе [6].

Плотность полученного материала таблеток, подвергнутого вакуумной сушке без нагрева, не превышала $1,40 \pm 0,1 \text{ г/см}^3$, что, в сравнении с предельной плотностью молекул целлюлозы

1,57 г/см³, позволило оценить нижнюю границу пористости образцов в 14 %. В эту оценку не входит кристаллизационная вода и вода в закрытых порах, качественно наблюдаемая на ИК-спектрах. Гравиметрический анализ показал, что при нормальных условиях ~35 % открытых пор занято водой, что позволяет оценить естественную влажность образца в 5 ± 2 %.

Для исследования электрических свойств полученных материалов была сконструирована измерительная ячейка, в которой контактами к таблетке служили два медных цилиндрических электрода, один из которых был сделан полым для обеспечения доступа газа к поверхности полимера (рис. 1). Измерительная ячейка была смонтирована в камере вакуумной установки, что одновременно решало проблемы защиты от электрических помех, обезвоживания и напуска контролируемого количества газа. В качестве измерителя тока использовался управляемый от компьютера прецизионный пикоамперметр Keithley 6485, установка стабилизированного напряжения осуществлялась программно с помощью лабораторных источников APS 7151 и АКПП 1111. Для генерации озона были использованы либо две ультрафиолетовые лампы TUV-15W, либо высоковольтный генератор барьерного разряда, помещаемые в закрытую емкость с принудительным отводом газа.

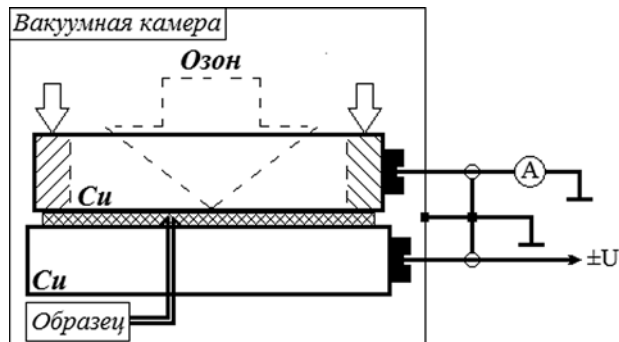


Рис. 1. Схема эксперимента

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) для образцов наноцеллюлозы, подвергнутых сначала вакуумированию, а затем обработке в парах воды, приведены на рис. 2. При измерениях контролировалась релаксация тока для каждого значения напряжения. Проявленный квазилинейный характер ВАХ является сверткой существенно нелинейных эффектов поляризации и зарядопереноса как на границе «металл – полимер», так и в объеме материала.

Вакуумная сушка образцов приводила к тому, что вода испарялась из открытых пор полимерной матрицы, при этом было зафиксировано уменьшение массы на величину порядка 1 %. Обработка в парах воды в течение 15 мин. увеличивала массу образца на 2–3 %. После пребывания образца в нормальных условиях в течение

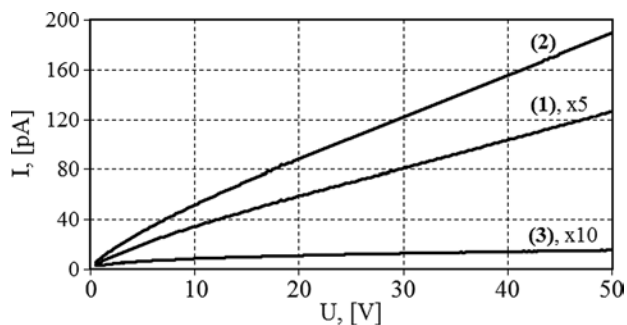


Рис. 2. Влияние влажности на токи в наноцеллюлозе. Цифрами обозначены ВАХ: 1 – в нормальных условиях (атмосфера); 2 – после 15 мин. обработки парами воды при атмосферном давлении; 3 – после 1,5 часа в вакууме при 3 мПа. Измерения проводились при комнатной температуре

нескольких дней, первоначальная масса образца восстанавливалась как в случае сушки, так и в случае увлажнения.

В качестве механизма, объясняющего протекание токов в сформированном из целлюлозы пористом материале, в согласии с точкой зрения [3] и [4], нами рассматривается перенос ионов водорода по водяной сетке, сформированной как кристаллизационной, так и подвижной водой в порах исследуемого материала (рис. 3). Предполагается, что при указанной выше плотности вещества молекулы воды могут формировать в структуре целлюлозы квазинепрерывную трехмерную сетку, по которой могут перемещаться протоны, связанные с молекулами воды (ионы гидроксония). На электрическое поле внутри образца оказывает влияние и сама матрица целлюлозы, состоящая из полярных молекул, способных к некоторой переориентации в пространстве. Наши эксперименты свидетельствуют, что зарядоперенос и эффекты поляризации более выражены у МКЦ, подвергнутой химической и механической деформации, что легко объяснить уменьшением в этом случае степени полимеризации молекул целлюлозы.

Ввиду ионного характера проводимости целлюлозной матрицы медные контакты являются контактами блокирующего типа, что, в свою очередь, приводит к накоплению заряда вблизи электродов и возникновению приэлектродной, миграционной поляризации. Вектор напряженности поля, обусловленного данным типом поляризации, направлен навстречу тянущему полю, что приводит к возникновению обратного диффузионного тока и в связи с этим к уменьшению измеряемого тока со временем при приложении напряжения. Очевидно, достигая контакта, ионы гидроксония нейтрализуются, уменьшая тем самым величину объемного заряда в приэлектродной области. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению потенциального барьера вблизи контакта «медь – целлюлоза» и определяет минимальную (при заданном напряжении и температуре) величину ионного тока.

На релаксацию тока, протекающего через образец, также оказывает влияние переориентация звеньев целлюлозных цепочек. Именно изменением пространственного положения молекул целлюлозы может быть объяснена наблюдаемая нами длительная (до нескольких часов) релаксация токов. Перемещение целлюлозных молекул, наряду с абсорбцией паров воды, оказывает влияние, в свою очередь, на целостность водяных мостиков и, соответственно, на величину тока, протекающего через образец.

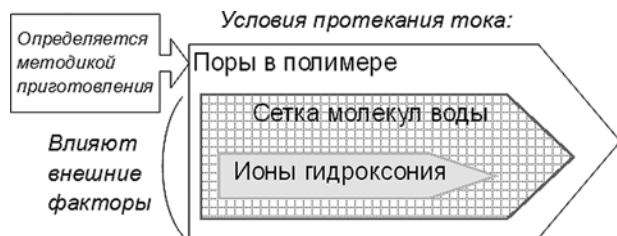


Рис. 3. Предположительный механизм зарядопереноса в МКЦ и НКЦ

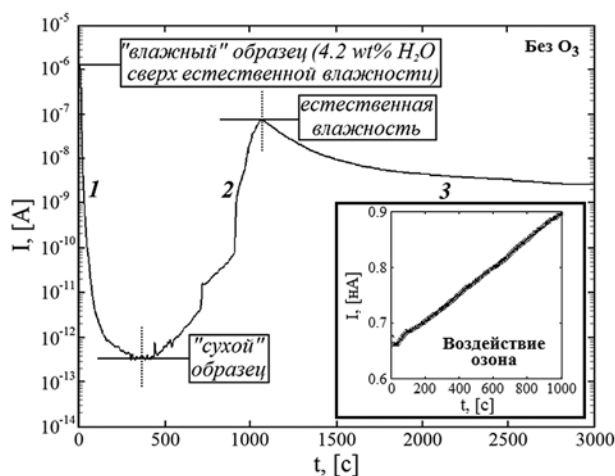


Рис. 4. Кинетика релаксации тока для контакта НКЦ – медь в условиях вакуума (1) и в атмосферном воздухе с влажностью 65 % (3). Участок 2 соответствует напуску воздуха в вакуумную камеру. На врезке показан эффект роста тока при постоянном темпе подвода молекул озона при комнатной температуре, естественной влажности и постоянном приложенном напряжении (25 В)

При отсутствии озонового воздействия кинетика релаксации тока при постоянном напряжении на контактах структуры показана на рис. 4 (области 1 и 3). Следует отметить, что в зависимости от предыстории зарядки образца целлюлозы, особенностей его изготовления и прессования, материала проводящих контактов вид функции релаксации может варьироваться в широких пределах, однако общей тенденцией во всех случаях является уменьшение величины тока со временем.

Характерный участок кинетики роста тока при озоновом воздействии показан на врезке к рис. 4. Поток воздуха, содержащего озон, пода-

вался в камеру с образцом с постоянной скоростью в течение всего времени эксперимента. На начальной стадии озонового воздействия, в силу компенсации эффекта релаксации тока, кривая проходит через минимум, при этом время выхода на линейный рост определяется в первую очередь проводимостью образца и интенсивностью озонолиза. Далее рост тока при различных величинах потока озона аппроксимируется линейной функцией, при этом тангенс угла наклона пропорционален скорости подвода озона к поверхности образца. Диапазон концентраций озона, при которых наблюдался вышеупомянутый эффект, простирался от естественных природных концентраций озона в атмосфере (аналогичных возникающим при близком грозном разряде) до нескольких ПДК.

Возможность использования контакта «медь – целлюлоза» для детектирования озона в периодическом режиме продемонстрирована на рис. 5. На первых тридцати секундах завершалось высушивание образца в потоке воздуха. Вплоть до 1200-й секунды шел озонолиз, затем до 2000-й секунды проводилась продувка образца атмосферным воздухом. Начиная с 2000-й секунды вновь был включен генератор озона. Представленные на рис. 5 результаты показывают, что в исследованном временном интервале эффект воспроизводим: с помощью озонирования можно поднять ток, с помощью продувки – вновь вернуть образец в исходное состояние, при этом изменения угла наклона линейной части кинетики после восстановления образца не наблюдается.

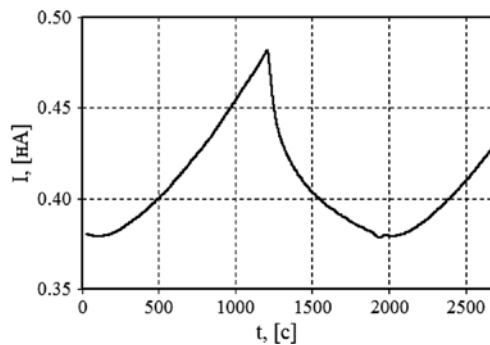


Рис. 5. Кинетика изменения электрического тока через образец наноцеллюлозы при периодическом воздействии потока озона (при постоянном напряжении 30 В)

Базируясь на предположениях о характере проводимости в целлюлозной матрице, можно считать, что эффект усиления тока при озоновом воздействии возникает (1) из-за появления дополнительного количества воды в порах и (2) из-за генерации дополнительного количества протонов на водяной сетке. В [2] предложен путь: $O_3 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow O_2 + H_2O$; $O_3 + H_2O + e^- \rightarrow O_2 + 2OH^-$, что приводит к увеличению количества воды и катионов гидроксильных групп. Однако катионы OH^- , по нашему предположению, не участвуют в пере-

носе заряда. Продолжение цепочки реакций рассмотрено в [5]: $O_3 + OH^- = O_2^- + HO_2^-$, затем $HO_2^- \rightarrow O_2^- + H^+$, то есть, в конечном итоге, увеличивается количество протонов. Учитывая высокую экзотермичность реакции распада молекул озона, возможно образование различных радикалов, поэтому здесь указаны лишь наиболее значимые пути.

Взаимодействие озона с протонами, приводящее к увеличению содержания воды в порах приэлектродной области, способствует дополнительной нейтрализации ионов гидроксония на границе раздела «медь–целлюлоза» и, таким образом, ведет к уменьшению времени релаксации и увеличению абсолютной величины тока, протекающего через систему. Действительно, напуск озона при отрицательной полярности полого медного электрода приводит к токовому отклику системы на ~10 % большему, чем в случае положительной полярности.

Проведенные нами измерения ИК-спектров образцов НКЦ в НПВО-ячейке при непосред-

ственном воздействии озона показывают рост широкого пика в диапазоне от 3000 до 3500 см^{-1} , а также пиков в районе 1400 см^{-1} , что наиболее естественно объяснить ростом количества –ОН-групп в целлюлозе. При этом образующаяся слабосвязанная вода при продувке образца воздухом может легко десорбироваться и вернуться в атмосферу, что позволяет детектору многократно восстанавливать свою работоспособность.

Таким образом, нами установлен и описан эффект влияния озона на проводимость системы «медь – целлюлоза». Данный эффект может найти применение при конструировании компактных и недорогих датчиков озона. Используемый диапазон значений токов вполне доступен для широко применяемых современных операционных усилителей, что не создает проблем с анализом сигнала. Гораздо более серьезной технологической задачей будет являться периодическая автоматическая калибровка датчика с учетом температуры и влажности воздуха.

* Исследования проведены в рамках реализации Программы стратегического развития на 2012–2016 годы «Университетский комплекс ПетрГУ в научно-образовательном пространстве Европейского Севера: стратегия инновационного развития».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лунин В., Попович М., Ткаченко С. Физическая химия озона. М.: МГУ, 1998. 480 с.
2. Beltran F. J. Ozone Reaction Kinetics for Water and Wastewater Systems. CRC Press, 2003. 384 p.
3. Nilsson M., Strømme M. Electrodynamic Investigations of Conduction Processes in Humid Microcrystalline Cellulose Tablets // J. Phys. Chem. B. 2005. Vol. 109. P. 5450–5455.
4. Nilsson M., Frenning G., Gråsjö J., Alderborn G., Strømme M. Conductivity Percolation in Loosely Compacted Microcrystalline Cellulose: An in Situ Study by Dielectric Spectroscopy during Densification // J. Phys. Chem. B. 2006. Vol. 110. P. 20502–20506.
5. O'Donnell C., Tiwari B. K., Cullen P. J., Rice R. G. Ozone in Food Processing. Wiley, 2012. 300 p.
6. Pikulev V., Loginova S., Gurtov V. Luminescence properties of silicon-cellulose nanocomposite // Nanoscale Research Letters. 2012. Vol. 7. P. 426:1–6.

Pikulev V. B., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Prokopovich P. F., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Gurtov V. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

INFLUENCE OF OZONE ON CHARGE TRANSFER IN MICROCRYSTALLINE CELLULOSE

Effects of the charge transfer in micro- and nano-crystalline cellulose under the ozone influence were studied. In the frames of the percolation conductivity model an interpretation of mechanisms promoting the charge transport in dielectrics was suggested. The experiment showed that the electric current through the “copper-cellulose” contact under atmospheric conditions demonstrates a quasi-linear increase at constant ozone flux over the surface of a cellulose tablet. Upon ozone exposure termination the current relaxes to the initial small value. We believe that this effect is caused by the generation of extra amounts of hydronium ions on the grid of water bridges under ozone exposure, and is also induced by the increase of water concentration in the pores. It is also associated with neutralization of excess protons during dissociation of ozone molecules near the negatively charged copper electrode. The obtained results allow using this effect for ozone detection starting from small atmospheric concentration of ozone.

Key words: gas sensor, percolation conductivity, hydronium ion

REFERENCES

1. Lunin V., Popovich M., Tkachenko S. *Fizicheskaya khimiya ozona* [Physical chemistry of ozone]. Moscow, MSU Publ., 1998. 480 p.
2. Beltran F. J. Ozone Reaction Kinetics for Water and Wastewater Systems. CRC Press, 2003. 384 p.
3. Nilsson M., Strømme M. Electrodynamic Investigations of Conduction Processes in Humid Microcrystalline Cellulose Tablets // J. Phys. Chem. B. 2005. Vol. 109. P. 5450–5455.
4. Nilsson M., Frenning G., Gråsjö J., Alderborn G., Strømme M. Conductivity Percolation in Loosely Compacted Microcrystalline Cellulose: An in Situ Study by Dielectric Spectroscopy during Densification // J. Phys. Chem. B. 2006. Vol. 110. P. 20502–20506.
5. O'Donnell C., Tiwari B. K., Cullen P. J., Rice R. G. Ozone in Food Processing. Wiley, 2012. 300 p.
6. Pikulev V., Loginova S., Gurtov V. Luminescence properties of silicon-cellulose nanocomposite // Nanoscale Research Letters. 2012. Vol. 7. P. 426:1–6.

Поступила в редакцию 29.12.2014

КРИСТИНА ВЯЧЕСЛАВОВНА СТЕПАНОВА

аспирант кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
lady.cristin4ik@yandex.ru

НАТАЛЬЯ МИХАЙЛОВНА ЯКОВЛЕВА

доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
ntyakov@gmail.com

АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ КОКАТЕВ

кандидат технических наук, инженер НИЛ «Физика наноструктурированных оксидных пленок и покрытий» физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
nelan-oksids@bk.ru

ХОКАН ПЕТТЕРССОН

профессор, заведующий лабораторией математики, физики и электротехники, Университет г. Хальмштад (Хальмштад, Швеция)
Hakan.Pettersson@hh.se

НАНОПОРИСТЫЕ АНОДНО-ОКСИДНЫЕ ПЛЕНКИ НА ПОРОШКОВОМ СПЛАВЕ Ti-40%Al*

Объектами исследования являлись образцы из прессованного порошка сплава Ti-40%Al до и после анодирования во фторсодержащем водном растворе 10% H_2SO_4 + 0,15%HF. Изучено влияние параметров анодирования (режима, плотности тока, напряжения и времени анодирования) на ход кинетических зависимостей $U_a(t)$ и $j_a(t)$. Установлены оптимальные условия процесса для формирования самоорганизованных наноструктурированных оксидных пленок. Исследовано строение поверхности как торцов, так и сломов образцов до и после анодирования при оптимальных условиях методом сканирующей электронной микроскопии. Впервые показано, что при оптимальных условиях на поверхности микрочастиц порошка формируется самоорганизованная пористая оксидная пленка толщиной порядка 350 нм и эффективным диаметром основных пор $\langle d_n \rangle = (70 \pm 10)$ нм. Установлено, что химический состав оксидной пленки представлен в основном Al, Ti, O, а ее структура соответствует совокупности TiO_2 и Al_2O_3 в соотношении, близком 1:1. Анодирование жаропрочного порошкового сплава Ti-40%Al во фторсодержащем водном электролите перспективно для создания новых каталитически активных наноматериалов.

Ключевые слова: анодирование, нанопористые, оксидные пленки, порошковый сплав, титан-алюминий

ВВЕДЕНИЕ

Известно [8], [15], что при определенных условиях электрохимического оксидирования (анодирования) титана во фторсодержащих электролитах на его поверхности образуются нанотрубчатые оксидные пленки, исследование которых актуально как с фундаментальной точки зрения изучения самоорганизованных оксидных наноструктур, так и по причине широкого спектра современных применений, например в фотокатализе и имплантологии [11]. Однако практическое использование нанотрубчатых анодных пленок оксида титана, к достоинствам которых следует отнести достаточно узкое распределение трубок по размерам и высокую удельную поверхность, сдерживается их слабыми механическими свойствами. Согласно [1], [3], [7], [12], для получения интегрированного регулярно пористого массива диоксида титана необходимо исполь-

зовать специальные методики анодирования, требующие больших временных затрат. Анодирование алюминия позволяет сформировать высокоупорядоченные пористые оксидные пленки с заданным диаметром пор и толщиной, а также отличной адгезией с металлической подложкой [10], [16], [17]. Самоорганизованный нанопористый анодный оксид алюминия образуется в условиях синергетики процессов роста и растворения оксидной пленки, что реализуется при анодировании Al в большом числе слабо растворяющих оксид электролитов [17]. Анализ литературных данных показывает, что формирование оксидных нанотрубок во фторсодержащих электролитах на Ti также является результатом одновременно происходящих процессов роста и растворения оксида, причем последний обусловлен агрессивным воздействием фтор-ионов. Отсюда следует возможность создания нанопористого оксидного

покрытия при анодировании сплава Ti-Al. Следует отметить, что многие сплавы на основе системы Ti-Al обладают прочностью при высоких температурах [2], сравнимой с прочностью никелевых суперсплавов. Легирование титановых сплавов алюминием значительно увеличивает сопротивление ползучести, то есть существенно повышает их жаропрочность. В соответствии с этим сплавы системы Ti-Al с большим содержанием алюминия являются перспективным материалом для высокотемпературных применений [14].

В работах [9], [18] приводятся результаты исследований формирования оксидных пленок при анодировании в водном растворе 10% H_2SO_4 с добавкой 0,15% HF интерметаллидных соединений системы Ti-Al: TiAl, TiAl₃, Ti₃Al. Показано, что для исследованных соединений формирование самоорганизованных оксидных слоев происходит в достаточно широком диапазоне значений напряжения анодирования U_a . Причем в зависимости от величины U_a и состава сплава возможно получение оксидов как с нанопористой, так и с нанотрубчатой структурой. Авторами [9] установлено, что для формирования пористого оксидного слоя следует использовать сплавы с содержанием Al не менее 19 вес.%. Согласно диаграмме состояния системы Ti-Al [2], в концентрационной области от 33 до 46 вес.% Al присутствует лишь гомогенная γ -фаза TiAl, имеющая гранецентрированную тетрагональную решетку типа CuAu. В [6] сообщается, что с увеличением содержания Al сохраняется упорядоченная структура фазы TiAl (36 вес.% Al), но происходит замещение части атомов Ti атомами Al. Таким образом, согласно [9], при анодировании γ -TiAl во фторсодержащих электролитах возможно формирование на поверхности самоорганизованных пористых анодно-оксидных пленок.

Весьма актуально изучение анодирования образцов из спеченного порошка сплава Ti-Al, имеющих достаточно высокую удельную поверхность. В этом случае при формировании нанопористой анодной оксидной пленки на поверхности частиц порошка произойдет заметное увеличение удельной поверхности образца и, соответственно, рост химической активности [4]. Отсюда следует, что анодирование порошкового жаропрочного сплава Ti-Al во фторсодержащих электролитах позволит решить проблему создания устойчивого наноструктурированного оксидного покрытия, проявляющего, в частности, каталитические свойства. Однако сведений о получении наноструктурированных анодно-оксидных пленок на поверхности образцов из спеченного порошка сплава Ti-Al в литературе не обнаружено.

Целью настоящей работы являлось изучение особенностей формирования нанопористых оксидных пленок при анодировании образцов спеченного порошкового сплава Ti-40%Al во фторсодержащем водном электролите.

МЕТОДИКА

Объектами исследования являлись цилиндрические образцы из прессованного порошка сплава Ti-40%Al с площадью поверхности $S_{\text{пов}} \approx 560 \text{ см}^2$ и удельной поверхностью $S_{\text{уд}} \approx 1600 \text{ см}^2/\text{г}$ до и после анодирования во фторсодержащем водном электролите 10% H_2SO_4 + 0,15% HF . Перед анодированием образцы химически очищались в ультразвуковой ванне в ацетоне и спирте, затем тщательно промывались в дистиллированной воде и сушились. Анодирование осуществлялось при комнатной температуре с использованием трехэлектродной ячейки с танталовым катодом и платиновым противэлектродом. В процессе роста оксидной пленки регистрировались зависимости напряжения от времени $U_a(t)$ при анодировании образцов при постоянной плотности тока (гальваностатический режим – ГСР) или зависимости плотности тока от времени $j_a(t)$ – в условиях постоянного напряжения (вольтстатический режим – ВСР). Кинетические зависимости тока и напряжения регистрировались с помощью электронных самописцев REGIGRAPH Ф1771-АД и ЭРБИЙ-7115, связанных с компьютером.

Анализ кинетики роста дополнялся исследованием строения образцов методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с помощью микроскопов JEOL JSM-6480LV и FIB/SEM FEI Nova NanoLab 600. Проводилось изучение поверхности как торцов, так и сломов цилиндрических образцов до и после анодирования. Параллельно оценивался химический состав образцов с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС). Сбор данных проводился для нескольких участков, выбранных на предварительно полученном СЭМ-изображении поверхности с последующим количественным анализом элементного состава. Толщина оксидных пленок определялась по электронно-микроскопическим изображениям сломов образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поскольку анодирование образцов из спеченного порошка сплава Ti-Al во фторсодержащих электролитах проводилось впервые, то выявление параметров процесса, приводящих к формированию наноструктурированной анодной оксидной пленки (АОП) на поверхности образцов, осуществлялось экспериментально. С этой целью было выполнено исследование влияния параметров анодирования (режима, плотности тока, напряжения и времени анодирования) на ход кинетических зависимостей $U_a(t)$ и $j_a(t)$.

На первом этапе был реализован вольтстатический режим анодирования порошковых образцов с регистрацией зависимостей $j_a(t)$. Величины напряжения, при которых осуществлялось формирование оксидного слоя, были выбраны с учетом результатов, полученных в работах [9], [18] при анодировании плоских образцов

γ -TiAl в том же электролите, и составили $U_a = 10, 15$ и 20 В. Следует отметить, что для исключения появления «экстратоков» в начале вольтстатического анодирования рекомендуется подъем напряжения до заданного значения осуществлять со скоростью не более 50 мВ/с [18]. В данной работе величина начального тока ограничивалась возможностями использованного источника тока и составляла $j_a \sim 0,53$ мА/см². Таким образом, подъем U_a осуществлялся при постоянной плотности тока со скоростью порядка 30 мВ/с. Как видно из рис. 1, ход кривых $j_a(t)$ для всех использованных значений U_a типичен для формирования самоорганизованной нанопористой или нанотрубчатой АОП [11], [17]. Так, на зависимостях $j_a(t)$ выделяются характерные, соответствующие различным этапам формирования АОП участки: (а) – спада тока, соответствующий образованию первичного плотного (барьерного) оксидного слоя, (б) – увеличения плотности тока из-за локального его растворения, (в) – стабилизации тока для стадии стационарного роста пор. Отметим, что при всех значениях U_a время достижения стадии стационарного роста было близко к 1 часу, а соответствующая величина стационарного тока составляла $j_{\text{стац}} \sim 0,1$ мА/см².

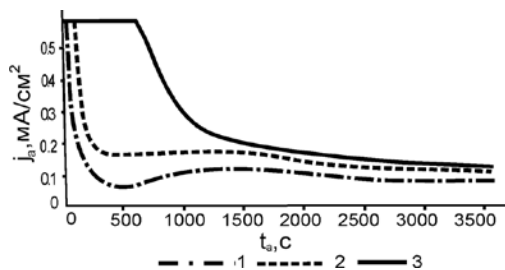


Рис. 1. Кривые $j_a(t)$, полученные при вольтстатическом анодировании в течение 1 часа образцов Ti-40%Al в $10\%H_2SO_4 + 0,15\%HF$ при различных значениях напряжения U_a : 1 – 10 В, 2 – 15 В, 3 – 20 В

По этой причине на втором этапе изучалось анодирование порошковых образцов в гальваностатическом режиме при значениях $j_a = 0,1, 0,2, 0,3$ мА/см² (рис. 2). Вид кривых $U_a(t)$, приведенных на рис. 2, близок к характерным для формирования пористых АОП в гальваностатическом режиме: на начальном этапе происходит рост плотного (барьерного) оксидного слоя, что вызывает увеличение напряжения анодирования, затем имеет место замедление роста U_a , связанное с началом процесса локального растворения барьерного слоя и образованием пор, и, наконец, самоорганизация пор, с наступлением которой напряжение стабилизируется и происходит стационарный рост пористого слоя.

Наиболее характерный для формирования самоорганизованного наноструктурированного анодного оксида вид имеет кривая $U_a(t)$, полученная при значении $j_a = 0,2$ мА/см². В этом случае

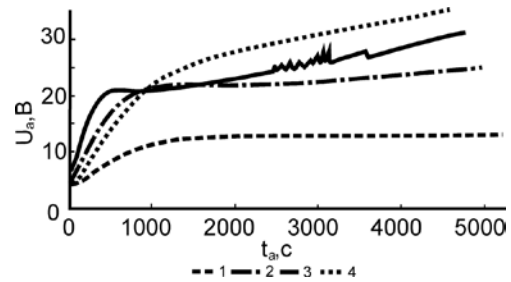


Рис. 2. Кривые $U_a(t)$, полученные при гальваностатическом анодировании в течение 85 мин. образцов Ti-40%Al в $10\%H_2SO_4 + 0,15\%HF$ при различных значениях плотности тока j_a : 1 – $0,1$ мА/см², 2 – $0,2$ мА/см², 3 – $0,3$ мА/см², а также 4 – в $10\%H_2SO_4$ при $j_a = 0,2$ мА/см²

величина стационарного напряжения ($U_a \sim 20$ В) достаточно близка к значению напряжения вольтстатического анодирования в том же электролите, рекомендованному в [18] для плоских образцов γ -TiAl. Следует отметить, что оптимальное время анодирования при $j_a = 0,2$ мА/см² составляет 85 мин., поскольку дальнейшее продолжение процесса приводит к резкому возрастанию температуры раствора.

Сравнение анодирования порошкового сплава Ti-40%Al в ГСР при установленном оптимальном значении $j_a = 0,2$ мА/см² в электролитах $10\%H_2SO_4$ и $10\%H_2SO_4 + 0,15\%HF$ показало, что ход зависимостей $U_a(t)$ в этих электролитах различен (см. рис. 2). Если зависимость $U_a(t)$ при анодировании во фторсодержащем растворе (кривая 2) типична для роста самоорганизованных нанопористых/нанотрубчатых оксидных пленок, то при анодировании в $10\%H_2SO_4$ (кривая 4) на кривой наблюдаются два близких к линейным участка с разным наклоном. Согласно [5], [13], такой перегиб на кривой может быть связан с началом процесса кристаллизации сформированной на первом этапе барьерной оксидной пленки и обычно сопровождается увеличением температуры раствора.

Таким образом, анодирование порошкового сплава Ti-40%Al в вольтстатическом режиме при $U_a = 15$ В и гальваностатическом режиме при $j_a = 0,2$ мА/см² в водном фторсодержащем электролите $10\%H_2SO_4 + 0,15\%HF$ характеризуется кинетическими зависимостями $j_a(t)$ и $U_a(t)$, типичными для формирования самоорганизованных наноструктурированных оксидных пленок.

На следующем этапе было выполнено электронно-микроскопическое изучение строения поверхности образцов до и после анодирования при оптимальных условиях. Результаты ЭДС-анализа подтвердили, что порошок соответствует составу Ti-40%Al. Как видно из рис. 3а, размер частиц порошка находится в диапазоне от 1 до 20 мкм при преобладании мелкодисперсной фазы. Электронно-микроскопические исследования как торцов, так и сломов образцов, анодированных в условиях вольтстатического режима в течение 1 часа при $U_a = 10-15$ В, показали, что на поверхности частиц порошка присутствует «дефектный по-

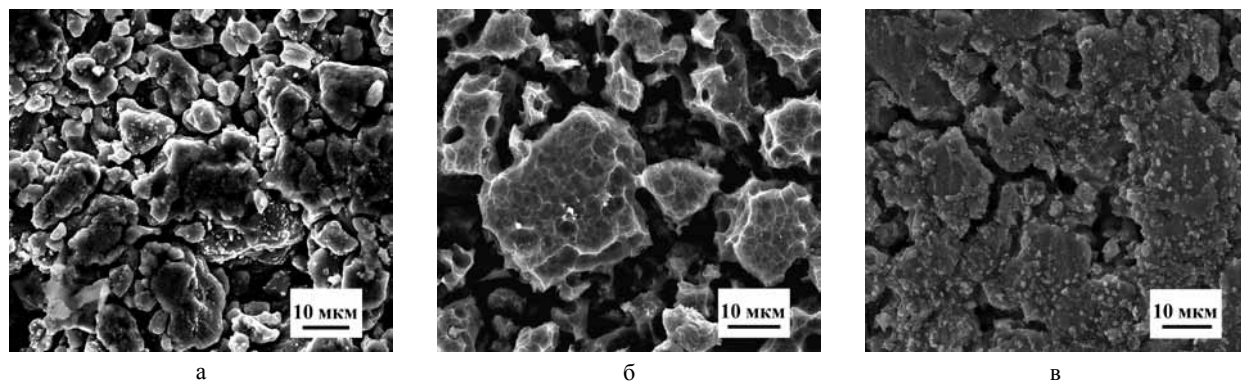


Рис. 3. СЭМ-изображения поверхности образцов порошкового сплава Ti-40%Al до (а) и после анодирования в 10% H_2SO_4 + 0,15% HF при $T_a = 293$ К: (б) в гальваностатическом режиме при $j_a = 0,2$ мА/см 2 в течение $t_a = 85$ мин. и (в) вольтстатическом режиме при $U_a = 10$ В, $t_a = 60$ мин.

ристый слой» (рис. 3в) толщиной порядка 10 нм, отражающий состояние оксида на стадии зарождения и развития пор в барьерном слое [9], [18]. Для данного слоя характерно наличие трещин, на отдельных участках отмечается присутствие неупорядоченно расположенных пор. При увеличении напряжения до $U_a = 20$ В на поверхности оксидного слоя, покрытого многочисленными трещинами, появляются отдельные выходы пор диаметром 30–40 нм. На основе вышесказанного можно предположить, что для формирования пористой АОП, характеризующейся отсутствием верхнего дефектного слоя, в условиях вольтстатического режима следует увеличить либо величину напряжения, либо время анодирования, что, как было обнаружено, в обоих случаях влечет за собой разогрев электролита, интенсифицирующий процесс растворения формируемой оксидной пленки.

Как видно из рис. 3б и 4, применение гальваностатического режима при установленных оптимальных условиях приводит к формированию как на торцах, так и сломах образцов нанопористой оксидной пленки толщиной $\delta \approx 300\text{--}350$ нм, что хорошо соответствует величине, полученной в [9], [18] при анодировании плоских образцов $\gamma\text{-TiAl}$ в том же электролите. Присутствие дефектного слоя отмечается лишь

Результаты ЭДС-анализа элементного состава для нескольких участков поверхности порошковых образцов, подвергнутых анодированию в 10% H_2SO_4 + 0,15% HF в течение 85 мин. при $j_a = 0,2$ мА/см 2

Элемент	Массовая доля элементов, вес. %			
	Участок 1	Участок 2	Участок 3	Участок 4
O	37,1	32,6	40,1	38,2
Al	30,8	26,9	25,3	22,5
S	2,6	2,3	2,4	3,9
Ti	29,5	33,0	32,3	35,5

на отдельных участках поверхности (рис. 4а). Как следует из изображений поверхности сломов образцов (рис. 4б), этот слой имеет толщину порядка 10–20 нм и характеризуется слабой адгезией к основному пористому массиву. Статистический анализ дает величину эффективного диаметра регулярных пор $\langle d_p \rangle = (70 \pm 10)$ нм. Следует отметить, что уровень формирования самоорганизованной структуры оксида на разных микрочастицах порошка неодинаков. Так, на поверхности некоторых частиц анодированных образцов наблюдается присутствие остатков дефектного слоя, тогда как на большинстве он отсутствует. Этот факт может быть объяснен с позиции различной скорости формирования

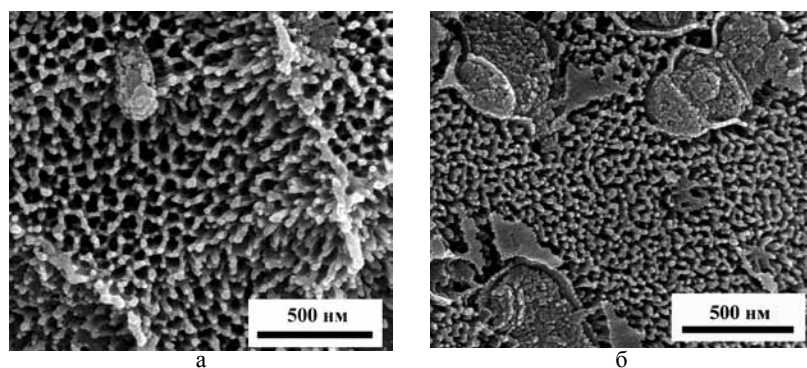


Рис. 4. СЭМ-изображения поверхности образцов порошкового сплава Ti-40%Al после гальваностатического анодирования в 10% H_2SO_4 + 0,15% HF при $T_a = 293$ К, $j_a = 0,2$ мА/см 2 , $t_a = 85$ мин.: торец (а) и слом (б)

оксидного слоя на отдельных микрочастицах порошка. Результаты изучения состава сформированных в оптимальных гальваностатических условиях оксидных пленок методом ЭДС представлены в таблице. Для всех исследованных участков, наряду с основными элементами Al, Ti, O, обнаруживается незначительное количество серы. Присутствие F не выявлено. Данные ЭДС-анализа позволяют говорить, что формируемый оксид в основном состоит из TiO_2 и Al_2O_3 в соотношении 1:1, что соответствует данным рентгеноспектрального анализа [18]. Оценка, сделанная исходя из размера пор и толщины оксидного слоя, показывает, что в результате анодирования во фторсодержащем электролите происходит увеличение площади поверхности образцов порошкового сплава Ti-40%Al примерно в 20 раз.

ВЫВОДЫ

Путем изучения влияния условий анодирования порошкового сплава Ti-40%Al на кинети-

ку роста оксидных пленок во фторсодержащем водном электролите (10% H_2SO_4 + 0,15% HF) установлено, что оптимальным для формирования самоорганизованной нанопористой структуры является применение гальваностатического режима при плотности тока $j_a=0,2$ mA/cm^2 .

Показано, что при оптимальных условиях на поверхности микрочастиц порошка формируется пористая оксидная пленка толщиной порядка 350 нм и эффективным диаметром основных пор $\langle d_p \rangle = (70 \pm 10)$ нм. С помощью ЭДС установлено, что химический состав оксидной пленки представлен в основном Al, Ti, O, а ее структура соответствует совокупности TiO_2 и Al_2O_3 в соотношении, близком 1:1.

Результаты работы показывают применимость анодирования во фторсодержащем водном электролите для формирования на поверхности жаропрочного порошкового сплава Ti-40%Al устойчивого нанопористого оксидного покрытия, перспективного для создания каталитически активных наноматериалов.

* Статья подготовлена в рамках Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булдаков Д. А., Петухов Д. И., Колесник И. В., Елисеев А. В., Лукашин А. В., Третьяков Ю. Д. Термическая стабильность пористых пленок анодного оксида титана // Российские нанотехнологии. 2009. Т. 4. № 5–6. С. 58–53.
2. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т. / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996. Т. 1. С. 225–227.
3. Кокатев А. Н. Структура и свойства композитных покрытий на основе пористых анодных оксидов алюминия и титана, модифицированных наночастицами Ag и $\gamma-MnO_2$: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Петрозаводск, 2013. 18 с.
4. Крылов О. В. Гетерогенный катализ. Новосибирск, 2002. 234 с.
5. Фишгойт Л. А., Давыдов А. Д., Мешков Л. Л. Кинетика электрохимического формирования оксидной пленки на сплаве титан-алюминий // Электрохимия. 1999. Т. 35. № 3. С. 383–386.
6. Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. М.: Металлургиздат, 1962. Т. 1. 608 с.
7. Ali G., Chen C., Yoo S. H., Kum J. M., Cho S. O. Fabrication of complete titania nanoporous structures via electrochemical anodization of Ti // Nanoscale Research Letters. 2011. Vol. 6. P. 1–10.
8. Beranek R., Hildebrand H., Schmuki P. Self-organized porous titanium oxide prepared in H_2SO_4/HF electrolytes // Electrochemical and Solid-State Letters. 2003. Vol. 6. № 3. P. B12–B14.
9. Berger S., Tsuchiya H., Schmuki P. Transition from nanopores to nanotubes: Self-ordered anodic oxide structures on Titanium/Aluminides // Chem. Mater. 2008. Vol. 20. P. 3245–3247.
10. Choi J., Wehrspohn R., Gosele U. Mechanism of guided self-organization producing quasi-monodomain porous alumina // Electrochimica Acta. 2005. Vol. 50. P. 2591–2595.
11. Ghicov A., Schmuki P. Self-ordering electrochemistry: a review on growth and functionality of TiO_2 nanotubes and other self-aligned MO_x structures // Chem. Commun. 2009. P. 2791–2808.
12. Grimes C. A. Synthesis and application of highly ordered arrays of TiO_2 nanotubes // J. Mater. Chem. 2007. Vol. 17. P. 1451–1457.
13. Habazaki H., Uozumi M., Konno H., Shimizu K., Skeldon P., Thompson G. E. Crystallization of anodic titania on titanium and its alloys // Cor. Science. 2003. Vol. 45. P. 2063–2073.
14. Kelm K., Irsen S., Paninski M. et al. Characterization of the microstructured of Al-rich Ti-Al-alloys by combined TEM imaging techniques // Microsc. Microanal. 2007. Vol. 13. Suppl 3. P. 294.
15. Macak J. M., Tsuchiya H., Ghicov A., Yasuda K., Hahn R., Bauer S., Schmuki P. TiO_2 nanotubes: self-organized electrochemical formation, properties and applications // Curr. Opin. Solid. State Mater. Sci. 2007. Vol. 11. P. 3–18.
16. Nielsh K., Choi J., Schwirn K., Wehrspohn R., Gösele U. Self-ordering regimes of porous alumina: the 10% porosity rule // Nanoletters. 2002. Vol. 2. № 7. P. 676–680.
17. Sulka G. D. Highly ordered anodic porous alumina formation by self-organised anodising and template-assisted fabrication of nanostructured materials // Eftekhari A. (ed.). Nanostructured Materials in Electrochemistry. Wiley-VCH. 2008. P. 1–116.
18. Tsuchiya H., Berger S., Macak J. M., Ghicov A., Schmuki P. // Electrochem. Comm. 2007. Vol. 9. P. 2397–2402.

Stepanova K. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Yakovleva N. M., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Kokatev A. N., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Pettersson Kh., Halmstad University (Halmstad, Sweden)

NANOPOROUS ANODIC OXIDE FILMS ON TI-AL POWDER ALLOY

Data on anodic oxide films produced by anodizing sintered powder Ti-40%Al samples in fluorine water solution 10% H_2SO_4 +0.15%HF are analyzed. The influence of anodizing parameters (regime, values of current density or voltage and anodizing duration) on dependences of current density and voltage on time, i.e. $j_a(t)$ and $U_a(t)$ were studied. Optimal conditions for self-organized nanostructured oxide films formation were determined. The structure of the surface and cross-sections of investigated samples before and after anodizing was studied by means of scanning electron microscopy. It was shown that under optimal anodizing conditions the self-organized porous film about 350 nm thick with effective pore diameter value $\langle d_p \rangle = (70 \pm 10)$ nm is formed on the powder particles' surface. It was established that the oxide film consists essentially of TiO_2 : Al_2O_3 in a ratio of approximately 1:1. Anodizing of heat resistant powder Ti-40%Al alloy in fluorine water solution is promising for creation of new catalytic nanomaterials.

Key words: adodization, nanoporous, oxide films, powder alloy titanium-aluminum

REFERENCES

1. Buldakov D. A., Petukhov D. I., Kolesnik I. V., Eliseev A. V., Lukashin A. V., Tret'yakov Yu. D. Thermal stability of porous anodic titanium films [Termicheskaya stabil'nost' poristykh plenok anodnogo oksida titana]. *Rossiyskie nanotekhnologii* [Nanotechnologies in Russia]. 2009. Vol. 4. № 5–6. P. 58–53.
2. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskiykh sistem: Spravochnik: V 3 t.* / Pod obshch. redaktsiey N. P. Lyakisheva. [Phase diagrams of double metal systems: Reference book]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1996. Vol. 1. P. 225–227.
3. Kokatev A. N. *Struktura i svoystva kompozitnykh pokrytiy na osnove poristykh anodnykh oksidov alyuminiya i titana, modifitsirovannykh nanochastitsami Ag i γ -MnO₂: Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk* [Structure and properties of composite coatings on the base of the porous anodic aluminas and titanias modified by Ag and γ -MnO₂ nanoparticles. Author's abstract of Phd. tech. sci. diss.]. Petrozavodsk, 2013. 18 p.
4. Krylov O. V. *Geterogennyy kataliz* [Heterogeneous catalysis]. Novosibirsk, 2002. 234 p.
5. Fishgoyt L. A., Davydov A. D., Meshkov L. L. Kinetics of electrochemical formation of oxide layer on a titanium aluminum alloy [Kinetika elektrokhimicheskogo formirovaniya oksidnoy plenki na splave titan-alyuminiy]. *Elektrokimiya* [Russian Journal of Electrochemistry]. 1999. Vol. 35. № 3. P. 383–386.
6. Hansen M., Anderko K. *Struktury dvoynykh splavov* [Structures of two-component alloys]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1962. Vol. 1. 608 p.
7. Ali G., Chen C., Yoo S. H., Kum J. M., Cho S. O. Fabrication of complete titania nanoporous structures via electrochemical anodization of Ti // *Nanoscale Research Letters*. 2011. Vol. 6. P. 1–10.
8. Beranek R., Hildebrand H., Schmuki P. Self-organized porous titanium oxide prepared in H_2SO_4 /HF electrolytes // *Electrochemical and Solid-State Letters*. 2003. Vol. 6. № 3. P. B12–B14.
9. Berger S., Tsuchiya H., Schmuki P. Transition from nanopores to nanotubes: Self-ordered anodic oxide structures on Titanium/Aluminides // *Chem. Mater.* 2008. Vol. 20. P. 3245–3247.
10. Choi J., Wehrspohn R., Gosele U. Mechanism of guided self-organization producing quasi-monodomain porous alumina // *Electrochimica Acta*. 2005. Vol. 50. P. 2591–2595.
11. Ghicov A., Schmuki P. Self-ordering electrochemistry: a review on growth and functionality of TiO_2 nanotubes and other self-aligned MO_x structures // *Chem. Commun.* 2009. P. 2791–2808.
12. Grimes C. A. Synthesis and application of highly ordered arrays of TiO_2 nanotubes // *J. Mater.Chem.* 2007. Vol. 17. P. 1451–1457.
13. Habazaki H., Uozumi M., Konno H., Shimizu K., Skeldon P., Thompson G. E. Crystallization of anodic titania on titanium and its alloys // *Cor. Science*. 2003. Vol. 45. P. 2063–2073.
14. Kelm K., Irsen S., Paninski M. et al. Characterization of the microstructured of Al-rich Ti-Al-alloys by combined TEM imaging techniques // *Microsc. Microanal.* 2007. Vol. 13. Suppl 3. P. 294.
15. Macak J. M., Tsuchiya H., Ghicov A., Yasuda K., Hahn R., Bauer S., Schmuki P. TiO_2 nanotubes: self-organized electrochemical formation, properties and applications // *Curr. Opin. Solid. State Mater. Sci.* 2007. Vol. 11. P. 3–18.
16. Nielsh K., Choi J., Schwirn K., Wehrspohn R., Gosele U. Self-ordering regimes of porous alumina: the 10% porosity rule // *Nanoletters*. 2002. Vol. 2. № 7. P. 676–680.
17. Sulka G. D. Highly ordered anodic porous alumina formation by self-organised anodising and template-assisted fabrication of nanostructured materials // Eftekhari A. (ed.). *Nanostructured Materials in Electrochemistry*. Wiley-VCH. 2008. P. 1–116.
18. Tsuchiya H., Berger S., Macak J. M., Ghicov A., Schmuki P. // *Electrochem. Comm.* 2007. Vol. 9. P. 2397–2402.

Поступила в редакцию 12.12.2014

РОМАН ВЛАДИМИРОВИЧ ВОРОНОВ

кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
rvoronov@karelia.ru

АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ ГАЛОВ

ведущий программист, ЗАО «РТЛ-Сервис» (Петрозаводск, Российская Федерация)
gas@rtlservice.com

АЛЕКСЕЙ ПЕТРОВИЧ МОЩЕВИКИН

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
alexmou@lab127.karelia.ru

АННА МИХАЙЛОВНА ВОРОНОВА

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
voronova_am@petrsu.ru

ЗАДАЧА ПРИВЯЗКИ ТРАЕКТОРИИ ОБЪЕКТА К ПЛАНУ ПОМЕЩЕНИЯ*

Современные мобильные устройства содержат встроенный модуль распознавания движения, позволяющий построить траекторию движения (трек), по которой двигался объект. Привязка трека к плану помещения позволяет отследить перемещения объекта и уточнить его возможное местоположение. Рассмотрена задача наилучшего вписывания трека в план помещения с учетом ограничений для движения объекта в виде стен помещения. Так как траектория строится с некоторой погрешностью, то при вписывании допускаются небольшие ее изменения: сжатия или растяжения отдельных фрагментов и вращения с небольшим углом частей трека относительно друг друга. Предлагается математическая модель привязки трека к плану помещения. Описывается приближенный, основанный на методе динамического программирования, алгоритм решения задачи построения траектории с наилучшей оценкой. Приводится пример работы алгоритма на реальных данных. Предложенный подход может применяться в системах локации мобильных объектов на основе беспроводной сети датчиков, когда требуется одновременно определять местоположение большого числа устройств в режиме экономии эфира.

Ключевые слова: локация мобильных объектов, акселерометр, NanoLOC, RealTrac, локальная система позиционирования

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время широкое распространение получают системы определения местоположения объектов внутри помещений. Большинство из них основано на использовании беспроводных сетей таких стандартов, как WiFi, ZigBee, Bluetooth и др. [6], [7], [8], [11]. Такие системы состоят из нескольких базовых станций и мобильного устройства, местоположение которого необходимо определить. Иногда подобные системы требуют предварительного построения шаблонов карт уровней сигналов от базовых станций [1].

Дополнительной информацией для уточнения локации могут являться измерения, полученные с помощью встроенного в мобильное устройство модуля распознавания движения (обычно такие

модули основаны на информации от акселерометра, магнитометра и гироскопа [9]).

Встроенный в мобильное устройство модуль распознавания движения может определять траекторию движения, по которой движется устройство. Если мобильное устройство несет человек, то встроенный модуль может оценить длину и направление каждого шага. Однако данные измерения, как правило, содержат ошибку. Например, погрешность в оценке длины шага может достигать 10 % от длины шага [9], а ошибка в оценке направления движения – нескольких градусов.

Траектория, полученная от встроенного модуля распознавания движения, может быть скорректирована, если принять во внимание информацию о структуре помещения, внутри которого происходит движение. Очевидно, что при движе-

нии человек не может идти сквозь стены. Значит, и полученная траектория не может пересекаться со стенами внутри здания. На рис. 1 показан пример трека, зафиксированного встроенным модулем распознавания движения (слева) и возможный вариант скорректированного трека (справа), который не пересекается со стенами.

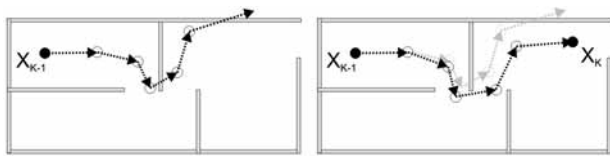


Рис. 1. Зафиксированный (слева) и скорректированный трек объекта (справа)

Задача вписывания трека объекта в план помещения особенно актуальна, когда в локальной системе позиционирования не хватает других данных для расчета локации объекта.

Поскольку радиочастотный диапазон для всех радиотехнологий ограничен, а эфир делится между многими участниками сети, выделяемая полоса пропускания может не обеспечить передачу большого количества данных и проведение дополнительных измерений расстояний.

В таких условиях мобильное устройство рассчитывает собственную траекторию по данным встроенных датчиков движения и лишь изредка передает ее на сервер. Эта ситуация может наблюдаться в системах позиционирования на основе измерения времени распространения сигнала в режиме экономии эфира, например в технологии RealTrac [3], построенной на основе радиостандарта nanoLOC [4], [10] и UWB.

В статье предлагается эвристический алгоритм решения задачи привязки трека к плану помещения.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ ПРИВЯЗКИ ТРЕКА

Трек состоит из последовательных точек, заданных в некоторой системе координат, не привязанной к системе координат помещения. Длина единичного отрезка в системе координат трека совпадает с длиной единичного отрезка в системе координат помещения, но на практике могут быть небольшие расхождения и при расчетах следует это учитывать.

Для решения задачи привязки трека к плану помещения необходимо на плане помещения задать точку для совмещения с ней точки начала координат трека и определить угол поворота системы координат трека по отношению к системе координат помещения.

Для того чтобы не учитывать внутреннюю систему координат трека, удобнее будет считать, что трек состоит из последовательных отрезков. Для каждого отрезка задана его длина, а также углы между смежными отрезками трека.

Пусть для плана помещения задана прямоугольная система координат. Множество точек помещения будем обозначать X . Все точки множества X являются элементами пространства $\mathbf{R}^2$ (евклидовой плоскости), для них определены операции сложения, а также умножения на число.

Трек будем представлять в виде ломаной, описываемой N парами (l_i, φ_i) , $i = 1, \dots, N$, где l_i – длина i -го звена (отрезка) ломаной, φ_i – угол между i -м и $(i-1)$ -м звеньями ломаной (при этом $\varphi_1 = 0$). Пусть Δ_i – i -е звено ломаной, заданное в виде вектора.

Определяя на множестве X начальную точку ломаной, меняя направление ее первого звена, удлиняя или укорачивая звенья ломаной, изменяя углы между звеньями, можно получать различные ее траектории. Будем оценивать каждую такую траекторию в зависимости от числа изменений длин ее звеньев и углов между звеньями. Чем меньше было изменений, тем лучше. В качестве оценки f траектории предлагается следующая взвешенная сумма:

$$f = C_1 \sum_{i=1}^N |1 - \gamma_i| + C_2 \sum_{i=2}^N \varphi_i,$$

где γ_i – относительное изменение длины i -го звена ломаной, φ_i – абсолютное изменение угла между i -м и $(i-1)$ -м звеньями ломаной. Коэффициенты C_1 и C_2 определяют влияние на величину оценки суммарного относительного изменения длин и суммарного абсолютного изменения углов ломаной. Далее C_1 и C_2 предполагаются равными единице. Задача состоит в поиске вписанной в план помещения траектории, имеющей минимальную оценку. На вход описываемого ниже алгоритма подается начальная точка и зафиксированный трек.

АЛГОРИТМ ПРИВЯЗКИ ТРЕКА К ПЛАНУ ПОМЕЩЕНИЯ

В связи с тем что существует бесконечно много различных траекторий ломаной, определим правила, по которым будем строить и оценивать некоторое конечное подмножество траекторий ломаной, выбирать траектории с лучшей оценкой. Ниже опишем правила выбора первых точек траекторий ломаной, изменения длин ее звеньев и углов между звеньями, оценивания полученных траекторий и выбора наилучших из них.

Пусть на план помещения наложена прямоугольная сетка, в результате чего получается разбиение множества X на квадратные участки, множество которых обозначим S . Будем предполагать, что участки множества S не пересекаются. Этого можно добиться, устанавливая некоторые границы участков открытыми. Шаг сетки определяется точностью расчетов. Принадлежность точек $x \in X$ участкам $s \in S$ будем обозначать $x \in s$.

Первые i звеньев ломаной будем называть i -м фрагментом ломаной. Особенностью предложенного метода является то, что для каждого i и каждого участка $s \in S$ будем запоминать не более одной траектории i -го фрагмента ломаной, заканчивающейся на данном участке s . Пусть S_i – подмножество участков, для которых существуют заканчивающиеся в них траектории i -го фрагмента ломаной. Для участка $s \in S_i$ соответствующую траекторию i -го фрагмента ломаной будем для краткости называть (i, s) -траекторией. Каждая (i, s) -траектория может быть началом различных $(i+1, s')$ -траекторией, где s' – некоторые участки.

Если подобрана (i, s) -траектория, то она фиксируется и в дальнейшем не меняется. Это позволяет существенно сократить число перебираемых вариантов траекторий ломаной. Недостатком подхода является то, что возможна потеря «плохих» начальных фрагментов ломаных в «целом хороших» ломаных. Следовательно, описываемый подход является приближенным. Степень приближения регулируется шагом сетки.

Пусть H – множество отрезков, соответствующих стенам помещения. Назовем траекторию ломаной допустимой, если содержащие ее звенья не пересекаются с отрезками множества H .

Обозначим Γ – дискретное множество коэффициентов изменения длины отрезков ломаной (если больше единицы, то увеличение длины; если меньше единицы – уменьшение длины). Например, $\Gamma = \{0.9, 1.0, 1.1\}$. Обозначим Φ – дискретное множество значений (в радианах), на которые могут изменяться углы между отрезками ломаной. Например, $\Phi = \{-0.25, -0.2, \dots, 0.25\}$.

Пусть $\Delta = (a, b)$ – вектор ломаной, где a – смещение по оси абсцисс, b – смещение по оси ординат. Введем обозначение для отображения, вращающего вектор Δ на угол φ и растягивающего (сжимающего) его длину в γ раз:

$$G_{\gamma\varphi}(\Delta) = \gamma \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}.$$

Для каждого участка $s \in S_i$ ($i = 1, \dots, N$) будем определять:

$f_i(s)$ – оценку (i, s) -траектории;
 $\xi_i(s)$ – последнюю точку (i, s) -траектории;
 $\psi_i(s)$ – угол между последним звеном (i, s) -траектории и осью абсцисс;
 $\zeta_i(s)$ – участок, содержащий предпоследнюю точку (i, s) -траектории.

Алгоритм состоит из двух этапов: «прямой» и «обратный» ходы.

Опишем первый этап алгоритма. Пусть x_0 – первая точка ломаной. Пусть s_0 – участок, содержащий точку x_0 . Положим $f_0(s_0) = 0$, $\xi_0(s_0) = x_0$, $\psi_0(s_0) = 0$, $\zeta_0(s_0)$ – не определено.

Рассмотрим построение первых звеньев траекторий ломаной. Для каждого участка s найдем перебором $\gamma \in \Gamma$ и $\varphi \in [-\pi; \pi]$ такие, что точка

$$v = x_0 + G_{\gamma\varphi}(\Delta_1)$$

принадлежит участку s , отрезок (x_0, v) не пересекается с отрезками множества стен H и при этом достигается минимум $|1 - \gamma|$. Положим

$$\xi_1(s) := v, \psi_1(s) := \varphi, f_1(s) := |1 - \gamma|, \zeta_1(s) := s_0.$$

Из участков s , для которых такие точки v найдены, сформируем множество S_1 .

Далее для всех i -х звеньев ($i = 2, \dots, N$), для каждого участка s найдем перебором тройку $\sigma \in S_{i-1}$, $\gamma \in \Gamma$, $\varphi \in \Phi$, для которой $u = \xi_{i-1}(\sigma)$, $\omega = \psi_{i-1}(\sigma)$, точка

$$v = u + G_{\gamma, \omega + \varphi}(\Delta_i)$$

принадлежит участку s , отрезок (u, v) не пересекается с отрезками множества стен H и при этом достигается минимум $f_{i-1}(\sigma) + |1 - \gamma| + |\varphi|$. Положим

$$\xi_i(s) := v, \psi_i(s) := \omega + \varphi,$$

$$f_i(s) := f_{i-1}(\sigma) + |1 - \gamma| + |\varphi|, \zeta_i(s) := \sigma.$$

Из участков s , для которых такие точки v найдены, сформируем множество S_i .

Заметим, что выражение $|1 - \gamma| + |\varphi|$ равно нулю тогда и только тогда, когда $\gamma = 1$ и $\varphi = 0$, то есть не происходит изменения длины рассматриваемого звена ломаной и изменения угла между текущим и предыдущим ее звеньями. Чем больше γ отличается от единицы и φ от нуля, тем большее значение принимает слагаемое $|1 - \gamma| + |\varphi|$.

Опишем, каким образом на втором этапе алгоритма по вычисленным значениям $f_i(s)$, $\xi_i(s)$, $\zeta_i(s)$ «обратным ходом» определить точки наилучшим образом привязанной к плану помещения траектории ломаной. Пусть s_N^* – участок множества S_N , для которого достигается минимум $f_N(s)$. Участки s_i^* , содержащие точки лучшей траектории ломаной, находятся по формуле $s_i^* = \zeta_{i+1}(s_{i+1}^*)$, $i = N-1, \dots, 0$. Пусть $x_i^* = \xi_i(s_i^*)$, $i = 0, \dots, N$. Полученная последовательность $x_0, x_1, \dots, x_N$ определяет искомую оптимальную траекторию ломаной, привязанную к плану помещения.

Время работы описанного алгоритма равно $O(N \cdot |S| \cdot |\Gamma| \cdot |\Phi|)$.

На рис. 2 приведен пример привязки четырех отрезков ломаной к плану помещения. Помещение поделено на 12 квадратных участков, стены обозначены жирными линиями. Пусть зафиксировано положение первого звена (оканчивающегося точкой 1 на рис. 2). В этом примере для простоты будем менять угол каждого звена ломаной на небольшую величину вправо и влево. Тогда из точки 1 получаем три возможных направления второго звена ломаной. Два из этих звеньев заканчиваются на одном и том же участ-

тке – выбирается один из них, для которого не было вращения ($\varphi = 0$); другой отбрасывается. Остается два возможных варианта второго звена с последними точками, помеченными цифрой 2, расположенными на разных участках. Далее из конечных точек вторых вариантов звеньев откладываются возможные варианты третьего звена ломаной. Среди звеньев, попадающих в один участок, отбрасываются те, путь к которым содержит больше вращений (имеющие худшую оценку). Получаем два варианта третьего звена ломаной, их последние точки помечены цифрой 3. Затем из конечных точек третьего звена откладывается по три варианта возможных направлений четвертых звеньев. Но при этом отсекаются звенья, проходящие сквозь стены; среди звеньев, завершающихся на одном участке, оставляем звено без вращений. Таким образом, получился один вариант привязки ломаной, состоящей из четырех звеньев, на рисунке он заканчивается точкой с цифрой 4.

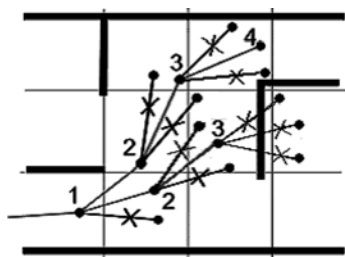


Рис. 2. Пример построения траекторий ломаной

ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА ПРИВЯЗКИ ТРЕКА К ПЛАНУ ПОМЕЩЕНИЯ

Рассмотрим демонстрацию работы алгоритма привязки трека к плану помещения. На рис. 3 представлен план помещения, на котором имеются несколько комнат и длинный коридор. Также нанесен реальный трек объекта. Начальная точка находится в правой части коридора.

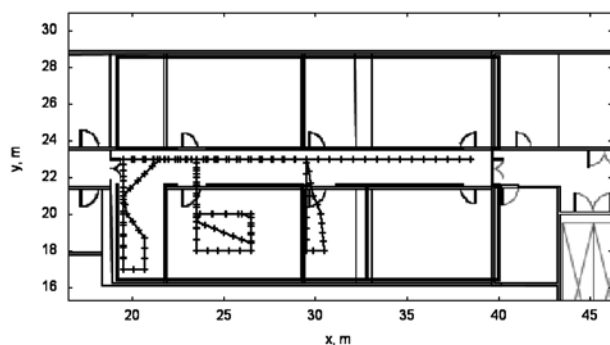


Рис. 3. Реальный трек объекта на плане помещения

На рис. 4 представлен трек, зафиксированный при помощи модуля распознавания движения, состоящий из 171 точки. Начальная точка – в правом верхнем углу. Начальное направление движения объекта относительно сторон света неизвестно.

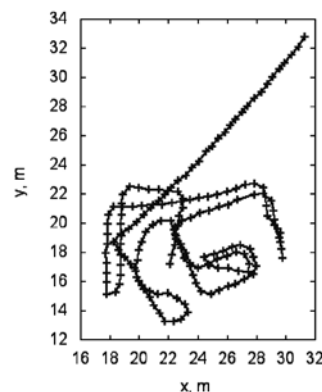


Рис. 4. Зафиксированный трек объекта

На рис. 5 продемонстрирован результат работы алгоритма привязки трека к плану помещения. Шаг сетки был равен одному метру. Видно, что в целом удалось вписать трек в план помещения. Средняя ошибка между истинными положениями объекта и реальными составила 0,8 м.

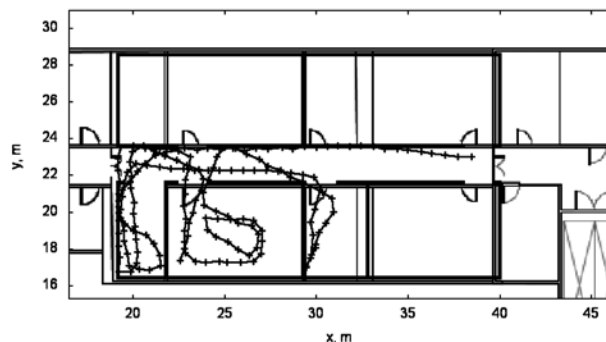


Рис. 5. Трек, привязанный к плану помещения

Предложенный алгоритм был апробирован на том же самом помещении в ходе тестовой эксплуатации системы локации мобильных объектов и показал устойчивость в работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учет информации от встроенного модуля распознавания движения может существенно улучшить точность локации в системе локации на основе беспроводной сети датчиков в случае редкого интервала опроса мобильного устройства. Описанный метод может применяться в системах, требующих одновременного определения местоположения большого количества устройств в системе локации на основе беспроводной сети датчиков в режиме экономии эфира [2], [5], [7] при условии наличия вычислительных мощностей на стороне сервера. В дальнейшем планируется сравнить его работу с алгоритмом привязки трека к плану помещения, основанным на случайном поиске.

* Исследования, описанные в статье, проводились в рамках деятельности МИП ООО «Наносети» и ЗАО «РТЛ-Сервис», а также поддерживались Петрозаводским государственным университетом (Программа стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 гг.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронов Р. В., Малодушев С. В. Динамическое создание карт уровня wifi-сигналов для систем локального позиционирования // Системы и средства информатики. 2014. Т. 24. № 1. С. 80–92.
2. Иванов Д. А., Суровцова Т. Г., Тяхти Е. А. Анализ активности в беспроводных сетях как инновационный метод изучения поведения покупателей в торговых центрах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 183 (2). С. 271–275.
3. Мوشевикин А. П., Галов А. С., Волков А. С. Локация в беспроводных сетях датчиков стандарта nanoLOC (IEEE 802.15.4a) // Информационные технологии. 2011. № 8. С. 43–47.
4. Мوشевикин А. П., Галов А. С., Волков А. С. Точность расчета локации в беспроводных сетях датчиков стандарта nanoLOC // Информационные технологии. 2012. № 9. С. 37–41.
5. Овчинников С. Системы позиционирования и мониторинга // Технологии и средства связи. 2014. № 2. С. 18–22.
6. Galov A. S., Moschevikin A. P., Voronov R. Combination of RSS localization and ToF ranging for increasing positioning accuracy indoors // 11th International Conference on ITS Telecommunications ITST-2011. P. 299–304.
7. Deak G., Curran K., Condell J. A survey of active and passive indoor localisation systems // Computer Communications. 2012. Vol. 35. № 16. P. 1939–1954.
8. Liu H. et al. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems // Systems, Man, and Cybernetics. Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on. 2007. Vol. 37. № 6. P. 1067–1080.
9. Moschevikin A., Galov A., Soloviev A., Mikov A., Volkov A., Reginya S. RealTrac technology overview. // EvAAL 2013. Communications in Computer and Information Science series CCIS. 2013. Vol. 386. P. 60–71.
10. Nanotron Technology GmbH. Available at: <http://www.nanotron.com>
11. Pei Z. et al. Anchor-free localization method for mobile targets in coal mine wireless sensor networks // Sensors. 2009. Vol. 9. № 4. P. 2836–2850.

Voronov R. V., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Galov A. S., RTL-Service (Petrozavodsk, Russian Federation)

Moshchevikin A. P., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

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

ON INDOOR OBJECT'S TRAJECTORY TRACE ADJUSTMENT TO BUILDING'S FLOOR PLAN

A modern mobile device is equipped with an embedded inertial measurement unit. This unit can restore the motion trajectory (trace) of an indoor object. The object's motion indoors is restricted by the walls. Therefore, correlations of the object's motion trajectory (trace) within the structure of the building allow clarification of the object's position. This paper presents an algorithm of the trace adjustment to the building floor plan. Since the trace contains some errors, small corrections to the segments of the trace are applied. During adjustment the direction and the length of different parts of the trace can be varied. A proposed mathematical model for adjustment of the trace is discussed. The approximate algorithm is based on the dynamic programming method. An example of the proposed algorithm application is described. The developed approach might be applied in local positioning systems based on wireless sensors' networks in conditions of high load when a large number of mobile devices are periodically set to energy saving mode.

Key words: positioning of mobile objects, inertial measurement unit, accelerometer, RealTrac, local positioning system

REFERENCES

1. Voronov R. V., Malodushhev S. V. Dynamic Creation of the Wifi-Level Signals for Local Positioning Systems [Dinamicheskoe sozdanie kart urovnya wifi-signalov dlya sistem lokal'nogo pozitsionirovaniya]. *Sistemy i sredstva informatiki* [Systems and Means of Informatics]. 2014. Vol. 24. № 1. P. 80–92.
2. Ivanov D. A., Surovtsova T. G., Tyakhti E. A. Analysis of Activity in Wireless Networks as Innovative Method for the Study of Consumer Behavior in Shopping Malls [Analiz aktivnosti v besprovodnykh setyakh kak innovatsionnyy metod izucheniya povedeniya pokupateley v trgovykh tsentrakh]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal]. 2013. № 183 (2). P. 271–275.
3. Moshchevikin A. P., Galov A. S., Volkov A. S. Location of Networks Standard nanoLOC in Wireless Sensor (IEEE 802.15.4a) [Lokatsiya v besprovodnykh setyakh datchikov standarta nanoLOC (IEEE 802.15.4a)]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies]. 2011. № 8. P. 43–47.
4. Moshchevikin A. P., Galov A. S., Volkov A. S. Calculation Accuracy of Location in the Wireless Sensor Networks Standard nanoLOC [Tochnost' rascheta lokatsii v besprovodnykh setyakh datchikov standarta nanoLOC]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies]. 2012. № 9. P. 37–41.
5. Ovchinnikov S. Positioning and Monitoring Systems [Sistemy pozitsionirovaniya i monitoringa]. *Tekhnologii i sredstva svyazi* [Communication Technologies & Equipment Magazine]. 2014. № 2. P. 18–22.
6. Galov A. S., Moschevikin A. P., Voronov R. Combination of RSS localization and ToF ranging for increasing positioning accuracy indoors // 11th International Conference on ITS Telecommunications ITST-2011. P. 299–304.
7. Deak G., Curran K., Condell J. A survey of active and passive indoor localization systems // Computer Communications. 2012. Vol. 35. № 16. P. 1939–1954.
8. Liu H. et al. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems // Systems, Man, and Cybernetics. Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on. 2007. Vol. 37. № 6. P. 1067–1080.
9. Moschevikin A., Galov A., Soloviev A., Mikov A., Volkov A., Reginya S. RealTrac technology overview. // EvAAL 2013. Communications in Computer and Information Science series CCIS. 2013. Vol. 386. P. 60–71.
10. Nanotron Technology GmbH. Available at: <http://www.nanotron.com>
11. Pei Z. et al. Anchor-free localization method for mobile targets in coal mine wireless sensor networks // Sensors. 2009. Vol. 9. № 4. P. 2836–2850.

Поступила в редакцию 04.07.2014

КОНСТАНТИН НИКОЛАЕВИЧ СЕНИЧЕВ

аспирант кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, программист ООО «Опти-Софт», программист Центра ПетрГУ-Метсо Систем Автоматизации (ЦПМСА), Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
csenichev@gmail.com

ЗАДАЧА ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО РАСПИСАНИЯ ОДНОГО СТАНКА С ДИРЕКТИВНЫМИ СРОКАМИ РАБОТ*

Представлена задача оптимизации работы одного станка, которая может возникать при расчете оптимального плана работы бумагоделательной машины, гофроагрегата, фанерного пресса или других производственных агрегатов, последовательно и неразрывно выполняющих определенные работы. В случае преждевременного начала работы или ее завершения позже установленного директивного срока на расписание налагается штраф в заданных размерах, пропорциональных величине нарушения срока. Требуется минимизировать сумму штрафных санкций за выполнение всех работ. Также рассмотрены вариации задачи в условиях минимизации общего количества нарушенных директивных сроков, одинаковых значений верхних и нижних штрафных санкций, отсутствия ранних сроков начала выполнения работ. Для решения задачи использованы как базовые метаэвристические алгоритмы, так и предложенный автором комбинированный алгоритм, использующий набор метаэвристик для последовательного улучшения найденного решения. При этом для построения окрестности текущего решения используются операторы инверсии, сдвига в начало, сдвига в конец и сдвига в начало и в конец. В результате комбинированный алгоритм демонстрирует прирост качества найденного решения без изменения порядка вычислительной сложности.

Ключевые слова: директивные сроки, оптимальное расписание, метаэвристические методы, комбинированный алгоритм

Задача поиска оптимального расписания одного станка с директивными сроками работ возникает при расчете оптимального плана работы гофроагрегата, бумагоделательной машины (БДМ), фанерного пресса и других производственных агрегатов, последовательно и неразрывно выполняющих определенные работы.

В литературе достаточно широко представлены методы решения задачи поиска оптимального расписания работ одного станка в случае отсутствующих директивных сроков начала работ, основанные на применении эвристического подхода [7]. Однако изложенные подходы не обеспечивают эффективное решение задачи поиска оптимального расписания одного станка с заданными директивными сроками работ, востребованной на реальном производстве.

Метаэвристическим называют общий подход к решению широкого класса задач поиска или оптимизации, чаще всего не имеющий строгого обоснования, но дающий хорошие практические результаты [3], [4]. Метаэвристики основаны на определенных наблюдениях, не связанных с математикой, или являются попыткой приспособить рассуждения здравого смысла для решения определенных задач оптимизации. Данная работа описывает применение предложенного автором комбинированного алгоритма решения задачи поиска оптимального расписания одного станка с директивными сроками работ. Комбинирован-

ный метод опирается на использование таких базовых метаэвристических методов, как метод локальной оптимизации, генетический алгоритм, меметический алгоритм, метод отжига и метод табуированного поиска [2], [5], [9]. Также в работе приведены результаты численных экспериментов, подтверждающие эффективность авторского решения.

ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Имеется один станок (в данном случае гофроагрегат), который в течение заданного временного промежутка должен последовательно, одну за другой, но в произвольном порядке выполнить множество работ, составляющих множество N . Каждая из этих работ должна выполняться в течение определенного времени. В случае начала работы ранее или ее завершения позже установленных (директивных) сроков на расписание накладывается штраф в заданных размерах, пропорциональных величине нарушения срока.

Требуется составить расписание выполнения работ $j \in N$, каждая из которых характеризуется следующими параметрами:

t_j – ее продолжительность;

a_j, b_j – ранний срок начала и поздний срок завершения;

$c_j, \bar{c}_j$ – штраф за нарушение раннего срока начала и позднего срока завершения, пропорци-

ональный величине выхода из заданного интервала.

Целевой функцией z задачи является сумма штрафных санкций за выполнение всех работ, которую требуется минимизировать.

Решение задачи определяется $p = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_n)$ – перестановкой очередности работ или неизвестными $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ – связанными с ней моментами их запуска.

Проще всего построить математическую модель задачи в терминах $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ моментов запуска работ. Действительно, в таком случае целевая функция имеет вид

$$z(x) = \sum_{j \in N} (\bar{c}_j \max(x_j + t_j - b_j, 0) + \underline{c}_j \max(a_j - x_j, 0)) \rightarrow \min. \quad (1)$$

Возможное перекрытие сроков выполнения работ устраняется наложением следующих дополнительных условий:

$$x_i + t_i \leq x_j \text{ или } x_j + t_j \leq x_i, \quad i \neq j \in N. \quad (2)$$

Задачу можно записать в терминах перестановки, сократив при этом количество ограничений (2).

Последовательность выполнения работ определим перестановкой $p = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_n)$, где каждый элемент p_i содержит порядковый номер работы, которая будет обработана i -й по списку.

Зависимость момента запуска работ от перестановки можно записать следующим образом:

$$x_{p_1} = 0, \quad x_{p_i} = x_{p_{i-1}} + t_{p_{i-1}}, \quad i = 2..N.$$

Очевидно, что выполнение работ производится без простоев оборудования между обработкой последовательных работ.

ВАРИАНТЫ ЗАДАЧИ

Представляет интерес возможность использования метаэвристик для решения данной задачи, а также ряда ее следующих вариантов.

а) Случай минимизации общего количества нарушенных директивных сроков

$$z(x) = \sum_{j \in N} (\bar{c}_j \text{sign}(x_j + t_j - b_j) + \underline{c}_j \text{sign}(a_j - x_j)) \rightarrow \min.$$

б) Случай одинаковых значений верхних и нижних штрафных санкций

$$\underline{c}_j = \underline{c}, \quad \bar{c}_j = \bar{c}, \quad j \in N$$

в линейном и дискретном случаях.

$$z(x) = \sum_{j \in N} (\underline{c} \max(x_j + t_j - b_j, 0) + \bar{c} \max(a_j - x_j, 0)) \rightarrow \min.$$

Случай отсутствия ранних сроков начала выполнения работ $a_j = 0, \quad c_j = \bar{c}_j, \quad \forall j \in N$:

$$z(x) = \sum_{j \in N} c_j \max(x_j + t_j - b_j, 0) \rightarrow \min.$$

Отметим, что задача хорошо изучена и полиномиально разрешима в случае $a_j = b_j = 0, \quad c_j = \bar{c}_j, \quad \forall j \in N$ – классическая задача одного станка

$$z(x) = \sum_{j \in N} c_j (x_j + t_j) \rightarrow \min.$$

Комбинированный алгоритм

Опишем комбинированный алгоритм (обозначим его *СМВ*), позволяющий использовать преимущества различных метаэвристик для нахождения наилучшего решения.

Введем следующие обозначения:

Ω – множество допустимых решений.

$k = 1, 2, 3 \dots$ – номер текущей итерации.

z_{pek} – рекордное значение целевой функции, найденное в процессе вычислений; $x_k^* \in \Omega$ – план, на котором достигается $z_{pek} = f(x_k^*)$.

Далее, пусть M – набор базовых метаэвристических алгоритмов, включающий метод локальной оптимизации *LO*, генетический алгоритм *GA* и меметический алгоритм *MA*, метод отжига *SA* и метод табуированного поиска *TS*. Особенности программной реализации данных алгоритмов изложены в работе [2].

Тогда комбинированный алгоритм *СМВ* можно записать следующим образом:

Шаг 0 (Start)

01. Установить $z_{pek} = \infty$ и $k = 1$.

02. Построить начальное решение $x_0^* \in \Omega$ с использованием эвристики или случайного выбора.

Шаг k (Estimate)

k1. Найти решение $x_k^* \in \Omega$ методом M_k , используя $x_{k-1}^* \in \Omega$ в качестве начального решения.

k2. Установить $z_{pek} = f(x_k^*)$.

k3. Если $k < |M|$, то положить $k = k + 1$.

Иначе, закончить работу.

Finish.

Важно отметить, что время выполнения каждого алгоритма $M_k, k = 1..|M|$ может

- быть зафиксировано;
- определяться допустимым установленным временем счета;
- отслеживаться по динамике изменения рекорда.

Окрестность решения

Рассмотрим следующие способы построения окрестности перестановки.

а) Инверсия

Оператором инверсии двух работ, расположенных на позициях $i \neq j \in N$ перестановки $p = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_n)$, будем называть обмен элементов p_i и p_j .

Определим окрестность Ω_p^{inv} перестановки $p = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_n)$ как множество всех перестановок, полученных инверсией пары элементов p_i, p_j исходной перестановки $p, i \neq j \in N$.

б) Сдвиг в начало

Оператор сдвига вперед переставляет работу с позиции i в начало перестановки, то есть переводит перестановку

$$p = (p_1, p_2, \dots, p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, \dots, p_{j-1}, p_j, p_{j+1}, \dots, p_n)$$

в перестановку

$$p' = (p_i, p_1, p_2, \dots, p_{i-1}, p_{i+1}, \dots, p_{j-1}, p_j, p_{j+1}, \dots, p_n).$$

Множество перестановок, полученных применением оператора сдвига в начало к перестановке

$p = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_n)$ для всех значений индекса $i = 1 \dots N$ будем называть окрестностью $\Omega_p^{forward}$.

с) Сдвиг в конец

Сдвиг назад перемещает работу с позиции j на последнюю позицию, то есть перестановку

$$p = (p_1, p_2, \dots, p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, \dots, p_{j-1}, p_j, p_{j+1}, \dots, p_n)$$

преобразует в перестановку

$$p' = (p_1, p_2, \dots, p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, \dots, p_{j-1}, p_{j+1}, \dots, p_n, p_j).$$

Окрестность Ω_p^{back} определим как множество перестановок, которые можно получить из перестановки $p = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_n)$ с помощью оператора сдвига назад.

д) Сдвиг в начало и в конец

Данный оператор является комбинацией предыдущих двух. Элементы перестановки p_i, p_j , расположенные на позициях $i \neq j \in N$, перемещаются в начало и в конец перестановки соответственно. Таким образом, исходная перестановка

$$p = (p_1, p_2, \dots, p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, \dots, p_{j-1}, p_j, p_{j+1}, \dots, p_n)$$

преобразуется в перестановку

$$p' = (p_i, p_1, p_2, \dots, p_{i-1}, p_{i+1}, \dots, p_{j-1}, p_{j+1}, \dots, p_n, p_j).$$

Окрестностью $\Omega_p^{forback}$ назовем множество всех перестановок, полученных из перестановки p методом сдвига пары элементов в начало и в конец.

Тестовые данные

В сети Интернет имеется библиотека тестовых данных, расположенная в общем доступе на ресурсе [11]. Всего представлено 300 наборов входных параметров для $n = 40, 50$ и 100 , по 100 тестов на каждую размерность.

Длительности работ $p_j, j \in N$ сгенерированы согласно равномерному распределению на интервале $[0, 100]$, штрафы $\underline{c}_j, \bar{c}_j$ – на интервале $[0, 10]$.

Сроки выполнения работ a_j, b_j сгенерированы в зависимости от комбинации параметров $R, T \in \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1\}$ в интервале

$$[P(1 - T - R/2), P(1 - T + R/2)],$$

где $P = \sum_{j=1}^n p_j$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проведения тестов использована система следующей конфигурации: Intel Core i7–2630QM @ 2.00 GHz, 4 GB RAM. Программные модули реализованы на языке C# и выполняются в среде Microsoft.NET.

Критериями останова базовых алгоритмов являются превышение заданного времени выполнения, равного 180 секундам, или невозможность улучшить текущее решение. В случае комбинированного алгоритма CMB максимальное время выполнения делится на количество элементов множества M вложенных алгоритмов.

В табл. 1 представлены результаты вычислительного эксперимента решения задачи поиска расписания работ одного станка с директивными сроками при тестовых данных для $n = 40$ работ с использованием окрестностей перестановок $\Omega_p^{inv}, \Omega_p^{forward}, \Omega_p^{back}$ и $\Omega_p^{forback}$.

Табл. 2. содержит данные тестовых вычислений для случая $n = 50$ работ с использованием того же набора окрестностей.

Таблица 1
Среднее отклонение от оптимального решения (%) и среднее время счета (с) при $n = 40$

Метод	Среднее отклонение				Среднее время счета			
	Ω_p^{inv}	$\Omega_p^{forward}$	Ω_p^{back}	$\Omega_p^{forback}$	Ω_p^{inv}	$\Omega_p^{forward}$	Ω_p^{back}	$\Omega_p^{forback}$
LO	3,0	4,4	4,6	2,4	15,4	14,9	16,6	17,5
GA	4,9	2,6	2,2	2,9	31,5	28,3	29,0	27,2
MA	4,4	2,7	2,1	2,8	32,1	30,8	28,7	29,5
SA	3,9	4,0	4,3	3,0	22,7	18,5	20,2	19,4
TS	4,9	4,4	4,2	4,6	20,0	24,3	22,1	21,3
CMB	2,5	2,1	2,9	1,7	22,8	25,3	23,3	21,0

Таблица 2
Среднее отклонение от оптимального решения (%) и среднее время счета (с) при $n = 50$

Метод	Среднее отклонение				Среднее время счета			
	Ω_p^{inv}	$\Omega_p^{forward}$	Ω_p^{back}	$\Omega_p^{forback}$	Ω_p^{inv}	$\Omega_p^{forward}$	$\Omega_p^{forback}$	$\Omega_p^{forback}$
LO	3,1	4,5	4,0	2,8	21,6	21,1	22,9	20,7
GA	3,4	3,0	2,9	2,6	36,9	35,8	40,1	36,5
MA	3,9	2,4	5,9	2,3	43,2	43,4	39,7	41,5
SA	4,7	5,8	4,7	3,4	37,5	35,1	34,7	35,6
TS	4,6	5,0	5,9	4,0	41,8	43,8	43,1	40,9
CMB	2,3	2,2	3,4	2,1	35,9	33,8	35,2	33,4

Таблица 3

Среднее отклонение от оптимального решения (%) и среднее время счета (с) при $n = 100$

Метод	Среднее отклонение				Среднее время счета			
	Ω_p^{inv}	$\Omega_p^{forward}$	Ω_p^{back}	$\Omega_p^{forback}$	Ω_p^{inv}	$\Omega_p^{forward}$	$\Omega_p^{forward}$	$\Omega_p^{forback}$
LO	4,9	4,6	5,7	4,8	81,7	86,4	79,5	79,7
GA	3,8	4,1	4,8	3,7	103,2	105,4	108,5	103,9
MA	3,5	3,7	4,2	3,3	125,3	116,3	129,6	121,3
SA	3,8	5,3	5,7	4,3	100,5	93,9	102,0	97,6
TS	3,4	3,7	4,7	3,1	97,2	101,5	105,7	101,4
CMB	3,1	3,2	4,0	2,2	87,8	90,2	103,8	95,4

Результаты вычислений на тестовых данных для размерности $n = 100$ работ показаны в табл. 3.

Отметим, что в каждом из представленных случаев наименьшее среднее отклонение от оптимального решения достигается с использованием комбинированного алгоритма *CMB* и окрестности $\Omega_p^{forback}$. Среднее время выполнения комбинированного алгоритма незначительно уступает времени работы метода локальной оптимизации *LO*, что, однако, нивелируется большим ухудшением качества найденного решения, полученного последним методом, при увеличении размерности задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задача поиска оптимального расписания одного станка с директивными сроками работ ха-

рактерна для достаточно широкого класса производственных процессов. Однако существующие методы ее решения, основанные на применении эвристического подхода, не являются достаточными для эффективного использования в реальных условиях.

Предложенный автором комбинированный алгоритм решения задачи поиска оптимального расписания работы одного станка с директивными сроками демонстрирует значительное улучшение качества найденного решения без изменения порядка вычислительной сложности. Наиболее успешные результаты достигаются в сочетании с оператором сдвига в начало и в конец для построения окрестности текущего решения.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Генетические алгоритмы: Учеб. пособие. 2-е изд. М.: Физматлит, 2006. 320 с.
2. Кузнецов В. А., Сеничев К. Н. Метаэвристики для решения комбинаторных задач: Учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2012. 40 с.
3. Кузнецов В. А., Сеничев К. Н. Использование метаэвристик для решения задач дискретного программирования // Вестник Череповецкого государственного университета (технические науки). 2012. № 4. С. 27–31.
4. Кузнецов В. А., Сеничев К. Н. Состав и структура метаэвристик для решения комбинаторных задач // Новые информационные технологии в ЦБП и энергетике: Материалы X Междунар. конф. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2012. С. 34–35.
5. Мак Коннелл Дж. Основы современных алгоритмов. М.: Техносфера, 2004. 368 с.
6. Хачатуров В. Р., Веселовский В. Е., Злотов А. В. и др. Комбинаторные методы и алгоритмы решения задач дискретной оптимизации большой размерности. М.: Наука, 2000. 354 с.
7. Ballestin F., Leus R. Meta-heuristics for stable scheduling on a single machine // Computer and Operation Research. 2008. № 7. P. 2175–2192.
8. Blum C. Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison // ACM Computing Surveys. 2003. № 3. P. 268–308.
9. Glover F., Kochenberger G. A. Handbook of Metaheuristics. Springer Science & Business Media, 2003. 556 p.
10. Mautor T. Intensification Neighborhoods for Local Search Methods. Essays and Surveys in Metaheuristics. Operation Research Computer Science. Kluwer Acad. Publ., 2001. P. 493–508.
11. OR-Library. Weighted tardiness. Available at: <http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/orlib/wtinfo.html>

Senichev K. N., Opti-Soft Ltd, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

SEARCH OF OPTIMAL MASTER SCHEDULE FOR SINGLE MACHINE OPTIMIZATION

The article is concerned with the single machine optimization problem that is typical for scheduling production processes with a number of consecutive and non-preemptive operations. A paper machine, a plywood press or a corrugator execution plan construction can be considered as an example. The processing work should start at a particular release time and should be completed no later than the relative due date. Otherwise, a proportional to the violation fine is imposed. The objective of the problem is to find

a processing order of the works that minimize total weighted tardiness. Moreover, the study covers the case of the total number of violated due dates minimization and an option with the works available at zero start time. The solution of the problem is based on metaheuristic algorithms that provide an opportunity to obtain sufficiently good result. Additionally, the author proposes a new combined algorithm that exploits basic metaheuristics in order to consistently improve the current plan. Inversion operators, shift forward, shift back and shift forward, and back operators are used to employ obtained solutions in practice. As a result, the combined algorithm provides an important solution in quality improvement comparable to the level of computation complexity in mentioned earlier metaheuristics.

Key words: relative due dates, optimal schedule, metaheuristic algorithms, combined methods

REFERENCES

1. Gladkov L. A., Kureychik V. V., Kureychik V. M. *Geneticheskie algoritmy* [Genetic Algorithms: A Tutorial]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 320 p.
2. Kuznetsov V. A., Senichev K. N. *Metaevristiki dlya resheniya kombinatornykh zadach* [Metaheuristics for Combinatorial Problems: A Tutorial]. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2012. 40 p.
3. Kuznetsov V. A., Senichev K. N. The Use of Metaheuristics for Solving Discrete Programming Problems [Ispol'zovanie metaevristik dlya resheniya zadach diskretnogo programmirovaniya]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta (tekhnicheskie nauki)*. 2012. № 4. P. 27–31.
4. Kuznetsov V. A., Senichev K. N. Composition and Structure of Metaheuristics for Combinatorial Problems [Sostav i struktura metaevristik dlya resheniya kombinatornykh zadach]. *Novye informatsionnye tekhnologii v TsBP i energetike: Materialy X Mezhdunarodnoy konferentsii*. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2012. P. 34–35.
5. MakKonnell Dzh. *Osnovy sovremennykh algoritmov* [Fundamentals of Modern Algorithms]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2004. 368 p.
6. Khachaturov V. R., Veselovskiy V. E., Zlotov A. V. i dr. *Kombinatornye metody i algoritmy resheniya zadach diskretnoy optimizatsii bol'shoy razmernosti* [Combinatorial Methods and Algorithms for Solving Discrete Optimization Problems of Large Dimensions]. Moscow, Nauka Publ., 2000. 354 p.
7. Ballestin F., Leus R. Meta-heuristics for stable scheduling on a single machine // *Computer and Operation Research*. 2008. № 7. P. 2175–2192.
8. Blum C. Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison // *ACM Computing Surveys*. 2003. № 3. P. 268–308.
9. Glover F., Kochenberger G. A. *Handbook of Metaheuristics*. Springer Science & Business Media, 2003. 556 p.
10. Mautor T. Intensification Neighborhoods for Local Search Methods. *Essays and Surveys in Metaheuristics*. Operation Research Computer Science. Kluwer Acad. Publ., 2001. P. 493–508.
11. OR-Library. Weighted tardiness. Available at: <http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/orlib/wtinfo.html>

Поступила в редакцию 20.11.2014

АНТОН АЛЕКСАНДРОВИЧ АНДРЕЕВ

студент 4-го курса математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
andreev@cs.karelia.ru

АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ КОЛОСОВ

старший преподаватель кафедры информатики и математического обеспечения математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
akolosov@cs.karelia.ru

ЮРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ БОГОЯВЛЕНСКИЙ

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информатики и математического обеспечения математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
ybgv@cs.karelia.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ГРАФА КАНАЛЬНОГО УРОВНЯ ИКТ-ИНФРАСТРУКТУРЫ ЛОКАЛЬНОГО ПОСТАВЩИКА УСЛУГ ИНТЕРНЕТА*

Рассматривается задача автоматизации построения графа канального уровня Сети, решение которой осложняется отсутствием поддержки стандартных средств обнаружения связей между устройствами на этом уровне. Таким образом, актуальной является задача разработки методов построения графа канального уровня Сети на основе данных, получаемых из различных неспециализированных источников. Приводится обзор существующих подходов к решению данной задачи, предлагается графовая модель для описания канального уровня Сети с учетом наличия нескольких широкоовещательных доменов, образованных сетями VLAN. На основе модели разработан новый комплексный алгоритм построения графа канального уровня, который использует данные, предоставляемые протоколами CDP, LLDP, STP, ARP, которые получают из MIB сетевых устройств по протоколу SNMP. В силу разнообразия протоколов и технологий, применяемых на канальном уровне, существенно осложняется тестирование средств построения графа Сети. Для создания экспериментальных сетевых окружений авторами был использован инструмент имитационного моделирования Сетей GNS3. Приводятся результаты тестирования комплексного алгоритма как в различных экспериментальных окружениях, так и в реальной Сети Петрозаводского государственного университета.

Ключевые слова: Сеть, граф, канальный уровень, VLAN, экспериментальная среда

ВВЕДЕНИЕ

Развитие ИКТ-инфраструктур (далее Сетей) локальных поставщиков сетевых услуг происходит стремительно, постоянно растет их масштаб и сложность. Существуют коммерческие компании и государственные организации, обладающие Сетями в несколько тысяч машин. Сопровождение таких Сетей требует не только более сложных методов логической структуризации (как, например, виртуальные локальные сети, далее VLAN), но и специализированных инструментов анализа.

Одним из основных инструментов сетевого управления является граф Сети – данные об аппаратных элементах и их связях. С помощью него можно решить множество задач: от поиска вариантов изменения топологии до моделирования потоков данных. Задачи планирования мощности Сети часто решаются с помощью имитационных моделей, также использующих граф [5].

Экспериментальная платформа для исследования моделей и методов управления Сетями Nest

[1], разрабатываемая на кафедре информатики и математического обеспечения Петрозаводского государственного университета, предоставляет средства для автоматизированного построения графа Сетей на сетевом уровне [2] и его визуализации.

Для обеспечения полноты инструментария по исследованию Сетей была поставлена задача разработать и реализовать метод построения графа канального уровня Сетей, построенных на базе стандартов IEEE 802 (который позволит получить представление о физическом устройстве Сети), включая сети VLAN.

ОБЗОР АЛГОРИТМОВ И ИСТОЧНИКОВ ДАННЫХ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ГРАФА КАНАЛЬНОГО УРОВНЯ СЕТИ

В настоящее время отсутствует унифицированный способ представления данных об устройствах Сети и связях между ними. Существующие алгоритмы, как правило, извлекают необходимую для построения графа информа-

цию путем анализа различных неспециализированных источников данных.

Так, например, в [7] предлагается использовать данные об остовных деревьях Сети, которые строятся в каждом Ethernet-сегменте в соответствии со стандартом IEEE 802.1D (протокол STP) и представлены записями в BRIDGE-MIB коммутаторов. Преимуществом такого подхода является то, что указанный стандарт реализуется во всем современном оборудовании, однако не все устройства сопровождают BRIDGE-MIB, а при наличии в сегменте Сети нескольких VLAN доступ к данным о деревьях может быть затруднен или невозможен (о чем не сказано в [7]).

Другой способ основан на обработке данных из адресных таблиц пересылки (AFT), также сопровождаемых каждым сетевым коммутатором. Однако, во-первых, стандартами не гарантируется полнота таблиц AFT, во-вторых, не все устройства предоставляют содержимое этих таблиц посредством SNMP. Поэтому в [3] приводится алгоритм, позволяющий построить граф при отсутствии некоторой части информации, что приводит к росту вычислительной сложности и некоторому несоответствию получаемых графов реальной топологии Сети.

Наконец, в последнее время начали появляться протоколы, направленные непосредственно на поддержание целостного описания всех связей между устройствами Сети на канальном уровне. Одним из таких протоколов является Cisco Discovery Protocol (CDP), позволяющий каждому устройству сопровождать описание связанных с ним устройств и особенностей этих связей. Для успешного исследования Сети необходима поддержка данного протокола всеми сетевыми устройствами, которая, однако, слабо распространена на устройствах, производимых не корпорацией Cisco.

Открытым аналогом протокола CDP является Link Layer Discovery Protocol (LLDP, стандарт IEEE 802.1AB). Схема его работы и набор сопровождаемых данных схожи с CDP. LLDP был стандартизован сравнительно недавно и не поддерживается большинством устройств предыдущих поколений.

Отметим также, что в современных Сетях невозможно гарантировать предоставление всеми устройствами данных стандартной структуры или предоставление их вообще (например, устройство не поддерживает SNMP, доступ к информации закрыт).

МОДЕЛЬ СЕТИ

Описание алгоритма построения графа канального уровня целесообразно приводить в терминах абстрактной модели Сети.

Введем множество сетевых устройств D . Для каждого $d \in D$ обозначим множество его физи-

ческих интерфейсов как P_d . Множество всех интерфейсов всех устройств из D обозначим $P = \bigcup_{d \in D} (P_d)$. Для каждого интерфейса $p \in P$ могут быть заданы MAC (p) и IP (p) – физический и сетевой адреса соответственно, а также ID (p) и NM (p) – целочисленный идентификатор интерфейса и его строковое имя. Введем симметричное отношение $N \subseteq P \times P$ такое, что два интерфейса $p, q \in P$ находятся в отношении N (обозначается $p N q$), если они связаны физически друг с другом.

Сеть на канальном уровне можно описать как граф $G = \langle V, E \rangle$, где множество вершин $V = D \cup P$, а множество ребер $E = C \cup L$. Здесь множество ребер $C = \{(d, p) \mid d \in D, p \in P_d\}$ содержит связи устройств с их интерфейсами, а множество ребер $L = \{(p, q) \mid p, q \in P, p N q\}$ содержит связи между интерфейсами.

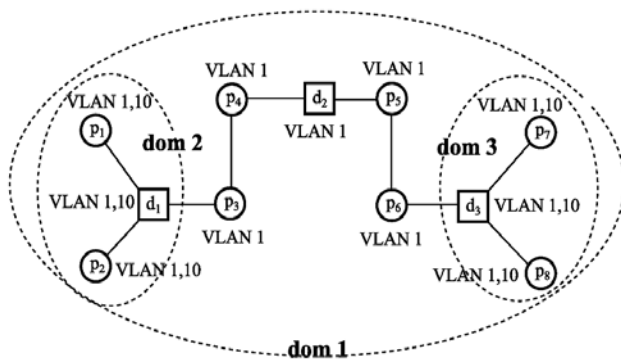
Пусть VID – множество идентификаторов VLAN, используемых в Сети. Припишем каждой вершине $v \in V$ множество меток $VLAN_v \subseteq VID$, соответствующих идентификаторам виртуальных сетей, которым она принадлежит. При этом интерфейс считается принадлежащим некоторой виртуальной сети, если он сконфигурирован соответствующим образом на устройстве или, в противном случае, если он связан с другим интерфейсом, принадлежащим этой виртуальной сети. Устройства считаются принадлежащими некоторой VLAN, если хотя бы один из его интерфейсов принадлежит этой VLAN.

Подграф графа G , образованный вершинами с меткой $i \in VID$, будем обозначать G^i . Множество компонент связности этого подграфа $CC(G^i)$ соответствует множеству широковещательных доменов, образованных VLAN с идентификатором i . Тогда множество $BD = \bigcup_{i \in VID} (CC(G^i))$ соответствует всем широковещательным доменам Сети. Элементы множества BD будем обозначать dom , а идентификатор образовавшей его VLAN – ID (dom).

На рисунке представлен пример модели канального уровня Сети, содержащей три коммутатора, для которых $P_{d1} = \{p1, p2, p3\}$, $P_{d2} = \{p4, p5\}$, $P_{d3} = \{p6, p7, p8\}$. Эти коммутаторы последовательно соединены: $p3 N p4$ и $p5 N p6$. В изображенной сети имеется две VLAN: $VID = \{1, 10\}$. Для широковещательных доменов (выделены эллипсами), образованных этими VLAN: $ID(dom1) = 1$, $ID(dom2) = 10$, $ID(dom3) = 10$.

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ ГРАФА КАНАЛЬНОГО УРОВНЯ

Построение графа выполняется в ходе опроса и обработки данных, полученных по протоколу SNMP от устройств Сети. Опрос начинается с некоторого заданного устройства, как правило, корневого маршрутизатора Сети, затем обрабатываются все устройства, связанные с ним, и т. д.



Пример графа канального уровня

По мере опроса создаются вершины графа, представляющие устройства и их интерфейсы. При этом устройство добавляется в множество D, его интерфейсы – в P, а связи – в C и L.

Данные, которые используются в алгоритме, приведены в табл. 1.

Список устройств, которые стоят в очереди на обработку, будем обозначать DQ. Для обращения к какому-либо устройству с помощью SNMP требуется сетевой адрес интерфейсов устройства, который не всегда возможно определить по известному физическому адресу. Поэтому список отложенных связей $PL \subseteq P$ будет содержать интерфейсы, сетевые адреса которых не получилось определить на момент первичной обработки, так как необходимая запись в таблице АТТ может появиться из MIB устройств, которые будут обработаны в дальнейшем. Список FL будет содержать устройства, сетевые адреса которых не удастся определить с помощью всех доступных данных из Сети.

Разработанный алгоритм разобьем на процедуры. Первые три процедуры принимают на вход вершину-интерфейс p устройства, от которого требуется обнаружить и построить связь с соседним устройством.

Процедура 1. Установление связей между устройствами в соответствии с текущим связующим деревом сегмента Сети в соответствии с IEEE 802.1D.

1. Определить DB (p) и произвести поиск IP (DB (p)) в АТТ.
2. Если адрес не был найден, то добавить p в PL и завершить процедуру.
3. Если вершина, представляющая DB (p), еще не создана, то создать ее и добавить в DQ.
4. Добавить ребро (p, DP (p)) в множество L.

Процедура 2. Установление связи между устройствами в соответствии с таблицами соседей CDP или LLDP.

1. Определить NA (p) и NP (p).
2. Выбрать такой $b \in D$, что $NA (p) = IP (q)$, для какого-либо $q \in P_b$.
3. Если такого элемента нет, то создать вершину b, представляющую устройство с адресом NA (p), добавить в DQ.
4. Выбрать такой интерфейс $q \in P_b$, что $NM (q) = NP (p)$.
5. Добавить ребро (p, q) в множество L.

Процедура 3. Установление связей между коммутаторами и оконечными устройствами по данным из таблиц коммутации. Если для одного интерфейса в таблице содержится несколько записей, то можно считать, что к такому интерфейсу подключен концентратор.

Таблица 1

Данные о канальном уровне Сети

Объекты	Описание данных	Обозначение
Источник: IF-MIB		
ifPhysAddress	Адрес интерфейса p	MAC (p)
ifIndex	Номер интерфейса p	ID (p)
Источник: BRIDGE-MIB		
dot1dBaseBridgeAddress	Адрес текущего устройства d	MAC (d)
dot1dStpPort	Номер интерфейса p текущего устройства d	ID (p)
dot1dStpPortDesignatedBridge	Адрес соседнего для интерфейса p устройства в основном дереве	DB (p)
dot1dStpPortDesignatedPort	Номер интерфейса соседнего для p устройства	DP (p)
dot1dTpFdbAddress	Таблица коммутации интерфейса p	AFT (p)
Источники: CISCO-CD-PMIB, LLDP-MIB		
cdpCacheAddress, lldpRemManAddrIfId	Адрес соседнего устройства для интерфейса p	NA (p)
cdpCacheDevicePort, lldpRemPortDescr	Имя интерфейса соседнего для p устройства	NP (p)
Источники: IP-MIB, RFC1213-MIB		
ipNetToMediaPhysAddress, atPhysAddress	Таблица соответствия MAC и IP адресов в пределах всей Сети	АТТ
Источники: CISCO-VTP-MIB, CISCO-VLAN-MEMBERSHIP-MIB, Q-BRIDGE-MIB		
vlanTrunkPortTable, vmMembershipTable, dot1qVlanCurrentTable	Информация о конфигурации VLAN на текущем устройстве d и всех его портах $p \in Pd$	$VID_d, VLAN_d, VLAN_p$

1. Если $|AFT(p)| = 1$, то создать вершину-устройство h с единственным интерфейсом с адресом из $AFT(p)$. Добавить ребро (p, q) в множество L (где $q \in P_h$) и завершить процедуру.
2. Если $|AFT(p)| > 1$, то создать вершину-устройство s с количеством интерфейсов, равным $|AFT(p)| + 1$. Добавить ребро (p, q) в множество L (где q – один из элементов P_s).
3. Для каждой записи из $AFT(p)$ создать вершину-устройство аналогично шагу 2 и соединить с любым, не имеющим физической связи с другими интерфейсами, $q \in P_s$.

Процедура 4. Первый этап процесса построения множества ширококешательных доменов путем выделения компонент связности размеченных подграфов. На вход процедура получает данные вершины-устройства – d .

1. Выбрать из $VLAN_d$ еще не обработанный элемент i .
2. Установить, есть ли такой $p \in P_d$, помеченный i , и такой $q \in P$, что $q \cap p$ и $i \in VLAN_q$.
3. Если условие выполнено, то выбрать ширококешательный домен dom из BD такой, что $q \in dom$ и $ID(dom) = i$. Иначе, создать новый домен dom с $ID(dom) = i$.
4. Добавить устройство d в dom . Также добавить в dom все $p \in P_d$, помеченные i .

Алгоритм построения графа. Комплексный алгоритм построения графа канального уровня Сети. При его запуске множество DQ состоит из единственной вершины, представляющей устройство, с которого начинается опрос Сети.

1. Выбрать d из DQ .
2. Наполнить ATT и AFT доступными из устройства d данными. Получаем данные от протоколов STP, CDP, LLDP. Наполнить множества $VLAN_p$ для всех $p \in P_d$ и $VLAN_d$.
3. Для всех $p \in P_d$, не имеющих физической связи с другими интерфейсами и $DB(p)$ у которых отличен от d , произвести запуск Процедуры 1. Если p попадает в PL более трех раз – перенести p из PL в FL .
4. Для всех $p \in P_d$ таких, что $p \notin PL$, произвести последовательный запуск процедур 2 (сначала для данных CDP, потом для LLDP) и 3, проверяя перед каждым вызовом, что p не имеет физической связи с другими интерфейсами (если имеет, то пропустить интерфейс).
5. Произвести запуск Процедуры 4 для d .
6. Удалить d из DQ . Если $DQ \neq \emptyset$, то вернуться к шагу 1.
7. Удалить из PL и FL все p , имеющие связь на канальном уровне.
8. Если $PL \neq \emptyset$, то для каждого $p \in PL$ произвести запуск алгоритма начиная с шага 4.
9. Если $FL \neq \emptyset$, то для каждого $p \in FL$ создать соседнюю вершину-устройство и ее интерфейсы со всей имеющейся по ним информацией. Установить с ней связь и добавить в L .

При реализации алгоритма необходимо учесть, что информация в BRIDGE-MIB может быть разделена по так называемым контекстам, соответствующим различным VLAN. Экземпляры BRIDGE-MIB для каждого контекста получают отдельными SNMP-запросами.

Алгоритм строит граф Сети с учетом присутствия VLAN, обнаруживает связи, образующие циклы, и устройства, недоступные по SNMP. Использование данных из нескольких источников позволяет алгоритму работать с широким классом оборудования.

РЕАЛИЗАЦИЯ И ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА

При реализации вышеописанного алгоритма в ЭП Nest графовая модель была реализована с помощью модели SON [1] (которая используется в Nest для описания графа) следующим образом. Элементы множества D – это объекты класса Device. Для $d \in D$ элементы P_d – это объекты класса LinkInterface. Класс модели VlanInterface описывает виртуальные интерфейсы с идентификаторами из $VLAN_d$ для $d \in D$. Для описания ширококешательных доменов множества BD в модель SON был добавлен новый класс BroadcastDomain, представляющий VLAN. Связи из множества E описываются свойством link класса LinkInterface.

Алгоритм построения графа канального уровня Сети был реализован на языке Java в рамках подсистемы построения графа сетевого уровня ЭП Nest. Для выполнения SNMP-запросов использовалась библиотека SNMP4J [9]. В ходе проведенных работ в код ЭП было добавлено 12 новых классов и интерфейсов, 15 существовавших классов было переработано. Общее количество новых строк кода превысило 1500 (включая комментарии).

Тестирование разработанных алгоритмов проводилось на участке Сети ПетрГУ, включающем 9 устройств, предоставляющих доступ по SNMP, а также множество устройств и хостов без SNMP-доступа. Корректность построенных графов была проверена по записям сетевых администраторов.

В табл. 2 представлены результаты тестирования алгоритмов, использующих данные только CISCO-CDP-MIB, только BRIDGE-MIB, а также комплексного алгоритма. LLDP не был включен в тестирование, так как устройства Сети ПетрГУ не оборудованы поддержкой данного протокола. Время сбора данных включает время простоя при обращении к недоступным устройствам. В дополнение к устройствам, поддерживающим STP, комплексный алгоритм обнаружил 3 маршрутизатора, которые не фигурируют в основном дереве.

Тестовые эксперименты показали, что разработанный комплексный алгоритм позволяет обнаружить большее количество устройств при

Таблица 2

Статистика тестирования алгоритма в Сети ПетрГУ

Конфигурация	Время сбора данных, сек.	Время построения графа, сек.	Обнаружено		
			Устройств	Интерфейсов	VLAN
Комплексный алгоритм	119,01	61,03	2749	5593	47
Только STP	106,26	51,33	2746	5581	46
Только CDP	118,03	24,65	24	158	36

схожих временных затратах по сравнению с алгоритмами, использующими источники информации по отдельности.

С целью проверки корректности работы алгоритма в конфигурациях, отличных от Сети ПетрГУ (построенной на оборудовании корпорации Cisco), а также с целью проведения полностью контролируемых тестов и получения воспроизводимых результатов проводились эксперименты в виртуальных сетевых окружениях. Для создания таких окружений используются программные средства моделирования Сетей, среди которых нами были рассмотрены GNS3 [6], Cisco Packet Tracer [4] и NetSim [8]. Последние две системы не позволяют использовать созданные окружения как полноценные сетевые сегменты и, следовательно, не могут быть использованы для отладки алгоритма, поэтому был выбран инструмент GNS3.

В рамках тестирования было создано три виртуальных лаборатории: 1) Сеть с поддержкой CDP; 2) Сеть с поддержкой LLDP; 3) Сеть с двумя

независимыми VLAN с одинаковым идентификатором.

Использование GNS3 на этапе тестирования позволило проверить работу алгоритма в различных конфигурациях VLAN, а также помогло реализовать и протестировать поддержку LLDP как источника данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный алгоритм построения графа канального уровня, разработанный в рамках данного исследования, показал свою эффективность в Сетях различного масштаба и состава. Используемый подход к построению – задействование нескольких источников данных – оказался удачным в условиях разнородности сетевого оборудования.

В будущем планируется провести расширенное тестирование в Сетях большего масштаба, а также в виртуальных лабораториях, эмулирующих сложные варианты топологий.

* Разработка программного обеспечения и эксперименты выполнялись на компьютерном оборудовании, приобретенном по Программе стратегического развития ПетрГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богдавленский Ю. А. Прототип экспериментальной платформы Nest для исследования моделей и методов управления ИКТ-инфраструктурами локальных поставщиков услуг Интернет // Программная инженерия. 2013. № 2. С. 11–20.
2. Колосов А. С., Богдавленский Ю. А. Параллельный алгоритм построения графа ИКТ-инфраструктуры интернет-провайдера // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2013. № 3. С. 105–110.
3. Breitbart Y. J., Gobjuka H. Ethernet Topology Discovery for Networks With Incomplete Information // IEEE/ACM Transactions on Networking. 2010. Vol. 18. № 4.
4. Cisco Packet Tracer // Cisco Packet Tracer – Networking Academy. 2013. Available at: <https://www.netacad.com/web/about-us/cisco-packet-tracer>
5. Claise B., Wolter R. Network Management: Accounting and Performance Strategies. Claise // Cisco Press. 2007. P. 631.
6. GNS3 // GNS3. 2014. Available at: <http://www.gns3.com>
7. Myung-Hee Son., Bheom-Soon Joo, Byung-Chul Kim, Jae-Yong Lee. Physical Topology Discovery for Metro Ethernet Networks // ETRI Journal. 2005. Vol. 27. № 4.
8. NetSim // Tetcos: Developers of NetSim, Network Simulator. 2014. Available at: <http://tetcos.com>
9. Snmp4j // SNMP4J – Free Open Source SNMP API for Java. 2014. Available at: <http://www.snmp4j.org>

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

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

Bogoyavlenskiy Yu. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

AUTOMATION OF ICT-INFRASTRUCTURE LINK LAYER GRAPH DISCOVERY FOR LOCAL INTERNET SERVICE PROVIDERS

The problem of automated Network link layer graph discovery is considered. A solution of the problem is complicated by the lack of standardized tools for device discovery and neighborhood notification. Therefore, the problem of new methods for the Network

link layer graph development with the use of different non-specialized data sources is important. The article provides an overview of existing methods for solving the noted problem and also suggests a graph model for the link layer description considering the presence of a number of broadcast domains produced by VLANs. A new complex algorithm for building the link layer graph was developed on the basis of the model. The algorithm uses data provided by CDP, LLDP, STP and ARP protocols, accumulated by network devices and retrieved from their MIBs with the use of SNMP. Testing of the Network graph building tools becomes very complicated because of the variety of link layer protocols and technologies. Experimental network environment built with the use of GNS3 network simulator was applied in the process of algorithm testing. Complex algorithm testing results obtained both in different experimental settings and in the real PetrSU network are presented.

Key words: Network, graph, link layer, VLAN, experimental environment

REFERENCES

1. Bogoyavlenskiy Yu. A. Prototype of the Tested Nest for Research of Network Management Methods and Models at the Enterprise Network Level [Prototip eksperimental'noy platformy Nest dlya issledovaniya modeley i metodov upravleniya IKT-infrastrukturami lokal'nykh postavshchikov uslug Internet]. *Programmnyaya inzheneriya*. 2013. № 2. P. 11–20.
2. Kolosov A. S., Bogoyavlenskiy Yu. A. A parallel algorithm for constructing a graph of a local Internet service provider's [Parallel'nyy algoritm postroeniya grafa IKT-infrastrukturnykh provaydera]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SpbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie*. 2013. № 3. P. 105–110.
3. Breitbart Y. J., Gobjuka H. Ethernet Topology Discovery for Networks With Incomplete Information // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2010. Vol. 18. № 4.
4. Cisco Packet Tracer // Cisco Packet Tracer – Networking Academy. 2013. Available at: <https://www.netacad.com/web/about-us/cisco-packet-tracer>
5. Claise B., Wolter R. Network Management: Accounting and Performance Strategies. Claise // Cisco Press. 2007. P. 631.
6. GNS3 // GNS3. 2014. Available at: <http://www.gns3.com>
7. Myung-Hee Son., Bheom-Soon Joo, Byung-Chul Kim, Jae-Yong Lee. Physical Topology Discovery for Metro Ethernet Networks // *ETRI Journal*. 2005. Vol. 27. № 4.
8. NetSim // Tetcos: Developers of NetSim, Network Simulator. 2014. Available at: <http://tetcos.com>
9. Snmp4j // SNMP4J – Free Open Source SNMP API for Java. 2014. Available at: <http://www.snmp4j.org>

Поступила в редакцию 05.11.2014

ОЛЬГА ЮРЬЕВНА БОГОЯВЛЕНСКАЯ

кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и математического обеспечения математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
olbgvl@cs.karelia.ru

ОЦЕНКА ДИСПЕРСИИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АЛГОРИТМА ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ НАСЫЩЕНИЯ В СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Построена оценка стационарной дисперсии размера скользящего окна алгоритма предотвращения насыщения протокола Transmission Control Protocol (TCP). Алгоритм предотвращения насыщения играет ключевую роль в сетях передачи данных, реализуя распределенное управление сетевой инфраструктурой (маршрутизаторы и каналы связи). Производительность протокола определяется соотношением между размером скользящего окна протокола (объем данных, который источник может отправить в сеть без подтверждения доставки) и временем кругового оборота. Дисперсия этой величины представляет значительный интерес для решения проблем управления и проектирования сетевых фрагментов. В работе рассматривается кусочно-линейный случайный процесс размера скользящего окна в условиях, когда объемы данных, отправленных последовательно без потерь, образуют процесс восстановления. На основе дальнейшего анализа этого процесса получена оценка математического ожидания размера скользящего окна без применения неравенства Гельдера. Последняя затем используется для построения оценки дисперсии снизу. Получены условия применимости построенной оценки дисперсии.

Ключевые слова: сети передачи данных, алгоритм предотвращения насыщения, протокол TCP

ВВЕДЕНИЕ

Проблема распределенного управления и справедливого разделения ресурсов инфраструктуры между источниками данных носит фундаментальный характер для обеспечения функционирования и развития глобальных сетей передачи данных. Современная парадигма распределенного управления, предложенная в 1974 году [1], не предполагает использование механизмов резервирования каналов и/или ресурсов маршрутизаторов источниками данных¹. Маршрутизаторы различных уровней сети отличаются по уровню производительности и набору аппаратного обеспечения, однако функционально являются однородными, обеспечивая трансляцию кадров локальных сетей и перенаправление дейтаграмм в соответствии с таблицами маршрутизации.

Интенсивное развитие методов распределенного управления началось, когда в 1984 году был описан, а в октябре 1986-го наблюдался так называемый коллапс перегрузки (congestion collapse) [2]. Анализ этого явления показал, что из-за переполнения очереди промежуточного маршрутизатора сеть была полностью заполнена повторно отправленными данными. При этом новые данные в сеть не поступали. Для решения проблемы был предложен ряд новых методов. Согласно последним, функции распределенного управления реализуются источниками данных, которые, следуя специальным алгоритмам, на основе сигналов обратной связи согласованно

наращивают или сокращают пропускную способность соединений.

В частности, такими алгоритмами успешная доставка данных интерпретируется как свидетельство о наличии в сети свободных ресурсов, а событие потери данных трактуется как сигнал обратной связи, означающий, что загрузка каналов и маршрутизаторов близка к критическим значениям. В первом случае алгоритм наращивает производительность, во втором уменьшает ее. Актуальность задач анализа производительности таких протоколов весьма высока как из-за быстрого роста масштабов сети, так и ввиду диверсификации носителей сигнала и сетевых приложений. Основные механизмы распределенного управления реализуются протоколом Transmission Control Protocol (TCP), который контролирует соединения на уровне точка – точка. Заметим, что этот протокол является единственным программным модулем в архитектуре OSI, реализующим такие функции.

Одним из важнейших алгоритмов, включенным во все существующие реализации TCP, является алгоритм предотвращения насыщения Congestion Avoidance (CA)². Для утилизации доступной мощности канала связи и одновременного контроля доставки данных TCP использует механизм скользящего окна. Скользящее окно – это объем данных, которые источник может отправить в сеть без подтверждения об их доставке.

Алгоритм CA управляет размером скользящего окна. Если доставка данных подтвержда-

ется получателем, то размер скользящего окна линейно возрастает со скоростью b , где последняя определяется величиной времени кругового оборота и реализацией протокола. Если источник получает сведения о потере данных, то размер скользящего окна уменьшается в $0 < 1/\alpha < 1$ раз. Стандарт IETF [3] определяет $\alpha = 1/2$, реализации могут использовать другие значения. Если сведений о доставке данных не было получено вовсе, то алгоритм СА прекращает передачу данных, включает механизм случайной отсрочки и передает управление алгоритму Slow Start. Однако стабильное TCP-соединение, для которого уровень потерь данных на сетевом маршруте не превышает 2,5 %, большую часть времени находится под управлением алгоритма СА. Анализ производительности TCP-соединения под управлением пары алгоритмов Slow Start и СА проведен в работе [4].

Подавляющее большинство исследований производительности алгоритма СА посвящены анализу математического ожидания его пропускной способности для разных видов потоков потерь данных. Анализу моментов более высокого порядка и анализу центральных моментов в литературе практически не уделяется внимание. Исключение составляет [5], где получена дисперсия алгоритма СА при условии, что потери данных являются случайным точечным процессом; ряд работ, где получены преобразования Лапласа для стационарного распределения (см., например, [6]) пропускной способности, а также [7], где построен точный численный алгоритм линейной сложности, позволяющий рассчитать стационарное распределение скользящего окна в условиях, когда потери данных описываются распределением Бернулли.

Однако качество услуг, предоставляемых большинством современных приложений (например, видео- и аудиопотоки), также существенно зависит от дисперсии пропускной способности потока. Поэтому оценки математического ожидания не дают информации, достаточной для дальнейшего анализа и эффективного решения задач проектирования и администрирования сетей. Кроме того, в настоящее время разработано более десятка экспериментальных версий протокола TCP, имеющих целью улучшить утилизацию широкополосных каналов связи и адаптировать свойства протокола к свойствам беспроводных носителей сигнала. В частности, протокол TCP CUBIC [8] используется по умолчанию в ОС Linux, начиная с версии 2.6.19. Характеристики производительности новых протоколов изучены весьма слабо, однако если для сравнения математических ожиданий пропускной способности имеется теоретическая основа, то дисперсия стандартного алгоритма СА также изучена слабо. Использование полученных в литературе преобразований Лапласа для расчета дисперсии

требует громоздких вычислений, следовательно, построение аналитических оценок дисперсии алгоритма СА является весьма актуальным.

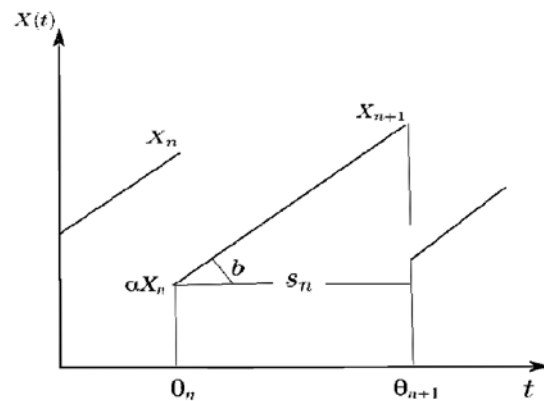
В настоящей работе проведен анализ и построена оценка дисперсии алгоритма СА версии NewReno в условиях, когда объемы данных, последовательно успешно доставленных получателю, образуют последовательность независимых одинаково распределенных случайных величин. Построено условие применимости оценки. Приведены примеры использования оценки.

ПОСТРОЕНИЕ ОЦЕНКИ ДИСПЕРСИИ

Определим $X(t) \in R^+$ объем данных, которые источник может отправить в сеть без получения подтверждения от получателя в момент времени t . Пусть на интервалах $[\theta_n, \theta_{n+1})$ $n = 0, 1, \dots$ имеет место $X(t) = X(t_0) + b(t - t_0)$, $\forall [t_0, t] \subset [\theta_n, \theta_{n+1})$, где $b^{-1} = E[\xi_n]$ математическое ожидание времени кругового оборота сегмента данных. В случайные моменты времени $\{\theta_n\}_{n \geq 0}$ процесс $\{X(t)\}_{t \geq 0}$ совершает скачок вида $X(\theta_n + 0) = \alpha X(\theta_n)$, где $0 < \alpha < 1$. При этом последовательность

$$\int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} X(\tau) d\tau$$

(объем данных, последовательно доставленных получателю без потерь) образует процесс восстановления с абсолютно непрерывной функцией восстановления $G(y) = P(s_n \leq y)$, имеющей конечные моменты первого и второго порядков, $E[s_n] = \lambda^{-1}$, $\lambda > 0$ и $E[s_n^2] < \infty$. Пример траектории процесса $X(t)$ представлен на рисунке.



Пример траектории размера скользящего окна

Определим последовательность $\{X_n = X(\theta_n)\}_{n \geq 0}$. Заметим, что из геометрических соображений для последней имеет место соотношение

$$X_{n+1}^2 = \alpha^2 X_n^2 + 2bs_n. \quad (1)$$

Сначала опишем основную проблему, возникающую при получении оценок дисперсии пропускной способности алгоритма СА. Физические

свойства носителей сигнала и алгоритмы управления очередью определяют свойства случайного потока потерь данных, видимые отправителем, которые, в свою очередь, являются важнейшим параметром аналитических моделей алгоритма AIMD. В литературе, как правило, применяются два основных способа описания потока потерь данных:

1. Определяется последовательность случайных величин $\{\delta_n\}_{n>0}$, где δ_n – это интервал времени между двумя последовательными событиями потерь данных.
2. Определяется последовательность случайных величин $\{s_n\}_{n>0}$, где s_n – объем данных, отправленных последовательно без потерь. Например, если предполагается, что потери сегментов происходят независимо с вероятностью p , то распределение s_n определяется по схеме Бернулли.

В литературе обе указанные выше последовательности определяются и как дискретные, и как непрерывные в зависимости от контекста и используемых методов анализа.

Если в качестве основного параметра модели используется распределение $P\{\delta_n = \theta_{n+1} - \theta_n \leq x\}$, как это сделано, например, в работе [5], тогда рекуррентное соотношение

$$X_{n+1} = \alpha X_n + b\delta_n \quad (2)$$

позволяет получить точное значение стационарного математического ожидания X_n в виде

$$\lim_{n \rightarrow \infty} [X_n] = \frac{b}{1 - \alpha} E[\delta_n]$$

и затем вычислить дисперсию стандартным способом.

Однако идентификация параметров последовательности δ_n требует более сложных вычислений, а также получения данных из ядра ОС. Соответствующая выборка, как правило, имеет значительно меньший объем, чем выборка, которую, в некоторых случаях, можно построить для идентификации параметров последовательности s_n . Кроме того, связь между уровнем потерь данных и производительностью алгоритма СА является фундаментальной характеристикой протокола ТСП. Поэтому в подавляющем большинстве работ именно характеристики объема данных, переданных последовательно без потерь, являются параметрами моделей производительности протокола ТСП. В этом случае соотношение (1) позволяет получить явное выражение для второго начального момента, на основе которого в литературе строится оценка математического ожидания с помощью неравенства Гельдера. Последняя непригодна для построения оценок дисперсии.

Теперь построим оценку стационарного математического ожидания размера скользящего

окна, не используя неравенство Гельдера. Опираясь на (1), получим

$$X_{k+n}^2 = 2b \sum_{i=0}^n \alpha^{2i} s_{k+n-i} \quad (3)$$

или

$$X_{k+n} = \sqrt{2b \sum_{i=0}^n \alpha^{2i} s_{k+n-i}}.$$

Последнее выражение можно преобразовать к виду:

$$X_{k+n} \leq \sqrt{2b} \sum_{i=0}^n \alpha^i \sqrt{s_{k+n-i}}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} E[X_{k+n}] &= E\left[\sqrt{2b \sum_{i=0}^n \alpha^{2i} s_{k+n-i}}\right] \leq \\ &\leq \sqrt{2b} \sum_{i=0}^n \alpha^i E\left[\sqrt{s_{k+n-i}}\right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь и далее будем предполагать, что предел

$$E[X] = \lim_{n \rightarrow \infty} E[X_n]$$

существует³. Тогда, основываясь на свойствах математического ожидания и пределов числовых последовательностей, получим следующее неравенство

$$\begin{aligned} E[X] &= \lim_{n \rightarrow \infty} E[X_n] \leq \\ &\leq \sqrt{2b} \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^n \alpha^i E[\sqrt{s_{n-i}}] = \frac{\sqrt{2b}}{1 - \alpha} E[\sqrt{s_n}]. \end{aligned}$$

Теперь заметим, что, согласно (3),

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E[X_n^2] = 2b \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^n E[\alpha^{2i} s_{n-i}] = \frac{2b}{1 - \alpha^2} E[s_n] \quad (5)$$

и, значит,

$$E[X] \leq \sqrt{\frac{2b}{1 - \alpha^2} E[s_n]}.$$

Таким образом, нами получены две оценки математического ожидания, одна из которых в точности равна квадратному корню из второго начального момента⁴. Следовательно, нами доказана следующая

Теорема 1. Если функция распределения $G(y)$ такова, что имеет место неравенство

$$E[\sqrt{s_n}] < \sqrt{\frac{1 - \alpha}{1 - \alpha^2}} E[s_n], \quad (6)$$

то для стационарной дисперсии D последовательности $\{X_n\}$ имеет место

$$D > 2b \left(\frac{E[s_n]}{1 - \alpha^2} - \frac{E^2[\sqrt{s_n}]}{(1 - \alpha)^2} \right). \quad (7)$$

ПРИМЕРЫ

Положим значения $b = 1$ и $\alpha = 1/2$, которые используются большинством реализаций протокола TCP. Тогда условие теоремы примет вид

$$E[\sqrt{s_n}] < \sqrt{\frac{E[s_n]}{3}}.$$

Оценки математического ожидания, полученные выше, примут вид:

$$E[X] \leq 2\sqrt{2}E[\sqrt{s_n}] \text{ и } E[X] \leq \sqrt{\frac{8}{3}}E[s_n].$$

Пример 1. Пусть s_n удовлетворяют показательной функции распределения и $G(y) = 1 - e^{-\lambda y}$. Тогда

$$E[s_n] = \frac{1}{\lambda}$$

и

$$E[\sqrt{s_n}] = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{1}{\lambda}}.$$

Условие теоремы не выполняется, следовательно, оценка (7) не может быть использована.

Пример 2. Пусть s_n удовлетворяют χ -распределению Пирсона. Тогда его моменты имеют вид:

$$E[s_n^k] = \frac{2^k \Gamma\left(\frac{n+k}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}, \quad (8)$$

где n – число степеней свободы. Используя оценки, построенные выше, получим

$$E[s_n] = \frac{2^{\frac{1}{2}} \Gamma\left(\frac{n+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}$$

и

$$E[\sqrt{s_n}] = \frac{2^{\frac{1}{4}} \Gamma\left(\frac{2n+1}{4}\right)}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}.$$

Условие теоремы 1 выполняется, например, для $n = 10$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа посвящена анализу дисперсии размера скользящего окна алгоритма предотвращения насыщения (Congestion Avoidance) протокола Transmission Control Protocol. Размер скользящего окна является ключевой характеристикой производительности протокола TCP, а его дисперсия – важным параметром для многих современных приложений сетей передачи данных. В работе построена модель эволюции размера скользящего окна, получена оценка его математического ожидания без использования неравенства Гельдера. Получена оценка стационарной дисперсии снизу и доказана теорема об условии ее применимости. Приведены примеры анализа условия теоремы.

ПРИМЕЧАНИЯ

¹ Заметим, что такие механизмы существовали в сети передачи данных, использовавших, например, комплексные стандарты X.25 или X.110, а также в сети «Автодин» Министерства обороны США. Однако эти технологии не получили широкого распространения и были вытеснены сетевыми стандартами DARPA.

² Последовательно использовались версии Tahoe, Reno, NewReno. Дальнейший анализ проводится для версии NewReno.

³ Более подробно см. [5].

⁴ Заметим, что последняя оценка совпадает с оценкой, полученной в [9] для детерминированного потока потерь данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богоявленская О. Ю. Анализ случайного потока, генерируемого транспортным протоколом с обратной связью, в сети передачи данных // Автоматика и телемеханика. 2003. № 12. С. 60–68.
2. Богоявленская О. Ю. Вероятностная модель алгоритмов протокола распределенного управления сети интернет // Автоматика и телемеханика. 2009. № 1. С. 119–129.
3. Allman M., Paxson V., Blanton E. TCP Congestion Control. 2009. RFC 5681.
4. Altman E., Avrachenkov K., Barakat C. A Stochastic model of TCP/IP with Stationary Random Losses // Proceedings of ACM SIGCOMM'00. Stockholm, 2000. P. 231–242.
5. Cerf V. G., Kahn R. E. A Protocol for Packet Network Intercommunication // IEEE Transactions on Communications. 1974. Vol. 22. № 5. P. 637–648.
6. Dumas V., Guillemin F. and Robert P. A Markovian analysis of AIMD algorithms // Advances in Applied Probability. 2002. Vol. 34. № 1. P. 85–111.
7. Floyd S., Fall F. Promoting the use of end-to-end congestion control in the Internet // IEEE/ACM Transactions on Networking. 1999. August.
8. Ha S., Rhee I., Xu L. Cubic: a new tcp-friendly high-speed tcp variant // SIGOPS Operation Systems Review. 2008. July. Vol. 42. № 5. P. 64–74.
9. Jacobson V. Congestion Avoidance and Control // Proceedings of the SIGCOMM '88 Symposium. 1988. August. P. 314–32.

Bogoyavlenskaya O. Yu., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

ESTIMATION OF PERFORMANCE VARIANCE FOR NETWORKING CONGESTION AVOIDANCE ALGORITHM

The estimate of the variance for Transmission Control Protocol (TCP) Congestion Avoidance algorithm is derived. Congestion Avoidance algorithm provides stability of the data communication networks performing distributed control of the networking infrastructure (data links and routers). The performance of the protocol is basically defined by the relation between sliding window size (amount of data that a sender is allowed to send through the network without acknowledgement) and round trip time. The variance of this value is essentially important for network design and administration tasks. We consider piece-wise linear stochastic process of the sliding window size with the assumption that multiple data successfully delivered in sequence form a renewal process. Further analysis provides the estimate of sliding window expectation without applying Goelder's inequality. This estimate is used then to derive the estimate of the variance. Conditions suitable for proper application of the estimate are obtained as well.

Key words: Networking, Congestion Avoidance Algorithm, TPC protocol

REFERENCES

1. Bogoyavlenskaya O. Yu. Analysis of the Random Flow Generated by the Feedback Transport Protocol in a Data Transfer Network // Automation and Remote Control. 2003. Vol. 64. № 12. P. 1882–1889.
2. Bogoyavlenskaya O. Yu. Probabilistic model of the algorithms of distributed control protocol in the internet network // Automation and Remote Control. Vol. 70. № 1. 2009. P. 107–117.
3. Allman M., Paxson V., Blanton E. TCP Congestion Control. 2009. RFC 5681.
4. Altman E., Avrachenkov K., Barakat C. A Stochastic model of TCP/IP with Stationary Random Losses // Proceedings of ACM SIGCOMM'00. Stockholm, 2000. P. 231–242.
5. Cerf V. G., Kahn R. E. A Protocol for Packet Network Intercommunication // IEEE Transactions on Communications. 1974. Vol. 22. № 5. P. 637–648.
6. Dumas V., Guillemin F. and Robert P. A Markovian analysis of AIMD algorithms // Advances in Applied Probability. 2002. Vol. 34. № 1. P. 85–111.
7. Floyd S., Fall F. Promoting the use of end-to-end congestion control in the Internet // IEEE/ACM Transactions on Networking. 1999. August.
8. Ha S., Rhee I., Xu L. Cubic: a new tcp-friendly high-speed tcp variant // SIGOPS Operation Systems Review. 2008. July. Vol. 42. № 5. P. 64–74.
9. Jacobson V. Congestion Avoidance and Control // Proceedings of the SIGCOMM '88 Symposium. 1988. August. P. 314–32.

Поступила в редакцию 05.11.2014

АНДРЕЙ СЕРГЕЕВИЧ ВДОВЕНКО

магистрант, младший научный сотрудник кафедры информатики и математического обеспечения математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
vdovenko@cs.karelia.ru

ДМИТРИЙ ЖОРЖЕВИЧ КОРЗУН

кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры информатики и математического обеспечения математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
dkorzun@cs.karelia.ru

УПРАВЛЕНИЕ ИНТЕРВАЛОМ ПРОВЕРКИ УВЕДОМЛЕНИЙ ПО ПОДПИСКЕ МОБИЛЬНЫМ КЛИЕНТОМ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ ПРОСТРАНСТВЕ*

Интеллектуальное пространство позволяет организовать сетевое взаимодействие множества участников на основе разделяемого использования информационного содержимого. Для отслеживания происходящих событий участник применяет операцию подписки, получая на постоянной основе уведомления об изменениях в информационном содержимом. Доставка уведомлений является негарантированной, что особенно проявляется в случае мобильных клиентов из-за частых сбоев беспроводной сети. В данной статье представлено решение с активной проверкой уведомлений. Предложена математическая модель управления интервалом проверки, позволяющая мобильному клиенту адаптироваться к текущему уровню потерь.

Ключевые слова: операция подписки, снижение потерь, интеллектуальные пространства, мобильные клиенты

ВВЕДЕНИЕ

Интеллектуальное пространство (ИП) формирует сервисно-ориентированную систему, обеспечивающую [1], [6], [7] построение и доставку сервисов разнородными динамическими участниками вычислительной среды на основе их взаимодействия через разделяемое использование накапливаемого информационного содержимого и извлечение из него знаний. Примером ИП выступает система интеллектуального зала SmartRoom [8], [11], предоставляющая сервисы для проведения таких мероприятий, как конференции. Программная часть системы состоит из агентов, выполняемых на окружающих вычислительных устройствах (в помещении), мобильных компьютерах пользователей (например, смартфоны) и удаленных сетевых ЭВМ (например, веб-серверы).

Операция подписки [3] является одним из ключевых механизмов для организации взаимодействия агентов в ИП. Агент отслеживает интересующую его информацию, устанавливая подписку на часть информационного содержимого ИП. Если агенты изменяют в ней информацию, то агент-подписчик получает уведомления. В рассматриваемом примере интеллектуального зала работа механизма подписки нарушается из-за потерь при доставке уведомлений по подписке. Эта особенность характерна для мобильных клиентов, так как беспроводная сеть подвержена сбоям при передаче данных [2], [5], [9].

В данной работе рассматривается задача проверки подписчиком наличия новых уведомлений для уменьшения последствий от потерь уведомлений. Как показано в [10], частые проверки приводят к излишним затратам ресурсов, поэтому необходимо адаптировать интервал проверки под текущее состояние системы. В статье представлена математическая модель для применения мобильным клиентом при адаптации интервала проверки к текущим условиям потерь уведомлений по подписке.

СИСТЕМЫ ПУБЛИКАЦИИ/ПОДПИСКИ

Модель публикации/подписки предназначена для организации взаимодействия большого числа участников и источников данных [4]. Участники – подписчики и издатели – формируют слабосвязанную распределенную систему. Издатель публикует данные, не зная обязательно, кто является подписчиком. Подписчик реагирует на публикацию данных, находящихся в поле его интересов, независимо от конкретного издателя. Со стороны подписчика не требуется выполнение разовых запросов для проверки изменений данных. Он использует долговременный запрос – подписку, по которой приходят уведомления. Информационный брокер обеспечивает хранение общего информационного содержимого и управляет подписками, динамически соединяя подписчиков и издателей.

Такой вариант реализован в платформе Smart-M3 [6], [7], позволяющей создавать ИП для построения сервисов в условиях разнообразия участвующих вычислительных устройств. При установке подписки между агентом и брокером организуется сетевое соединение. Если агент выполняется на мобильном устройстве (например, смартфоне), то особенности беспроводной связи приводят к частым сбоям в подписке: потеря уведомлений, разрыв сетевого соединения, переключение на другую беспроводную сеть.

Платформа Smart-M3 не гарантирует доставку уведомлений по подписке. Брокер хранит набор всех текущих подписок от агентов и регулярно проверяет состояние сетевых соединений. Уведомление должно быть отправлено агенту, если произошли соответствующие изменения содержимого. Такие уведомления будем называть пассивными. Некоторые уведомления не отправляются из-за перегрузки брокера. Брокер не отслеживает доставку уведомлений (за это может отвечать нижележащий протокол, напр., протокол TCP). Брокер завершает любую подписку, если обнаруживает потерю сетевого соединения.

Рассмотрим класс агентов, реализующих мобильных клиентов Smart-M3 приложения. Примером является система интеллектуального зала [8], в которой мобильные клиенты обеспечивают доступ пользователей (участников мероприятия) к сервисам поддержки этого мероприятия (повестка, презентации, дискуссия и т. п.). В случае мобильных клиентов на работу подписки существенно влияют особенности беспроводной связи. Потеря сетевого соединения между клиентом и брокером обнаруживается на стороне брокера и клиента. Часть уже отправленных уведомлений (до обнаружения брокером потери соединения) не будет доставлена. После обнаружения потери брокер перестает уведомлять клиента об изменениях. Клиенту необходимо восстановить подписку. Ему не будут доставлены уведомления об изменениях в информационном содержимом ИП, произошедших за время восстановления.

В реальных условиях работы интеллектуального зала обнаружено, что для мобильных клиентов перечисленные потери уведомлений по подписке возникают часто. Требуются решения для ручного и автоматического восстановления сетевого соединения [11]. Они реализуются на стороне клиента в виде дополнительного механизма для уменьшения числа недоставленных уведомлений. Доставка уведомлений может быть улучшена за счет активного контроля, реализуемого индивидуально мобильным клиентом.

ИЗВЕСТНЫЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОСТАВКИ УВЕДОМЛЕНИЙ

Известен ряд работ, в которых исследуются вопросы обеспечения доставки уведомлений

в системах публикации/подписки. В [9] рассмотрена задача быстрого восстановления компонент системы после сбоя. Предлагаемая там модель определяет качество функционирования подписки в зависимости от вероятностных характеристик потерь, доставки уведомлений и их своевременности. В отличие от рассматриваемого нами случая, модель предназначена для применения сетью брокеров, которые маршрутизируют передачу уведомлений. Качество обеспечения доставки уведомлений определяется построенным маршрутом в этой сети.

В [5] рассмотрена проблема своевременной доставки уведомлений. Задача доставки разбивается на подзадачи: управление поступающими изменениями, слежение за отключением подписчиков, отправка уведомлений активным подписчикам, хранение недоставленных уведомлений в буфере. В состав системы требуется вводить дополнительный модуль, следящий за всеми уведомлениями и проверяющий их доставку. В случае платформы Smart-M3 такой модуль должен быть реализован на стороне брокера, накладывая на последнего существенную дополнительную нагрузку.

В [4] представлена модель для оценки числа потерь на стороне подписчика. Выделены временные затраты: 1) время на установку подписки и ее завершение, 2) время на создание уведомления на стороне брокера и 3) время для получения уведомления последним подписчиком. Предполагается, что есть некоторый общий элемент, позволяющий динамически измерять указанные затраты для всех участников системы. В итоге получено выражение для вычисления вероятности потерь уведомлений по измеряемым временным затратам.

Предлагаемое нами в данной работе решение разработано с учетом возможностей платформы Smart-M3 и условий работы системы интеллектуального зала. Подписчиками выступают мобильные клиенты, находящиеся в условиях беспроводных сетей с частыми сбоями. Единственный брокер выполняет обслуживание подписок всех клиентов, не отслеживая доставку пассивных уведомлений.

ОРГАНИЗАЦИЯ ПОДПИСКИ НА СТОРОНЕ МОБИЛЬНОГО КЛИЕНТА

Выделим параметры, которые клиент может измерить в ходе работы. Будем далее считать, что клиент работает с одной подпиской.

Уведомления по подписке доставляются по сети от брокера к клиенту. На стороне заданного клиента обозначим очередное уведомление как i , где i можно интерпретировать как последовательный номер уведомления. Уведомления приходят неравномерно. Обозначим через t_i интервал времени между событиями $i-1$ и i . Между событиями $i-1$ и i могут произойти изменения,

уведомления о которых не были доставлены клиенту из-за возникших сбоев. Предположим, что клиент имеет некоторый способ оценивания числа таких потерь. Обозначим это число как k_i – обнаруженное число потерь на интервале t_i . Зная k_i , можно определить интенсивность потерь λ . В общем случае она зависит от времени, то есть $\lambda = \lambda(t)$.

Для снижения потерь уведомлений клиент может управлять t_i за счет выполнения явного запроса к брокеру. Таким образом, клиент реализует доставку активных уведомлений. Если уменьшить t_i , то снизится число потерь k_i . Если увеличить t_i , то k_i может возрасти. Таким образом, клиент может реализовать адаптивную стратегию за счет активных уведомлений, чтобы сократить количество потерь k_i и в то же время не создать чрезмерной нагрузки из-за выполнения дополнительных запросов.

На число потерь в первую очередь влияет качество беспроводной связи, так как при сбоях соединения повторные уведомления брокером не высылаются. Отметим, что число клиентов в ИП также влияет на число потерь, возникающих из-за повышенной нагрузки брокера.

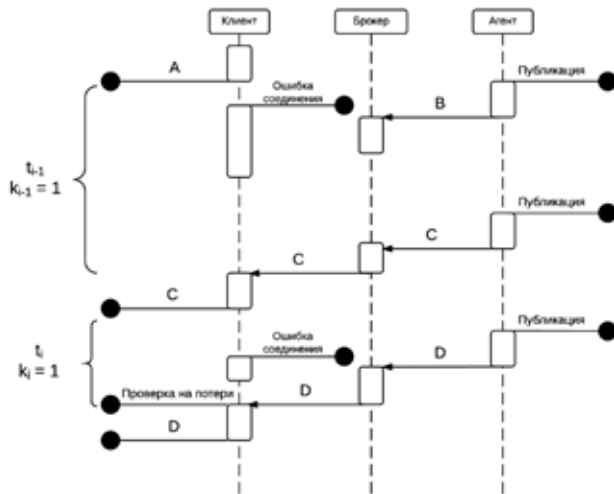


Рис. 1. Диаграмма последовательности взаимодействия сервиса и клиента по подписке

Диаграмма последовательности, поясняющая введенные параметры, представлена на рис. 1. Информационное содержимое ИП изменяется из-за публикации данных множеством агентов. Брокер уведомляет об этом клиента. Уведомление A было доставлено. Когда брокер отправил уведомление B , произошел сбой сетевого соединения, и B не доставляется клиенту. При получении уведомления C клиент вычисляет t_{i-1} и определяет $k_{i-1} = 1$. Для сокращения числа потерь уведомлений клиент выполняет явный запрос брокеру для проверки, происходили ли изменения. Обнаруживается потеря сетевого соединения. Клиент его восстанавливает, получает уведомление D и определяет $k_i = 1$.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕРВАЛОМ ПРОВЕРКИ

Рассмотрим модель для адаптивного управления интервалом проверки t_i для наблюдаемого количества потерь k_i . Модель предназначена для построения адаптивной стратегии клиента при реализации активных уведомлений. Пусть задано начальное значение t_0 интервала проверки. Рассмотрим поведение клиента, развивающееся по времени $i = 1, 2, \dots$.

Если на t_{i-1} не было потерь ($k_{i-1} = 0$), то целесообразно аддитивное увеличение t_i для сокращения числа явных запросов (клиент наблюдает признаки того, что состояние сетевой связи хорошее). Получаем следующее выражение:

$$t_i = t_{i-1} + \delta, \quad (1)$$

где $\delta \geq 0$ – это некоторое фиксированное значение, на которое происходит увеличение интервала. Увеличение умеренное, чтобы снизить риск резкого роста числа потерь.

Рассмотрим ситуацию с потерями. Пусть на интервале t_{i-1} обнаружено, что $k_{i-1} > 0$. Следует уменьшить интервал t_i , используя мультипликативное уменьшение. Клиент пытается избежать возможных потерь. Уменьшение мультипликативное, так как клиент заинтересован в быстром достижении $k_i = 0$ в последующих наблюдениях. Для величины t_i получаем следующее выражение:

$$t_i = \alpha t_{i-1} + (1 - \alpha) \frac{t_{i-1}}{k_{i-1} + 1}, \quad k_{i-1} > 0, \quad (2)$$

где $0 < \alpha < 1$ – коэффициент для учета предыдущих наблюдений.

Выражения (1) и (2) составляют рекуррентную систему:

$$t_i = \begin{cases} t_{i-1} + \delta, & k_{i-1} = 0, \\ \frac{1 + \alpha k_{i-1}}{k_{i-1} + 1} t_{i-1}, & k_{i-1} > 0. \end{cases} \quad (3)$$

Отметим, что (3) справедливо только для активных уведомлений. Когда приходит пассивное уведомление i , то значение t_i не может быть задано самим клиентом.

Рассмотрим два случая для (3), допускающие аналитическое решение. Они показывают экстремальные варианты для адаптивной стратегии.

Случай 1 (нет потерь): $k_i = 0$ для $i = 1, 2, \dots$. Заданы значения $t_0 > 0$ и $\delta > 0$. Решение для (3) принимает вид:

$$t_i = t_0 + \delta(i - 1), \quad i = 1, 2, \dots$$

Следовательно, t_i растет линейно до бесконечности. Если нет потерь, то клиент постепенно приходит к состоянию, когда активные уведомления не требуются.

Случай 2 (постоянные потери): $k_i = k > 0$ для $i = 1, 2, \dots$. Заданы фиксированные значения $t_0 > 0$ и $0 < \alpha < 1$. Решение для (3):

$$t_i = t_0 \left(\frac{\alpha k + 1}{k + 1} \right)^{i-1}, i = 1, 2, \dots \quad (4)$$

В силу $0 < (\alpha k + 1) / (k + 1) < 1$ получаем, что интервал проверок мультипликативно уменьшается до нуля. Клиент быстро приходит к состоянию с частыми активными уведомлениями.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Для оценки и сравнения предложенной модели для адаптивной стратегии проведено имитационное моделирование. Определяемая представленной моделью адаптивная стратегия клиента зависит от распределения потерь уведомлений. Использовались следующие два вероятностных распределения для генерации значений k_i как неотрицательных целых чисел.

1) Значения для k_i выбираются равномерно на отрезке $[a, b]$ для заданных параметров $0 < a < b$.

2) Значение для k_i имеет пуассоновское распределение со средним и отклонением λt_i для заданного значения $\lambda > 0$.

В выполненных экспериментах использовались значения $a = 0$, $b = 0,1$ и $\lambda = 0,05$. Зависимость k_i от t_i отражает факт, что число потерь пропорционально длительности интервала. Оба случая сходны, имитируя, что одно уведомление теряется в среднем каждые 20 с.

В табл. 1 представлены стратегии клиента, с которыми проводились эксперименты. Начальное значение для $t_0 = 20$ с, то есть на таком интервале в среднем происходит одна потеря. В экспериментах рассматривались последовательности уведомлений, где $0 < i \leq 100$.

На рис. 2 показано поведение t_i , управляемое по адаптивной стратегии модели (3) для двух распределений потерь. Интервал проверок t_i уменьшается линейно, что показано в (4), описывающей мультипликативное уменьшение, если за единицу времени брать i . При равномерно распределенных потерях ненулевые значения k_i встречаются часто, что приводит к пилообразному поведению с большими пиками. При пуассоновском распределении потерь случай $k_i = 0$

Таблица 1

Параметры экспериментальных стратегий		Описание
Стратегия	Параметр	
Адаптивная стратегия	Значение	Определяется моделью (3). Значение $\alpha = 0,5$ трактуется значимость предыдущих и текущего наблюдений в равной мере. Значение $\delta = 20$ с совпадает со средней длиной интервала для одной потери
	α	
	δ	
Мультипликативное уменьшение	Значение	Если $k_{i-1} > 0$, то t_i уменьшается в два раза. Если $k_{i-1} = 0$, то возврат $t_i = t_0$
Случайный выбор	Значение	Случайная стратегия: t_i выбирается равномерно из интервала (a, b)
	a	
	b	
Постоянный интервал проверки		Всегда используется $t_i = t_0$

имеет высокую вероятность, что приводит к пикам меньшей величины.

Второй тип проведенных экспериментов сравнивает предлагаемую адаптивную стратегию с более простыми (представлены в табл. 1). В этих экспериментах использовалось только пуассоновское распределение потерь с параметрами, как в предыдущих экспериментах. Отметим, что если бы распределение потерь зависело от времени, то предложенная адаптивная стратегия привела бы еще к большей разнице в сравнении с другими рассмотренными стратегиями.

На рис. 3 представлено поведение t_i для рассмотренных стратегий. В сравнении с адаптивной стратегией у остальных наблюдается низкое значение t_i , что приводит к чрезмерному использованию ресурсов клиентом (частые запросы).

Определим дополнительные показатели эффективности. Пусть k_{avg} будет средним числом потерь за все рассматриваемое время. Аналогично, пусть t_{avg} – средняя длина интервала проверки.

$$k_{\text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i, t_{\text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$$

Клиент заинтересован в $k_{\text{avg}} \rightarrow \min$ и $t_{\text{avg}} \rightarrow \max$. Табл. 2 показывает сравнение пока-

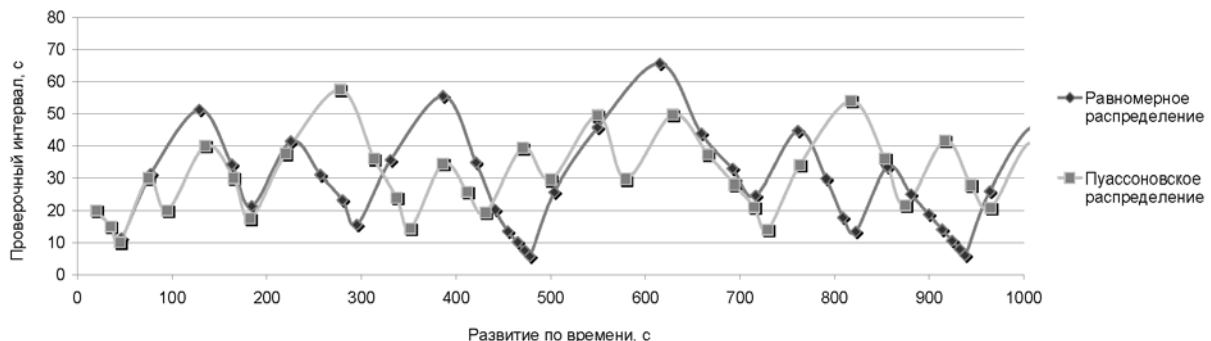


Рис. 2. Управление интервалом проверки при равномерном и пуассоновском распределении числа потерь k_i

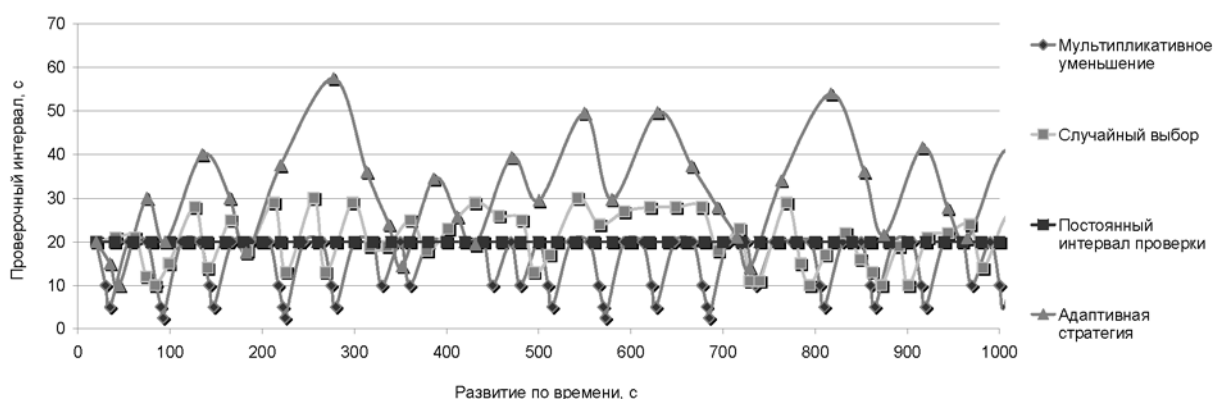


Рис. 3. Сравнение стратегий для контроля интервала проверок

зателей эффективности для разных стратегий. Стратегия мультипликативного уменьшения имеет худший результат по времени и лучший результат по числу потерь. Это связано с ее полуадаптивным характером, когда уменьшение быстрое, а рост интервала, наоборот, умеренный. Сравнительная эффективность стратегий случайного выбора и постоянного интервала проверки определяется независимостью потерь от времени и соответствующим подбором параметров стратегий под фиксированные характеристики распределения потерь. В целом можно заключить, что адаптивный алгоритм превосходит другие стратегии.

Таблица 2

Показатели эффективности для различных стратегий управления интервалом проверки уведомлений

Показатель эффективности		Мультипликативное уменьшение	Случайный выбор	Постоянный интервал проверки	Адаптивная стратегия
k_{avg}	min	0,59	1,19	0,89	1,23
t_{avg}	max	14,23	19,87	20	28,8
$\lambda = \frac{k_{avg}}{t_{avg}}$	min	0,042	0,06	0,045	0,041
$\lambda_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{t_i}$	min	0,078	0,06	0,045	0,043

Для анализа зависимости стратегии от величины δ , см. модель (3), проведены эксперименты с варьированием δ . Полученные результаты представлены в табл. 3. Малые значения δ ведут

к меньшим потерям. Большие значения уменьшают нагрузку клиента на брокера. Как видно из таблицы, наиболее оптимальным значением является $\delta = 20$, что подтверждается результатами эксперимента, приведенными в табл. 2.

Таблица 3
Влияние параметра δ на показатели эффективности адаптивной стратегии

δ	10	20	40	60
Показатель эффективности	Значение			
k_{avg} (min)	1,06	1,14	0,89	1,23
t_{avg} (max)	22,01	24,76	32,6	43,86
$\lambda = \frac{k_{avg}}{t_{avg}} \rightarrow \min$	0,048	0,046	0,047	0,054
$\lambda_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{t_i} \rightarrow \min$	0,047	0,045	0,046	0,054

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье исследована задача проверки мобильным клиентом изменений в информационном содержимом интеллектуального пространства в условиях возникновения потерь пассивных уведомлений по подписке. С одной стороны, отсутствие явных проверок со стороны или редкое их использование может привести к существенным потерям. С другой стороны, частый активный опрос приводит к чрезмерной нагрузке как на клиента, так и на сеть и брокера. Нами предложена математическая модель управления интервалом проверки, позволяющая адаптировать явную проверку к наблюдаемой клиентом ситуации. Приведены имитационные эксперименты с полученной адаптивной стратегией управления.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (НИР № 2.2336.2014/К) и по заданию № 2014/154 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания (НИР № 1481).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корзун Д. Ж. Формализм сервисов и архитектурные абстракции для программных приложений интеллектуальных пространств // Программная инженерия. 2015. № 2. С. 3–12.
2. Ломов А. А. Взаимодействие программного агента на уровне сессии с интеллектуальными пространствами // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер.: «Естественные и технические науки». 2013. № 8 (137). С. 118–121.
3. Ломов А. А., Корзун Д. Ж. Операция подписки для приложений в интеллектуальных пространствах платформы Smart-M3 // Труды СПИИРАН. 2012. № 4. С. 439–458.
4. Baldoni R., Beraldi R., Piergiovanni S., Virgillito A. Measuring notification loss in publish/subscribe communication systems // Dependable Computing, 2004. Proceedings. 10th IEEE Pacific Rim International Symposium on. IEEE, 2004. P. 84–93.
5. Bholia S., Strom R., Bagchi S., Yuanyuan Z., Auerbach J. Exactly-once Delivery in a Content-based Publish/Subscribe System // Proc. Int'l Conf. on Dependable Systems and Networks (DSN). IEEE, 2002. P. 7–16.
6. Honkola J., Laine H., Brown R., Tyrkko O. Smart-M3 information sharing platform // Proc. IEEE Symp. Computers and Communications (ISCC), 22–25 June 2010, Riccione, Italy. Washington: IEEE Computer Society, 2010. P. 1041–1046.
7. Korzun D., Balandin S., Luukkala V., Liuha P., Gurtov A. Overview of Smart-M3 principles for application development // Proc. Congress on Information Systems and Technologies (IS&IT'11), Conf. Artificial Intelligence and Systems (AIS'11). Moscow, Physmatlit Publ., 2011. Vol. 4. P. 64–71.
8. Korzun D., Galov I., Balandin S. Development of smart room services on top of Smart-M3 // Proc. 14th Conf. Open Innovations Framework Program FRUCT / S. Balandin and U. Trifonova, Eds. St. Petersburg, SUAI Publ., 2013. P. 37–444.
9. Pongthawornkamol T., Nahrstedt K., Wang G. Reliability and Timeliness Analysis of Fault-tolerant Distributed Publish/Subscribe Systems // 10th International Conference on Autonomic Computing (ICAC '13). 2013. P. 247–257.
10. Vdovenko A., Korzun D. Active Control by a Mobile Client of Subscription Notifications in Smart Space // Proc. 16th Conf. Open Innovations Framework Program FRUCT. Oulu, Finland, 27–31 Oct. 2014. P. 123–128.
11. Vdovenko A., Korzun D. Delivery of SmartRoom Services Using Mobile Clients // Proc. 14th Conf. Open Innovations Framework Program FRUCT / S. Balandin and U. Trifonova, Eds. St. Petersburg, SUAI Publ., 2013. P. 215–216.

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

Korzun D. Zh., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

CONTROL OF NOTIFICATION CHECK INTERVAL FOR SUBSCRIPTION FROM MOBILE CLIENTS IN SMART SPACE

The smart space supports network interactions of multiple participants though information sharing. For detection of ongoing changes a participant applies subscription operation, receiving notifications on a regular basis. Notification delivery is not guaranteed, especially in the case of mobile clients with frequent faults in the underlying wireless network. In this paper, we propose a solution with an active check of subscription notifications. We introduce a mathematical model for control the notification check interval, letting the client to adapt to the current loss level.

Key words: subscription, reduction of losses, smart spaces, mobile clients

REFERENCES

1. Korzun D. Zh. Formalism of services and architectural abstraction for software applications of smart spaces [Formalizm servisov i arkhitekturnye abstraktsii dlya programmnykh prilozheniy intellektual'nykh prostranstv]. *Programmnaya inzheneriya*. 2015. № 2. P. 3–12.
2. Lomov A. A. Session-level interaction of the agent with the smart space [Vzaimodeystvie programmnoho agenta na urovne sessii s intellektual'nymi prostranstvami]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences]. 2013. № 8 (137). P. 118–121.
3. Lomov A. A., Korzun D. Zh. Subscription operation for applications in smart spaces of Smart-M3 platform [Operatsiya podpiski dlya prilozheniy v intellektual'nykh prostranstvakh platformy Smart-M3]. *SPIIRAS Proc.* 2012. № 4. P. 439–458.
4. Baldoni R., Beraldi R., Piergiovanni S., Virgillito A. Measuring notification loss in publish/subscribe communication systems // Dependable Computing, 2004. Proceedings. 10th IEEE Pacific Rim International Symposium on. IEEE, 2004. P. 84–93.
5. Bholia S., Strom R., Bagchi S., Yuanyuan Z., Auerbach J. Exactly-once Delivery in a Content-based Publish/Subscribe System // Proc. Int'l Conf. on Dependable Systems and Networks (DSN). IEEE, 2002. P. 7–16.
6. Honkola J., Laine H., Brown R., Tyrkko O. Smart-M3 information sharing platform // Proc. IEEE Symp. Computers and Communications (ISCC), 22–25 June 2010, Riccione, Italy. Washington: IEEE Computer Society, 2010. P. 1041–1046.
7. Korzun D., Balandin S., Luukkala V., Liuha P., Gurtov A. Overview of Smart-M3 principles for application development // Proc. Congress on Information Systems and Technologies (IS&IT'11), Conf. Artificial Intelligence and Systems (AIS'11). Moscow, Physmatlit Publ., 2011. Vol. 4. P. 64–71.
8. Korzun D., Galov I., Balandin S. Development of smart room services on top of Smart-M3 // Proc. 14th Conf. Open Innovations Framework Program FRUCT / S. Balandin and U. Trifonova, Eds. St. Petersburg, SUAI Publ., 2013. P. 37–444.
9. Pongthawornkamol T., Nahrstedt K., Wang G. Reliability and Timeliness Analysis of Fault-tolerant Distributed Publish/Subscribe Systems // 10th International Conference on Autonomic Computing (ICAC '13). 2013. P. 247–257.
10. Vdovenko A., Korzun D. Active Control by a Mobile Client of Subscription Notifications in Smart Space // Proc. 16th Conf. Open Innovations Framework Program FRUCT. Oulu, Finland, 27–31 Oct. 2014. P. 123–128.
11. Vdovenko A., Korzun D. Delivery of SmartRoom Services Using Mobile Clients // Proc. 14th Conf. Open Innovations Framework Program FRUCT / S. Balandin and U. Trifonova, Eds. St. Petersburg, SUAI Publ., 2013. P. 215–216.

Поступила в редакцию 05.11.2014

СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ МАРЧЕНКОВ

магистрант, младший научный сотрудник кафедры информатики и математического обеспечения математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
marchenk@cs.karelia.ru

ДМИТРИЙ ЖОРЖЕВИЧ КОРЗУН

кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры информатики и математического обеспечения математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
dkorzun@cs.karelia.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИСУТСТВИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ ЗАЛЕ НА ОСНОВЕ ОТСЛЕЖИВАНИЯ АКТИВНОСТИ В БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ*

Система интеллектуального зала представляет сервисы для поддержки совместной деятельности участников мероприятия в пределах помещения. Интеллектуальность сервисов поддерживается использованием разнообразных источников информации. Одним из источников является сетевая активность участников в беспроводной локальной сети во время проведения мероприятия. В статье рассматривается задача использования этого источника для сервисов интеллектуального зала. Применяется технология Innorange, основанная на методе пассивной радиолокации. Определяются возможные сценарии использования получаемой информации и предлагается вариант интеграции в систему интеллектуального зала. Выполняется экспериментальное исследование производительности полученного программного прототипа.

Ключевые слова: интеллектуальные пространства, интеллектуальный зал, определение присутствия, сетевая активность, платформа Smart-M3

ВВЕДЕНИЕ

Интеллектуальное пространство (ИП) формирует сервисно-ориентированную систему, обеспечивающую [1], [2], [5], [6] построение сервисов агентами на основе их взаимодействия через разделяемое использование информации, извлечения из нее знаний и доставки сервисов пользователям через интерфейсные устройства вычислительной среды. Система интеллектуального зала (ИЗ) реализует ИП [7], [10], предоставляющее сервисы для поддержки проведения таких мероприятий коллаборативной деятельности, как конференции. ИП локализовано в помещении, оборудованном вычислительными устройствами для построения и доставки сервисов участникам мероприятия. Персональные мобильные устройства обеспечивают доступ к сервисам ИЗ [10]. Беспроводная сеть ИЗ обеспечивает и доступ к внешним ресурсам сети Интернет. Реализация ИЗ выполнена на платформе Smart-M3 [5].

Интеллектуальность сервисов ИЗ может быть усилена за счет использования информации о присутствии участников [8]. Она может быть получена на основе отслеживания сетевой активности мобильных устройств на уровне передачи пакетов данных [9], [11]. В данной статье рассматривается задача отслеживания с применением технологии Innorange, реализующей метод

пассивной радиолокации с измерением мощности принимаемого сигнала для передаваемых пакетов. Полученное решение позволяет отслеживать активность зарегистрированных мобильных устройств, характеризуя присутствие участников. Разработан вариант интеграции технологии Innorange в ИЗ, обеспечивая отслеживание, накопление и обработку полученной информации для построения сервисов.

ЗАДАЧА ОТСЛЕЖИВАНИЯ ПРИСУТСТВИЯ УЧАСТНИКОВ

Метод пассивной радиолокации основан на измерениях мощности принимаемого сигнала мобильного устройства в беспроводной локальной сети. Мощность сигнала может быть измерена сетевым сенсором. Значение RSSI (от англ. «received signal strength indication») позволяет оценить расстояние от сенсора до мобильного устройства. Такой метод реализуется, в частности, технологией Innorange. Идентификация устройства выполняется по MAC-адресу. Встроенное в сенсор присутствия программное обеспечение OpenWRT отслеживает пакеты, передаваемые мобильными устройствами в беспроводной сети. Для каждого пакета определяются три параметра: временная метка, MAC-адрес, значение RSSI.

Сенсор присутствия устанавливается в центре помещения для обеспечения наибольшего покрытия пространственной области. После установки необходима калибровка для заданного помещения – определение порогового значения RSSI. Если значение RSSI превышает этот порог, то устройство будет рассматриваться как находящееся внутри помещения. Измеряемая информация о нахождении мобильного устройства в помещении характеризует и присутствие человека как пользователя. Участник ИЗ использует мобильное устройство для доступа к сервисам, и можно задать соответствие между MAC-адресом устройства и участником.

Рассмотрим далее три группы сценариев для ИЗ, основанных на использовании информации о присутствии.

S_1 . Участники приходят на мероприятие. Перед началом основного мероприятия они собираются в помещении ИЗ. Их обнаружение активирует персонализированные приветственные сервисы и обеспечивает начало основной деятельности.

S_2 . Участники приходят в помещение и выходят из него во время мероприятия. Текущий статус присутствия участника позволяет управлять повесткой мероприятия.

S_3 . Анализ активности. В ходе мероприятия накапливается персонализированная информация, а по итогам формируется отчет по общему уровню активности и вкладу участников.

ПОДСИСТЕМА ОТСЛЕЖИВАНИЯ ПРИСУТСТВИЯ УЧАСТНИКОВ

Система ИЗ реализована как ИП на основе платформы Smart-M3 [5], [6]. Взаимодействие программных агентов происходит через обмен информационным содержимым ИП, доступ к которому выполняется через семантического информационного брокера (далее – брокер SIB, от англ. «semantic information broker»). Для представления информационного содержимого используется модель RDF (от англ. «resource description framework»), что позволяет хранить в ИП как непосредственно данные, так и их семантику [4].

Общая онтология информационного содержимого ИЗ представлена в [7], [10]. В нее входит контекст каждого участника и сервиса. Контекст участника определяется как его текущее состояние и используемые им сервисы. Контекст сервиса определяет, кем и как используется сервис. На рис. 1 представлена онтология присутствия участника и связей с другим содержимым (все отношения имеют тип «имеет/содержит»). Онтология профиля описывает персональную информацию и контекст используемых сервисов. Когда мобильное устройство обнаруживается сенсором присутствия, то сервис определения присутствия находит соответствующий профиль и обновляет

информацию (например, время появления и время последней активности). Сервис отслеживает и изменяет информацию об уровне присутствия участника, а также регулярно обновляет параметры сетевой активности.

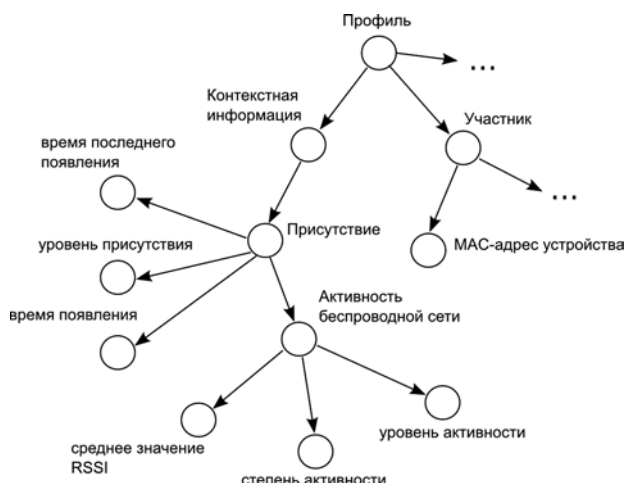


Рис. 1. Онтология для интеграции сервиса определения присутствия

Архитектурное решение для интеграции сенсора и сервиса определения присутствия в систему ИЗ представлено на рис. 2. Сенсор взаимодействует с агентом сенсора. Последний работает на выделенном компьютере как HTTP-сервер для получения от сенсора его измерений и публикации их в ИП. Агент сенсора также взаимодействует с сервисом управления содержимым.



Рис. 2. Архитектура для интеграции сервиса определения присутствия в систему ИЗ

Агент определения присутствия подписан на обновление информации о присутствии мобильных устройств. Он публикует в ИП уровень присутствия пользователя на основе модели состояний присутствия участника (см. следующий раздел). Этот уровень далее используется другими сервисами (например, сервис повестки мероприятия) в сценариях S_1 и S_2 .

Сервис анализа активности также строится выделенным агентом. Он также отвечает за визуализацию активности. В конце основной деятельности или по запросу сервиса накопленных данных от сервиса управления содержимым вычисляются показатели сетевой активности. Сервис анализа активности используется при реализации сценариев из группы S_3 .

МОДЕЛЬ СОСТОЯНИЙ ПРИСУТСТВИЯ УЧАСТНИКА

В ИЗ каждый участник может иметь различные состояния присутствия. На рис. 3 представлена модель состояний присутствия участника ИЗ. Каждое состояние определяется совокупностью следующих логических параметров:

$$S = (R, D, L),$$

где R определяет, зарегистрирован ли участник в системе, D – обнаружено ли в помещении мобильное устройство сенсором, L – зашел ли участник в систему как пользователь с помощью клиента ИЗ.

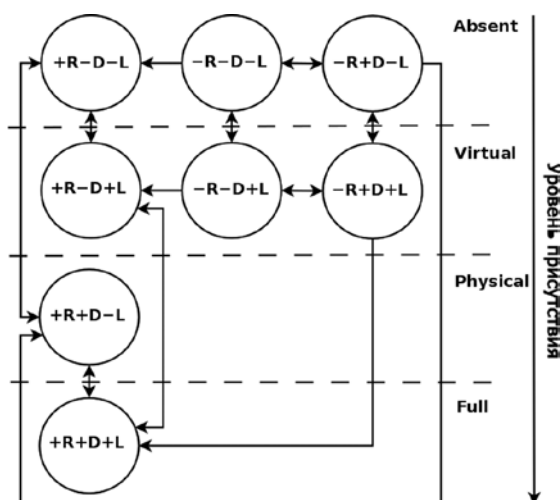


Рис. 3. Модель состояний присутствия участника

В зависимости от состояния присутствия участник может быть классифицирован по одному из следующих уровней присутствия: *Absent* (отсутствие), *Virtual* (виртуальное присутствие), *Physical* (физическое присутствие), *Full* (полное присутствие). Участник не может отменить регистрацию в системе. Он может покинуть помещение или выйти из системы как пользователь, используя клиент ИЗ. Отслеживаются только зарегистрированные пользователи, предоставившие MAC-адрес своего мобильного устройства. Так, статус участника может быть визуализирован на экране повестки мероприятия в зависимости от текущего уровня присутствия.

Рассмотрим переходы между состояниями, когда изменяется параметр D , а параметры L и R остаются неизменными. На таких переходах

основаны группы сценариев S_1 и S_2 . Группа S_3 не требует мгновенного обнаружения изменения состояния присутствия.

Группа сценариев S_1 использует однонаправленные переходы между состояниями, так как первоначальная идентификация участника в помещении происходит один раз перед началом мероприятия:

$$+R-D-L \rightarrow +R+D-L. \quad (1)$$

Далее активируется персональный приветственный сервис, прежде чем участник зайдет в систему с помощью клиента.

Группа сценариев S_2 использует двунаправленные переходы, выполняемые после первоначальной идентификации участника:

$$+R-D-L \leftrightarrow +R+D-L, \quad (2)$$

$$+R-D+L \leftrightarrow +R+D+L. \quad (3)$$

ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Оценим производительность для групп сценариев S_1-S_3 . В случае S_1 и S_2 оценивается время перехода между состояниями (1), (2) и (3). Для S_3 измеряется: а) объем памяти, занимаемый регистрационными файлами, и б) время их обработки с вычислением показателей сетевой активности.

Для реализации сценария из группы S_1 необходимо выполнить следующие шаги.

Шаг 1. Сенсор определяет ближайшие устройства и отправляет информацию о присутствии агенту сенсора.

Шаг 2. При первом обнаружении MAC-адреса устройства агент сенсора публикует информацию о присутствии в ИП.

Шаг 3. Агент определения присутствия следит за добавлением индивидов класса «Присутствие» и изменением свойств данных. Такое слежение реализуется операцией подписки [3].

Шаг 4. Сервисы, которым необходима информация о присутствии участников, подписываются на соответствующие обновления.

На рис. 4 представлено распределение времени определения присутствия для одного участника (шаги 1–4). Размер выборки – 100 элементов. Среднее время составило 677 мс. Характерны частые выбросы, которые зависят от производительности беспроводной сети.

Для группы сценариев S_2 важной является оценка порогового временного значения последней активности участника, которое зависит от вида мобильного устройства. Пороговое значение определяет время, прошедшее с момента проявления последней сетевой активности до времени, когда устройство считается покинувшим помещение.

Рассмотрим следующие мобильные устройства (смартфоны): а) iPhone 5 (iOS 7.1); б) Samsung Galaxy S3 (Android 4.3); в) Nokia Lumia 920 (Windows Phone 8.0). Каждое периодически отправ-

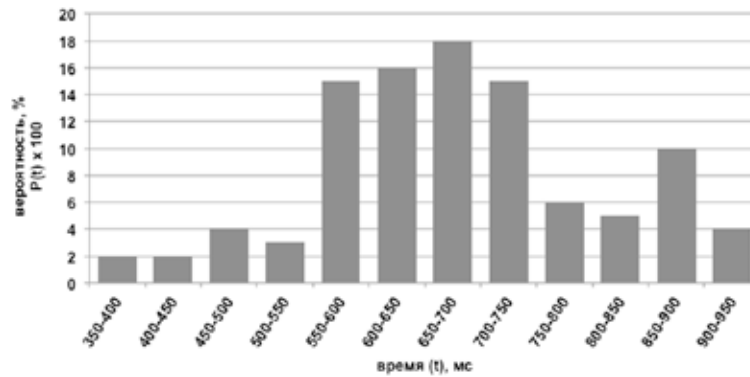


Рис. 4. Распределение времени определения присутствия участника

ляет пакеты запросов на зондирование по всем каналам передачи для определения ближайших точек доступа. Сенсор присутствия отслеживает такие пакеты, определяя присутствие мобильных устройств при неактивной передаче данных. Частота зондирования зависит от внутренних алгоритмов, реализуемых производителем на устройстве.

Частота отправки определялась с помощью мониторинга каналов беспроводной сети. Измерялся период времени, по истечении которого сенсор получает пакеты запросов на зондирование беспроводной локальной сети для конкретных смартфонов (рис. 5). Для устройства iPhone 5 данный период определялся диапазоном [40,50] секунд (рис. 5 (а)), для устройства Galaxy S3 – диапазоном [27,34] (рис. 5 (б)), для устройства Lumia 920 – диапазоном [31,37] (рис. 5 (в)). В экспериментах устройства были расположены примерно в 5 метрах от сенсора присутствия.

Агент определения присутствия постоянно отслеживает свойство «*время последнего появления*» и реагирует, когда значение данного свойства превышает пороговое временное значение последней активности. Таким образом, участник считается покинувшим помещение. Когда устройство снова обнаруживается в помещении, то участник рассматривается как вновь прибывший и выполняются шаги, описанные для сценариев группы S_1 .

Для накопления статистики и ее анализа для группы сценариев S_3 используется сервис управления содержимым, который реализуется как веб-сервер. Агент сенсора создает и отправляет HTTP-запрос сервису управления содержимым с измерениями сенсора присутствия. Сервис управления содержимым формирует регистрационный файл для каждого зарегистрированного участника. Файл состоит из текстовых строк, каждая содержит временную метку и значение RSSI обнаруженного пакета, отправленного мобильным устройством. Уровень сетевой активности участника k определим как $L_k = n_k$, где n_k – количество строк в файле участника k .

Известное число измерений и время их получения позволяет вычислить степень активности для участника k :

$$f_k = \frac{j-i}{t(s_{kj}) - t(s_{ki})}, \quad 1 \leq i < j \leq n_k, \quad (4)$$

где s_{ki} – измерение i в файле участника k , $t(s_{kj})$ и $t(s_{ki})$ – значения временных меток в измерениях j и i в регистрационном файле участника k соответственно.

Анализ степени активности позволяет определить, когда участник покидал помещение во

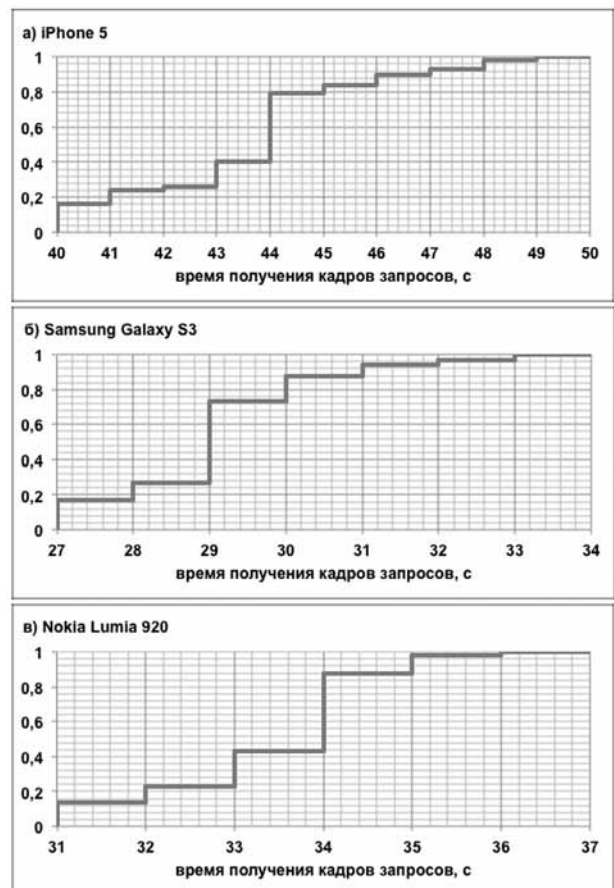


Рис. 5. Распределение времени получения пакетов запросов

время мероприятия. Пусть пороговое значение последней активности равно 60 с. Наши эксперименты показывают, что если степень активности становится меньше 0,017, то участник покинул помещение. Существует также зависимость степени активности от типа участника, например «очень активный пользователь» и «слабо активный пользователь».

В измерительном эксперименте проведено мероприятие с 10 докладчиками, каждое выступление с запланированной продолжительностью 15 мин. Участники использовали мобильные устройства для управления презентацией и для доступа к презентациям других участников. Сервис анализа активности запущен на выделенной ЭВМ (CPU 2.30GHz, RAM 4Gb, Windows 7) и вычисляет уровень сетевой активности, степень активности и среднее значение RSSI для каждого участника. Среднее время обработки файла составило 0,72 с. Средний размер файла – около 346 КБ. Потребовалось около 3500 КБ дискового пространства для хранения регистрационных файлов участников на сервисе управления содержанием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрено использование метода пассивной радиолокации для определения присутствия участников в помещении. Сам метод реализован в известной технологии Innorange. Нами предлагается его интеграция в систему интеллектуального зала для расширения возможных сервисов этой системы за счет дополнительного источника информации – информации о присутствии участников и их сетевой активности (на уровне пакетов сетевого трафика). Разработаны сценарии использования в интеллектуальном зале, определяющие классы возможных сервисов с таким источником информации. Предложена онтологическая модель для сбора и представления в интеллектуальном пространстве информации о присутствии участников и модель состояния присутствия пользователя. Разработана архитектура интеграции в систему интеллектуального зала с выделением дополнительных агентов. Проведена оценка производительности интегрированной в интеллектуальный зал подсистемы определения присутствия участников.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (НИР № 2.2336.2014/К) и по заданию № 2014/154 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания (НИР № 1481).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корзун Д. Ж. Формализм сервисов и архитектурные абстракции для программных приложений интеллектуальных пространств // Программная инженерия. 2015. № 2. С. 3–12.
2. Ломов А. А. Взаимодействие программного агента на уровне сессии с интеллектуальными пространствами // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер.: «Естественные и технические науки». 2013. № 8 (137). С. 118–121.
3. Ломов А. А., Корзун Д. Ж. Операция подписки для приложений в интеллектуальных пространствах платформы Smart-M3 // Труды СПИИРАН. 2012. № 4. С. 439–458.
4. Allemang D., Hendler J. Semantic Web for the Working Ontologist: Effective Modeling in RDFS and OWL. Elsevier, 2008. 330 p.
5. Honkola J., Laine H., Brown R., Tyrkko O. Smart-M3 information sharing platform // Proc. IEEE Symp. Computers and Communications (ISCC), 22–25 June 2010, Riccione, Italy. Washington: IEEE Computer Society, 2010. P. 1041–1046.
6. Korzun D., Balandin S., Luukkala V., Liuha P., Gurtov A. Overview of Smart-M3 principles for application development // Proc. Congress on Information Systems and Technologies (IS&IT'11), Conf. Artificial Intelligence and Systems (AIS'11). Moscow: Physmatlit, 2011. Vol. 4. P. 64–71.
7. Korzun D., Galov I., Balandin S. Development of smart room services on top of Smart-M3 // Proc. 14th Conf. Open Innovations Framework Program FRUCT. St. Petersburg, SUAI, 2013. P. 3744–.
8. Marchenkov S., Korzun D. User Presence Detection Based on Tracking Network Activity in SmartRoom // Proc. 16th Conference of Open Innovations Association FRUCT, 27–31 Oct. 2014, Oulu, Finland. St. Petersburg, ITMO University, 2014. P. 45–50.
9. Narzullaev A., Park Y. Novel calibration algorithm for received signal strength based indoor real-time locating systems // International Journal of Electronics and Communications. 2013. Vol. 67. № 7. P. 637–644.
10. Vdovenko A., Marchenkov S., Korzun D. Mobile multi-service smart room client: Initial study for multi-platform development // Proc. 13th Conf. of Open Innovations Association FRUCT and 2nd Seminar on e-Tourism for Karelia and Oulu Region. 22–26 Apr. 2013, Petrozavodsk, Russia. St. Petersburg, SUAI, 2013. P. 143–152.
11. Zhu X., Feng Y. RSSI-based Algorithm for Indoor Localization // Communications and Network. 2013. Vol. 5. № 2B. P. 37–42.

Marchenkov S. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)
Korzun D. Zh., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

NETWORK ACTIVITY TRACKING DETECTION OF USER PRESENCE IN SMART ROOM

The Smart Room System provides a set of digital services supportive in collaborative activities of event attendees physically present in a room. Intelligence of different server systems is supported by the use of diverse information sources. One of such important information source is the network activity of event attendees. In this paper, we consider the problem of using such a source for Smart Room services. We employ the Innorange technology, which implements a method of passive radio detection. We define possible user case scenarios and propose integration solution based on the Smart-M3 platform. The implemented software prototype is experimentally studied to reveal effectiveness of its performance.

Key words: smart spaces, Smart Room, presence detection, network activity, Smart-M

REFERENCES

1. Korzun D. Zh. Formalism of services and architectural abstraction for software applications of smart spaces [Formalizm servisov i arkhitekturnye abstraktsii dlya programnykh prilozheniy intellektual'nykh prostranstv]. *Programmnyaya inzheneriya*. 2015. № 2. P. 3–12.
2. Lomov A. A. Session-level interaction of agent with the smart space. [Vzaimodeystvie programmnogo agenta na urovne sessii s intellektual'nymi prostranstvami]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2013. № 8 (137). P. 118–121.
3. Lomov A. A., Korzun D. Zh. Subscription operation for applications in smart spaces of Smart-M3 platform [Operatsiya podpiski dlya prilozheniy v intellektual'nykh prostranstvakh platformy Smart-M3]. *SPIRAS Proc.* 2012. № 4. P. 439–458.
4. Allemang D., Hendler J. Semantic Web for the Working Ontologist: Effective Modeling in RDFS and OWL. Elsevier, 2008. 330 p.
5. Honkola J., Laine H., Brown R., Tyrkko O. Smart-M3 information sharing platform // Proc. IEEE Symp. Computers and Communications (ISCC), 22–25 June 2010, Riccione, Italy. Washington: IEEE Computer Society, 2010. P. 1041–1046.
6. Korzun D., Balandin S., Luukkala V., Liuha P., Gurtov A. Overview of Smart-M3 principles for application development // Proc. Congress on Information Systems and Technologies (IS&IT'11), Conf. Artificial Intelligence and Systems (AIS'11). Moscow: Physmatlit, 2011. Vol. 4. P. 64–71.
7. Korzun D., Galov I., Balandin S. Development of smart room services on top of Smart-M3 // Proc. 14th Conf. Open Innovations Framework Program FRUCT. St. Petersburg, SUAI, 2013. P. 3744–.
8. Marchenkov S., Korzun D. User Presence Detection Based on Tracking Network Activity in SmartRoom // Proc. 16th Conference of Open Innovations Association FRUCT, 27–31 Oct. 2014, Oulu, Finland. St. Petersburg, ITMO University, 2014. P. 45–50.
9. Narzullaev A., Park Y. Novel calibration algorithm for received signal strength based indoor real-time locating systems // International Journal of Electronics and Communications. 2013. Vol. 67. № 7. P. 637–644.
10. Vdovenko A., Marchenkov S., Korzun D. Mobile multi- service smart room client: Initial study for multi-platform development // Proc. 13th Conf. of Open Innovations Association FRUCT and 2nd Seminar on e-Tourism for Karelia and Oulu Region. 22–26 Apr. 2013, Petrozavodsk, Russia. St. Petersburg, SUAI, 2013. P. 143–152.
11. Zhu X., Feng Y. RSSI-based Algorithm for Indoor Localization // Communications and Network. 2013. Vol. 5. № 2B. P. 37–42.

Поступила в редакцию 05.11.2014



20 января 2015 года исполнилось 75 лет доктору сельскохозяйственных наук, профессору, заведующему кафедрой зоотехнии, рыбоводства и товароведения агротехнического факультета Петрозаводского государственного университета, члену редакционной коллегии нашего журнала *Анатолию Ефремовичу Болгову*.

АНАТОЛИЙ ЕФРЕМОВИЧ БОЛГОВ

К 75-летию со дня рождения

А. Е. Болгов родился в д. Сомовка Ясеновского района Курской области. В 1961 году окончил Петрозаводский университет. В 1961–1964 годах работал в Карелии главным зоотехником совхоза «Прогресс». С 1964 года – в Петрозаводском университете: аспирант, преподаватель, доцент, старший научный сотрудник. В 1985 году защитил докторскую диссертацию во Всесоюзном НИИ генетики и разведения животных (Ленинград). С 1986 года – заведующий кафедрой зоотехнии, рыбоводства и товароведения. Под его руководством кафедра подготовила и выпустила около 1300 дипломированных ученых, зоотехников, зооинженеров, звероводов, рыбоводов, товароведов.

С середины 1980-х годов Анатолий Ефремович Болгов возглавляет одну из наиболее крупных и плодотворно работающих научных школ по разведению и селекции животных, разработке методов повышения продуктивности, плодовитости, резистентности к заболеваниям. Совместно с сотрудниками и выпускниками кафедры им выведен новый тип животных «Карельский» айрширской породы, удостоенный патента и авторского свидетельства. Разработаны по заказам министерств, предприятий и представлены к реализации 13 региональных и международных научно-инновационных проектов в области животноводства.

Анатолий Ефремович – автор более 300 научных и учебно-методических работ, в числе которых монографии, брошюры, статьи, пособия. Под его руководством защищено 17 кандидатских диссертаций.

Около 20 лет он член коллегии Министерства сельского хозяйства РК, с 2004 года – член Центрального совета Вавиловского общества генетиков и селекционеров России (ВОГиС), председатель Карельского отделения ВОГиС. Заслуженный деятель науки и работник высшей школы РФ, награжден орденом Почета.

От всей души поздравляем Анатолия Ефремовича с юбилеем, желаем здоровья и успехов в научно-педагогической деятельности!

ВСЕРОССИЙСКИЙ ФОРУМ
«ПРОБЛЕМЫ ОЗЕЛЕНЕНИЯ СЕВЕРНЫХ ГОРОДОВ»
21–24 апреля 2015 года

**Организатор форума – Петрозаводский государственный университет при поддержке
 Администрации Петрозаводского городского округа**



В рамках форума проводится конкурс студенческих работ

Цели форума:

- повышение квалификации специалистов в области ландшафтной архитектуры;
- развитие сотрудничества между специалистами всероссийского уровня в области озеленения и проектирования;
- обмен информацией о современных подходах в озеленении городов, исследованиях и направлениях развития в области проектирования объектов ландшафтной архитектуры различного назначения.

Тематика форума – обсуждение современных тенденций в области ландшафтной архитектуры.

Целевая аудитория – преподаватели, специалисты, аспиранты, студенты и заинтересованные лица, специализирующиеся в области ландшафтного дизайна и озеленения городов.

Контактная информация:

185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33.
 Тел. (8142) 56-20-84
 E-mail: mail@petrogreen.ru

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Серия «Естественные и технические науки» включает в себя следующие рубрики, соответствующие трем отраслям наук: «Биологические науки» (03.00.00), «Медицинские науки» (14.00.00), «Физико-математические науки» (01.00.00); трем группам специальностей из отрасли «Сельскохозяйственные науки»: «Ветеринария и зоотехния» (06.02.00), «Лесное хозяйство» (06.03.00) и «Рыбное хозяйство» (06.04.00); двум группам специальностей из отрасли «Технические науки»: «Технология, машины и оборудование лесозаготовок, лесного хозяйства, деревообработки и химической переработки биомассы дерева» (05.21.00) и «Строительство и архитектура» (05.23.00).

Представляемые рукописи должны соответствовать тематике журнала и содержать материалы, не опубликованные ранее в других изданиях.

Статья предоставляется в распечатанном виде на бумаге формата А4 (в двух экземплярах) и в электронном виде. Печатная версия статьи подписывается всеми авторами.

Объем оригинальной и обзорной статьи не должен превышать один печатный лист. Статья набирается в текстовом редакторе Microsoft Word и сохраняется с расширением .doc. **Поля:** верхнее и нижнее – 2 см, правое и левое – 3 см. Абзацный отступ – 0,5 см. **Шрифт:** Times New Roman, размер – 14 пунктов, список литературы – 12 пт, межстрочный интервал – полуторный. Нумерация страниц – справа внизу страницы.

Статья должна состоять из следующих элементов:

УДК (индекс Универсальной десятичной классификации) в левом верхнем углу.

Сведения об авторе: имя, отчество, фамилия автора(ов) полностью прописными буквами; ученая степень и звание; место работы: должность, кафедра, факультет, вуз, город, страна; электронный адрес, а также контактный телефон и почтовый адрес.

Название статьи жирным шрифтом прописными буквами.

Аннотация (объем от 120 до 250 слов) является кратким резюме большей по объему работы. Аннотация может публиковаться самостоятельно и, следовательно, должна быть понятной без обращения к самой публикации. Она является основным источником информации в отечественных и зарубежных информационных системах и базах данных, индексирующих журнал. Структура аннотации должна повторять структуру статьи и включать введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение (выводы). Результаты работы описывают предельно точно и информативно. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Выводы могут сопровождаться рекоменда-

циями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье. Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации. Следует избегать лишних фраз (например, «автор статьи рассматривает...»), не включать несущественные детали, применять значимые слова из текста статьи. Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения в аннотации не приводятся. В тексте аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций. Аннотация предназначена для компетентной аудитории, включая международную, поэтому можно использовать техническую (специальную) терминологию дисциплины. Текст аннотации должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т. д. («consequently», «moreover», «for example», «the benefits of this study», «as a result» etc.), либо разрозненные излагаемые положения должны логично вытекать один из другого. Необходимо использовать активный, а не пассивный залог («The study tested», но не «It was tested in this study»).

Ключевые слова – от 3 до 8 слов (или словосочетаний, несущих в тексте основную смысловую нагрузку).

Список литературы должен быть представлен на отдельных листах в 2 вариантах:

1) на русском языке в соответствии с ГОСТ 7.1–84 «Библиографическое описание документа. Общие требования и правила составления». Цитируемая в статье литература (автор, название, место, издательство, год издания и страницы (от и до или общее количество)) приводится в алфавитном порядке, сначала отечественные, затем зарубежные авторы;

2) список литературы должен быть записан на языке оригинала латинскими буквами (References). Если русскоязычная статья была переведена на английский язык и опубликована

в английской версии, то необходимо указывать ссылку из переводного источника. Как правило, библиографические описания российских публикаций составляются в следующей последовательности: авторы (транслитерация), перевод названия статьи на английский язык, название статьи в транслитерированном варианте в квадратных скобках, название источника (транслитерация, курсив), выходные данные с обозначениями на английском языке.

В тексте статьи ссылка дается в квадратных скобках, через точку с запятой – цитируемая страница, если это необходимо.

Примечания (в том числе архивные и другие источники) даются в виде концевых сносок.

На **английский язык** необходимо перевести ФИО автора(ов), место работы, город, страну; название статьи (оформляется прописными буквами и не содержит артиклей), аннотацию и ключевые слова и разместить данные после списка литературы перед References.

Таблицы – каждая печатается на отдельной странице, нумеруется соответственно первому упоминанию ее в тексте и снабжается заголовком. Таблицы предоставляются в текстовом редакторе Microsoft Word (форматы.doc или docx) или табличном редакторе Microsoft Excel (форматы.xls или.xlsx). **Иллюстрации** (рисунки, фотографии, схемы, диаграммы) нумеруются, снабжаются подписями и предоставляются в виде отдельных растровых файлов (в формате.tif, bmp). В бумажной версии на обороте каждой иллюстрации ставится номер и пометка «верх», «низ». В тексте статьи указывается место таблицы или рисунка. Таблиц и иллюстраций не должно быть более 5.

Правила предоставления иллюстраций. Растровые форматы: рисунки и фотографии должны иметь разрешение не менее 300 dpi (формат.tif), без LZW уплотнения, в градациях серо-

го. Векторные форматы: рисунки должны иметь толщину линий не менее 0,2 мм, текст в них может быть набран шрифтом Times New Roman или Arial.

Правила предоставления диаграмм и графиков. Графики и диаграммы должны быть созданы в табличном процессоре Excel и присылаться вместе с исходными численными данными в одном файле с расширением.xls. При создании графиков и диаграмм следует использовать черный, белый цвета и градации серого, различного типа штриховку; избегать применения трехмерной графики, градиентных заливок и т. д. Все надписи и числа на графиках желательно делать, используя жирный шрифт Arial Cyr, размер 14. На самом графике не должно быть названия, оно должно быть отражено в подрисуночной подписи. В виде растрового изображения могут быть представлены графики, полученные с помощью специальных программ статистической обработки.

Требования к математическим формулам. Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation (присутствует в составе Word), MathType или символьным шрифтом (надстрочные и подстрочные символы, меню «Вставка», «Символ»). Настоятельно рекомендуется не использовать русские буквы в формулах, набираемых в специальных редакторах. Формулы в виде картинок любого формата не принимаются.

Статьи, поступившие в редакцию, подлежат обязательному рецензированию.

Редакция оставляет за собой право внесения в текст редакторских изменений, не искажающих смысла статьи.

Материалы, не соответствующие предъявленным требованиям, редакция не рассматривает.

Решение о публикации принимается редакционными коллегами журнала.

Более подробная информация для авторов дана на сайте журнала: uchzap.petrsv.ru

CONTENTS

BIOLOGICAL SCIENCES

- Andreev V. P., Zachinyaeva A. V.*
ENDOGENOUS AND EXOGENOUS MODIFI-
CATORS OF NA,K-ATPASE ACTIVITY. 7
- Markovskaya E. F., D'yachkova T. Yu., Morozova K. V.*
ANATOMICAL AND MORPHOLOGICAL
FEATURES OF *NYMPHOIDES PELTATA*
(S. G. GMEL.) O. KUNTZE IN NORTHWEST-
ERN BORDER PART OF DISTRIBUTION
AREA 17
- Tyrkin I. A., Ivanov S. I., Shchurov I. L., Shirokov V. A.*
REPRODUCTION OF ATLANTIC SALMON
(*SALMO SALAR* L.) (SALMONIFORMES,
SALMONIDAE) (FRESHWATER FORMS) IN
REMEDIED SPAWNING AND REARING
SECTION OF SUNA RIVER. 23

MEDICAL SCIENCES

- Maslyakov V. V., Gromov M. S., Bryzgunov A. V.,
Leont'ev V. Yu.*
OPTIMIZATION OF RIGHT ILIAC AREA
DISEASE DIAGNOSIS BY USE OF TRANS-
RESONANT TOPOGRAPHY 29
- Sukhin Yu. V., Logay V. A.*
COMPUTER-BASED NAVIGATION SYS-
TEM DEVELOPMENT FOR TREAT-
MENT OF RECURRENT SHOULDER
DISLOCATION 35
- Topchieva L. V., Malysheva I. E., Kurbatova I. V.,
Korneva V. A., Barysheva O. Yu.*
ASSESSMENT OF INTERLEUKIN 6 LEVEL
IN HEALTHY AND HYPERTENSIVE SUB-
JECTS WITH DIFFERENT GENOTYPES BY
-572G>C POLYMORPHIC MARKER OF *IL6*
GENE 39
- Kochetova E. V.*
PULMONARY DIFFUSING CAPACITY AND
RISKS OF FRACTURES IN PATIENTS WITH
COPD 45

ENGINEERING SCIENCE

- Gol'dshteyn Yu. B.*
GEOMETRICAL CHARACTERISTICS OF
THIN-WALLED RODS OF OPEN PROFILE. 48
- Miryaev B. V., Miryaeva A. B.*
OPTIMIZED CONSTRUCTION DESIGN OF
WOODEN DOME GRID 53
- Pekkoiev A. N., Lukashevich V. M., Seliverstrov A. A.,
Sukhanov Yu. V.*
EXPERIMENTS ON DIFFERENT INTEN-
SITY THINNING OF PINE STANDS 56
- Bode A. B.*
GABLE BELTS IN ARCHITECTURE OF
WOODEN CHURCHES OF XVII–XVIII
CENTURIES. 60

- Grafova E. O., Gol'denberg P. G., Evtifeev Yu. P.*
IMPROVEMENT OF INDUSTRIAL PHENOL
POLLUTED SURFACE RUNOFF TREAT-
MENT SYSTEM 66

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

- Krupyanskiy D. S., Fofanov A. D.*
IMPACT OF ARITHMETIC PRECISION ON
RESEARCH RESULTS OF MOLECULAR-
DYNAMIC SIMULATION 72
- Pikulev V. B., Prokopovich P. F., Gurtov V. A.*
INFLUENCE OF OZONE ON CHARGE
TRANSFER IN MICROCRYSTALLINE CEL-
LULOSE 77
- Stepanova K. V., Yakovleva N. M., Kokatev A. N.,
Pettersson Kh.*
NANOPOROUS ANODIC OXIDE FILMS ON
TI-AL POWDER ALLOY. 81
- Voronov R. V., Galov A. S., Moshchevikin A. P.,
Voronova A. M.*
ON INDOOR OBJECT'S TRAJECTORY
TRACE ADJUSTMENT TO BUILDING'S
FLOOR PLAN 87
- Senichev K. N.*
SEARCH OF OPTIMAL MASTER SCHED-
ULE FOR SINGLE MACHINE
OPTIMIZATION 92

Annual International Workshop on Advances in Methods of Information and Communication Technology (AMICT – 2014)

- Andreev A. A., Kolosov A. S., Bogoyavlenskiy Yu. A.*
AUTOMATION OF ICT-INFRASTRUC-
TURE LINK LAYER GRAPH DISCOVERY
FOR LOCAL INTERNET SERVICE
PROVIDERS. 97
- Bogoyavlenskaya O. Yu.*
ESTIMATION OF PERFORMANCE VARI-
ANCE FOR NETWORKING CONGESTION
AVOIDANCE ALGORITHM 103
- Vdovenko A. S., Korzun D. Zh.*
CONTROL OF NOTIFICATION CHECK
INTERVAL FOR SUBSCRIPTION FROM
MOBILE CLIENTS IN SMART
SPACE. 108
- Marchenkov S. A., Korzun D. Zh.*
NETWORK ACTIVITY TRACKING DE-
TECTION OF USER PRESENCE IN SMART
ROOM 114

Jubilation

- To the 75th birthday anniversary of A. E. Bolgov 120

Scientific information 121

Info for the authors 122