

---

Федеральное агентство по образованию

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

№ 5 (99). Март, 2009

---

**Серия: Естественные и технические науки**

---

Главный редактор

*А. В. Воронин*, доктор технических наук, профессор

Зам. главного редактора

*Н. В. Доршакова*, доктор медицинских наук, профессор

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

*Н. В. Ровенко*, кандидат филологических наук,  
ответственный секретарь журнала

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

Статьи журнала рецензируются.

Адрес редакции журнала

185910, Республика Карелия,

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

Тел. (8142) 76-97-11

E-mail: [uchzap@mail.ru](mailto:uchzap@mail.ru)

**[uchzap.petrSU.ru](http://uchzap.petrSU.ru)**

## Редакционный совет

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

Редакционная коллегия серии  
«Естественные и технические науки»

- А. Е. БОЛГОВ**  
доктор сельскохозяйственных наук,  
профессор (Петрозаводск)
- Н. Н. НЕМОВА**  
доктор биологических наук,  
профессор, член-корреспондент  
РАН (Петрозаводск)
- В. И. ПАТЯКИН**  
доктор технических наук,  
профессор (Санкт-Петербург)
- Е. И. РАТЬКОВА**  
ответственный секретарь серии (Петрозаводск)
- В. И. СЫСУН**  
доктор физико-математических наук,  
профессор (Петрозаводск)
- В. С. СЮНЁВ**  
доктор технических наук,  
профессор (Петрозаводск)
- Б. М. ШИРОКОВ**  
кандидат физико-математических наук,  
доцент (Петрозаводск)
- В. В. ЩИПЦОВ**  
доктор геолого-минералогических наук,  
профессор (Петрозаводск)

---

Federal Educational Agency

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

№ 5 (99). March, 2009

---

**Natural & Engineering Sciences**

---

Chief Editor

*Anatoly V. Voronin*, Doctor of Technical Sciences, Professor

Chief Deputy Editor

*Natalia V. Dorshakova*, Doctor of Medical Sciences, Professor

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

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

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

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

**[uchzap.petrSU.ru](http://uchzap.petrSU.ru)**

---

Editorial Council

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

Editorial Board of the Series  
«Natural & Engineering Sciences»

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

- Гришина И. Е.*  
Этноархитектура: принципы исследования (к юбилею В. П. Орфинского) .....7
- Аюкаев Р. Р., Графова Е. О., Аюкаев Р. И., Веницианов Е. В.*  
Математическое моделирование в исследовании процессов водоочистки.  
Сообщение 1. Медленное фильтрование .....14
- Крылова О. И.*  
К вопросу о пешеходном движении .....21

### БИОЛОГИЯ

- Антипина Г. С., Шуйская Е. А.*  
Семенная продуктивность инвазионного вида борщевик Сосновского (*Heracleum Sosnowskyi* Manden.) в Южной Карелии .....23
- Дзюбук И. М., Рыжков Л. П.*  
Динамика состояния ихтиофауны Онежского озера в XX веке .....26
- Хохлова Т. Ю., Яковлева М. В., Артемьев А. В.*  
Птицы Кенозерского национального парка (неворобьиные – *Non Passerine*) .....32

### ГЕОЛОГИЯ

- Кондрашова Н. И.*  
Корово-мантыйный магматизм Ялонварской структуры (Балтийский щит) .....48
- Медведев П. В.*  
Ископаемая нефть, органическое вещество и фоссилии в отложениях нижнего протерозоя Онежского синклиория .....54

### МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

- Мейгал А. Ю., Лупандин Ю. В.*  
«Терморегуляционный компонент» двигательных расстройств при паркинсонизме .....61
- Иоффе Ю. Г., Марусенко И. М.*  
Современное состояние и проблемы создания Российского национального регистра неродственных доноров гемопоэтических стволовых клеток .....69

### СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО

- Болгов А. Е., Карманова Е. П., Муравья Л. Н., Макарова В. Е., Штеркель С. Г., Гришина Н. В.*  
Влияние различных факторов на резистентность молочных коров к маститу .....73

### ФИЗИКА

- Луизова Л. А., Хахаев А. Д.*  
Невозмущающие методы локальной спектроскопии плазмы .....82

### ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Бабкин В. А.*  
Профили скоростей и теплообмен при турбулентном течении несжимаемой жидкости в гладкой круглой трубе небольшого диаметра .....91
- Беляев С. В., Карпова Ж. С.*  
Перспективы получения этанола из целлюлозной биомассы .....98
- Симонова И. В., Васильев С. Б.*  
Теоретическое исследование процесса взаимодействия древесного сырья с рабочим органом дисковой рубительной машины .....102

### Научная информация .....107

### Юбилей

- Н. С. Рузановой .....108
- К 80-летию Л. П. Рыжкова .....109
- К 70-летию А. П. Царева .....110

### Информация для авторов .....111

### Contents.....112

Редактор Г. А. Мехралиева. Корректор С. Л. Смирнова. Переводчик Е. И. Соколова. Дизайн, верстка И. Г. Лежнев.

Подписано в печать 25.03.2009. Формат 60х90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
10 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. Изд. № 96

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

УДК 72.03(470.22)

**ИРИНА ЕВГЕНЬЕВНА ГРИШИНА**

заместитель директора НИИ историко-теоретических проблем народного зодчества ПетрГУ

*niinaz@karelia.ru***ЭТНОАРХИТЕКТУРА: ПРИНЦИПЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
(к юбилею В. П. Орфинского)**

В статье изложены задачи и методы этноархитектуроведения – научного направления, объединяющего историко-архитектурные и этнографические подходы к изучению традиционного деревянного зодчества и нацеленного на выявление этнической специфики и закономерностей развития народной архитектуры. Рассматривается основополагающий для этноархитектуроведения труд В. П. Орфинского, посвященный деревянному зодчеству Карелии, и его развитие в работах петрозаводской этноархитектурной научной школы в 1980–2000-х годах.

Ключевые слова: Русский Север, народное деревянное зодчество, методы этноархитектурных исследований, этнические особенности, закономерности архитектурного формообразования, типология

В апреле 2009 года исполняется 80 лет Вячеславу Петровичу Орфинскому – доктору архитектуры, профессору, действительному члену Российской академии архитектуры и строительных наук, знатоку деревянного зодчества Русского Севера, основателю и руководителю петрозаводской этноархитектурной научной школы, директору НИИ историко-теоретических проблем народного зодчества ПетрГУ.

Важнейшим достижением ученого по праву считается создание нового направления отечественной историко-архитектурной науки – этноархитектуроведения, объединившего этнографические и историко-архитектурные подходы к изучению народного деревянного зодчества. Принципы и методы исследования этноархитектуры были изложены в докторской диссертации В. П. Орфинского, представившей целостную объективизированную версию генезиса и эволюции деревянного зодчества Карелии с акцентом на формировании его национальных особенностей [9]. Защита дис-

сертационной работы состоялась в 1975 году, но значение ее как научного труда, ключевого для становления этноархитектуроведения, не утрачено и поныне. Более того, с течением времени все его основные положения, подтверждаемые и развиваемые в работах научной школы, приобретают все большую фундаментальность.

Исходной предпосылкой для предпринятого В. П. Орфинским новаторского труда послужило его вызревшее в течение более чем двадцати экспедиционных сезонов убеждение, что архитектура карел имеет ярко выраженный этнический характер.

Новизна реализованного ученым подхода к осмыслению народной архитектуры проявилась в первую очередь в формулировке цели исследования, в котором предполагалось не просто указать на отличия карельских и русских построек: такие отличия справедливо могут быть причислены к локальным признакам. Была поставлена задача доказать, что частные особенности, проявляющие-

ся в разных типах сооружений, обусловлены закономерностями исторического развития народа и его национального характера. Наметился и новый путь решения задачи – отказ от «художественных» описаний архитектурного наследия и переход к детальному анализу не столько отдельных памятников, сколько самого процесса их формирования и развития характеризующих этот процесс тенденций, поскольку, как было подтверждено по завершении исследования, в условиях региональной общности именно при сопоставлении таких тенденций определяются отличия соседствующих разноэтничных архитектур.



В. П. Орфинский с сотрудниками национального парка «Кенозерский». 2008 год, Архангельская область, д. Вершинино

Следует подчеркнуть, что принципиальной установкой при этом стал отказ от рассмотрения исторического наследия с позиций нашего времени, сиюминутных потребностей архитектурной практики, а также эстетических предпочтений исследователей. Единственно возможным путем реализации такой установки представлялась максимальная объективизация исследования, а ядром новой объективизированной методики стала Единая сводная классификация приемов, форм и деталей деревянного зодчества.

Классифицирование к началу 1970-х годов уже достаточно прочно вошло в арсенал методов, применяемых при изучении народного зодчества. Но не удовлетворяли его результаты – малая детали-

зация классификаций, созданных предшественниками, приводила к тому, что деревянное зодчество обширнейшего региона – Русского Севера – рассматривалось как этнически однородное явление. Это отражалось даже в этнографических работах, нацеленных на поиски отличительных черт материальной культуры разных народов. Этнографы фиксировали отдельные потенциально этнодифференцирующие характеристики поселений и построек, но только наиболее существенные, с их точки зрения, сознательно отказываясь от «дробных» классификаций [1; 36]. Несколько иная ситуация сложилась в историко-архитектурной науке. В классификации культовых построек М. В. Красовского, а вслед за ним А. В. Ополонникова немногочисленные типы указывали на наиболее выразительный признак памятника, играющий ведущую роль в сложении его архитектурного образа [5; 176–177], [8]. При этом сопоставимости типологических признаков не придавалось особого значения. В результате ныне распространенная классификация культовых построек в русском деревянном зодчестве объединяет клетские, шатровые, ярусные, многоглавые и кубоватые храмы в единый типологический ряд, первый и третий члены которого выделены с учетом характера общего объемного решения, а второй, четвертый и пятый – по форме венчания. Те же недостатки присущи классификациям И. В. Маковецкого, посвященным поселениям и жилым домам [6, табл. 65–69].

Стремление к детализации архитектурной классификации за счет удлинения типологического ряда при сохранении прежних подходов не приводило к успеху. Это подтверждает опыт известного финского исследователя деревянного зодчества Ларса Петтерссона, изучавшего культовые постройки Заонежья [22]. Так, часовни он разделил на 24 типа. При этом некоторые типы имели всего по одному представителю, отличаясь друг от друга лишь деталями, другие объединяли разные по объемно-планировочной композиции постройки. В классификации Л. Петтерссона не была определена иерархия признаков, поэтому систематизация остановилась на полпути, хотя специфика материала (объемного, привязанного к значительной территории и напрашивающегося на детальное сопоставление) уже подталкивала исследователя заняться «препарированием» памятников, отказавшись от принятого в истории архитектуры их целостного рассмотрения, направленного на поиски в лучших образцах народного зодчества классической завершенности и соответствия универсальным правилам архитектурной композиции.

Между тем в народном зодчестве воплощены совсем другие принципы. Его развитие, приводившее к созданию совершенных образцов, происходило путем постепенного и относительно независимого преобразования отдельных форм, деталей, узлов, сходного с эволюцией в живой природе. При этом неизменной оставалась опирающаяся на традиции способность к созданию



органической целостности разностадиальных элементов и разностилевых заимствований («имманентная эклектика»).

Сегодня, благодаря работам В. П. Орфинского, такая характеристика народного зодчества уже не вызывает дискуссий. Однако в начале 1970-х годов ее осознание стало поистине революционным шагом на пути создания нового направления изучения народной архитектуры. Возможность моделировать исследуемые объекты с помощью определенного сочетания признаков и описывать развитие через изменения отдельных объектов в первую очередь реализовалась в разработке типологической системы, построение которой приблизилось к отражению происходивших в архитектурной реальности процессов.

Чем же отличалась созданная типологическая система от разработок предшественников? Прежде всего – многоуровневостью и разветвленностью, позволившими систематизировать необычайно большое число признаков. Она состояла из 38 частных классификаций – от поселений до деталей построек, которые, в свою очередь, включили в себя более мелкие типологические ряды и цепочки, отражавшие многообразие, изменчивость частей и элементов целого.

В то же время типологическая система строилась на представлении автора о деревянном зодчестве как о едином явлении, отдельные элементы которого – жилые, хозяйственные и культовые постройки – обладают эволюционно-генетическим родством, ибо объединены общностью происхождения от клетки архаичного жилища и подчиняются общим закономерностям развития. При этом отдельные признаки систематизировались по иерархическому принципу с учетом их роли в формообразовании изучаемых объектов. Все это придало своду классификаций структурную и содержательную целостность, которая противостояла его аналитической дробности, а включение в системное осмысление всего многообразия зодчества Карелии позволило преодолеть свойственную исследованиям предшественников обособленность изучения трех областей архитектурно-строительной деятельности народа – поселений, культовых и жилищно-хозяйственных построек, что привело к более глубокому проникновению в специфику и каждой из них, и народного зодчества в целом.

Типологическая система стала главным итогом первого этноархитектурного исследования, она обладала необходимым для научных классификаций двуединством: использовалась как модель изучаемого явления и одновременно как инструмент такого изучения. С ее помощью за кратчайший срок был переосмыслен весь имеющийся материал, счет анализируемым единицам которого шел на многие сотни.

С тех пор типологическая система неоднократно перерабатывалась автором и его учениками: расширялась и вновь сужалась сфера ее охвата, отражая изменение представлений о степени ее универсальности; разрастались прежние частные

классификации, а из отдельных их подразделений формировались новые; яснее и совершеннее становилась структура представления информации. Однако все это оставалось воплощением комплекса тех принципов и идей, которые лежали в основе первой классификационной разработки.

В 1970-е годы детальное классифицирование по первой версии типологической системы позволило В. П. Орфинскому впервые широко применить в историко-архитектурном исследовании статистически-типологический анализ. Были определены ареалы приемов, форм и деталей народного деревянного зодчества на территории Карелии и проведено ее подробное этноархитектурное зонирование.

Частные вопросы происхождения и развития каждого из исследуемых типов объектов получили новое освещение, а в ряде случаев были разработаны впервые. Так, были выявлены несколько направлений развития форм поселений и высказана новая версия появления уличной формы. Подвергнута сомнению универсальность гипотезы У. Т. Сирелиуса о происхождении домов-комплексов: на территории Карелии были намечены три направления их эволюции, обозначено время зарождения этих эволюционных тенденций, высказано предположение о причинах их различия. Впоследствии детальные исследования подтвердили картину формирования комплексного жилища в Карелии [15].

В области культового зодчества были опровергнуты представления о его единстве в пределах Севера России, об общерегиональном направлении развития деревянного храмоостроительства от архаики к классике и от нее – к упадку, об однозначно отрицательных влияниях профессиональной культовой архитектуры на народную храмоостроительную традицию. Развитие культового деревянного зодчества Карелии предстало в виде сменяющих друг друга этапов, откликающихся на стилистические переломы в монументальном храмоостроительстве. Деревянные культовые постройки в результате внешних влияний до конца XIX века не только не теряли, а, напротив, приобретали дополнительные черты своеобразия, синтезируя заимствования с традиционными приемами и формами, а иногда реагировали противоположным образом – подчеркнутой этнизацией, как случилось в культовой архитектуре карел на рубеже XIX–XX веков. Отдельные яркие признаки этнической специфики деревянных культовых построек – от деталей до взаимодействия с архитектурно-ландшафтным окружением – были отмечены на протяжении всей их истории.

Систематизация культовых построек Карелии, датированных в широких временных пределах – с XVI до начала XX века – позволила выявить на их примере «хронологические ареалы» архитектурных форм. На протяжении четырех столетий прослежена эволюция объемно-планировочных решений, частей и деталей культовых построек. Емким и наглядным способом представления результатов

стала «архитектурно-археологическая шкала» для датировки часовен Карелии, с успехом применяемая на практике реставраторами и исследователями деревянного зодчества «в списках» еще до ее первого опубликования в 1999 году [18; 152–159].

В диссертационной работе В. П. Орфинского впервые было истолковано развитие народной архитектуры целого региона. Во многих подобных случаях, несмотря на возможную климатическую, хозяйственную и этническую неоднородность территории, ее общая архитектурная картина отличается неопределенностью и размытостью. Ключом к ее пониманию служат сформулированные В. П. Орфинским положения о том, что эволюционные преобразования проявляются в народном деревянном зодчестве не в сплошной замене одних форм другими, а в постепенном изменении соотношения сосуществующих разнотадальных форм – прототипов и производных, «эмбрионов» и «рудиментов», часто имеющих лишь нюансные, но тем не менее значимые отличия. В относительно узких временных рамках о развитии массовых типов построек можно судить только по определяемым статистически тенденциям к изменению такого соотношения форм. Узость временных границ, в которые укладывается фактический материал, неизбежна при исследовании деревянной архитектуры, но на примере Карелии была показана возможность расширения базы хронологических сопоставлений: из-за неравномерности социально-экономического развития края, более интенсивного в его южной части, эволюционные изменения форм в направлении с севера на юг оказались сходны со сменой эволюционных этапов во времени.

Среди полученных результатов важное место занял вывод о том, что в условиях региональной архитектурной общности бесперспективно искать «абсолютные» национальные признаки, отсутствующие в зодчестве других народов. Такие признаки всегда относительны и определяются сопоставлением непосредственно соседствующих разнотадальных архитектур, причем сопоставлением не столько конкретных форм, сколько формообразующих тенденций. Относительная «заторможенность» развития архитектуры карел как следствие особой традиционности их материальной и духовной культуры проявилась и в длительном сохранении самобытных черт, и в устойчивости заимствованных русских форм – большей, чем в собственно русском зодчестве. Было выявлено отличное свойство культуры карел, названное природо-подражательностью (позже – природосообразностью), которая оставила свой след в их зодчестве в стремлении к свободной планировке поселений и раскрытости застройки в окружающую среду, в композиционном подчинении культовых построек элементам ландшафта, в приверженности к декоративным формам, интерпретирующим образы природы, в наиболее полном соответствии решений технических и декоративных задач качествам дерева как строительного материала и рациональным приемам его обработки.

Таковы главные результаты первого опыта последовательного проведения принципов этноархитектуроведения при изучении народного деревянного зодчества. С позиций сегодняшнего дня их можно оценить как систему до сих пор не опровергнутых постулатов нового научного направления, а другие, менее акцентированные в исследовании наблюдения, догадки и идеи, – как блестящее предвосхищение тематики изысканий, развитой в трудах В. П. Орфинского и его учеников в 1980–2000-е годы.

Констатация различий в темпах развития деталей, частей и типов построек, а также целых этноархитектурных зон и регионов вылилась в создание концепции относительной несинхронности эволюции разнотадальных архитектур как первопричины этнической специфики зодчества взаимодействующих народов [12].

Описанные факты возрождения отдельных утраченных тенденций, принципов и форм на новых этапах развития архитектуры сложились в представление о линейно-циклическом характере эволюционных преобразований в народном зодчестве [13], [14].

Давнее осознание важности процессов, происходящих при непосредственном межэтническом взаимодействии в архитектуре, со временем обрело системную стройность. Изучение механизма этнизации архитектурной среды в традиционной культуре показало, что нивелировка национальных характеристик архитектуры при межэтническом взаимодействии полностью не происходит даже при ассимиляции этноса: некоторые субстратные архитектурные признаки на протяжении длительного времени продолжают жить в новой этнокультурной среде. Тем более не размывается своеобразие архитектур соседствующих народов, связанных друг с другом многообразными контактами, но сохраняющих свои языки и этническую специфику. Для национального зодчества межэтнические контакты становились как поводом для актуализации собственного порожденных ими архитектурных признаков, так и причиной творческих поисков, обновляющих арсенал архитектурных приемов, форм и деталей, как правило, с опорой на свои этнические традиции [11].

В процессе межэтнических контактов качественные изменения в зодчестве этноса соотносятся с определенными фазами этнокультурного взаимодействия, а территориальное распределение порожденных ими архитектурных признаков предопределено видом контактной зоны, в которой это взаимодействие разворачивается.

В ситуации активного этнического сопоставления по мере приближения к исторически стабильной границе между этнокультурными ареалами на фоне отторжения внешних влияний усиливается выражение национальной самобытности в архитектуре: происходит консервация и даже архаизация привычных форм, усиление характеристик, основанных на эстетических

предпочтениях своего этноса, формируются архитектурные этнические символы.

Углубление культурной интеграции приводит к ассоциативным заимствованиям – раскрытию путем сопоставления с чужой культурой тех или иных достижений культуры собственной. Далее в ситуации этнического компромисса «чужие» архитектурные образцы заимствуются непосредственно, но не воспроизводятся буквально, а при адаптации к «своей» культурной среде перерождаются в новые формы – компромиссные, являющиеся результатом переработки образца и приведения его в соответствие своей системе композиционного и художественно-образного мышления, или в формы-гиперболы, отражающие высокую степень односторонней тенденциозности в межэтническом общении и гипертрофирующие наиболее выразительную часть или признак заимствованного образца. Ситуация этнического компромисса соотносится с расширяющимся взаимопроникновением этнических ареалов и исторически подвижными границами – своеобразными межареальными буферными зонами, где формы-символы этнокультурной интеграции распределены достаточно равномерно по всей территории.

В Карелии межэтническим взаимодействием русского и прибалтийско-финских народов можно объяснить появление высотных шатровых храмов в Прионежье, феномен Преображенского храма в Кижях и зодчества Зонежья, некоторые особенности домов-комплексов и архитектурного декора. Изложенные закономерности развития архитектуры в зонах этнокультурных контактов прослежены также в Республике Коми, Архангельской области, на севере Норвегии. Все это подтверждает, что при определенных условиях этнокультурные контакты стимулируют расцвет национальной архитектуры и обогащают совокупное культурное наследие народов в целом.

В течение многих лет после своего введения в научный оборот главный исследовательский инструмент этноархитектуроведения – типологическая система приемов, форм и деталей деревянного зодчества – продолжает дополняться и совершенствоваться. Опыт ее длительного использования при изучении архитектурного наследия Карелии и сопредельных территорий показал, что типологическая система является надежным алгоритмом, обеспечивающим последовательность, относительную объективность и полноту фиксации характеристик традиционных построек. В частности, с помощью первых вариантов типологической системы в 1979–1980 годах проводилась инвентаризация деревянного зодчества Карелии, когда всего за два полевых сезона было зафиксировано более 5500 традиционных крестьянских построек, то есть значительно больше, чем за все предшествующие годы XX столетия. Для новичка типологическая система служит эффективным обучающим средством, структурирующим разрозненные знания о деревянном зодчестве, для опытного исследователя сравнение реалий с типологическими подразде-

лениями дает возможность акцентировать свое внимание в первую очередь на новых, отсутствующих в классификации признаках и их сочетаниях.

Сегодня видоизмененная структура частных классификаций включает до 10 классификационных уровней с вариантами и подвариантами. Помимо каркаса системы – основных типологических подразделений, характеризующих ведущие тенденции в развитии объекта, – классификации включают дополнительные признаки, организованные по открытой схеме с возможностью их дальнейшего накопления. Дополнительные признаки отражают особенности структурных частей и элементов объекта, характеризуя этнические, региональные, местные особенности, включая «почерки» отдельных мастеров или плотницких артелей.

Последние по времени создания типологические структуры – классификации простейших культовых построек, храмов и колоколен – представлены в монографии «Типология деревянного культового зодчества Русского Севера» [16]. Высокая степень формализации в представлении историко-архитектурных данных, которую обеспечивают классификации, дала возможность положить их в основу электронного классификатора – программно-информационного комплекса, включающего инструментальное средство типологического анализа и базу данных атрибутивной, типологической, иконографической и картографической информации об исследуемых объектах. В наиболее полном виде электронный классификатор впервые был разработан для культовых построек [17].

Типологическая система по-прежнему служит главным залогом объективизации исследований народного деревянного зодчества, позволяющей опираться на количественные методы анализа материала. Одновременно с ее использованием в 1980-е годы были разработаны способы математического описания наиболее ярких отличительных признаков карельской архитектуры: существование тенденции к свободной планировке поселений у карел подтверждено с помощью коэффициентов регулярности их объемно-планировочной структуры [21], [7] и графиков восприятия степени замкнутости пространства [2], а отмеченное ранее стремление к обостренности и геометризации форм карельского архитектурного декора описано с помощью коэффициента остроты силуэта [10; 150–151].

Изучение этнических процессов в традиционном зодчестве невозможно без взаимодействия со специалистами в области наук народоведческого цикла. Поэтому более десяти лет назад по инициативе В. П. Орфинского ученые, изучающие язык и культуру народов Карелии, объединились для совместных исследований, начало которым положили комплексные экспедиции, проводимые ежегодно с 1996 года.

Этноархитектуроведение органично находит общие научные интересы с топонимией (выявление этнокультурных субстратов и характера ассимиляционных процессов на различных territori-

ях), этнографией (строительная деятельность крестьян и их декоративно-прикладное искусство), искусствоведением (сюжетная живопись, включая иконопись), этномузыковедением (композиционное построение образцов народной музыки и хореографии). Внутреннее созвучие интегрируемых в совместных исследованиях научных дисциплин предопределено особенностями проявления этничности, структурным тождеством исследуемых объектов, отраженным в таких объектах специфической эстетических предпочтений разноэтничного населения региона или их общей генетической природой, восходящей к концептуальным представлениям человека о пространстве и времени.

Многолетние этноархитектурные наработки научно-методического характера были апробированы и уточнены в ходе выполнения четырех комплексных проектов, реализовавшихся в четырех монографиях, – описании истории, быта и культуры села Суйсарь с ассимилированным людиковским населением, рассмотрении округа собственно карельской деревни Юккогубы, историко-культурном анализе северно-карельской деревни Панозеро, находящейся в русско-карельском порубежье, и, наконец, своеобразной энциклопедии старого Сямозерья – территории, оказавшейся в эпицентре этнокультурных процессов юго-западной Карелии в конце XIX – начале XX века [20], [3], [19], [4].

Деревянное зодчество Карелии не случайно стало полигоном для отработки принципов этноархитектуроведения. Карелия и сегодня широко известна своими многочисленными памятниками и сохранившимися традиционными деревнями – целостными фрагментами исторической архитектурно-ландшафтной среды. Она выгодно расположена на стыке Восточной и Западной Европы, где межэтнические контакты в прошлом способствовали формированию яркой и многообразной народной культуры. Однако экспедиции последних лет свидетельствуют, что деревянный мир Севера становится все более похожим на археологический

объект – безмолвное руинированное свидетельство минувшей эпохи. Все ощутимее угроза полного исчезновения самобытнейшего пласта отечественного историко-архитектурного наследия.

Во многом это связано с распространенной в российском обществе оценкой деревянного зодчества как отжившего, чуждого современности явления. А между тем в цивилизованном мире растет понимание ценности наследия деревянного зодчества как уникального историко-культурного документа. В формах и деталях национальных архитектурных памятников из дерева воплощены не только особенности понимания конструктивной работы этого натурального строительного материала, но и отражены древнейшие представления о взаимодействии природы, общества и человека, сложившиеся в разных культурах. Памятники деревянной архитектуры все активнее аккумулируют вокруг себя деятельность, которая способствует возрождению и развитию этнических традиций, национального самосознания и конкретного патриотизма. Исторические деревянные постройки служат источником идей и образов для той ветви современной архитектуры, которая нацелена на эволюционную безупречность, акцентирование национальных культурных приоритетов и выявление «духа места».

Этноархитектуроведение, появившееся в Карелии, с первых дней своего становления заявило о нерасторжимости задач исследования и сохранения наследия деревянного зодчества. И, пожалуй, его самый важный принцип – сделать все возможное, чтобы, говоря словами В. П. Орфинского, не прервалась нить архитектурной преемственности «на перекрестке между прошлым и будущим».

*От всей души поздравляем Вячеслава Петровича с юбилеем и желаем ему крепкого здоровья, успехов в научной деятельности и талантливых учеников!*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Витов М. В. О классификации поселений // Советская этнография. 1953. № 3.
2. Гуляев В. Ф. Количественное описание степени замкнутости архитектурного пространства традиционных сельских поселений // Проблемы исследования, реставрации и использования архитектурного наследия Русского Севера: Межвуз. сб. Петрозаводск: РИО ПГУ, 1988. С. 48–54.
3. Деревня Юккогуба и ее округа / Отв. ред. В. П. Орфинский. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2001. 432 с.
4. История и культура Сямозерья / Отв. ред. В. П. Орфинский. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. 816 с.
5. Красовский М. В. Курс истории русской архитектуры. Ч. 1. Деревянное зодчество. Пг.: Товарищество Р. Голике и А. Вильборг, 1916. 408 с.
6. Маковецкий И. В. Архитектура русского народного жилища. Север и Верхнее Поволжье. М.: Академия архитектуры СССР, 1962.
7. Медведев П. П. Программа «Регулярность» для мини-ЭВМ («Электроника–60») // Советская этнография. 1989. № 2. С. 62–67. (Приложение № 1 к статье: Орфинский В. П. Вековой спор. Типы планировки как этнический признак (на примере поселений Русского Севера) // Советская этнография. 1989. № 2. С. 55–62.)
8. Ополовников А. В. Русское деревянное зодчество. Памятники шатрового типа и малые архитектурные формы. Памятники ярусного, кубоватого и многоглавого типа. М.: Искусство, 1986. 312 с.
9. Орфинский В. П. Деревянное зодчество Карелии. Генезис, эволюция, национальные особенности: Дисс. ... д-ра архитектуры. Т. 1, 2. М.: ЦНИИТИА, 1975.
10. Орфинский В. П. Классификация архитектурно-конструктивных и декоративных деталей деревянного зодчества Русского Севера // Архитектурное наследие и реставрация (Реставрация памятников истории и культуры России): Сб. науч. тр. М.: Росреставрация, 1986. С. 147–151.

11. Орфинский В. П. К вопросу о типологии этнокультурных контактов в сфере архитектуры (на примере Российского Севера) // Проблемы российской архитектурной науки: Сб. науч. тр. членов отделения архитектуры РААСН. М.: РААСН, 1999. С. 78–94.
12. Орфинский В. П. Несинхронность эволюционных преобразований как ключ к расшифровке этнической специфики деревянного зодчества Карелии // «Свое» и «чужое» в культуре народов Европейского Севера. Петрозаводск, 2001. С. 12–14.
13. Орфинский В. П., Гришина И. Е. Традиционные системы сельского расселения в Карелии // Этнографическое обозрение. 1999. № 6. С. 16–33.
14. Орфинский В. П., Гришина И. Е. Элементы цикличности в развитии народного деревянного зодчества // Народное зодчество: Межвуз. сб. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1999. С. 23–37.
15. Орфинский В. П., Гришина И. Е. Генезис дома-двора в крестьянском зодчестве Карелии // Архитектурное наследие. № 44. М., 2001. С. 63–80.
16. Орфинский В. П., Гришина И. Е. Типология деревянного культового зодчества Русского Севера. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2004. 280 с.
17. Орфинский В. П., Гришина И. Е., Ляля Е. В., Наволоцкий С. В. Электронный классификатор деревянного культового зодчества Русского Севера // Вестник Российского гуманитарного научного фонда. 2005. № 1 (38). С. 146–158.
18. Орфинский В. П., Яскеляйнен А. Т. Хронологическая атрибуция сооружений деревянного культового зодчества Карелии // Народное зодчество: Межвуз. сб. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1999. С. 147–160.
19. Панозеро: сердце Беломорской Карелии / Под ред. А. П. Конкка, В. П. Орфинского. ПетрГУ; Jumikelo-säätiö. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003. 448 с.
20. Село Суйсарь: история, быт, культура / Под ред. Т. В. Краснопольской, В. П. Орфинского. Петрозаводск, 1997. 296 с.
21. Хрол Т. М. Определение количественных характеристик регулярности планировки и застройки сельских поселений // Проблемы исследования, реставрации и использования архитектурного наследия Карелии и сопредельных областей: Межвуз. сб. Петрозаводск: РИО ПГУ, 1985. С. 18–22.
22. Pettersson L. Äänisniemen kiriollinen puuarkkitehtuuri. Helsinki, 1950. 242 s.

УДК 628.3

**РОМАН РЕНАТОВИЧ АЮКАЕВ**

кандидат технических наук, инженер ООО «Коммунжил-проектинвест»  
*chistayavoda@rambler.ru*

**ЕЛЕНА ОЛЕГОВНА ГРАФОВА**

кандидат технических наук, ассистент кафедры водоснабжения, водоотведения и гидравлики строительного факультета ПетрГУ  
*chistayavoda@rambler.ru*

**РЕНАТ ИСХАКОВИЧ АЮКАЕВ**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водоснабжения, водоотведения и гидравлики  
*chistayavoda@rambler.ru*

**ЕВГЕНИЙ ВИКТОРОВИЧ ВЕНИЦИАНОВ**

доктор физико-математических наук, профессор Института водных проблем РАН, г. Москва  
*venits@aqua.laser.ru*

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ВОДОЧИСТКИ Сообщение 1. Медленное фильтрование

В водоснабжении загородных объектов перспективно применение медленных фильтров. В статье приводятся результаты математического моделирования процесса регенерации загрузки медленных фильтров. Дано объяснение эффекта концентрации отмытых загрязнений в центре цилиндрического фильтра за счет закручивания надфильтрового объема воды.

Ключевые слова: медленное фильтрование, регенерация, математическое моделирование, водоснабжение загородных объектов

В работах [1], [2] показана высокая эффективность применения технологии медленного и «сухого» фильтрования при инженерном обустройстве загородных объектов типа придорожных кемпингов, гостиниц, автозаправочных станций.

При переносе известных конструкторских решений по сооружениям большой производительности на сооружения малой и средней производительности эффективным оказывается применение методов математического моделирования. Удачно построенная феноменологическая модель и подобранная для ее исследования математическая модель зачастую позволяют прояснить физику процесса, выйти на инженерные методы его расчета или приблизиться к ним. При этом удается избежать грубых ошибок в построении программ экспериментальных исследований, сократить объем и упростить технологию экспериментов.

Одной из причин исчезновения из практики водоподготовки простых в строительстве, надежных в работе медленных фильтров послужили неудобства в проведении работ по регенерации

загрузки. Так, традиционная технология включает в себя осушение песчаной загрузки и последующее механическое удаление слоя образовавшейся за фильтроцикл пленки. После каждого фильтроцикла вследствие чрезвычайно антисанитарных условий удаления осадка проводилась тщательная дезинфекция конструкции фильтра и загрузки, что существенно затягивало формирование биопленки с бактерицидным эффектом. В последующие годы появилась технология регенерации загрузки медленных фильтров смывом задержанных загрязнений струей воды.

Однако эта технология не нашла широкого применения по причине чрезвычайно больших затрат на насосное оборудование и резервуары промывной воды, сложности перемещения водоструйного устройства и приема промывного потока боковыми желобами.

В работах Ю. И. Коренева [3] по промывке загрузки скорых фильтров, А. Ф. Порядина [6] по инфильтрационным водозаборам обсуждается метод регенерации, который позволяет извлекать

частицы загрязнений из зернистого слоя с помощью высоконапорных нисходящих водяных струй.

Применительно к регенерации медленного фильтра более предпочтительным с позиции снижения энергозатрат оказалось перемещение насадки не над загрузкой, а в ее толще. В этом случае имеет место ординарная для технологии скорого фильтрования регенерация зернистого слоя в восходящем потоке воды. Фильтр сканируется струей воды, подаваемой вглубь загрузки через гибкий шланг с жестким наконечником. Расход промывного потока подбирается из условия обеспечения гидравлической сортировки (отмывки) песка в зоне действия факела такой струи.

Вынесенная из толщи загрузки взвесь оседает на поверхности загрузки. Взвесь легко подвижна и хорошо удаляется илососом.

Разработанная технология регенерации загрузки медленного фильтра сканированием рыхлителя смонтирована нами и успешно эксплуатируется на протяжении более 10 лет на станции очистки воды озера Укшозеро госрезиденции президента РФ «Шуйская Чупа» под Петрозаводском. При ординарном качестве исходной воды и продолжительности фильтроциклов порядка 60–75 суток все операции по промывке загрузки и удалению илососом отмытых загрязнений проводились вручную.

В неординарные периоды года требовалась реагентная обработка озерной воды, что сокращало продолжительность фильтроциклов до 2–3 суток. В этих условиях обслуживание достаточно удаленного от города объекта стало делом трудоемким. Потребность в автоматизации регенерационного процесса привела к попытке применить для перемещения осадка к центральной воронке апробированный в радиальных отстойниках скребковый механизм. Опыт оказался неудачным из-за чрезвычайной подвижности осадка гидроокиси.

Аналогичная картина «вспухания» осадка гидроокиси алюминия с сорбированными органическими загрязнениями наблюдалась нами при попытках убрать его илососом со дна плавательного бассейна.

В поисках оптимального конструктивного оформления системы удаления из фильтра отмытых легкоподвижных загрязнений мы обратились к методу математического моделирования, широко и успешно применяемого в гидромеханике.

При регенерации медленных фильтров цилиндрической формы с диаметром 1500 мм на водоочистной станции «Шуйская Чупа» в период реагентной подготовки озерной воды нам удалось организовать эффективный выпуск осадка гидроксида алюминия за счет закручивания воды в надзагрузочном объеме. Погружной насос был расположен в центре, напорным шлангом вода подавалась по касательной. Через некоторое время, после выключения насоса, движение жидкости останавливалось, и работа насоса переключалась на выброс скопившегося в центре осадка.

На рис. 1 представлены две интересные для нашего случая модели из монографии Г. Шлихтинга по теории пограничного слоя [8].

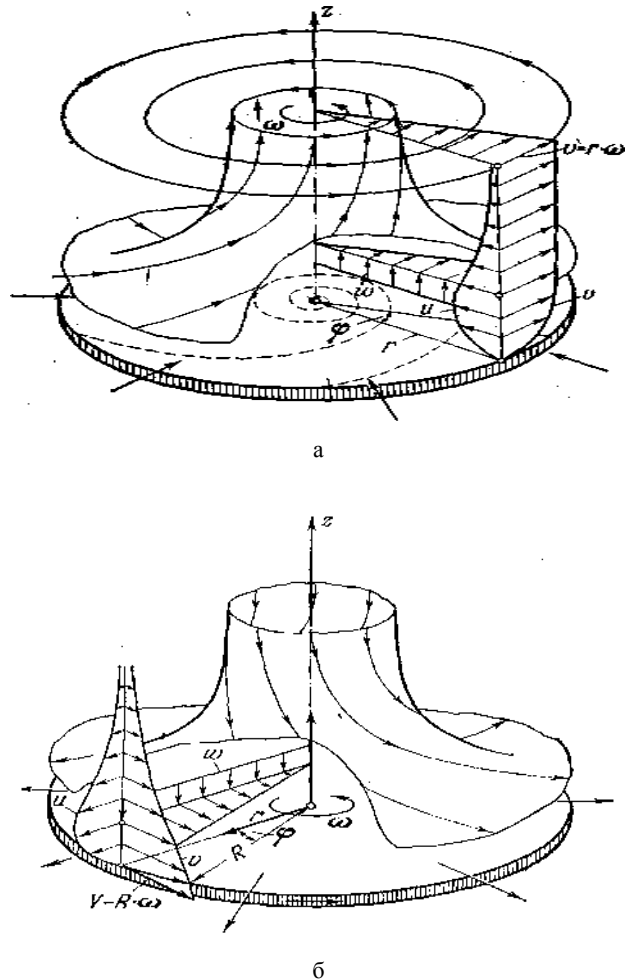


Рис. 1. Графическое изображение результатов математического моделирования процесса регенерации медленного фильтра: а – течение в окрестности диска (скребка), вращающегося в покоящейся жидкости; б – вращательное движение жидкости над неподвижным основанием (над поверхностью загрузки)

**Модель № 1.** Вращающийся в покоящейся жидкости диск имитирует вращение скребкового механизма радиального отстойника с плоским дном. Вследствие трения слой жидкости, непосредственно прилегающей к диску, увлекается последним и под действием центробежной силы отбрасывается наружу от диска. Взамен отброшенной жидкости к диску сверху в осевом направлении притекает новая жидкость, которая также увлекается диском и снова отбрасывается наружу.

**Модель № 2.** Жидкость, вращающаяся над неподвижным плоским основанием, имитирует безнапорный гидроциклон с центральным выпуском осадка. Для частиц жидкости, находящихся вблизи дна, окружная скорость вследствие торможения понижена, поэтому здесь цен-

требужная скорость значительно уменьшена, между тем как направленный внутрь радиальный градиент давления остается таким же, как и на большом расстоянии от дна. В результате вблизи дна возникает направленное внутрь радиальное течение, которое вызывает, в свою очередь, вследствие условия неразрывности восходящее течение в осевом направлении.

Для подробного анализа выбрана вторая модель как отвечающая задаче концентрации легкоподвижного гидроксидного осадка в центре цилиндрической формы медленного фильтра.

Рассмотрим эту модель движения закрученной жидкости над неподвижным основанием в такой последовательности: распределение скоростей и затем модель закручивания жидкости турбулентной струей.

Модель вращательного движения жидкости над неподвижным основанием была решена для вращающейся жидкости без стенок, то есть для модели бесконечного цилиндра. Для адаптации этой модели к реальным условиям медленного фильтра цилиндрической формы ограниченного диаметра нами проведены преобразования.

**Постановка задачи.** Вязкая жидкость вращается над неподвижной плоской стенкой с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . Рассматривается установившееся движение. Вследствие прилипания скорость жидкости при  $z = 0$  ( $z$  – вертикальная ось) равна нулю. Для частиц жидкости, находящихся на большом удалении от неподвижного основания (большие значения координаты  $z$ ), центробежная сила, возникающая за счет вращения жидкости, уравновешивается радиальным градиентом давления. Это проявляется в возникновении «воронки» на поверхности вращающейся жидкости.

Однако вблизи неподвижного дна окружная скорость вследствие прилипания понижена. Между тем радиальный градиент давления остается таким же, как и на большом расстоянии от стенки. Вследствие этого градиента возникает радиальное течение к центру ( $x = y = 0$ ). В результате неразрывности потока возникает восходящее течение в осевом направлении, которое называется вторичным течением.

Вторичное течение легко наблюдать в стакане с мелкими чайниками, когда жидкость размешивается ложечкой. После того как мы создадим круговое движение и вынем ложечку, вследствие кругового движения вблизи дна стакана возникнет радиальное движение, направленное внутрь, к центру дна, а также восходящий поток по вертикальной оси стакана. В результате чайники собираются в середине дна, образуя «холмообразную» структуру.

**Аналитическое решение задачи.** Используется математическое решение, приведенное в книге Г. Шлихтинга [8]. Вводится цилиндрическая система координат (рис. 2):  $r$  – радиальная координата от центра,  $r = 0$ ,  $\phi$  – угловая координата,  $z$  – вертикальная координата ( $z = 0$  – твердая стенка).

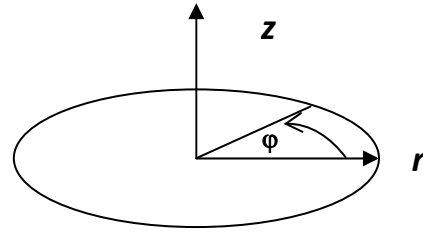


Рис. 2. Цилиндрическая система координат

Поскольку решается задача без ограничивающих стенок, на большом расстоянии от стенки жидкость вращается как твердое тело с угловой скоростью  $\omega$ . Составляющие скорости в радиальном, окружном и вертикальном направлениях обозначим соответственно как  $u$ ,  $v$ ,  $w$  (рис. 3).

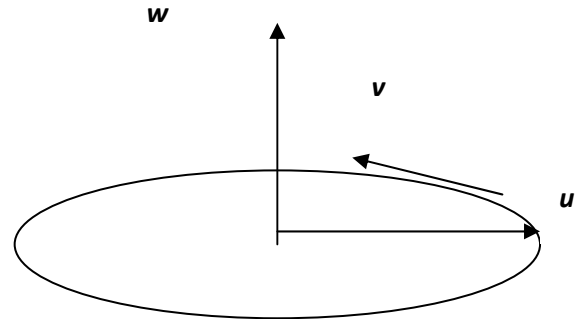


Рис. 3. Направления скоростей  $w$ ,  $v$ ,  $u$

Задача имеет осевую симметрию, так что все функции не зависят от угловой координаты  $\phi$ . Поэтому выпадают все производные по  $\phi$  в уравнениях Навье – Стокса, и система принимает вид:

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{v^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{u}{r} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right\} \quad (1a)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + \omega \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{uv}{r} = v \left\{ \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v}{r} \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right\} \quad (1б)$$

$$u \frac{\partial \omega}{\partial r} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left\{ \frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right\} \quad (1в)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (1г)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} u = v = w = 0 \text{ при } z = 0, \\ u = 0, v = r\omega \text{ при } z = \infty. \end{aligned} \quad (2)$$

На большом удалении от стенки течение проходит без влияния вязкости, жидкость вращается как единое недеформируемое тело, и градиент давления можно найти из уравнения (1а).

$$(1/\rho) \hat{\partial} p / \hat{\partial} r = v^2 / r.$$



Поскольку на удалении от пластины радиальная скорость определяется по формуле для твердого тела:

$$v = r\omega,$$

получим для градиента давления выражение:

$$\hat{p}/\hat{r} = \rho r\omega^2. \quad (3)$$

Поскольку положение поверхности вращающейся жидкости определяет градиент давления в соответствии с (3), можно найти уравнение поверхности вращающейся жидкости:

$$Z_{нов} = Ar^2, \quad (4)$$

то есть  $Z_{нов}$  меняется по параболическому закону, где  $A$  – коэффициент:

$$A = \omega^2/2.$$

Отметим, что по перепаду высот жидкости можно определить угловую скорость вращения («закрутки»)  $\omega$  слоя жидкости. Для этого надо измерить перепад высот поверхности между центром вращения (положим  $Z_{нов} = 0$  при  $r = 0$ ) и половиной радиуса цилиндра, в котором вращается жидкость ( $Z_{нов} = Z_{0,5}$  при  $r = 0,5R$  – половине радиуса цилиндра). Выбор такой точки отсчета связан с тем, что решение системы (1) получено в предположении, что вращается слой жидкости без стенок (бесконечного радиуса). Реально всегда имеется стенка и вблизи стенки обязательно влияние прилипания, то есть решение (1) вблизи стенки цилиндра нарушается. Однако вблизи центра (до половины радиуса  $R$ ) влиянием стенки можно пренебречь и использовать решение (4).

Поскольку давление создается столбом жидкости, то для горизонтальной поверхности, проведенной через самую низкую точку поверхности жидкости ( $Z_{нов} = 0$  при  $r = 0$ ), для точек окружности, проведенных на половине радиуса цилиндра ( $r = 0,5R$ ), давление будет равно:

$$p = Z_{0,5} \rho g, \quad (5)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения (атмосферное давление для всех точек не учитывается, поскольку в уравнения входит градиент давления).

Тогда из (4) и (5) получим:

$$\omega = (8 Z_{0,5} g)^{0,5}/R.$$

Математическое решение системы (1) приведено в [7]. Вводится безразмерная переменная:

$$\zeta = z (\omega/v)^{0,5},$$

а также безразмерные скорости

$$U(\zeta) = u/(r\omega), V(\zeta) = v/(r\omega), W(\zeta) = w/(r\omega)^{0,5}.$$

В безразмерных переменных граничные условия (2) примут вид:

$$U = V = W = 0 \text{ при } \zeta = 0, U = 0, V = 1 \text{ при } \zeta = \infty,$$

а сама система (1) примет вид:

$$U^2 - V^2 + WU' - U'' + 1 = 0 \quad 2UV + WV' - V'' = 0 \quad 2V + W' = 0.$$

Эту систему можно решить численным методом. Значения функций  $U, V, W$  представлены в таблице, а также на рис. 4 и 5.

Значения радиальной  $U$ , окружной  $V$  и осевой (вертикальной)  $W$  составляющих скорости движения жидкости

$\zeta$	U	V	W	$\zeta$	U	V	W	$\zeta$	U	V	W
0	0	0	0	5,0	0,103	1,003	1,478	10,0	0,000	1,009	1,390
0,5	-0,343	0,382	0,190	5,5	0,074	0,969	1,390	10,5	0,003	1,007	1,386
1,0	-0,468	0,731	0,614	6,0	0,041	0,954	1,332	11,0	0,004	1,005	1,382
1,5	-0,437	1,004	1,076	6,5	0,013	0,953	1,308	11,5	0,003	1,002	1,380
2,0	-0,318	1,175	1,460	7,0	-0,010	0,959	1,304	12,0	0,001	1,000	1,380
2,5	-0,171	1,246	1,704	7,5	-0,020	0,975	1,320	12,5	0,000	1,000	1,380
3,0	-0,038	1,242	1,800	8,0	-0,023	0,990	1,340	$\infty$	0,000	1,000	1,380
3,5	0,056	1,192	1,784	8,5	-0,020	1,00	1,364				
4,0	0,106	1,123	1,702	9,0	-0,013	1,007	1,382				
4,5	0,117	1,056	1,590	9,5	-0,006	1,010	1,390				

Из полученного решения можно сделать следующие практические выводы:

1. Максимальное значение осевой скорости достигается на высоте  $\zeta = 3,1$  и равно:

$$w_{max} = 1,8(v\omega)^{0,5}.$$

Поскольку  $v = 0,01 \text{ см}^2/\text{с}$ , а величина «закрутки» порядка  $0,1 \text{ с}^{-1}$  (один оборот за 10 с), то типичная величина

$$w_{max} \sim 0,05\text{--}0,10 \text{ см/с}.$$

Это значит, что частицы с гидравлической крупностью порядка  $0,5 \text{ мм/с}$  и меньше могут

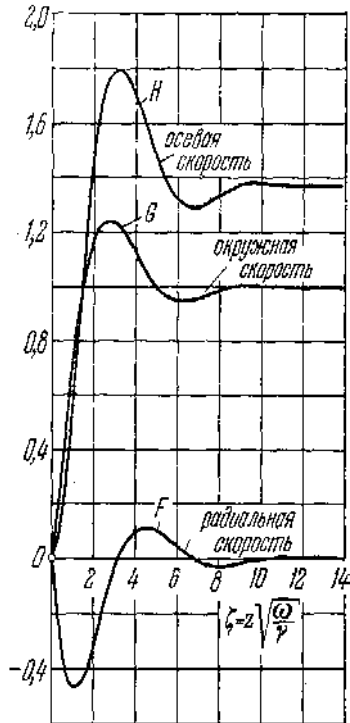


Рис. 4. Распределение скорости в пограничном слое, образуемом при вращении жидкости вблизи неподвижного основания

быть перемещены к центру неподвижного дна. Более точные значения гидравлической крупности частиц взвеси можно установить экспериментально. Такое уточнение связано с тем, что решение получено в предположении, что неподвижная поверхность имеет бесконечный радиус. Реально всегда имеются вертикальные цилиндрические стенки, на которых скорость потока также равна нулю. Это приводит к снижению величины  $w_{max}$ .

2. Величина и направление радиальной скорости зависят от расстояния от поверхности загрузки. Для высоты  $\zeta \leq 3$  (или в размерных переменных  $z \leq 3(\omega/\nu)^{0.5}$ , то есть  $z \leq 10$  см) скорость направлена к центру дна. Следовательно, для этого слоя жидкости существует центростремительное движение жидкости, увлекающее частицы взвеси. Высота формирующегося «холма» частиц порядка 10 см и увеличивается с ростом скорости вращения (10 см для скорости вращения один оборот за 10 с, далее высота растет пропорционально  $\omega^{0.5}$ . При увеличении скорости вращения в 2 раза высота «холма» возрастает в 1,4 раза).

**Закручивание потока в цилиндре турбулентной струей.** В задаче удаления осадка гидроксида с поверхности загрузки отличие гидродинамического режима от гидроциклона принципиальное: в гидроциклоне необходимо достичь турбулентного режима. Тогда происходит «включение» центробежного механизма.

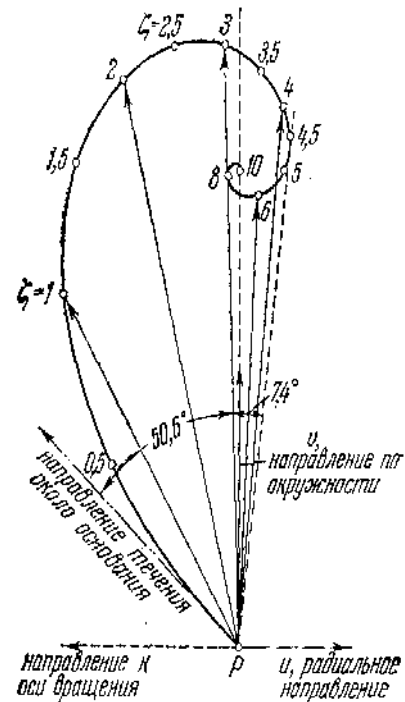


Рис. 5. Векторная диаграмма горизонтальной составляющей скорости в пограничном слое, образуемом при вращении жидкости вблизи неподвижного основания

Напротив, в нашем случае режим кругового вращения должен быть ламинарным, когда формируется пограничный слой и происходит концентрирование осадка в центре загрузки в форме «холма». Это требование является принципиальным, поэтому применение устройств закрутки потока, которые применяются в гидроциклонах (например, лопастей), здесь невозможно. Требование ламинарности накладывает ограничения на скорость закрутки потока.

Известно решение Тейлора об устойчивости вращательного движения между цилиндрами [4]. При вращении жидкости в цилиндре потеря устойчивости происходит в зависимости от числа Рейнольдса, которое в нашем случае следует брать в виде:

$$Re = \omega R^2/\nu.$$

Если принять для критической области значение  $Re \sim 10^4$ , то получим выражение для угловой скорости закрутки:

$$\omega \sim 200/R^2,$$

где  $\omega$  измеряется в  $\text{с}^{-1}$ , а  $R$  – в см. Для радиуса фильтра порядка 70 см критическая область лежит в области  $\omega > 0,04 \text{ с}^{-1}$ . Эта величина ориентировочная, поэтому необходим контроль за тем, чтобы движение жидкости было ламинарным. Для окружной скорости эта величина должна иметь порядок 4 см/с.

Следующий этап – оценка скорости истечения жидкости из сопла для «закрутки» потока. Задача о распределении скоростей в покоящейся вязкой жидкости при истечении из конца трубки турбулентной струи (задача о «затопленной струе») рассмотрена в монографии [5].

На больших по сравнению с размером отверстия трубы расстояниях струя аксиально симметрична вне зависимости от формы отверстия. Вследствие радиальной симметрии радиус области  $R_T$  турбулентности зависит только от расстояния  $x$ , пройденного струей при закрутке. В соответствии с приведенным в указанной монографии решением, радиус области  $R_T$  турбулентности пропорционален расстоянию  $x$ :

$$R_T = \operatorname{tg} \alpha \cdot x, \quad (6)$$

где  $\alpha \approx 12,5^\circ$ .

Решение задачи о попутном движении жидкости вне турбулентной области приводит к выводу, что отношение

$$(u_x)_{\text{пот}} / (U_x)_{\text{ср}} = (1 - \operatorname{Cos} \alpha) / 2, \quad (7)$$

где  $(u_x)_{\text{пот}}$  – скорость в ламинарном (покоящемся первоначально) слое на границе с турбулентной струей;  $(U_x)_{\text{ср}}$  – средняя скорость в турбулентной (закручивающей) струе.

При  $\alpha \approx 12,5^\circ$  получаем для этого отношения значение 0,011, то есть на границе турбулентной области скорость мала по сравнению со средней скоростью потока внутри турбулентной струи.

Таким образом, «закручивание» потока в цилиндре происходит в основном за счет расширения турбулентной струи. Значение угла расширения струи получено в упрощающем предположении о плоском безграничном потоке, так что в реальных условиях величина будет несколько меньше.

Для получения достаточной раскрутки всего объема жидкости следует учесть, что вследствие наличия стенки максимальные окружные скорости  $v$  достигаются по направлению истечения струи. Чтобы вращениехватило весь слой жидкости в окрестности дна (до расстояния не менее 10 см), необходимо, чтобы струя в соответствии с уравнением (6) охватила весь радиус цилиндра. Это произойдет, когда число «оборотов» струи  $N$  составит

$$N \sim 1/\pi \operatorname{tg} \alpha$$

или порядка 15.

Обозначим среднюю скорость истечения через  $(U_x)_{\text{ср}}$ . Тогда среднее значение угловой скорости  $\omega$  составляет

$$\omega = 2(U_x)_{\text{ср}} / R \text{ (с}^{-1}\text{)}. \quad (8)$$

Следовательно, минимальное время  $T_z$  необходимой закрутки потока в окрестности дна составляет:

$$T_z = N / \omega = R / 2\pi (U_x)_{\text{ср}} \operatorname{tg} \alpha. \quad (9)$$

В частности, при радиусе 700 мм и средней скорости истечения 100 мм/с мы получим для минимального времени закрутки значение порядка 1 мин.

Реальное время закрутки может быть больше из-за того, что в использованном решении не учтено влияние пристеночных эффектов.

Выполненный анализ математической модели закрученного движения жидкости у неподвижного дна круглого резервуара (у поверхности загрузки медленного фильтра) дает основание надеяться на успех в конструировании системы регенерации медленного пленочного фильтра с легкоподвижной массой гидроокиси алюминия (железа) с использованием в качестве «привода» направленного потока рабочей жидкости.

Как показало проведенное исследование, в нашем случае необходим ламинарный режим раскручивания придонного объема жидкости до определенной скорости и на определенное время, достаточных для сдвига отложений и перемещения их в центр цилиндрического сосуда. Приведенные теоретические решения дают примерные значения указанных параметров, которые должны быть уточнены экспериментально.

После выполнения задачи концентрирования сдвинутого осадка в центре цилиндрического фильтра должны последовать: остановка внешнего раскручивающего воздействия; последующий выпуск осадка за пределы фильтра (под гидростатическим давлением или насосом).

При использовании полученных рекомендаций для реализации процесса сбора и удаления легкоподвижного осадка следует учесть конструктивные особенности открытых гидроциклонов и принимать во внимание отличия в режимах гидроциклонов и устройств для раскручивания жидкости.

Открытые гидроциклоны относятся к оружию гравитационного типа с вращательным движением потока в рабочей зоне, которое обеспечивается тангенциальным подводом осветляемой воды к цилиндрическому корпусу. Число впускных патрубков принимается обычно не менее двух. Скорость впуска воды в гидроциклон составляет 0,1–0,5 м/с, то есть выше, чем по нашим оценкам. Осадок из конической части открытых гидроциклонов удаляют откачкой насосами, гидроэлеваторами или под гидростатическим давлением воды. Вращение потока способствует агломерации взвешенных частиц и увеличению их гидравлической крупности.

Интенсификация процесса разделения в гидроциклоне достигается за счет уменьшения высоты слоя отстаивания, что созвучно нашей задаче раскручивания тонкого слоя надзагрузочного объема жидкости.

В качестве ориентировочных расчетных параметров могут быть приняты следующие: диаметр аппарата рекомендуется принимать не более 4 м; скорость восходящего потока в аван-

камере принимают  $0,5 \text{ м/с}$ ; удельная гидравлическая нагрузка  $q$ ,  $\text{м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$ , которая определяется по формуле

$$q = 3,6K \frac{D^2 - (d + 2b)^2}{D^2} u_{0n} \eta, \quad (10)$$

где  $3,6$  – коэффициент перевода  $\text{мм/с}$  в  $\text{м/ч}$ ;  $u_0$  – гидравлическая крупность задерживаемых частиц,  $\text{мм/с}$ ;  $K$  принимается равным 1. Среднее значение коэффициента  $\eta$  при рабочей нагрузке  $2,0\text{--}2,5 \text{ м}^3/\text{м}^2$  равно  $0,75$ ;  $n$  – число ярусов.

Этим приближенным расчетом можно пользоваться при гидравлической нагрузке на один ярус высотой примерно  $0,25 \text{ м}$  в пределах  $1 : 2,5 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ .

При диаметре медленного фильтра  $4,0 \text{ м}$   $F = 12,56 \text{ м}^2$ .

Для аппарата такой площади потребуется подача жидкости расходом  $Q_n$ :

$$Q_n = 12,56 \text{ м}^2 \cdot 2,0 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч} = 25,12 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Насос с таким расходом и напором порядка  $5,0 \text{ м}$  в. ст. может быть установлен в центре фильтра над загрузкой.

Тангенциальная подача рабочей жидкости по двум или четырем патрубкам вдоль внутренней поверхности стенок фильтра и отбор воды насосом в центре фильтра обеспечат необходимый гидродинамический режим вращающегося потока жидкости и ускорят при одних и тех же затратах энергии сбор осадка в центре фильтра. После раскручивания жидкости и сдвига осадка напорный патрубок насоса может быть переключен на выброс собранного осадка на иловую площадку.

Проведение экспериментальных исследований и развитие теории (в плане уточнения численных значений критериев) в этом направлении являются, по нашему мнению, интересной и актуальной задачей.

Методу математического моделирования процесса «сухого» фильтрования будет посвящено второе сообщение, которое будет опубликовано в следующем номере «Ученых записок ПетрГУ».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аюкаев Р. Р. Технология медленного фильтрования на сооружениях малой и средней производительности: Дисс. ... канд. технич. наук. Самара: СГАСА, 2006. 170 с.
2. Графова Е. О. Повышение эффективности работы систем водоснабжения и водоотведения загородных объектов: Дисс. ... канд. технич. наук. СПб.: СПбГАСУ, 2008. 148 с.
3. Корнев Ю. И. Водовоздушная промывка скорых фильтров передвижной воздухораспределительной системой: Автореф. дисс. ... канд. технич. наук. Киев: Киевский инж.-стр. инст., 1985. 16 с.
4. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. Ч. 2. М.: Физматгиз, 1963. 665 с.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
6. Порядин А. Ф. Водозаборы в системах централизованного водоснабжения. М.: Изд-во НУМЦ Госкомэкологии России, 1999. 338 с.
7. Шехтман Ю. М. Фильтрация малоцентрированных суспензий // Изв. АН СССР. 1949. № 3. 260 с.
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 711 с.

УДК 711

**ОЛЬГА ИВАНОВНА КРЫЛОВА**

кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры  
строительных конструкций и геотехники строительного  
факультета ПетрГУ  
*kro@sampo.ru*

### К ВОПРОСУ О ПЕШЕХОДНОМ ДВИЖЕНИИ

Статья посвящена вопросам организации пешеходного движения в городах. Социальные преобразования сопряжены с необходимостью новых подходов к градостроительным решениям. Для выбора пешеходных связей должна быть выработана многофакторная оценка, что потребует ряд исследований.

Ключевые слова: пешеходная связь, транспортная организация, критерии, многофакторная оценка

Как правило, в городах транспортные и пешеходные потоки сосредоточены на улицах и, по сути, перемещаются совместно. Когда основным видом пассажирского транспорта был массовый и подавляющее большинство поездок в отечественных городах совершалось на автобусах, трамваях, троллейбусах и другом общественном транспорте, такое решение представлялось оправданным. Особенности поведения пешеходных потоков изучались и использовались для формирования рекреационных зон, зон отдыха и при проектировании транспортных сооружений.

Градостроительное проектирование современного периода переживает сегодня большие изменения. Социальное расслоение общества привело к тому, что изменились закономерности формирования транспортных и пешеходных потоков. Произошло качественное изменение машинопотоков. Значительно увеличилось количество личных автомобилей и их доля в перевозке пассажиров. В соответствии с этим вносятся изменения в транспортную организацию населенных пунктов. Поскольку роль массового пассажирского транспорта в трудовых и культурно-

бытовых передвижениях уменьшилась, представляется целесообразным ослабление связи пешеходных и транспортных путей.

Идея физической изоляции пешеходов от транспорта давно рассматривалась градостроителями. Леонардо да Винчи, Ле Корбюзье и другие решали эту проблему соответственно своему времени [2; 89]. В XX веке в условиях значительного увеличения числа автомобилей появляются попытки радикального разобщения людских и автомобильных потоков по вертикали (экспериментальный проект города Мотопия). По такому принципу был спроектирован Пенн-центр в г. Филадельфия, где предусмотрено использование отдельных элементов зданий в разных уровнях для движения транспорта и пешеходов. Значительно большее применение нашел принцип разобщения транспортных и пешеходных потоков не по вертикали, а в горизонтальной плоскости. Такой принцип применяется при проектировании селитебной территории малых городов – г. Леверкузен на Рейне, г. Редберн (США), внутримикрорайонных территорий в отечественном градостроительстве [4; 296–297]. В отечествен-

ной градостроительной практике иногда проектировались пешеходные пути районного значения в виде эспланад в озелененных зонах. Однако в этом случае не исключается движение транспорта, связанного непосредственно с застройкой. В период массовой застройки в отечественных городах при низком уровне автомобилизации по территориям микрорайона передвигались только одиночные автомобили. В настоящее время число личных автомобилей возросло в несколько десятков раз, поэтому заложенные в проектах планировочные решения больше не отвечают современным требованиям. В связи с этим необходима реконструкция не только магистралей, но и межмагистральных территорий. Кроме уже упомянутых эспланад в озелененных районах, достаточно широко применяются пешеходные зоны в общественных центрах крупных городов. Большое внимание придавалось обоснованию того или иного решения пересечений транспортных и пешеходных потоков [3; 315]. Необходимые для этого закономерности движения достаточно полно изучены.

Для грамотного решения пешеходных связей необходимо в составе транспортной организации города разрабатывать схему пешеходного движения в масштабе города [1]. Как показали наблюдения, в настоящее время пешеходное движение для достаточно большой группы населения является предпочтительным типом передвижения. Следует отметить, что причины для этого у разных групп населения разные. Так, при трудовых передвижениях одни жители ходят пешком, так как по материальным причинам не могут пользоваться транспортом, другие – с целью оздоровления и т. д. Для определения закономерностей формирования пешеходных потоков в современных условиях необходимо выполнить ряд исследовательских работ, направленных на определение мощности пешеходных потоков. Выявление мотивов выбора того или иного способа передвижения потребует не только градостроительных, но и социальных исследований. Кроме того, необходимо учитывать климатический район, величину города и цель передвижения.

Передвижения жителей можно по целевому признаку разделить на группы – трудовые, культурно-бытовые и многоцелевые. Характер движения и требования к путям передвижений у этих групп различны. Так, если при трудовых передвижениях решающее значение имеет коэффициент непрямолинейности, то для прогулочных маршрутов этот показатель не имеет большого значения. Привлекательность маршрута зависит от ряда факторов. Какие факторы и в какой степени влияют на выбор маршрута, можно выявить в ряде исследований. Эти факторы целесообразно разделить на градостроительную, социальную, экологическую и экономическую группы. В ходе исследований необходимо определить значимость показателей внутри группы и относительный «вес» каждой группы показателей. Таким образом, для выбора оптимального решения путей пешеходного движения предлагается применять многофакторную оценку:

$$S = k_1 \sum G + k_2 \sum C + k_3 \sum E + k_4 \sum Q,$$

где  $S$  – величина оценки пешеходной связи;  $\sum G$ ,  $\sum C$ ,  $\sum E$ ,  $\sum Q$  – суммарные величины градостроительных, социальных, экологических и экономических факторов соответственно;  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  – доля группы факторов в общей оценке.

Коэффициенты, показывающие, какую долю составляют факторы от общей оценки, могут быть определены на основе изучения существующих и проектируемых планировочных решений, а также опросов общественного мнения. Возможно, экологическую группу следует вынести из сравнения. Состав факторов внутри групп и критерии их оценки также должны быть выявлены исследованиями. Поскольку факторы групп измеряются в разных единицах, их необходимо привести в сопоставимый вид, для чего можно использовать баллы, бинарный ряд и т. д.

Мы попытались предложить стратегию оптимизации сети пешеходных путей с применением многофакторной оценки, для чего потребуются проведение исследований в ряде направлений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП 2.07.01 – 89\* Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений.
2. Иконников А. В., Артеменко В. В., Искржицкий Г. И. Основы градостроительства и планировка сельских населенных мест. М.: Высшая школа, 1982.
3. Страментов А. Е., Фишельсон М. С. Городское движение. М.: Изд-во лит-ры по строительству, 1965.
4. Черепанов В. А. Транспорт в градостроительстве. М.: Изд-во лит-ры по строительству, 1964.

УДК 582.794.1

ГАЛИНА СТАНИСЛАВОВНА АНТИПИНА

доктор биологических наук, профессор кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета ПетрГУ

antipina@petrsu.ru

ЕЛЕНА АЛЕКСАНДРОВНА ШУЙСКАЯ

аспирант кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета ПетрГУ

elenashuy@rambler.ru

### СЕМЕННАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ ИНВАЗИОННОГО ВИДА БОРЩЕВИК СОСНОВСКОГО (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) В ЮЖНОЙ КАРЕЛИИ

*Heracleum sosnowskyi* Manden. – инвазионный вид синантропных экотопов Южной Карелии, в условиях республики сохраняет классический «арсенал агрессора», высокую семенную продуктивность (3.6 тысячи семян на одном генеративном побеге), мощный травостой (4 генеративных побега высотой до 2 м на квадратный метр), эксплерентность (образует монодоминантные заросли).

Ключевые слова: инвазионный вид, соцветие, сложный зонтик, семя, плод, семенная продуктивность

Изучение биологии и стратегии инвазионных видов является одним из аспектов современной ботаники и экологии. Особое внимание при этом уделяется признакам репродуктивной сферы, так как закрепиться на новой территории могут только виды с эффективной системой размножения [5].

Новым для флоры Карелии адвентивным видом является борщевик Сосновского *Heracleum sosnowskyi* Manden., распространение которого на территории республики является частью общего процесса синантропизации флоры региона.

*Heracleum sosnowskyi* – представитель рода Борщевик *Heracleum* (секция *Pubescentia* Manden.) семейства Сельдерейные (Зонтичные) *Apiaceae* (*Umbelliferae*), адвентивный для Севера южно-умеренный европейский вид. Естественный ареал *H. sosnowskyi* – Кавказ, Закавказье, Малая Азия, где он растет на опушках горных лесов, на субальпийских лугах. В результате расселения из культуры вид широко распространился в европейской части России, а также в Украине, Белоруссии, странах Прибалтики [8].

*H. sosnowskyi* – крупное растение, гемикриптофит, корневищный многолетник в условиях Карелии, в естественном ареале – двулетник или многолетник [6]. Стебель бороздчато-ребристый, листья крупные тройчато- или перисто-рассеченные. Генеративный побег имеет один крупный (до 40–50 см в диаметре) центральный сложный зонтик и несколько меньших по размеру боковых сложных зонтиков. Особенностью *H. sosnowskyi* является наличие у растения цветков трех типов: обоеполюх с нормально развитыми тычинками и пестиком, функционально женских с недоразвитым андроцеом и функционально мужских с недоразвитым гинецеом. Центральное соцветие образовано обоеполюми и функционально женскими цветками, боковые – преимущественно функционально мужскими цветками, поэтому боковые соцветия не образуют плодов [6].

Цветки белые, лепестки краевых цветков зонтика более крупные. Растение энтомофильное. Плод – вислоплодник из двух эллиптических или обратнойцевидных мерикарпиев. *H. sosnowskyi* относится к группе баллистов-анемохоров [6]. По

данным И. Ф. Сацыперовой [6], растение обычно в первый год образует только вегетативные побеги, на второй-третий год цветет, плодоносит и после плодоношения отмирает. В сенильный период *H. sosnowskyi* размножается только вегетативно путем партикуляции корневища, но новые растения развиваются в непосредственной близости к материнскому, поэтому редко зацветают и быстро отмирают [6].

Первые опыты по введению *H. sosnowskyi* в культуру в качестве кормового силосного растения начались в Полярно-альпийском ботаническом саде-институте (Мурманская область) в середине 1946 года, на Северо-Западе России – с 1951 года на базах Научно-опытной станции «Отрадное» Ботанического института им. В. Л. Комарова (Ленинградская область, Приозерский р-н) [6], Областной опытной сельскохозяйственной станции (пос. Сиверская Гагчинского р-на), Ленинградской государственной селекционной станции (ст. Суйда Гагчинского р-на). Его распространение за пределы культурных участков началось примерно с середины 1980-х годов [7].

В Карелии единичные растения *H. sosnowskyi* были впервые зарегистрированы как «беглецы из культуры» в 1990-х годах и отмечены в д. Шотозеро (Пряжинский административный и Олонецкий флористический районы) [1] и в д. Верховье (Прионежский административный и Заонежский флористический районы) [4]. Позднее вид обнаружен в различных районах Карелии вплоть до северных районов республики. Сегодня самая северная точка нахождения вида в республике – окрестности пос. Сумский (к северу от пос. Надвоицы) (Сегежский административный и Кемский флористический районы). Наиболее обширные заросли существуют в районе г. Сортавала (Приладожский флористический район) в окрестностях д. Хаапалампи (к западу от г. Сортавала), в Заонежском и Водлозерском флористических районах (р-н г. Медвежьегорск – пос. Пиндуши) [6].

В системе адвентивных видов флоры Карелии этот вид рассматривается как эуноофит (новейший заносный вид, появившийся на данной территории в последние 20–30 лет), эргазиофит (дикающий интродуцент), эпокофит (вид, распространяющийся семенным и/или вегетативным путем по вторичным местообитаниям) [1]. Вероятно, *H. sosnowskyi* в настоящее время для Карелии можно рассматривать и как аколотофит (вид, распространяющийся самостоятельно, используя нарушенные и антропогенные местообитания).

Для территории Карелии *H. sosnowskyi* является инвазионным видом, играющим отрицательную роль. Растение расселяется преимущественно вдоль автодорог и по рудеральным местообитаниям, формируя здесь монодоминантные заросли. Негативным для природы Карелии последствием распространения *H. sosnowskyi* является формирование в местах обитания вида новых, нехарактерных для Севера, растительных

сообществ, что можно рассматривать как биологическое загрязнение экосистем северного региона. В связи с наличием в органах растения фурукумаринов, попадание которых на кожу человека вызывает фотохимический ожог [6], это растение представляет реальную опасность для людей, особенно детей.

Основным для воспроизводства и диссеминации *H. sosnowskyi* является семенное размножение. Для изучения семенной продуктивности растения в местах массового произрастания *H. sosnowskyi* в окрестностях г. Петрозаводска были заложены пробные площади 10×10 м, внутри каждой из них выделялись 10 учетных площадок по 1 м<sup>2</sup> [3], на которых определялось число генеративных побегов (плотность). На каждой пробной площади выбирали по 10 модельных генеративных побегов, у которых учитывали следующие признаки: число простых зонтиков в сложном зонтике, число цветков и плодов в каждом простом зонтике. При оценке параметров общего соцветия сравнивали средние значения показателей (в силу нормального распределения показателя и достоверности различий количества цветков). Количество плодов, образующихся на одном генеративном побеге и на одном квадратном метре зарослей, определяли расчетным путем.

В условиях Южной Карелии на открытых участках почвы синантропных экотопов в первый год наблюдается массовое семенное заселение *H. sosnowskyi* за счет семян, занесенных с генеративных растений. Плотность ювенильных растений на таких участках составляет в среднем 40 особей на каждый квадратный метр, максимально достигая 65 особей. На второй, реже на третий год большинство молодых растений погибает, у оставшихся развиваются генеративные побеги, плотность которых составляет не более 4–5 на квадратный метр зарослей. Высота генеративных побегов в условиях Карелии в среднем составляет 2 метра, но отдельные побеги достигают высоты 3.3 метра.

В популяциях *H. sosnowskyi* в окрестностях г. Петрозаводска представлены все возрастные группы особей. В настоящее время популяции являются молодыми, онтогенетический спектр – левосторонний с преобладанием ювенильных растений (60%). Доля виргинильных и генеративных растений составляет 24 и 15% соответственно, доля сенильных растений не превышает 1%.

Вегетация *H. sosnowskyi* в условиях Южной Карелии начинается в апреле – мае. Окончание вегетации связано с отмиранием растений после первых сентябрьских заморозков. Соцветия на генеративных побегах появляются в июне. Цветение растений начинается в конце июня и продолжается в среднем 30 дней, до конца августа. Первыми распускаются цветки центрального сложного зонтика, и только через 9–15 дней, после опадания лепестков и начала завязывания плодов в центральном сложном зонтике, распускаются цветки боковых соцветий. Длительность



цветения одного цветка колеблется от 7 до 12 дней, зонтика – от 10 до 20 дней, сложного зонтика – 7 до 24 дней. Надо отметить, что центральные цветки простых зонтиков боковых соцветий практически не успевают раскрыться.

В простых зонтиках плоды созревают от края к центру, в средних цветках зонтика плоды мелкие, и к осени зародыш в них сформирован не полностью. Плоды созревают с конца августа до середины сентября и часто сохраняются на побеге до выпадения снега. При порывах ветра лучи зонтиков обламываются, и созревшие плоды и мерикарпии опадают недалеко от материнского растения.

Генеративный побег в условиях Карелии имеет один центральный сложный зонтик и 4 (реже 2) боковых сложных зонтика.

Центральное соцветие образовано 40–104 (в среднем 65) зонтичками, в каждом из которых от 10 до 92 (в среднем 38) цветков. В центральном сложном зонтике, таким образом, насчитывается от 1.5 до 4 тыс. (в среднем 2.5 тыс.) цветков. Боковые соцветия состоят из 30–60 (в среднем 48) зонтиков, в каждом из которых в среднем 33 цветка, то есть в боковом соцветии формируется до 1.6 тыс. цветков.

Таким образом, общее количество цветков во всех соцветиях одного генеративного побега *H. sosnowskyi* достигает в среднем 8.9 тыс., но потенциальная семенная продуктивность одного генеративного побега, равная количеству обоеполых и женских цветков центрального сложного зонтика, составляет до 2.5 тыс. плодов и до 5 тыс. семян.

Семенная продуктивность центрального сложного зонтика определяет семенную продуктивность всего генеративного побега, именно центральное соцветие является источником плодов и семян для диссеминации. Фактическая семенная продуктивность центрального соцветия, то есть количество созревших плодов, составляет примерно 70 % от потенциальной (из 2.5 тыс. цветков развивается в среднем 1.8 тыс. плодов и 3.6 тыс. семян).

Таким образом, один генеративный побег *H. sosnowskyi* формирует до 3.6 тыс. нормально развитых семян, из которых потенциально может

появиться около 3.6 тыс. проростков. При плотности 4 генеративных побега каждый квадратный метр зарослей *H. sosnowskyi* является источником около 14 тыс. семян. Семена прорастают весной, после периода покоя и обязательной стратификации в течение 4–5 месяцев. Лабораторная всхожесть семян составляет 60 %, полевая – около 56 %. Высокая семенная продуктивность и высокая всхожесть семян обеспечивают интенсивное семенное возобновление растения.

Расселение *H. sosnowskyi* – пример экспансии нового для Севера вида, активного его расселения с занятием новых биотопов и экологических ниш. Можно говорить о натурализации растения на новой для него территории, то есть такой стадии акклиматизации, при которой вид полностью приспосабливается к новым условиям, успешно размножается и не уступает местным видам в борьбе за существование [2]. *H. sosnowskyi* во многих синантропных экотопах Южной Карелии формирует устойчивые самовоспроизводящиеся популяции, способные к самоподдержанию без повторяющегося заноса.

Растение в условиях Южной Карелии сохраняет присущий ему классический «арсенал агрессора» – высокую семенную продуктивность, мощный травостой, эксплерентность, которые и обеспечивают способность этого вида к инвазии. В настоящее время не наблюдается внедрение *H. sosnowskyi* в естественные ненарушенные фитоценозы Карелии, то есть репродуктивный потенциал этого вида пока реализуется только в условиях нарушенных синантропных местообитаний.

Борьба с *H. sosnowskyi* сегодня малоэффективна и ведется лишь попутно при выполнении работ по обустройству обочин дорог. Для уничтожения зарослей необходимо скашивание растений до созревания семян и затем глубокая неоднократная вспашка почвы, то есть эффективными могут быть любые меры, связанные с предотвращением плодоношения растений. Необходимо шире информировать население об этом опасном растении. С точки зрения изучения биологических инвазий необходим мониторинг дальнейшего распространения *H. sosnowskyi* на территории республики и Севера России в целом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипина Г. С. Урбанофлора Карелии. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2002. 200 с.
2. Биологические инвазии в водных и наземных экосистемах. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2004. 436 с.
3. Ипатов В. С., Кирикова Л. А. Фитоценология: Учебник для студентов вузов по спец. «Биология». СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 1997. 316 с.
4. Кравченко А. В. Конспект флоры Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 403 с.
5. Миркин Б. М., Наумова Л. Г. Адвентизация растительности: инвазивные виды и инвазительность сообществ // Успехи современной биологии. 2001. Т. 121. № 6. С. 550–562.
6. Сацыперова И. Ф. Борщевик флоры СССР – новые кормовые растения. Л.: Наука, 1984. 223 с.
7. Скупченко Л. А. Семеноведение борщевика на Севере. Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1989. 117 с.
8. Цвелев Н. Н. Определитель сосудистых растений Северо-Западной России (Ленинградская, Псковская, Новгородская области). СПб.: Изд-во СПХФА, 2000. 781 с.

**ИРИНА МИХАЙЛОВНА ДЗЮБУК**

кандидат биологических наук, доцент кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета ПетрГУ  
*lkrup@petrsu.ru*

**ЛЕОНИД ПАВЛОВИЧ РЫЖКОВ**

доктор биологических наук, профессор кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета ПетрГУ  
*rlp@psu.karelia.ru*

### **ДИНАМИКА СОСТОЯНИЯ ИХТИОФАУНЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В XX ВЕКЕ**

В работе дана оценка динамики состояния ихтиофауны Онежского озера в XX веке. Представлен список рыб и рыбообразных Онежского озера. Выявлены изменения на основе официальных данных по промысловым уловам рыб и с помощью экспертизы массового ихтиологического материала путем использования экспертного балльного подхода, предложенного Л. А. Кудерским. Результаты показали некоторое ухудшение состояния рыбного сообщества к концу XX века, несмотря на усилия по поддержанию рыбных запасов, регулированию промысла и охранным мероприятиям.

Ключевые слова: Онежское озеро, ихтиофауна, видовое разнообразие, динамика, промысловые уловы, экспертная оценка, балльный подход, современное состояние ихтиофауны

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Двадцатый век отмечен интенсификацией влияния человека на природную среду. В настоящее время и в ближайшем будущем невозможно избежать такого воздействия человека на природу, в том числе и на водные экосистемы. Важной задачей при этом становится неистощимое развитие водных экосистем, которое возможно при накоплении знаний о сложных биотических процессах [2].

Особый научный интерес вызывали в XX веке и продолжают вызывать в настоящее время крупные водоемы мира, в том числе и Онежское озеро, результаты исследований которого важны для решения конкретных социальных, экономических и экологических проблем в развитии Северо-Западного региона. Интенсивное использование биологических ресурсов этого крупного водоема обострило вопрос об их сохранении. В XX веке

особенно важным стало сохранение видового разнообразия ихтиофауны Онежского озера, что остается актуальным и в настоящее время. Известно, что при условии интенсивного воздействия человека на природную среду происходит ускорение естественных сукцессионных процессов. Это характерно для большинства водных экосистем, особенно для геологически молодых водоемов Севера. Изменяются гидрологический, гидрохимический и гидробиологический режимы озер, что влечет за собой структурные изменения биоты. Направленность сукцессий ихтиоценозов в водоемах всех типов идет по пути сокращения числа членов и замены доминирующих видов. В первую очередь выпадают реофильные виды, затем – лимнофильные с высокими требованиями к условиям обитания и размножения, затем лимнофильные хищники и бентофаги. Конечная точка в трансформации ихтиоценозов – сокращение состава ихтиофауны до 2–3 видов, как правило, эврифагов с пол-

ным выпадением крупных хищников (щуки). По мере возрастания уровня эвтрофикации количество видовых популяций вначале возрастает, а в дальнейшем идет их закономерное уменьшение [13].

Нерациональный промысел также вызывает перестройки в видовом составе рыб, чаще всего ценные промысловые виды замещаются на малоценные, ранее многочисленные виды становятся редкими, отмечаются изменения в структуре их популяций (возрастной, размерно-весовой, половой структур) и др. Все это в полной мере относится и к ихтиофауне Онежского озера, испытывающей определенный промысловый пресс. В отдельных районах этого водоема продолжается процесс эвтрофирования, что также сказывается на структуре популяций рыб. Поэтому очевидна необходимость оценки многолетних изменений, современной ситуации и прогноза состояния ихтиофауны Онежского озера.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе дана оценка динамики состояния ихтиофауны Онежского озера исходя из официальных данных по уловам с 1960 по 2000 год и с помощью экспертизы массового ихтиологического материала с 1930 по 2000 год путем использования балльного подхода, предложенного Л. А. Кудерским [16], [17].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

По количеству видов рыб Онежское озеро всегда было насыщенным водоемом [6], [10], [11], [19], [12], [15], [14]. В озере встречается 56 видов, подвидов и форм рыб и рыбообразных, относящихся к 16 семействам: Миноговые, Осетровые, Лососевые, Сиговые, Хариусовые, Корюшковые, Карповые, Балиториевые, Щуковые, Вьюновые, Сомовые, Налимовые, Окуневые, Колюшковые, Керчаковые и Угревые (Список 1).

Разнообразие условий обитания в озере определило сильно выраженную внутривидовую изменчивость у ряда видов рыб. Так, форель образует 2 подвида (озерную и ручьевую), паляя – 2 формы (лудную и кряжевую), сиги образуют 9 озерных и озерно-речных форм, налим – 2 формы (озерную и озерно-речную). Только в Онежском озере обитают крупная форма ряпушки (килец) и корюшка онежская [9], [12], [8].

Ихтиофауна Онежского озера сформирована из 7 фаунистических комплексов – бореально-равнинного (25,7 % от общего числа), бореально-предгорного (20 %), арктического пресноводного (14,3 %), понтокаспийского пресноводного (14,3 %), амфибореального (8,6 %), арктического бореального (8,6 %), арктического морского (8,6 %). За последние 40–50 лет число комплексов в Онежском озере не изменилось, и соотношение обилия отдельных комплексов всегда было устойчивым [5].

Онежское озеро относят к сиговым водоемам, так как по ихтиомассе и рыбопродукции

в озере преобладают различные представители рода *Coregonus* – сиг, ряпушка. К многочисленным видам относят корюшку, налима, окуня, ерша, леща, плотву. Наряду с ними определенное промысловое значение имеют такие ценные рыбы, как пресноводный лосось, озерная форель, паляя, судак, щука [15], [14].

Одним из регулирующих факторов структуры и количественного состава ихтиофауны является промысел. По величине учтенных уловов можно судить с определенными допущениями о состоянии и динамике количественных показателей популяции каждого вида рыб. Сведения по учтенным уловам промысловых рыб Онежского озера с 1960 по 2000 год приведены в табл 1.

Величины учтенных уловов рыбы в период с 1960 по 2000 год существенно изменялись. Наибольшие уловы, отмеченные в 1965 и 1985 годах, составили 1739 и 2184 т соответственно. С 1985 по 2000 год показатели учтенного вылова рыбы в озере постепенно и существенно сократились с 2183,7 до 655,1 т. К сожалению, их сокращение продолжается и в начале XXI века.

#### Список 1.

Состав ихтиофауны и круглоротых  
Онежского озера

- I. Семейство Миноговые – *Petromyzontidae*.
  1. Речная минога *Lampetra fluviatilis* (Linnaeus, 1758).
  2. Европейская ручьевая минога *Lampetra planeri* (Bloch, 1784).
- II. Семейство Осетровые – *Acipenseridae*.
  3. Стерлядь *Acipenser ruthenus* (Linnaeus, 1758).
- III. Семейство Лососевые – *Salmonidae*.
  4. Атлантический лосось *Salmo salar morpha sebago* (Girard, 1853).
  5. Кумжа (озерная форель) *Salmo trutta morpha lacustris* (Linnaeus, 1758).
  6. Паляя *Salvelinus lepechini* (Gmelin, 1788).
- IV. Семейство Сиговые – *Coregonidae*.
  7. Европейская ряпушка *Coregonus albula* (Linnaeus, 1758).
  8. Обыкновенный сиг *Coregonus lavaretus* (Linnaeus, 1758).
  9. \*Песядь *Coregonus peled* (Gmelin, 1789).
  10. \*Омуль *Coregonus autumnalis* (Pallas, 1776).
- V. Семейство Хариусовые – *Thymallidae*.
  11. Европейский хариус *Thymallus thymallus* (Linnaeus, 1758).
- VI. Семейство Корюшковые – *Osmeridae*.
  12. Европейская корюшка *Osmerus eperlanus* (Linnaeus, 1758).
- VII. Семейство Щуковые – *Esocidae*.
  13. Щука *Esox lucius* (Linnaeus, 1758).
- VIII. Семейство Угревые – *Anguillidae*.
  14. Речной угорь *Anguilla anguilla* (Linnaeus, 1758).
- IX. Семейство Карповые – *Cyprinidae*.
  15. Синец *Abramis ballerus* (Linnaeus, 1758).
  16. Лещ *Abramis brama* (Linnaeus, 1758).
  17. Уклейка *Alburnus alburnus* (Linnaeus, 1758).
  18. Жерех *Aspius aspius* (Linnaeus, 1758).
  19. Густера *Blicca bjoerkna* (Linnaeus, 1758).

20. Карась *Carassius carassius* (Linnaeus, 1758).  
 21. Пескарь *Gobio gobio* (Linnaeus, 1758).  
 22. Елец *Leuciscus leuciscus* (Linnaeus, 1758).  
 23. Язь *Leuciscus idus* (Linnaeus, 1758).  
 24. Голавль *Leuciscus cephalus* (Linnaeus, 1758).  
 25. Чехонь *Pelecus cultratus* (Linnaeus, 1758).  
 26. Гольян *Phoxinus phoxinus* (Linnaeus, 1758).  
 27. Плотва *Rutilus rutilus* (Linnaeus, 1758).  
 28. Красноперка *Scardinius erythrophthalmus* (Linnaeus, 1758).
- X. Семейство Балиториевые – *Balitoridae*.  
 29. Усатый голец *Barbatula barbatula* (Linnaeus, 1758).
- XI. Семейство Бьюновые – *Cobitidae*.  
 30. Щиповка *Cobitis taenia* (Linnaeus, 1758).
- XII. Семейство Сомовые – *Siluridae*.  
 31. Обыкновенный сом *Silurus glanis* (Linnaeus, 1758).
- XIII. Семейство Налимовые – *Lotidae*.  
 32. Налим *Lota lota* (Linnaeus, 1758).
- XIV. Семейство Колюшковые – *Casterosteidae*.  
 33. Трехиглая колюшка *Casterosteus aculeatus* (Linnaeus, 1758).  
 34. Девятииглая колюшка *Pungitius pungitius* (Linnaeus, 1758).
- XV. Семейство Окуневые – *Percidae*.  
 35. Обыкновенный судак *Sander lucioperca* (Linnaeus, 1758).  
 36. Окунь *Perca fluviatilis* (Linnaeus, 1758).  
 37. Ерш *Gymnocephalus cernuus* (Linnaeus, 1758).
- XVI. Семейство Керчаковые – *Cottidae*.  
 38. Обыкновенный подкаменщик *Cottus gobio* (Linnaeus, 1758).  
 39. Подкаменщик пестроногий *Cottus poecilopus* (Heckel, 1836).  
 40. Четырехрогий бычок, рогатка *Trigloopsis quadricornis* (Linnaeus, 1758).

\* – Виды вселялись в озеро, но не произошло их натурализации.

За последние шестьдесят лет произошло уменьшение запасов озерного лосося, ручьевой форели, в то время как количество корюшки, колюшки и других малоценных промысловых видов рыб увеличилось. Основной причиной структурного нарушения рыбного сообщества Онежского озера явился тотальный вылов ценных промысловых видов рыб. По сравнению с 1930 годом в 1996 году уловы лосося снизились в 3 раза, форели – в 15 раз, гольца – в 20 раз и сига – в 1,5 раза. В 1930-е годы в уловах доминировали сиговые и лососевые. В 1950-е годы произошло уменьшение величины вылова ценных промысловых видов рыб. Одновременно в уловах увеличилась доля корюшки и колюшки, что было связано с нарастающей антропогенной нагрузкой на водоем. В это время в структуре уловов на Онежском озере ядро составляли корюшка, ряпушка и налим, в меньшей степени были представлены сиг, окунь, плотва и судак. Особо следует отметить, что характерной чертой рыбного сообщества Онежского озера является то, что всегда в уловах доминирует группа планктофагов (65–75 % в общем улове) [5].

Таблица 1  
 Учетные уловы промысловых рыб  
 в карельской части Онежского озера, т  
 (по материалам Карелрыбвода)

Виды рыб	Годы								
	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000
Лосось	2.6	7.6	4.8	16.0	9.1	10.2	17.8	0.3	3.2
Палия	14.5	11.6	2.5	2.3	7.3	6.9	0.5	0.4	1.0
Форель	0.3	0.1	–	–	0.3	0.1	–	0.6	0.1
Харнус	0.3	–	–	–	0.04	0.1	–	–	–
Сиг	28.7	35.2	22.4	61.1	47.8	79.9	43.6	4.2	19.9
Ряпушка	621.0	1026.2	266.2	500.1	780.9	183.5	454.8	257.0	341.8
Корюшка	220.4	370.3	353.1	558.2	383.9	745.0	636.6	368.0	515.2
Налим	60.6	3.0	90.1	76.8	65.2	156.8	67.9	38.1	20.5
Судак	28.6	37.0	30.5	49.8	21.3	31.1	15.3	5.1	7.6
Лещ	24.9	13.8	8.8	11.8	12.3	25.5	13.1	2.9	4.9
Щука	27.5	11.1	8.8	9.7	3.6	9.1	2.6	0.3	1.7
Окунь	29.1	4.9	4.0	14.9	38.6	20.9	7.6	12.5	10.3
Плотва	23.3	3.1	10.7	10.5	29.9	11.2	9.1	35.8	4.7
Ерш	1.7	0.2	–	–	25.0	3.4	4.0	6.8	–
Язь	2.6	–	1.0	–	1.1	0.4	–	–	0.1
Колюшка	–	–	–	–	76.9	76.9	20.4	19.8	–
Килец	–	–	–	–	–	0.6	–	–	0.15
Прочие	173.0	244.7	220.5	213.8	93.0	298.1	118.3	–	27.8
Итого	1261.1	1738.6	1023.4	1523.0	1504.3	2183.7	1398.1	1654.8	655.1

В 1960–70-х годах доля ряпушки в уловах составляла 26–59 %, а корюшки – 21–35 %. В этот период относительно постоянными оставались уловы сига и судака, тогда как уловы леща и щуки снизились почти в 3 раза. Добыча окуня, плотвы, ерша составляла 0,5–4,3 % всего улова. В 1970 году при доминировании планктофагов несколько сократились промысловые запасы озерного лосося. С целью повышения запасов этого вида был введен запрет на вылов неполовозрелых особей, что дало положительные результаты [18]. В этот период произошли некоторые изменения в видовом составе рыб Онежского озера, в результате саморасселения из озер бассейна реки Шуи в 1971 году появился новосел – пелядь [1]. Почти одновременно в результате акклиматизационно-рыбоводных работ видовой состав ихтиофауны пополнился стерлядью и омулем. К сожалению, в дальнейшем натурализации пеляди и омуля не произошло. В конце 1970-х – начале 1980-х годов почти в 6 раз уменьшились уловы палии. Если в 1975 году ее запасы в озере считались удовлетворительными [7], то уже в 1987 году расценивались как низкие, и на вылов данной рыбы установили запрет.

Улучшение условий воспроизводства лосося (прекращение лесосплава на нерестовых реках и очистка их от отходов сплавляемой древесины) привело к увеличению его уловов в 1990-е годы. Высокими оставались уловы корюшки и ряпушки. В этот период отмечено стойкое уменьшение промысла палии, сига, налима, судака, леща, щуки, окуня. В целом для данного периода была характерна низкая интенсивность промысла, хотя запасы многих видов расценивались как удов-

летворительные. Вероятно, такая ситуация была следствием социально-экономических перестроек в стране. К 1990-м годам этот водоем превратился из сигового в сигово-корюшково-окуневый. Это значит, что произошли изменения в трофических связях рыбного сообщества озера (уменьшение численности хищников, увеличение численности планктофагов и т. д.), что отразилось на скорости роста, времени полового созревания и плодовитости рыб. К 2000 году на высоком уровне остались уловы ряпушки и корюшки. Благодаря искусственному воспроизводству несколько увеличились уловы лосося и палии. Однако отмечен невысокий вылов налима, судака, леща и щуки при низком улове рыб в целом по озеру (655,1 т).

Учитывая, что статистические сведения, особенно в последнее десятилетие, не полностью отражают фактические уловы рыбы, для сравнения мы даем общую оценку состояния ихтиофауны в Онежском озере с помощью экспертизы массового ихтиологического материала путем использования балльного подхода [16], [17]. В табл. 2 и 3 приведены обобщенные материалы по количественной оценке (индексам) состояния отдельных видов рыб и ихтиофауны Онежского озера в 1930, 1970 и 2000 годах. В 1930 году для всех рассмотренных видов рыб не требовались специальные рыбоохранные мероприятия. В это время состояние рыбных запасов было удовлетворительным, негативное влияние антропогенных факторов практически не проявлялось. В 1970 году, когда начало ухудшаться качество водной среды и появились некоторые деформации в структуре ихтиофауны, возникла необходимость принятия конкретных мер по сохранению рыбных ресурсов. В частности, два вида (угорь и щиповка) нуждались в сохранении через Красную книгу России, двум видам (лосось и палия) было необходимо интенсивное воспроизводство в искусственных условиях, и семь видов (форель, ряпушка, сиги, лещ, судак, голавль и жерех) нуждались в регулировании промысловых запасов.

В 2000 году дальнейшее ухудшение состояния водной среды, продолжающиеся изменения в структуре рыбного сообщества, а также социально-экономическая перестройка в стране выдвинули необходимость новых дополнительных требований к сохранению рыбного населения Онежского озера. Из 25 анализируемых видов рыб 12 видам (из них 1 непромысловый – голянь) не были нужны охранные мероприятия. Среди оставшихся 13 видов охране через Красную книгу подлежали 8 видов (пресноводный лосось, озерная форель, палия, щиповка, угорь, елец, красноперка и жерех) (табл. 2 и 3). Однако, в связи с изменением статуса Красной книги, в настоящее время трудно рекомендовать занесение в нее пресноводного лосося, озерной форели и палии, так как сохранение их численности может быть обеспечено путем регулирования рыболовства и увеличения объемов искусственного воспроизводства.

Для сохранения высокой численности ряпушки, леща и щуки достаточно продолжить регулирование их промысла. Для судака и сига наряду с регулированием рыболовства необходимо использовать воспроизводство в искусственных условиях.

**Таблица 2**  
Индексы состояния основных видов рыб Онежского озера по годам

Виды рыб	Годы		
	1930	1970	2000
Лосось	2 + 2	2 + 4	2 + 4 (5)
Форель	2 + 2	2 + 3	2 + 4 (5)
Палия	2 + 2	2 + 4	2 + 5
Ряпушка	1 + 2	1 + 3	1 + 3
Корюшка	1 + 2	1 + 2	1 + 2
Сиги	2 + 2	2 + 3	2 + 4
Налим	2 + 2	2 + 2	2 + 2
Лещ	4 + 2	4 + 3	4 + 3
Плотва	1 + 2	1 + 2	1 + 2
Судак	4 + 2	4 + 3	4 + 4
Окунь	1 + 2	1 + 2	1 + 2
Ерш	1 + 2	1 + 2	1 + 2
Щука	1 + 2	1 + 2	2 + 3
Уклея	1 + 2	1 + 2	1 + 2
Густера	2 + 2	2 + 2	2 + 2
Язь	2 + 2	2 + 2	2 + 2
Хариус	2 + 2	2 + 2	2 + 2
Колошка	1 + 1	1 + 1	1 + 2
Щиповка	4 + 1	4 + 5	5 + 5
Угорь	5 + 2	5 + 5	5 + 5
Елец	2 + 2	2 + 2	2 + 2
Голавль	2 + 2	2 + 3	2 + 5
Красноперка	4 + 2	4 + 1	5 + 5
Жерех	4 + 2	4 + 3	4 + 5
Голянь	4 + 1	4 + 1	4 + 1

Примечание. Левая цифра показывает численность и распространенность:

- 1 – широко распространенный, многочисленный;
- 2 – широко распространенный, малочисленный;
- 3 – ограниченно распространенный, многочисленный;
- 4 – ограниченно распространенный, малочисленный;
- 5 – редкий.

Правая цифра показывает промысловое значение и охранные мероприятия:

- 1 – непромысловый, охранные мероприятия не требуются;
- 2 – промысловый, охранные мероприятия не требуются;
- 3 – промысловый, охраняется Правилами рыболовства;
- 4 – промысловый, необходимо искусственное воспроизводство запасов;
- 5 – занесен в Красную книгу.

На основании приведенных количественных показателей можно рассчитать усредненный показатель для общей оценки изменений состояния ихтиофауны за исследуемый период в целом для озера. Для этого мы использовали формулу, предложенную Л. А. Кудерским, которая имеет следующий вид:

$$C = (N + L + R) / 3,$$

Таблица 3

Количество видов рыб Онежского озера с конкретными значениями индексов состояния

Баллы	1	2	3	4	5	Итого
1930 год						
1	1	7	–	–	–	8
2	–	10	–	–	–	10
3	–	–	–	–	–	–
4	2	4	–	–	–	6
5	–	1	–	–	–	1
Итого	3	22	–	–	–	25
1970 год						
1	1	6	1	–	–	8
2	–	5	3	2	–	10
3	–	–	–	–	–	–
4	2	–	3	–	1	6
5	–	–	–	–	1	1
Итого	4	11	7	2	2	25
2000 год						
1	–	6	1	–	–	7
2	–	5	1	3	2	11
3	–	–	–	–	–	–
4	1	–	1	1	1	4
5	–	–	–	–	3	3
Итого	1	11	3	4	6	25

где С – усредненный показатель состояния вида в водоеме;

N – процент видов, для которых индекс не изменился за исследуемый период;

L – средняя левая цифра индекса в процентах к такой же средней цифре последующего периода;

R – средняя правая цифра индекса в процентах к такой же средней цифре последующего периода.

Выполненные расчеты показывают, что средний показатель индекса состояния ихтиофауны в Онежском озере в 1930 году равнялся 2,28 + 1,88, в 1970 году – 2,28 + 2,56 и в 2000 году – 2,40 + 3,12. Сохранение левого показателя индекса в 1970 году свидетельствует о том, что в распределении и численности рыб за период с 1930 по 1970 год изменений не произошло. Хотя на более коротких промежутках исследуемого периода, как было показано выше (по учтенным уловам), такие изменения в состоянии отдельных видов рыб наблюдались. Однако они в определенной степени устранялись путем естественных регуляторных процессов в рыбном сообществе и, конечно, проводимыми мероприятиями. Увеличение правого показателя в этот же период отмечает существенное снижение промыслового значения некоторых видов рыб и настоятельно требует усиления охранных мероприятий для них.

Увеличение левого индекса к 2000 году показывает на некоторое сокращение численности и распространенности рыб в экосистеме, а повышение правого индекса указывает на увеличение количества видов, которым необходимы охранные мероприятия и искусственное воспроизводство.

Для определения усредненного показателя «С» были произведены соответствующие расчеты по приведенной выше формуле. Они показали, что величина «С» для периода 1930–70-х годов равняется 73,4 %, для 1970–2000-х годов – 77,6 %, а для периода 1930–2000-х годов – 64,7 %. При благоприятном состоянии ихтиофауны исследуемый показатель должен стремиться к 100 %, а при неблагоприятных условиях – к нижней границе, свидетельствующей о катастрофе ихтиофауны. Рассчитанная теоретическая величина этой границы равняется 26,9 %. Это значит, что усредненный показатель состояния ихтиофауны в Онежском озере в исследуемые периоды свидетельствует о ее благоприятном состоянии. Наблюдалось некоторое увеличение показателя в 2000 году по сравнению с 1970 годом, что может быть связано с интенсивным положительным влиянием охранных и рыбоводных мероприятий. Однако если сравнить показатель 2000 года с таковым 1930 года, то выявляется определенная динамика в состоянии ихтиофауны Онежского озера в сторону ухудшения.

## ВЫВОДЫ

Чтобы объективно охарактеризовать состояние рыбного сообщества любого водоема, необходимо использовать результаты, полученные с помощью всех доступных методов экспертной оценки. Официальная статистика промысловых уловов полностью не отражает фактических уловов разных видов рыб и их запаса, но все же дает определенное представление о состоянии ихтиофауны водоема, которое существенно дополняют результаты применения экспертного балльного подхода, предложенного Л. А. Кудерским [16], [17].

По изменению количественных показателей как в целом уловов по озеру, так и уловов отдельных видов рыб, а также на основе изменения показателя состояния ихтиофауны Онежского озера можно констатировать, что в течение XX века наблюдалось некоторое ухудшение состояния рыбного сообщества, несмотря на усилия по поддержанию рыбных запасов, регулированию промысла и охранным мероприятиям. Однако современное состояние ихтиофауны в целом можно оценивать как относительно благополучное, но при этом надо обратить особое внимание на необходимость ужесточения охранных мероприятий, регулирование рыбного промысла на водоеме и увеличение объемов искусственного воспроизводства отдельных видов рыб. Одновременно следует отметить, что в дальнейшем сохранение и улучшение состояния ихтиофауны Онежского озера возможно путем систематического проведения названных охранных, регуляторных и других мероприятий при условии сохранения природных качеств водной среды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Б. М., Александрова Т. Н., Гуляева А. М., Покровский В. В. Рыбы Онежского озера и особенности их распределения // Материалы VI конф. по изучению внутренних водоемов Прибалтики. Петрозаводск, 1971. Ч. 1. С. 104–105.
2. Алимов А. Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем. СПб.: Наука, 2001. 147 с.
3. Атлас пресноводных рыб России / Под ред. Ю. С. Решетникова. М.: Наука, 2002. Т. I. 378 с.
4. Атлас пресноводных рыб России / Под ред. Ю. С. Решетникова. М.: Наука, 2002. Т. II. 252 с.
5. Бабий А. А. О динамике структуры рыбной части сообщества Онежского озера // Озерные экосистемы, биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: Материалы междунар. конф. Минск; Нарочь: Изд-во БГУ, 2003. С. 564–567.
6. Берг Л. С. Рыбы пресных вод СССР и сопредельных стран. М.; Л.: Академия наук СССР, 1948. Т. 1. 466 с.
7. Биске Г. С., Григорьев С. В., Малинина Т. И., Смирнов А. Ф., Эпштейн Е. М. Онежское озеро. Петрозаводск: Карелия, 1975. 164 с.
8. Блинов В. В., Сергеева Т. И., Веденеев В. П. Динамика численности планктофагов и прогноз их вылова в Карельской части Онежского озера // Крупные озера Европы – Ладожское и Онежское: Тезисы докл. междунар. конф. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1996. С. 23–25.
9. Веденеев В. П. Биология и промысел сига лудоги северо-восточной части Онежского озера // Рыбы Онежского озера и их хозяйственное использование: Сб. науч. тр. Л.: Наука, 1983. Вып. 205. С. 98–107.
10. Герд С. В. Озера Карелии и их рыбные богатства. Петрозаводск: Госиздат Карело-Финской ССР, 1944. 125 с.
11. Герд С. В. Озера Карелии и их рыбные богатства. Петрозаводск: Госиздат Карело-Финской ССР, 1951. 88 с.
12. Гуляева А. М., Покровский В. В. Современный состав ихтиофауны и промысловые уловы рыбы в Онежском озере // Биологические основы рационального использования рыбных ресурсов Онежского озера и повышение его рыбопродуктивности. Л.: Наука, 1984. С. 4–10.
13. Костоусов В. Г. Структура ихтиоценозов и направленность сукцессий в них на примере озер национальных парков Республики Беларусь // Озерные экосистемы, биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: Материалы междунар. конф. Минск: Изд-во БГУ, 2003. С. 589–591.
14. Костылев Ю. В. Рыбы. Петрозаводск: Карелия, 1990. 149 с.
15. Кудерский Л. А. Состояние рыбных запасов больших озер СССР // Проблемы исследования крупных озер СССР. Л.: Наука, 1985. С. 28–36.
16. Кудерский Л. А. Охрана фауны рыб во внутренних водоемах Северо-Запада и Севера европейской части СССР // Сб. науч. тр. ГосНИОРХ. Л.: ГосНИОРХ, 1989. Вып. 290. С. 129–141.
17. Кудерский Л. А. Мониторинг состояния биоразнообразия в границах ихтиогеографических подразделений // Крупные озера Европы – Ладожское и Онежское: Тезисы докл. междунар. конф. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1996. С. 10–12.
18. Мельянцев В. Г. Рыбы. Петрозаводск: Карелия, 1974. 149 с.
19. Рыжков Л. П., Гуляева А. М. О мероприятиях по увеличению рыбных запасов Онежского озера // Предварительные результаты работ комплексной экспедиции по исследованию Онежского озера. Петрозаводск: Карельское книжное изд-во, 1970. Вып. 4. С. 3–6.
20. Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения / Под ред. З. С. Кауфмана. Л.: Наука, 1990. 264 с.

УДК 598.2(470.11)

**ТАТЬЯНА ЮРЬЕВНА ХОХЛОВА**

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник,  
доцент  
hokhlova@karelia.ru

**МАРИНА ВЛАДИМИРОВНА ЯКОВЛЕВА**

кандидат биологических наук, научный сотрудник заповедника «Кивач»  
kivach@onego.ru

**АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ АРТЕМЬЕВ**

доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник,  
доцент Института биологии КарНЦ РАН  
artem@karelia.ru

### ПТИЦЫ КЕНОЗЕРСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА (НЕВОРОБЬИНЫЕ – *NON PASSERINE*)

В статье обобщены данные, собранные на территории Кенозерского национального парка (Архангельская область) в 1995–2003 годах. Приведены сведения о характере пребывания, уровне численности, сроках фенологических явлений в жизни 108 видов неворобьиных птиц. Представлена подробная информация о встречах и находках гнезд редких и малочисленных видов. Особое внимание уделено видам, находящимся у границ своих ареалов.

Ключевые слова: орнитофауна, гнездовой ареал, граница распространения, редкие птицы, Кенозерский национальный парк, Архангельская область

Кенозерский государственный национальный парк (КГНП) – крупный охраняемый природный резерват на юго-западе Архангельской области у границы с Республикой Карелия. Занимает площадь 138700 га в пределах Каргопольского и Плесецкого районов области (см. рисунок).

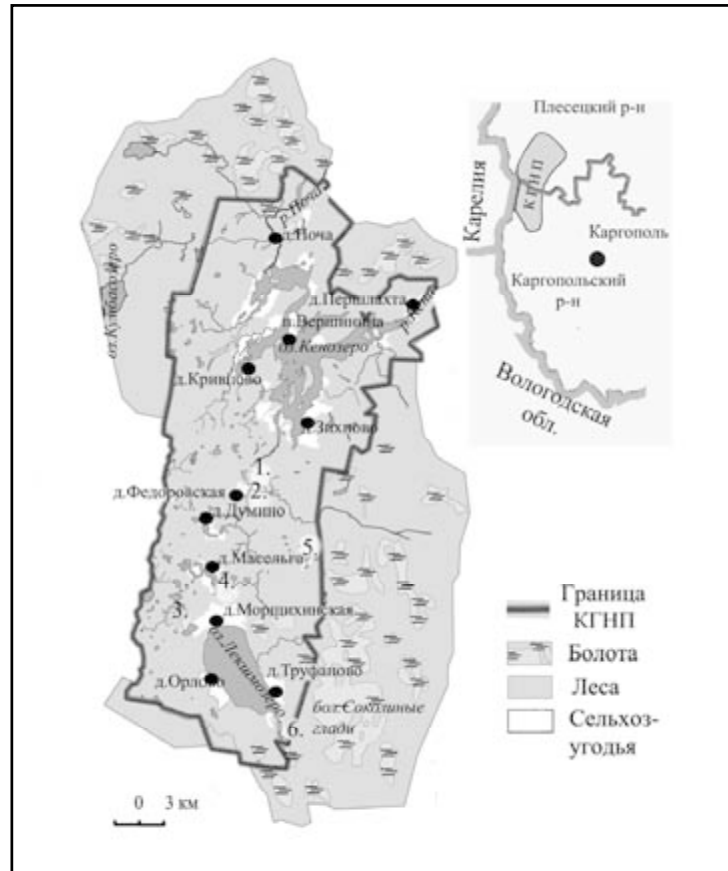
Под охрану взята территория, уникальная по своему географическому положению и чрезвычайно интересная по природным особенностям [30]. Парк лежит на водоразделе бассейнов Белого и Балтийского морей. Его северная часть (Кенозерье) располагается на юго-восточной границе Балтийского щита, южная (Лекшмозерье) – на северо-западной периферии Русской платформы, что обуславливает существенные различия природных условий (климатических, почвенных, ландшафтных и пр.) в разных участках парка. Его территория с обширной сетью болот и водоемов разного типа отличается высоким ландшафтным и биотопическим разнообразием, включает широкий спектр не только есте-

ственных, но и антропогенных сообществ. Наконец, КГНП находится у 62° с. ш. в зоне контакта нескольких флористических и фаунистических комплексов, что определяет большое видовое разнообразие его флоры и фауны и обилие в их составе видов, обитающих на пределе ареалов. Однако до организации КГНП в 1991 году эти территории оставались вне поля зрения специалистов.

Первый неполный список птиц (архив КГНП) был составлен в период проектирования парка сотрудником северного филиала ВНИИОЗ В. Н. Корепановым (г. Архангельск). В 1995 году по инициативе администрации парка к инвентаризации орнитофауны были привлечены сотрудники лаборатории зоологии Института биологии Карельского научного центра РАН и заповедника «Кивач». В задачи исследования входило:

- описание видового состава с оценкой характера пребывания и уровня численности всех видов птиц;





Картограмма Кенозерского государственного национального парка (КГНП)

Примечание. 1 – оз. Большое Порженское; 2 – оз. Малое Порженское; 3 – оз. Наглимозеро; 4 – оз. Масельгское; 5 – озера Макары; 6 – оз. Монастырское.

- выявление и описание размещения редких и ценных видов;
- оценка распределения птиц разных экологических групп по территории парка в разные сезоны года;
- описание населения птиц на участках – памятниках природы;
- разработка предложений по мерам охраны ценных видов и сообществ;
- разработка рекомендаций по организации экологических троп и туристических маршрутов.

Первые результаты этих работ опубликованы в серии кратких статей и сообщений [25], [21], [22], [23], [2] и др. Исследования показали высокую значимость территории парка для сохранения северных популяций многих видов птиц, в том числе занесенных в Красные книги разного уровня [29], [1]. Это послужило основанием для включения Кенозерья (парка с прилегающими участками) в каталог «Ключевые орнитологические территории международного значения в Европейской России» [27] и международный перечень важнейших орнитологических территорий Европы [31].

В 2002 году в книге «Природное и культурное наследие Кенозерского национального пар-

ка» [30] была опубликована общая характеристика его орнитофауны и полный список птиц (263 вида), составленный на основе анализа литературных сведений о птицах сопредельных территорий и оригинальных данных, собранных в пределах парка к 2000 году. К тому времени в границах парка было встречено 168 видов; гнездование 91 из них подтверждено находками гнезд и выводков. Исследования последующих лет позволили расширить список встреченных птиц и проверить статус многих видов. Особый интерес представляют материалы, позволяющие уточнить границы распространения ряда видов, обитающих на северо-западе России на периферии своих ареалов [29], [21], [23], [32], [2] и др.

За период работ получены сведения о пребывании в парке 201 вида птиц, в том числе 143 гнездящихся (подтверждено гнездование 103 из них) и 32 вероятно гнездящихся. Анализ данных показал, что при большом сходстве населения птиц парка и соседних районов Карелии существуют заметные различия в видовом составе, особенностях пребывания и фенологии основных явлений годового цикла птиц этих территорий. Данная публикация содержит материалы, позволяющие судить о характере пребывания в КГНП, уровне численности, сроках миграций и гнездования 108 видов нево-

робьиных птиц (*Non passerine*), встреченных в его границах к настоящему времени.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работы лаборатории зоологии Института биологии КарНЦ РАН по инвентаризации орнитофауны Кенозерского национального парка проходили в 1995–2003 годах при финансовой поддержке КГНП (1995–2000 гг.), Союза охраны птиц России (1997, 1999 гг.), Министерства охраны окружающей среды и регионального центра Хяйме, Финляндия (2001–2003 гг.).

Всего в разные сезоны года осуществлено 12 выездов, что позволило почти полностью охватить гнездовой и послегнездовой периоды и частично – периоды весенней и осенней миграций (см. таблицу). Большая часть данных по гнездованию птиц собрана в 1995–2000 годах, основная информация о ситуации в предотлетный период и во время миграций – в 2001–2003 годах при посещениях парка во время работ по оценке осенних концентраций гусей и журавлей в Каргопольском районе [24], [25], [28], [26], [33], [7].

Сроки проведения работ в Кенозерском национальном парке в 1995–2003 годах

№	Год	Сроки работ		Участники
		в границах КГНП	за пределами КГНП	
1	1995	15–28.07		Т. Хохлова, М. Яковлева
2	1996	26.06–09.07		Т. Хохлова, М. Яковлева
3	1996	26.08–05.09	06–07.09	Т. Хохлова, А. Артемьев, М. Яковлева
4	1997	01–06, 09–14.06	06–08.06	Т. Хохлова, А. Артемьев, М. Яковлева
5	1997	04–15.07		Т. Хохлова, А. Артемьев, Дж. О'Салливан
6	1999	07–16.08		Т. Хохлова, А. Артемьев, М. Яковлева
7	2000	26.09–05.10		Т. Хохлова, А. Артемьев, Л. Фирсова, М. Яковлева
8	2001	05.09–07.09	08–11.09	Т. Хохлова, Э. Келломьяки, Н. Рипатти
9	2001	21–24.09, 09–10.10	25.09–08.10	Т. Хохлова, А. Артемьев, В. Высоцкий, М. Яковлева
10	2002	30.04–03.05	24–30.04	Т. Хохлова, Э. Келломьяки, Н. Рипатти с группой финских орнитологов-любителей
11	2002	16, 27–29.08	17–26.08	Т. Хохлова, А. Артемьев, М. Яковлева
12	2003	02.09, 12–13.09	03–11.09	Т. Хохлова, А. Артемьев, М. Яковлева

До начала полевых работ был составлен предварительный список птиц КГНП, в который было включено 263 вида, в том числе 189 гнездящихся и вероятно гнездящихся на северо-западе России. Основой послужил список птиц Карелии [6], откорректированный в соответствии с данными о распространении отдельных видов на ближайших обследованных территориях – в Заонежье ([19], [20], [6] и др.) и Водлозерском национальном парке ([3], [4], [14], [17] и др.). Также использованы сведения о птицах сопредельных территорий Архангельской, Вологодской и Ленинградской областей [5], [11], [9], [18], [15], [16]. Основной задачей полевых работ была проверка предполагаемого статуса видов из предварительного списка, сбор данных, подтверждающих их гнездование. Особое внимание уделялось сбору информации о редких видах, выявлению их гнездовых участков, поиску гнезд и выводков.

Основные трудности работы были связаны со слабой изученностью территории парка. Несмотря на то что КГНП создавался, прежде всего, для сохранения памятников северной деревянной архитектуры, в его границы вошли обширные труднодоступные участки, покрытые лесами и болотами. Поэтому первые выезды пришлось посвящать рекогносцировочным работам, в том числе выявлению всего спектра местообитаний птиц и их распределения по территории парка. Из-за сложного ландшафта и слаборазвитой сети дорог наряду с привычными автомобилями и моторными лодками приходилось использовать самые разные средства передвижения, включая выючных лошадей, плоты, долбленые лодки-дубаны, тракторы, водометный катер и пр. В организации экспедиций неоценимую помощь оказала администрация парка, а в сборе информации – местные жители, многие из которых отличались большой наблюдательностью и неплохим знанием птиц. С помощью опросов были получены предварительные сведения о расположении токов, послегнездовых концентраций разных видов водоплавающих, гнездовых участков и выводков многих редких видов и прочие данные, которые подтвердились впоследствии.

В послегнездовое время наряду с визуальными наблюдениями проведена серия отловов птиц с помощью 14 паутинных сетей: 28.08–06.09.1996 у деревень Моршихинская (48 часов), Вершинина (48) и Кривцово (24) и 11–15.08.1999 у д. Моршихинской. У пойманных птиц определяли вид, пол, подробно описывали состояние оперения (линьку) по методике Г. А. Носкова и А. Р. Гагинской [10]. Всего отловлено и окольцовано 288 птиц 36 видов, среди которых белоспинный дятел, коростель, варакушка, славка-черноголовка, луговой конек и другие редкие и малочисленные в парке виды.

Учет всех встреченных птиц (в 50-метровой полосе и по поющим самцам на дальность слышимости) проводили на 2 маршрутах, предлагаемых в качестве экологических троп: д. Видягино

– Порженские озера (6 км) и д. Морщихинская – оз. Наглимозеро (3 км). На остальных маршрутах отмечали все встречи редких и малочисленных птиц, выводки тетеревиных и хищных птиц. На всех озерах описывали видовой состав и регистрировали все выводки водоплавающих, ежегодно в разные сезоны года проводили учеты водоплавающих на оз. Лекшмозере (круговой лодочный маршрут вдоль побережья – 12 км), оценивали их предотлетные концентрации с высокого берега (от кладбища) на оз. Монастырском с помощью подзорных труб и биноклей.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Полный список птиц парка, составленный с учетом видового состава населения соседних территорий, включает представителей 18 отрядов. Самому крупному из них – воробьиным (*Passeriformes*) – принадлежит 107 видов. Неворобьиные (*Non passerine*) представлены 16 отрядами и 156 видами. Две трети этих видов (98) относятся к 7 отрядам птиц, связанных с водноболотными угодьями: гагары, поганки, веслоногие, голенастые, пластинчатоклювые, журавлеобразные, ржанкообразные. На территории парка встречены представители всех 17 отрядов неворобьиных птиц, включая ряд редких залетных (белый аист, серая цапля, малый погоныш, зимородок, удод и др.) и большинство северных видов, появляющихся только в периоды миграций. Находками гнезд и выводков подтверждено гнездование 44 видов птиц, в том числе ряда видов, обитающих здесь на пределе ареала – чомги, выпя, лебедя-кликлуна, широконоски, малой чайки, белоспинного дятла и др. Найдены на гнездовании 7 видов хищных птиц, включая скопу и орлана-белохвоста.

### Отряд Гагары – *Gaviiformes*

1. **Краснозобая гагара** – *Gavia stellata* (*Pontopp.*). Вид, находящийся на южном пределе гнездового ареала. В летнее время редка, на пролете более обычна. Отдельные пары, возможно, гнездятся. На Кенозере у п. Вершинина встречены: 10.07.1997 – 2 пары, в июле 2000 года – 1 пара, 10.08.1999 – 1 птица. На других озерах отмечены: на Перозере – 1 пара 12.07.1997, на Б. Порженском – 6 птиц 13.08.1999, на Лекшмозере – 2 (одна мельче, возможно, молодая) 27.08.2002, на Масельском (сообщение В. Нефедова) – стая около 20 птиц на осеннем пролете в начале 1990-х годов.
2. **Чернозобая гагара** – *G. arctica* (*L.*). Обычна на гнездовании и пролете. В парке и его ближайших окрестностях обитает не менее 400 пар. Встречается на всех водоемах КГНП, входит в число фоновых видов водоплавающих. Прилетает в начале мая. Выводки появляются в конце июня – начале июля (наиболее ранняя встреча пары с двумя пуховичками – 01.07.1996 у д. Думино). Птицы, гнездящиеся

на лесных озерах, часто летают за кормом на крупные водоемы: в июле постоянно можно видеть гагар, пролетающих над лесом с рыбой в клювах. Так, 01.07.1996 на лодочном маршруте вокруг Лекшмозера на 12 км зарегистрировано 18 птиц, 05.07.1997 на этом же водоеме на 6 км – 13 птиц. На Наглимозере 28.08.1996 собралось 15 птиц, включая выводок с 2 крупными птенцами. В начале осени на Лекшмозере от д. Морщихинской до д. Труфаново зарегистрировано: 06.09.2001 – 10 птиц, 12.09.2003 – 17 птиц, 22.09.2001 – 8 птиц. В более поздние сроки (27.09–03.10.2000) на разных водоемах парка встречены только одиночные птицы.

### Отряд Поганки – *Podicipitiformes*

3. **Серошекая поганка** – *Podiceps griseigena* (*Bodd.*). Довольно обычна, но немногочисленна. Найдена на гнездовании как в южной, так и в северной части парка. Самка, сидящая на гнезде, отмечена 12.07.1997 на Гамозере (окрестности д. Монино). В тростниках на Лекшмозере зарегистрированы: 08.07.1996 – гнездо с 4 насиженными яйцами, 02.07.1997 – 4 пары без птенцов, 08.08.1999 – 4 пары с выводками (с птенцами, достигшими  $\frac{3}{4}$  размера взрослой птицы). Одна пара регулярно гнездится на оз. Монастырском: 05.07.1996 найдено гнездо с 2 слабонасиженными яйцами, 05.06.1997 – недостроенное гнездо, 05.07.1997 – самка на гнезде с недавно выплывшими птенцами. Птицы встречались на озерах до конца сентября. Последняя встреча на оз. Монастырском – 22.09.2001. В период осеннего пролета 28–29.09.2000 две птицы отмечены также на Кенозере у п. Вершинина и 4 – у д. Першлахты.
4. **Чомга** – *P. cristatus* (*L.*). Обычный гнездящийся и пролетный вид, обитающий на северной периферии своего ареала. Одна из наиболее многочисленных гнездящихся птиц на Лекшмозере. Самая крупная колония (не менее 20 пар) находится в тростниках у д. Морщихинской. Гнезда с яйцами и маленьких пуховичков регистрировали 01.07–08.07.1996, молодых, достигших размеров взрослой птицы, – 27.08.96. Однако отдельные особи могут размножаться в более поздние сроки: птица с птенцом в  $\frac{2}{3}$  полного размера встречена 30.09.2000. По-видимому, отдельные пары гнездятся также на Гамозере: пара и две одиночные птицы отмечены 12.07.1997, 9 птиц – 04.09.1996. На других водоемах летних встреч пока не было, тогда как в сентябре одиночных птиц регистрировали также у п. Вершинина на Кенозере (01 и 04.09.1996), оз. Монастырском (12.09.2003 и 22.09.2001), оз. Б. Порженском (02.10.2000).
5. **Отряд Веслоногие – *Pelicaniformes***  
**Большой баклан** – *Phalacrocorax carbo* (*L.*). Изредка залетает на озера парка в периоды

миграций. Одна птица была встречена С. Пуховым на Макарьих озерах в середине сентября 2001 года.

**Отряд Голенастые – Ciconiiformes**

6. **Выпь – *Botaurus stellaris* (L.)**. Редкий вид, распространяется в регионе на северном пределе распространения. В разные годы крики 1–4 птиц регулярно отмечали только на Лекшмозере: в тростниках вблизи деревень Орлово, Труфаново и Морщихинской. Нами крик самца зарегистрирован недалеко от д. Труфаново 05.06.1997. Здесь же, по сообщению О. А. Смирнова, летом 2000 года дети нашли в тростниках гнездо, а 29.09 в последний раз видели саму птицу. Есть также сведения о нерегулярном появлении выпи на Кенозере (у д. Кривцово) и встрече птицы на оз. Черном в середине июня 2001 года, которые требуют проверки.
  7. **Серая цапля – *Ardea cinerea* (L.)**. Залетный вид, который, по сообщениям местных жителей, с конца 1980-х годов все чаще появляется на водоемах парка во второй половине лета. Нами зарегистрированы: 26.07.1995 – 1 птица у д. Кривцово, 08.08.1999 – 2 взрослых и 1 молодая у д. Морщихинской, 10–15.08.1999 – 2 взрослых и 2 молодых у п. Вершинина. В августе 2001 года В. Нефедов отметил сразу 7–8 птиц в урочище Дровники и 2 – на Вильно; нами 07.09 встречены 2 взрослых птицы с одной молодой у д. Морщихинской. В конце июля 2003 года в разных точках парка уже постоянно встречали по 2–7 птиц.
  8. **Белый аист – *Ciconia ciconia* (L.)**. Редкий залетный вид. По сообщению В. Нефедова, одну птицу видели в д. Морщихинской на огородах в начале 1990-х годов.
- Отряд Пластинчатоклювые – Anseriformes**
9. **Лебедь-кликун – *Cygnus cygnus* (L.)**. Обычный гнездящийся и пролетный вид. В парке обитает самая южная устойчивая гнездовая группировка вида из известных на северо-западе России, включающая несколько десятков пар птиц [21], [32]. Весной, по сообщению В. Нефедова, первые птицы появляются на польнях уже в конце марта – первых числах апреля. Регулярно выводят птенцов на оз. Лекшмозере и в окрестностях оз. Б. Порженского. Выводки отмечали также на более мелких озерах: Шаймозеро, Копеечное, Верхнее, Катечное, Котозеро, Черное, Лопозеро и др. Пуховых птенцов регистрируют с конца июня. Подросшие нелетные выводки начинают выходить на открытую воду в конце июля и держатся там, по крайней мере, до начала сентября. Кроме гнездящихся пар в течение всего сезона встречаются взрослые летующие особи без птенцов. В предотлетный период птицы постепенно собираются на крупных водоемах: 22.09.2001 в разных точках Лекшмозера встречено 16 птиц группами по 2–4 особи, в том числе летные выводки и холостые птицы. Выводки держатся обособленно до самого отлета: на Лекшмозере 27.09–01.10 наблюдали взрослую птицу с двумя молодыми, 30.09 – пару с 4 птенцами, достигшими  $\frac{4}{5}$  величины взрослой птицы, 02.10 на оз. М. Порженском – пару с 4 молодыми. На пролете обычен, но останавливающихся здесь птиц немного: пролетная стая из 20 птиц отмечена В. Портновым на оз. Лекшмозере в окрестностях д. Труфаново 02.10.2000. На этом же озере птиц встречали 02–03.11.2002 [12].
  10. **Белолобая казарка – *Anser albifrons* (Scop.)**. Северный пролетный вид, самый массовый из гусей, останавливающихся на сельхозугодьях Каргополья. Во время весеннего пролета особенно много птиц собирается на полях района в третьей декаде апреля, в 2002 году наибольшее число особей зарегистрировано 25.04 [33]. По наблюдениям 2001 года, осенний пролет идет с конца сентября, массовый – в первой декаде октября [28]. Территория парка лежит в стороне от основных миграционных путей. Птицы пересекают ее преимущественно транзитом, следуя в юго-западном и западно-юго-западном направлениях. Но некоторые стаи, по сообщениям местных жителей, весной, реже – осенью останавливаются в границах парка на больших болотах и полях в окрестностях населенных пунктов.
  11. **Гуменник – *A. fabalis* (L.)**. Обычен на пролете и редок на гнездовании. В Каргополе находится на южном пределе гнездового ареала. Весной, как и белолобый гусь, в массе останавливается на сельхозугодьях Каргопольского района, но уступает ему по численности [33]. В небольшом количестве гнездится на болотах, в том числе и в границах парка. В 1999 году небольшие группы, возможно, местные летные выводки, зарегистрированы 09.08 у переправы в д. Конево (5 птиц) и 14.08 – на луговом островке против п. Вершинина (4 птицы). По сообщениям жителей, в гнездовое время гусей встречали у окруженного болотами Шаймозера и на болоте Соколиные глади, а выводки – у западной границы парка в районе Кумбасозера. Осенний пролет идет с третьей декады сентября до середины октября. В 2001 году наиболее интенсивная миграция отмечена в дни его начала (23.09) и окончания (06.10) [28]. Транзитные стаи пересекают территорию парка в западном и юго-юго-западном направлениях, но часть стай движется прямо на юг. В его границах известны постоянные места остановок на крупных болотах, иногда птицы садятся также на поля и луга в окрестностях населенных пунктов.
  12. **Кряква – *Anas platyrhynchos* (L.)**. Обычный гнездящийся и пролетный вид. Населяет во-

- доемы разных типов. В летний период на 1 км береговой линии Лекшмозера приходится по 1–2 выводка. В 1999 году был одним из основных видов в послегнездовых концентрациях уток в заливе Кенозера у п. Вершинина, там же в начале сентября 1996 года плотность птиц составляла 17 экземпляров на 10 км маршрута. В предотлетных скоплениях на Лекшмозере уступают по численности только связи (сотни). Иногда в небольшом числе остается на зиму: до 10 птиц зимовало у мельницы на р. Порженке в 1996–1997 годах (сообщение И. Роймуева) и там же – в 2000–2001 годах. [13].
13. **Чирок-свистун** – *A. crecca* (L.). Обычен на гнездовании и пролете. Населяет водоемы разных типов, предпочитая небольшие лесные ручьи и озера. Встречен в послегнездовых скоплениях уток на многих водоемах парка. На Лекшмозере и Кенозере в конце августа – начале сентября приходится 15 птиц на 10 км береговой линии.
  14. **Серая утка** – *A. strepera* (L.). По мнению местных охотников, в небольшом числе обитает в Каргопольском районе, включая парк, что требует проверки.
  15. **Связь** – *A. penelope* (L.). Вид, обычный на гнездовании и пролете. В гнездовое время распределение неравномерное. Встречается в основном на водоемах с богатой прибрежно-водной растительностью. Так, 25.07.1995 на небольшом оз. Шаймозере отмечено 4 выводка (от пуховых до почти полностью доросших птенцов), 12.07.1997 на Гамозере – 3 выводка и 4 одиночных самки. Самый массовый вид в предотлетных скоплениях уток: 06–07.09.2001 и 12.09.2003 численность птиц на озерах Лекшмозере и Монастырское оценивалась в несколько сотен особей. В 2000 году стая из 120 птиц отмечена на оз. Монастырском 08.09 (сообщение Й. Хёгмандера).
  16. **Шилохвость** – *A. acuta* (L.). Обычный вид с низкой численностью. В парке редок. Весной 02.05.2001 две птицы встречены у д. Морщихинской. Выводок (самка с 5 птенцами в ¼ размера взрослой птицы) найден на Гамозере 12.07.1997, и тогда же еще одна самка отмечена на р. Поча. В августе 1996–1999 годов по 1–4 птицы зарегистрированы на Лекшмозере у д. Морщихинской, на Кенозере – у п. Вершинина и д. Кривцово. Небольшая стая (20 птиц) встречена 15.08.1999 на заливе у п. Вершинина. В предотлетных скоплениях уток на водоемах южной части парка встречены только отдельные особи: 22.09.2001 – 6 птиц в разных точках озера, 12.09.2003 – 2 особи на оз. Монастырском.
  17. **Чирок-трескунок** – *A. querquedula* (L.). Редкий гнездящийся в регионе вид. В небольшом числе встречается и на территории парка. С 02 по 10.06.1997 отмечены: самка и 4 одиночных самца на Лекшмозере, 3 птицы у д. Зихново, самец на оз. Монастырском, пара на р. Кене у д. Першлахта и самка на оз. Верхнее в окрестностях Макарьих озер. В послегнездовое время трескунки встречены: на Кенозере у п. Вершинина – 11 и 12.08.1999 (2 – в стае других уток), 31.08.1996 (2), 01.09.1996 (12 – стая), на Лекшмозере – 18.08 (2) и 06.09 (1 в смешанном скоплении уток).
  18. **Широконоска** – *A. clypeata* (L.). Гнездящийся и пролетный вид, редкий на сопредельной территории Карелии, но довольно обычный на юге Каргопольского района на оз. Лача [24], [2]. Два выводка с птенцами, размером со взрослую птицу, встречены 09.08.1999 за пределами парка у д. Луги. В парке отмечена 01.05.2002 у д. Морщихинская. Гнездование подтверждено регистрацией 11.08.1999 самки, беспокоившейся у выводка, у п. Вершинина. Помимо этого, 4 особи отмечены там же 10–11.08.1999, по одной – на Гамозере 04.09.1996 и в окрестностях д. Першлахта 14.07.1997, еще 4 – на оз. Монастырском 12.09.2003. На Кенозере у д. Кривцово 03.09.1996 добыта молодая широконоска из стайки в 5 птиц, вероятно, нераспавшегося выводка.
  19. **Красноголовый нырок** – *Aythya ferina* (L.). Малочисленный вид, обитающий на северном пределе ареала. Оказался в числе обычных на оз. Лача при учетах 07–08.06.1997 [24]. В парке редок, но, возможно, изредка гнездится. У д. Зихново 10–11.06.1997 встречены пара и 4 одиночные птицы.
  20. **Хохлатая чернеть** – *A. fuligula* (L.). Обычный гнездящийся вид, массовый на пролете. Обитает на многих водоемах парка. Так, только на небольшом Гамозере 12.07.1997 встречены 3 выводка разного возраста, а также 5 самцов и 6 самок без птенцов. Летом стаи линных самцов зарегистрированы на Лекшмозере и Кенозере. В предотлетный период и на пролете птицы встречаются на самых разных водоемах парка. В скоплениях уток на Лекшмозере 06–07.09.2002 не уступала по численности крякве. При позднем ледоставе может задерживаться до ноября [12].
  21. **Морская чернеть** – *A. marila* (L.). Северный вид, обычный в Каргополье на пролете. В большом числе останавливается на оз. Лача, но редко попадает на небольшие озера парка. В конце сентября 2000 года (27.09–01.10) по 2–3 особи отмечено на Лекшмозере, на оз. Монастырском и в окрестностях д. Думино. В октябре 2001 года В. Портнов наблюдал на оз. Монастырском плотную стаю морских чернетей, которую он оценил в 10000 особей: птицы сидели на воде узкой полосой шириной в 50–60 м и протяженностью около 1,5 км.
  22. **Турпан** – *Melanitta fusca* (L.). Северный вид, обычный на пролете. Встреча пары на Лекшмозере 05.06.1997 позволяет говорить о

- возможном редком гнездовании птиц в пределах парка. Одиночную птицу отмечали также в окрестностях п. Вершинина на Кенозере 10 и 14.08.1999. Во время осеннего пролета встречены: на Лекшмозере 22.09.2001 (1 и 2), на р. Кена у д. Першлахта 03.10.2000 (3). При позднем ледоставе может задерживаться значительно дольше: отмечена на Лекшмозере 02–03.11.2002 [12].
23. **Синьга** – *M. nigra* (L.). Северный пролетный вид. Изредка останавливается на крупных озерах парка во время пролета. Самцы (по 2 птицы) встречены на Лекшмозере 05.06.1997 и 01.07.1996. Осенью 2000 года стаи из 6 и 19 птиц зарегистрированы на этом же озере 30.09, одна птица – у п. Вершинина 02.10.
  24. **Морянка** – *Clangula hyemalis* (L.). Обычный пролетный вид. По сообщению В. Нефедова, регулярно встречается на Лекшмозере во время весенней миграции. Одна птица отмечена в стае других уток 30.09.2000.
  25. **Гоголь** – *Bucephala clangula* (L.). Обычный гнездящийся и пролетный вид. Обитает на многих водоемах парка. В 1997 году с поздней весной в северной половине Лекшмозера 02.06 отмечены 3 пары и группы, состоявшие из 10 и 20 птиц, преимущественно самцов. Выводки найдены на Лекшмозере, на р. Кена у д. Першлахта и в других местах. Особенно много гоголей гнездится у небольшого, окруженного болотами оз. Монастырского: здесь 05.07.1996 зарегистрировано 8 выводков (возраст – 10–25 дней) и 34 самца группами по 1–17 особей. Регулярно встречается в предотлетных скоплениях уток на крупных озерах, но по численности (десятки) в 5–10 раз уступает крякве и свиязи.
  26. **Луток** – *Mergus albellus* (L.). Редкий вид. Встречается в парке, как летом, так и на пролете. Судя по встрече самки на Гамозере 12.07.1997, отдельные пары, возможно, гнездятся. Самцов регистрировали: 10.06.1997 в устье р. Кены (2), 10–11.06.1997 в д. Зихново (1); 05.07.1997 – на Лекшмозере (3) и оз. Монастырском (1). Две уже перелинявшие особи встречены на Кенозере 11.08.1999, по одной в 2 разных местах Лекшмозера 27.08.2002, 1 и 2 на оз. Монастырском 12.09.2003. Пролетные стаи зарегистрированы 22.09.2001 (13 птиц) и 30.09.2000 (20).
  27. **Средний крохаль** – *M. serrator* (L.). Вид, массовый на Онежском озере в Карелии. Однако на территории парка зарегистрирован только дважды на Лекшмозере: пара – 02.06.1997, одна птица – 22.09.2001.
  28. **Большой крохаль** – *M. merganser* (L.). Обычный в регионе вид с низкой численностью. В парке редок, что, вероятно, обусловлено нехваткой деревьев с крупными дуплами, необходимых для устройства гнезд. Весной самец встречен на оз. Лебяжьем 02.05.2002. В начале лета (02.06.1997) в разных точках Лекшмозера отмечены: одиночная самка, 2 группы из 4 самок и 4 самцов и одна пара. В июле встречены только 2 птицы: одна – 29.07.1996 на Лекшмозере у д. Морщихинской, другая (самка) – 05.07.1997 на оз. Монастырском. Самка с выводком из 5 сеголетков, не достигших полной величины, обнаружена у п. Вершинина 31.08.1996. Осенью небольшие группы отмечены на Лекшмозере: 02.09.2003 (3 птицы), 08.09.2000 (6) и 22.09.2001 (7), на Кенозере – 02.10.2000 (5).
- Отряд Хищные птицы – Falconiformes**
29. **Скопа** – *Pandion haliaetus* (L.). Редкий вид, занесенный в Красную книгу России. В Кенозере довольно обычен. Судя по многочисленным встречам на разных водоемах, на территории парка и в его ближайших окрестностях гнездится до 25 пар этих птиц. Известны постоянные гнездовые участки в окрестностях д. Морщихинской, оз. Монастырского, урочища Глухая Лахта, п. Вершинина, оз. Вильно, Порженских озер. В д. Видягино птиц, летавших с рыбой в сторону Глухой Лахты, отметили 17.07.1995. У д. Морщихинской пару скоп, носивших рыбу к Половинному ручью, наблюдали 29.06, 05.07 и 27.08 в 1996 году, а также 05.07.1997; на Порженских озерах птиц, таскающих рыбу в лес, отмечали 09.07.1997 и 13.08.1999.
  30. **Осоед** – *Pernis apivorus* (L.). Самый многочисленный вид хищных птиц парка с равномерным распределением по его территории. Соседние пары обитают на расстоянии 2–3 км одна от другой в самых разных типах угодий. Выводки встречены: 02–03.09.1996 у д. Кривцово, 13.08.1999 – на тропе от Порженских на Макарью озера.
  31. **Черный коршун** – *Milvus korschun* (Gm.). Обычен, но по числу встреч уступает осоеду. Избегает лесных массивов, придерживаясь в основном приопушечной полосы и побережной водоемов. Известны места постоянного обитания пар у протоки между Б. и М. Порженскими озерами и в окрестностях д. Морщихинской, где их ежегодно отмечали в гнездовое время в 1995–1999 годах. В августе 2001 года В. Нефедов наблюдал выводок (3 птицы) у д. Масельга.
  32. **Орлан-белохвост** – *Haliaeetus albicilla* (L.). Редкий вид, занесенный в Красную книгу России. В парке и его ближайших окрестностях гнездится до 10 пар. На Лекшмозере взрослых птиц регулярно встречали в 1996–2003 годах у северного побережья в устье ручья Лазема. Другая старая пара, которая, по опросным данным, обитала в районе оз. Монастырского, зарегистрирована 12.09.2003. На Кенозере выводок наблюдали 10–14.08.1999 в окрестностях п. Вершинина, взрослую птицу, летавшую за рыбой, – 02–03.09.1996 у д. Кривцово. По опросным данным, орланы

- держатся также в районе деревень Тамбичлахта, Видягино, Усть-Поча, у южной оконечности Лекшмозера (район Песков). По сообщению М. Зуева, весной по 1–2 птицы регулярно пролетают через Порженские озера в северо-западном направлении. Мигрирующие птицы зарегистрированы: 02.05.2002 у д. Морщихинской, 12.09.2003 у д. Труфаново (2-летняя особь), 22.09.2001 на оз. Монастырском (3–4-летняя птица с темной молодой).
33. **Тетеревятник** – *Accipiter gentilis* (L.). Обычный, но немногочисленный гнездящийся, пролетный и зимующий вид, редко попадающий на глаза в гнездовое время. В весенне-летний период птицы отмечены только 30.04.2002 у оз. Монастырского и 04.06.1997 в окрестностях д. Труфаново. В конце лета одиночные, возможно, мигрирующие особи встречены 28.08.1996 у д. Морщихинской, 11.08.1999 у п. Вершинина, 13.08.1999 у д. Федоровской, 22.09.2001 у оз. Монастырского. Зимой 22.01.2001 отмечен на р. Порженке у полыньи, где держались кряквы [13].
34. **Перепелятник** – *A. nisus* (L.). Обычный гнездящийся и пролетный вид. Возможно, в небольшом числе зимует. Гнездится в лесах разных типов и регулярно появляется вблизи жилья, охотясь на воробьев и ласточек.
35. **Канюк** – *Buteo buteo* (L.). Обычный вид, уступающий по численности осоеду и коршуону. Селится в основном по окраинам сельхозугодий. Зарегистрирован в окрестностях большинства жилых и нежилых деревень парка. Две молодые птицы встречены в окрестностях д. Почы 09.08.1999, выводок – 30.08.1996 у оз. М. Порженского.
36. **Малый подорлик** – *Aquila pomarina* (Ch. L. Brehm.). Очень редкий в регионе вид, находящийся здесь на северо-восточном пределе распространения. У д. Морщихинская одна взрослая пролетная птица встречена 28.08.2002. Еще одна особь зарегистрирована там же в начале мая 2003 года [7].
37. **Беркут** – *A. chrysaetus* (L.). Редкий вид, представитель Красной книги России. Возможно, гнездится в парке или ближайших окрестностях. Наиболее вероятное место обитания – Соколиные Глади – обширные болотные массивы с островами леса вдоль восточной границы парка. Одна птица встречена на Наглимозере в августе 2000 года (сообщение В. Нефедова).
38. **Полевой лунь** – *Circus cyaneus* (L.). Довольно обычный, но немногочисленный обитатель открытого ландшафта – сельхозугодий и прибрежных лугов. С конца апреля (30.04.2002) по начало сентября (03.09.1996) охотящихся одиночных птиц и пары регистрировали в окрестностях многих деревень, окруженных полями: Гужево, Морщихинская, Першлахта, Кривцово, Думино, Труфаново, Вершинина, а также у озер Порженских, Масельгского, Монастырского. Пара с одним хорошо летающим птенцом встречена на полях у д. Морщихинской 28.08.2002.
39. **Болотный лунь** – *C. aeruginosus* (L.). Редкий вид, находящийся на северном пределе ареала. Возможно, гнездится. Самок регистрировали: 29.08.1996 у д. Морщихинской, 05.07.1997 и 27.08.2002 у оз. Монастырского, 27.08.2002 у д. Орлово. Самца отметили 14.08.1999 над островком с колонией чаек против п. Вершинина.
40. **Пустельга** – *Cerchneis tinnunculus* (L.). Редкий гнездящийся в парке сокол. Одиночных птиц отмечали: 29.08.1996 на Масельге, в августе 2001 года в д. Гужево (сообщение В. Нефедова), 08–09.08.1999 в окрестностях д. Морщихинской. По сообщению А. Козыкина, в июле 2000 года дети подобрали нелетающего птенца пустельги у п. Вершинина. В конце июля 1999 года местные жители видели плохо летающих птенцов у погоста в д. Федоровской, а 12.08 там же нами встречена пара птиц, кормивших уже хорошо летающий выводок.
41. **Дербник** – *Aesalon columbarius* (L.). Довольно обычный в регионе лесной сокол, редкий на территории парка. Самку, охотившуюся на ласточек, отмечали 11 и 14.08.1999 у п. Вершинина, еще одну птицу – 27.08.2002 у оз. Монастырского. По сообщению А. Костылева, в начале 1990-х дербники обитали также у д. Думино.
42. **Кобчик** – *Erythropus vespertinus* (L.). Очень редкий сокол. По сообщению А. В. Костылева, изредка встречается на территории парка. Одну птицу видели 28.06.2002 над оз. М. Порженским (сообщение С. Рыковой).
43. **Чеглок** – *Hypotriorchis subbuteo* (L.). Единственный сокол, который входит в группу видов, обычных для Кенозерья. Отмечен в летнее время у многих населенных пунктов северной части парка, у д. Семеново 27.07.1995 зарегистрирована пара, гонявшая третью птицу. В 1995–1999 годах ежегодно гнездились в месте впадения р. Чаженьги в оз. Порженское. В южной части парка редок: отмечен только у аэродрома д. Морщихинской 29.06.1996, 27.08.1996, 08.08.1997, 16 и 28.08.2002, а также на болоте Щучья гладь 05.06.1997. В начале сентября (03–04.09.1996) еще регулярно встречался в населенных пунктах по берегам Кенозера.
- Отряд Куриные – Galliformes**
44. **Серая куропатка** – *Perdix perdix* (L.). По данным опросов, была многочисленной в Каргопольском районе и встречалась в парке еще в начале 1960-х годов. Но, как и в Карелии [6], исчезла после резкого сокращения посевов зерновых и уменьшения числа амбаров, где зерно хранилось в зимнее время.

45. **Перепел** – *Coturnix coturnix* (L.). Редкий вид на северном пределе распространения. Крик самца зарегистрирован у д. Ожегово 02.07.1996. По сообщению А. Костылева, голос перепела неоднократно был слышен здесь и раньше.
46. **Белая куропатка** – *Lagopus lagopus* (L.). Обычный гнездящийся и зимующий вид. В. Нефедов встречал выводки на болотах в Лекшмозерской части парка. Зимой куропаток регулярно наблюдают вблизи деревень и на берегах водоемов. В декабре 1996 года В. Портнов насчитал около 30 птиц в 1,5 км к югу от оз. Пежемского. Зимой 2002/03 года В. Нефедов отметил группу до 20 птиц у д. Моршихинской. Вид неоднократно отмечен также в январе 2001 года [13].
47. **Глухарь** – *Tetrao urogallus* (L.). Обычный гнездящийся и зимующий вид. По опросам жителей и архивным данным, в прошлом на территории парка насчитывалось свыше 30 довольно крупных токов, однако к середине 1990-х годов численность птиц резко снизилась. И хотя многие тока остались на прежних местах, число петухов во многих точках сократилось до 2–3 птиц. Сравнительно много птиц еще держится у юго-восточной границы парка вблизи болот Соколиные глади. По сообщению В. Портнова, в 1997 году в полосе невырубленного леса по краю этих болот насчитывалось не менее 3 токов, один из которых был выгнан почти на 2 км и насчитывал более 20 птиц. Во внегнездовое время глухари кормятся здесь же, на ягодниках брусники и клюквы. Крупные тока сохранились также у северо-западной границы парка в окрестностях Кумбасозера. Выводки зарегистрированы: 25.06.1995 у Шаймозера (5 птенцов размером с тетерку) и Лепозера; 30.06.1996 у Сергозера (6 пуховых птенцов); 12.07.1997 у оз. Б. Сафроново (4 птенца размером с рябчика).
48. **Тетерев** – *Lyrurus tetrix* (L.). Обычный гнездящийся и зимующий вид. В 1980-е годы тока располагались в окрестностях многих деревень. Только у д. Думино собиралось до 50 птиц (сообщение А. Костылева). Однако к середине 1990-х годов численность тетеревов резко упала: летние встречи в 1995–2000 годах – единичны. В последние годы, по наблюдениям местных жителей, популяция восстанавливается. По сообщению охотников, численность зимней стаи у Кумбасозера уже в 1997 году поднялась до 30 птиц, а число птиц, встреченных В. Портновым зимой 2003 года по дороге на оз. Щучье (Соколиные глади), достигло 100 особей. Гнездо с 10 яйцами найдено у д. Федоровской 11.06.1997. Выводки встречены: 25.07.1995 на вырубке за Шаймозером, 12.08.1999 у деревень Косицина (сообщение А. Тряпицина) и Видягино (сообщение А. Козыкина).
49. **Рябчик** – *Tetrastes bonasia* (L.). Обычный гнездящийся и зимующий вид. По сообще-
- ниям жителей, численность рябчика, как и всех тетеревиных, в середине 1990-х опускалась до минимума (единичные встречи), но затем начала вновь восстанавливаться. В 1997 году в окрестностях п. Труфаново на маршруте в 20 км 04.06 отмечено уже 5 свистящих самцов. В 1995–1997 годах зарегистрировано 13 выводков разного возраста; причем 6 из них – в 1997 году. Наиболее ранняя встреча пуховых птенцов – 30.06.1996. Осенью 02.10.2000 на маршруте от д. Видягино до оз. Б. Порженского (6 км) зарегистрировано 18 птиц (по 1–2 особи).
- Отряд Журавлеобразные – Gruiformes**
50. **Коростель** – *Crex crex* (L.). Обычный, но немногочисленный гнездящийся вид. Обитатель сенокосных и прибрежных лугов. Почти у каждой деревни в июне – июле можно слышать крик 1–3 самцов. Судя по количеству деревень и площади сельхозугодий, в парке и его ближайших окрестностях гнездится не менее 100 пар коростелей. Крайние даты регистрации в парке токующих самцов – 05.06.1997–18.07.1995. Птица без признаков смены оперения отловлена у п. Вершинина 13.08.1999.
51. **Погоныш** – *Porzana porzana* (L.). Редкий вид, находящийся на северном пределе распространения. Число встреч резко колеблется по годам. В 1995 году нами не отмечен, хотя местные жители сообщили о крике птиц в п. Вершинина. В 1996 году был вполне обычным в Лекшмозерской части парка: с 01 по 04.07 голоса самцов регистрировали у деревень Моршихинской (2 птицы), Труфаново (1), Гужево (1), Думино (1) и у оз. Монастырского (1). В 1997 году погоныша слышали только у д. Глазово (данные опросов) и 08.07 – у д. Моршихинской. Одинокые, вероятно, мигрирующие птицы встречены на берегу озера в п. Вершинина 31.08.1997, 11 и 14.08.1999.
52. **Малый погоныш** – *P. parva* (Scop.). Редкий вид на северном пределе распространения. В парк залетают, по-видимому, лишь отдельные особи: крик самца отмечен в прибрежной траве у д. Кривцово 27.07.1995.
53. **Лысуха** – *Fulica atra* (L.). Вид, обитающий в регионе на северном пределе ареала. По одной птице зарегистрировано 27.08.2002 на Лекшмозере и 06.09.2001 – на оз. Монастырском. По сообщениям В. Нефедова, И. Бархатова, В. и О. Смирновых, иногда гнездится у д. Труфаново: в отдельные годы птиц постоянно встречали в тростниках у деревни, а в 1995 и 2001 годах видели взрослую пару и выводок.
54. **Серый журавль** – *Grus grus* (L.). Обычный гнездящийся и пролетный вид. В Каргопольском районе находятся места крупнейших на северо-западе России послегнездовых концентраций журавлей. Их основу составляют местные птицы, гнездовая популяция кото-



- рых насчитывает от 200 до 600 пар [28]. Журавли обитают на многих болотах парка. Известны места их постоянного обитания в окрестностях озер Шаймозера, М. Порженского, д. Усть-Поча, на болоте Соколиные глади. Самка с пуховым птенцом встречена 06.07.1997 на болоте Козичьем по дороге от д. Морщихинской на Макарьи озера, пара с летающим молодым – 13.08.1999 на оз. М. Порженском. По сообщению В. Нефедова, раньше журавли гнездились и недалеко от Левозера, где он видел самку с одним птенцом. В августе выводки поднимаются на крыло и начинают вылетать на поля за пределы парка. К концу месяца большинство местных птиц покидают его территорию, а в начале сентября – и территорию района.
- Отряд Ржанкообразные – *Charadriiformes***
55. **Золотистая ржанка – *Pluvialis apricarius* (L.)**. Массовый пролетный вид, отдельные пары могут гнездиться на крупных болотах. Птиц, кормившихся на берегу оз. Кенозера у п. Вершинина, регистрировали 31.08–01.09.1996 (1 особь), 10–11.08.1999 (2) и 28.09.2000 (2).
56. **Галстучник – *Charadrius hiaticula* (L.)**. Встречается на пролете. Одна особь отмечена на берегу Кенозера в п. Вершинина 01 и 04.09.1996.
57. **Малый зуек – *Ch. dubius* (Scop.)**. Довольно обычный для региона гнездящийся и пролетный вид. В парке редок, вероятно, из-за недостатка гнездопригодных биотопов. Пары, которая, судя по поведению, имела выводок, встречена 10.07.1997 в п. Вершинина, одиночная птица – 11.07.1997 у д. Усть-Поча, стайка из 6–8 птиц – 10.08 и 2 птицы – 15.08.1999 у п. Вершинина.
58. **Чибис – *Vanellus vanellus* (L.)**. Обычный гнездящийся и пролетный вид. В начале июля 1996 года входил в число фоновых птиц на лугах и полях Лекшмозерской части парка. Однако, по сообщению местных жителей, к 2003 году его численность резко упала из-за зарастания сельхозугодий. Прилетает в апреле. В 2002 году в конце месяца еще шла интенсивная миграция: 30.04 только на полях у д. Гужево держалось около 30 птиц. Однако в отдельные годы массовый пролет, по-видимому, может сдвигаться на более поздние сроки. В 1997 году, который отличался очень поздней весной, он шел до середины июня: 04.06 у д. Труфаново зарегистрирована стая из 20 птиц, 11.06 в д. Зихново – из 9 птиц, а 10.06.1997 у д. Першлахты на полях держалось и токовало до 40 пар, большая часть которых исчезла на следующий день. Летняя миграция начинается до завершения гнездования местных птиц. В период, когда они еще водят выводки, на лугах время от времени появляются пролетные стаи, которые после коротких остановок продолжают миграцию. Так, 07.07.1996 у д. Морщихинской зарегистрирована оставка более 50 птиц, 10.08.1999 на берегу в п. Вершинина – более 20. Наиболее поздняя дата встречи одиночной птицы – 29.08.1996 у д. Морщихинской.
59. **Кулик-сорока – *Haematopus ostralegus* (L.)**. Редкий, возможно, гнездящийся вид. О возможности размножения куликов-сорок в парке свидетельствует и находка этого вида на гнездовье в окрестностях Каргополя [8]. В парке две активно токующие пары отмечены на р. Кена у д. Першлахта 09.06.1997. Птицы, которые, по сообщениям местных жителей, появились здесь в середине мая, держались на заболоченном берегу в колонии речных крачек и сизых чаек, совершая токовые полеты вдоль русла реки. Спустя месяц, 14.07, обнаружить их на этом месте уже не удалось [22].
60. **Черныш – *Tringa ochropus* (L.)**. Обычный гнездящийся и пролетный вид. Обычно селится по берегам лесных водоемов, включая небольшие ручьи, речки и лужи. На 20 км маршрута в д. Труфаново 04.06.1997 отмечено 6 тревожащихся птиц, по тропе от д. Морщихинской на Макарьи озера (20 км) 06.07.1997 – 5 пар с выводками, в одном из которых птенцы уже достигли величины взрослой птицы.
61. **Фифи – *T. glareola* (L.)**. Обычный в регионе гнездящийся и пролетный вид. Однако находок, указывающих на гнездование в парке, очень немного. Активно токующие птицы зарегистрированы 02.06.1997 в д. Морщихинской и 05.06.1997 – на оз. Монастырском. Сильная тревога, свидетельствующая о наличии выводка, отмечена 07.07.1996 на топкой луже посреди полей у д. Морщихинской. В конце июня появляются перемещающиеся стайки птиц, число которых постепенно возрастает. В середине июля стайки и одиночек можно увидеть на побережьях любых водоемов. Так, 13.07.1997 в п. Усть-Поча на берегу реки кормилось 7, 2, 2 и 9 птиц. В середине августа фифи присутствуют почти во всех поливидовых скоплениях куликов, но уже в конце месяца встречаются лишь единицы.
62. **Большой улит – *T. nebularia* (Gunn.)**. Обычный, но малочисленный гнездящийся и пролетный вид. Весной и в начале лета ток птиц можно услышать во многих точках парка. Самцы, особенно активно токовавшие в течение дня, зарегистрированы 02.06.1997 у д. Морщихинской и 09.06.1997 в д. Першлахте. Пары с выводками встречены: 04.07.1997 вблизи западной границы парка у д. Заозерье (Карелия), 12.07.1997 в окрестностях д. Поча у оз. Б. Сафроново. С началом характерной для куликов летней миграции (июль – август) число птиц резко возрастает. В одиночку и небольшими группами они кочуют по побережьям,

- присоединяясь к поливидовым скоплениям других куликов на мелководьях. Наиболее поздняя встреча – 04.09.1996.
63. **Щеголь** – *T. erythropus (Pall.)*. Северный вид, появляющийся в парке только в периоды миграций. Две птицы держались со стайкой турухтанов на берегу Кенозера у п. Вершинина 10–12.08.1999.
64. **Перевозчик** – *Actitis hypoleucos (L.)*. Обычный гнездящийся и пролетный вид. Селится по берегам разных водоемов на всей территории парка. Прилетает в мае, но 30.04–3.05.2002 еще отсутствовал. Выводки регистрируют с середины июня до середины июля (14.07.1997). К началу августа основная масса птиц покидает места гнездования, и с первой декады месяца встречаются лишь отдельные пролетные особи (последняя встреча – 02.09.2003).
65. **Мордунка** – *Xenus cinereus (Guld.)*. Редкий пролетный и, возможно, гнездящийся вид. Интенсивный ток двух пар над р. Кеной отмечен в д. Першлахта вечером 09.06.1996. В тот же день в п. Вершинина встречена еще одна птица в стайке других куликов, кормившихся на берегу Кенозера.
66. **Круглоносый плавунчик** – *Phalaropus lobatus (L.)*. Северный вид, встречающийся на водоемах парка во время пролета. Стая из 20 птиц отмечена на Лекшмозере 02.06.1997, две птицы – на оз. Монастырском 27.08.2002 и одна – у д. Морщихинской 07.09.2001.
67. **Турухтан** – *Philomachus pugnax (L.)*. Обычный, но немногочисленный гнездящийся и пролетный вид. По сообщению В. Нефедова и В. Портнова, весной турухтаны регулярно токуют на болотах в окрестностях д. Труфаново. Птица, убитая ястребом, подобрана у этой деревни 22.05.1997, самка с 2 самцами встречена на болоте Щучья гладь 05.06.1997. На прибрежном лугу непосредственно в п. Вершинина 09.06.1997 отмечена группа из 12 токующих птиц, а 16.07.1995 встречена самка с нелетным птенцом. Стайки, состоящие из 3–20 птиц, регистрировали на берегу Кенозера у п. Вершинина 10.07.1997, 10–15.08.1999, 30–31.08.1996, на аэродроме в д. Морщихинской – 08.08.1997.
68. **Кулик-воробей** – *Calidris minutus (Leisl.)*. Встречается во время пролета. Стайка из 14 птиц кормилась в луже посреди п. Вершинина 09.06.1997.
69. **Белохвостый песочник** – *C. temminckii (Leisl.)*. Северный вид, регулярно останавливающийся в парке на пролете. В п. Вершинина на берегу встречены: 09.06.1997 – 8 птиц, 10 и 15.08.1999 – стайки по 5 и 7 птиц, 30.08.1996 – 2 особи, 02 и 04.09.1996 – по одной птице. Еще один песочник встречен на берегу Лекшмозера 07.09.2001.
70. **Чернозобик** – *C. alpina (L.)*. Северный вид. Изредка встречается в парке во время пролета. Одна птица отмечена в стайке с белохвостыми песочниками в п. Вершинина 09.06.1997.
71. **Песчанка** – *C. alba (Pall.)*. Северный вид, изредка появляющийся в парке во время пролета. У д. Морщихинской 06.09.2001 зарегистрировано 5 молодых птиц, которые кормились у уреза воды на берегу Лекшмозера.
72. **Грязовик** – *Limicola falcinellus (Pontopp.)*. Редкий северный вид. В период миграций 06.09.2001 у д. Морщихинской встречены 3 птицы, кормившиеся в прибойной полосе Лекшмозера.
73. **Дупель** – *Gallinago media (Lath.)*. Редкий пролетный и гнездящийся вид. Несколько токов найдено в Каргополье в окрестностях оз. Лача. Судя по характеру местообитаний, может гнездиться и на территории парка. Пока же встречена одна птица на прибрежном лугу у п. Вершинина во внегнездовое время (11.08.1999).
74. **Бекас** – *G. gallinago (L.)*. Один из наиболее обычных гнездящихся и пролетных куликов парка. Весной токование птиц слышно вблизи большинства болот и водоемов, включая небольшие лужи и болотины среди полей. Вошел в число фоновых видов окрестностей д. Першлахта 09.06.1997. В конце лета птицы появляются на прибрежных лугах. У п. Вершинина на 1 км заросшего травой побережья приходилось: 10.07.1997 – не менее 5 птиц, 10.08.1999 – до 10 птиц. В первых числах сентября плотность птиц этого вида на побережье Кенозера достигала 20–25 особей на 10 км береговой линии, а на отдельных участках была значительно выше. В меньшем числе, но также регулярно бекасы встречались там и 28.09–02.10.2000.
75. **Вальдшнеп** – *Scolopax rusticola (L.)*. Обычный гнездящийся и пролетный вид, малочисленный в парке. В июне – июле тяга одиночных птиц зарегистрирована всего несколько раз: у деревень Труфаново, Думино и оз. Монастырского. Частота встреч к осени несколько увеличивается. Покидают регион в конце сентября – октябре; поздние встречи в 2000 году: 27.09 в окрестностях Лекшмозера (3 птицы), 28.09 у п. Вершинина (1).
76. **Большой кроншнеп** – *Numenius arquata (L.)*. Обычный гнездящийся и пролетный вид. В 1995–1997 годах по 1–3 гнездящиеся пары отмечено у деревень Видягино, Масельги, Ожегово, Думино, Морщихинской, Зихново. В конце апреля (30.04.2002) на полях уже встречались отдельные птицы, но основная масса, по-видимому, прилетает позднее. В д. Першлахте 09–10.06.1997 одновременно активно токовало до 15 птиц, однако большая их часть, по-видимому, не гнездилась, и 14.07 здесь было найдено всего две тревожащиеся пары. Большинство птиц покидает парк к середине августа: по-

- следняя встреча – 13.08.1999 на Порженских озерах. По сообщениям жителей, в недавнем прошлом численность птиц на прибрежных лугах и полях была значительно выше, но в последние годы она быстро сокращалась из-за зарастания сельскохозяйственных угодий.
77. **Средний кроншнеп** – *N. phaeopus* (L.). Довольно обычный в регионе вид, редкий на территории парка. Встречи единичны, однако их сроки указывают на возможность гнездования: 04.06.1997 зарегистрирована тревога нескольких птиц на болоте Соколиные глади и одной – на небольшом лесном болоте за д. Труфаново; 05.06.1997 – тревога и спаривание двух птиц на болоте Щучья гладь; 09.06.1997 – токование птиц на лугах у д. Першлахты совместно с большими кроншнепами. Одиночных птиц видели: 03.06.1997 на полях у д. Морщихинской, 27.07.1995 у д. Кривцово, 11.08.1999 у п. Вершинина, 13.08.1999 у Порженских озер.
78. **Большой веретенник** – *Limosa limosa* (L.). Редкий в регионе вид, гнездящийся в Каргополье на северном пределе распространения [8]. Отдельные пары могут гнездиться и на территории парка, хотя пока их регистрировали только в послегнездовое время. У п. Вершинина отмечены: 27.07.1995 – две птицы, 10.08.1999 – группа из 4 особей и одиночная птица, которая держалась со стаей других куликов до 12.08.1999, у д. Морщихинской – 1 птица 16.08.2002.
79. **Короткохвостый поморник** – *Stercorarius parasiticus* (L.). Северный вид. Изредка появляется в парке во время миграций и летних кочевков. Две птицы, пролетавшие в юго-восточном направлении над Лекшмозером, зарегистрированы 03.06.1997.
80. **Сизая чайка** – *Larus canus* (L.). Обычный гнездящийся и пролетный вид. Самая многочисленная из чаек, обитающих в парке. Гнездится на открытых островах Кенозера и других озер и рек, на крупных болотах, прибрежных лугах и сельхозугодьях. В первой декаде июня большинство птиц либо насиживают кладки, либо только откладывают яйца. Из-за регулярных высоких майских паводков, уничтожающих ранние кладки, многие птицы гнездятся повторно, поэтому значительная часть птенцов появляется только в июле. В августе – сентябре птицы скапливаются вблизи мест, богатых кормом, обычно в окрестностях крупных прибрежных деревень. Так, 14.08.1999 эти птицы составляли фон у п. Вершинина, а 27.09.2000 – у д. Морщихинской, где только у аэродрома держалось до 100 птиц, половину из которых составляла молодежь этого года. Отдельные особи встречаются до поздней осени: отмечена 02–03.11.2002 [12].
81. **Серебристая чайка** – *L. argentatus* (Pon-topp.). Обычный для региона гнездящийся и пролетный вид. В парке редок: встречаются лишь отдельные особи и пары, которые, возможно, иногда выводят птенцов в колониях других видов чайковых птиц. На Лекшмозере одна птица встречена 02.06.1997, две – 07.09.2000. На Кенозере у п. Вершинина взрослые особи с крупными, уже летными птенцами отмечены 10.07.1997 и 1–4.09.1996, одна взрослая – 29.09.2000.
82. **Клуша** – *L. fuscus* (L.). Редкий для парка скандинавский вид, залетающий, вероятно, с Онежского озера и Водлозера (юго-восточная граница ареала). Не исключено гнездование отдельных пар в поливидовых колониях чайковых птиц. В 1995 году одну птицу видели 20.07 в д. Кривцово (сообщение А. Шишкина), 23.07 – у п. Вершинина.
83. **Озерная чайка** – *L. ridibundus* (L.). Обычный гнездящийся вид, однако в парке по численности заметно уступает сизой чайке. Единственная относительно крупная колония в несколько десятков пар находится на Лекшмозере в тростниковых зарослях в окрестностях д. Морщихинской. В гнездовой период птицы встречаются также на оз. Монастырском, М. Порженском, на р. Кене у д. Першлахта. Взрослых с уже летными молодыми отмечали 16.07.1995 и 10.07.1997 в п. Вершинина (Кенозеро), 12.07.1997 – на Гамозере, 08.08.1997 – на Лекшмозере. Наиболее поздняя встреча одиночной птицы на Лекшмозере – 27.09.2000.
84. **Малая чайка** – *L. minutus* (Pall.). Регионально редкий вид со спорадическим распространением. Находится на северной периферии гнездового ареала. На многих водоемах парка в июне – июле встречаются одиночки и группы до 10 взрослых особей, которые кормятся над куртинами водноболотной растительности. Однако ежегодно они появляются только в южной части парка. В отдельные годы гнездятся на Лекшмозере, где В. Нефедов находил кладки в гнездах, расположенных на плотных сплавинах, заламах тростника и в плавающих постройках. По его сообщениям, особенно много чаек гнезилось в тростниках у д. Морщихинской в 1996, 2001 и 2003 годах. Нами 29.06.1996 здесь учтено более 50 пар, а при объезде озера 01.07 встречено несколько сотен птиц, однако подобраться к гнездам или к выводкам через густые заросли не удалось. В следующем, 1997, году с холодной поздней весной у этих же тростников 02.06 обнаружено только 10 кормившихся птиц, а 05.07 при лодочных учетах птицы встречены лишь на соседнем оз. Монастырском. Взрослая птица с несколькими уже самостоятельными молодыми зарегистрирована 08.08.1999 у д. Морщихинской. Но, возможно, это были пролетные птицы, поскольку большинство малых чаек покидает регион уже в августе.

- Наиболее поздняя встреча в парке – 28.08.2002 у д. Труфаново.
85. **Речная крачка** – *Sterna hirundo* (L.). Обычный гнездящийся и пролетный вид. Уступает по численности только сизой чайке. Гнездится на заламах тростника и островах крупных водоемов: Лекшмозера, Кенозера и др. Птицы на гнездах (более 20) и их спаривание зарегистрированы на островах реки Кена 09.06.1997, насиженная кладка из двух яиц найдена на узком мысу на оз. Масельгском 03.07.1996, птицы, носящие рыбу птенцам, отмечены 24.07.1995 в д. Кривцово и 29.07.1996 в д. Морщихинской. Летные выводки регистрировали с начала августа: 08.08.1999 у д. Морщихинской отмечено 30 особей, половина из которых были молодыми. Выводки из двух птенцов, еще не достигших размеров взрослых особей, встречены на оз. Порженском 14.08.1999 и на Лекшмозере 02.09.2003. Появление у д. Морщихинской большого числа пролетных птиц (до сотни в пределах видимости), среди которых были нераспавшиеся выводки, зарегистрировано 02.09.2003. В более поздние сроки встречи единичны.
86. **Полярная крачка** – *S. paradisaea* (Pontopp.). Северный вид, изредка встречающийся на пролете. Взрослая птица с уже хорошо летающей молодой обнаружена в стае речных крачек у д. Морщихинской 08.08.1999.
- Отряд Голубеобразные – Columbiformes**
87. **Сизый голубь** – *Columba livia* (L.). Обычный гнездящийся вид. Обитает не только в крупных населенных пунктах (п. Вершинина, д. Морщихинская), но в небольшом числе выводит птенцов под крышами церквей и часовен в некоторых оставленных деревнях (Федоровская, Видягино). Так, в д. Видягино 17–18.07.1995 мы наблюдали, как время от времени группы из 1–5 голубей, среди которых была самка с птенцом, прилетали под купол церкви со стороны п. Вершинина и улетали обратно через Кенозеро, преодолевая более 10 км.
88. **Вяхирь** – *C. palumbus* (L.). Обычный в регионе гнездящийся и пролетный вид. В парке в летнее время малочислен, но, безусловно, гнездится, хотя это пока не подтверждено находками гнезд или выводков. Населяет леса разных типов. В конце лета вяхири нередко вылетают кормиться на сельскохозяйственные угодья, собираясь в стаи, насчитывающие иногда по несколько десятков птиц.
89. **Клинтух** – *C. oenas* (L.). Редкий вид, обитающий в регионе на северном пределе распространения. Птиц неоднократно встречали в агроландшафтах Каргополя в разные сезоны года. Осенью 11.09.2001 у д. Печниково отмечена стайка из 10 особей, которые кормились на полях вместе с сизыми голубями и вяхирями. Вероятно, в небольшом числе обитает и на территории парка.
90. **Горлица** – *Streptopelia turtur* (L.). Редкий вид, который находится на данных широтах на северном пределе гнездового ареала. Несколько раз отмечен в агроландшафтах Каргопольского района. Одна птица зарегистрирована 04.07.1997 в непосредственной близости от юго-западной границы парка у д. Усть-Речка (Карелия). Вероятно, проникает и на территорию парка.
- Отряд Кукушкообразные – Cuculiformes**
91. **Кукушка** – *Cuculus canorus* (L.). Обычный гнездящийся вид. Встречается на всей территории парка во всех типах леса.
- Отряд Совы – Strigiformes**
92. **Филин** – *Bubo bubo* (L.). Редкий гнездящийся, пролетный и зимующий в регионе вид. По сообщениям В. Нефедова и С. Боголепова, только в Лекшмозерской части парка известно 5 участков, где отмечали токующих самцов: у озер Гамозеро и Лебяжье, в верховьях р. Лазема, в окрестностях д. Орлово, на Лисьем болоте в среднем течении р. Виленки. Зимой 1995/96 года одна птица встречена в д. Федоровской (сообщение Е. Шатковской). Еще одного филина видели в зимнее время у зимника в д. Гужево.
93. **Белая сова** – *Nyctea scandiaca* (L.). Северный вид. Встречается в парке в основном в осенне-зимний период. Осенью мигрирующих птиц отмечают с октября (сообщение А. Костылева). Весной, в мае, одна птица встречена на р. Гузеньге (сообщение В. Сытина).
94. **Воробьиный сыч** – *Glauclidium passerinum* (L.). Малочисленный гнездящийся и зимующий вид. По сообщению В. Нефедова, одна птица попала в капкан в лесу в конце февраля 1996 года.
95. **Длиннохвостая неясыть** – *Strix uralensis* (Pall). Малочисленный гнездящийся, пролетный и зимующий вид. По сообщениям местных жителей, птиц неоднократно встречали и добывали в Лекшмозерской части парка. Одна птица зарегистрирована 26.08.1996 в южной части парка недалеко от границы с Карелией.
96. **Болотная сова** – *Asio flammeus* (Pontopp.). Обычный гнездящийся и пролетный вид. Выводки встречены: 31.08.1996 на берегу Кенозера в п. Вершинина (4 крупных птицы), 08.08.1999 среди полей у д. Морщихинской (пара с 3–4 плохо летающими птенцами); 12–13.08.1999 у оз. М. Порженского (не менее 3 птенцов размером со взрослых птиц). М. Зуев сообщил, что болотные совы гнездились у Порженских озер также в 1995 и 1996 годах.
97. **Мохноногий сыч** – *Aegolius funereus* (L.). Обычный, но немногочисленный гнездящийся, пролетный и зимующий в регионе вид. Одна птица встречена недалеко от д. Поча 11.07.1997.

**Отряд Козодоеобразные –  
*Caprimulgiformes***

98. **Козодой** – *Caprimulgus europaeus* (L.). Южный вид, находится в регионе на северном пределе распространения. По сообщениям жителей, регулярно встречается в окрестностях деревень Видягино и Горбачиха (А. Тряпцын), отмечен в д. Думино (А. Костылев).

**Отряд Стрижеобразные – *Apodiformes***

99. **Черный стриж** – *Apus apus* (L.). Обычный гнездящийся и пролетный вид. Встречается повсеместно. Гнездится в дуплах старых деревьев, поэтому численность выше там, где сохранились участки старых лесов, например по краю болот Соколиной глади. На маршруте по р. Гузеньга 12.07.1997 в поле зрения постоянно находилось 10–30, а над Кумбасозером – до сотни стрижей.

**Отряд Ракшеобразные – *Coraciiformes***

100. **Зимородок** – *Alcedo atthis* (L.). Залетный вид южного происхождения. По информации С. Боголепова и В. Нефедова, летом 1995 года одна птица долгое время держалась на ручье у мельницы за д. Гужево.

101. **Удод** – *Upupa epops* (L.). Залетный вид южного происхождения. Одна птица в течение суток держалась на аэродроме д. Морщихинской 12–13.09.2003.

**Отряд Дятлообразные – *Piciformes***

102. **Вертишейка** – *Jynx torquilla* (L.). Обычный в регионе, но малочисленный гнездящийся и пролетный вид. По сообщениям жителей, обитает в парке, однако гнездование пока не подтверждено встречами гнезд или находками выводков.

103. **Черный дятел** – *Dryocopus martius* (L.). Обычный гнездящийся и зимующий вид с низкой численностью. По сообщениям местных жителей, гнездится на территории парка. Одиночные особи регулярно встречались в разных его частях преимущественно во второй половине лета и осенью. Кроме того, по одной птице зарегистрировано в окрестностях д. Морщихинской и у Наглимозера 02.05.2001. Отмечен в парке в зимнее время [13].

104. **Седой дятел** – *Picus. canus* (Gm.). Редкий в регионе вид. Находится на северном пределе распространения. Известны случаи гнездования в прилегающих районах Карелии [6] и залеты на территорию Каргопольского района (сообщение Н. Н. Проницовой). Не исключена возможность гнездования отдельных пар и в границах парка: по сообщению А. Костылева, одна птица встречена летом у д. Думино в начале 1990-х годов.

105. **Большой пестрый дятел** – *Dendrocopos major* (L.). Обычный гнездящийся, пролетный и зимующий вид. Самый многочисленный из дятлов на территории парка. В январе 2001 года плотность населения в разных биотопах оценивали в 10,9–20 особей на

100 га [13]. Летом 06.07.1997 только рядом с тропой от д. Морщихинской до Макарьих озер (20 км) найдено 4 жилых гнезда с птенцами. Населяет леса разных типов, но предпочитает старовозрастные хвойные и смешанные древостой. Для гнездования обычно использует старые осины и сухие сосны. Массовое появление выводков – в конце июля.

106. **Белоспинный дятел** – *D. leucotos* (Bechst.). Редкий гнездящийся и зимующий вид. Находится на северо-восточном пределе своего распространения [29]. Встреч немного, но они указывают на гнездование вида на территории парка: 11.06.1997 отмечен взрослый самец у д. Зихново, 10.07.1997 – тревожащаяся пара у п. Вершинина, 27.07.1995 – взрослый самец со второй, возможно, молодой птицей у д. Кривцово, 22.08.2002 – одна птица у д. Морщихинской. Молодой самец, интенсивно меняющий оперение, отловлен у п. Вершинина 12.08.1999.

107. **Малый пестрый дятел** – *D. minor* (L.). Довольно обычный в регионе вид с низкой численностью. Безусловно, в небольшом количестве гнездится и на территории парка. Однако пока зарегистрировано всего несколько встреч: 26.07.1995 – самец в д. Кривцово; 14–15.08.1999 – самка в полосе сероольшаника вдоль берега озера у п. Вершинина, 06 и 23.09.2001 – по одной птице в окрестностях д. Морщихинской. Зимой также мало числен [13].

108. **Трехпалый дятел** – *Picoides tridactylus* (L.). Обычный, но немногочисленный обитатель северотаежных хвойных лесов. Судя по характеру местообитаний, должен гнездиться на территории парка. Взрослый самец встречен 08.07.1996 в смешанном старовозрастном лесу у ручья Половинного, впадающего в Лекшмозеро. Осенью 2000 года одна птица зарегистрирована у оз. Монастырского 08.09 (сообщение И. Хёгмандера), другая – у болота Гниловальского 30.09. Зимой одну птицу видели в д. Морщихинской 22.01.2001 [13].

**БЛАГОДАРНОСТИ**

Выражаем глубокую признательность администрации Кенозерского национального парка, всем его сотрудникам, а также многочисленным добровольным помощникам и коллегам, участвовавшим в работах по инвентаризации орнитофауны этих уникальных территорий. Искренне благодарим директора парка Е. Ф. Шатковскую за глубокую заинтересованность и постоянную помощь в организации экспедиционных работ. Многие труднодоступные участки этой территории были обследованы только благодаря четким и слаженным действиям администрации и сотрудников парка по обеспечению группы всеми доступными видами транспорта и хорошо знающими местность проводниками. Большую помощь

в решении бытовых проблем оказывали местные жители А. И. Бархагова, В. А. Нефедов, В. М. Пятунин и др. В разных участках парка участниками и проводниками экспедиционных работ были: А. В. Козыкин, В. А. Нефедов, М. В. Калитин, В. В. Портнов, С. А. Боголепов, В. В. Пригодин, А. В. Антуфьев, А. Е. Аникиев, А. М. Шишкин, М. Зуев, И. Ромуев и др.

В разные годы в работах принимали участие: представитель Британского отделения BirdLife

International Джон О'Салливан, сотрудники Зоологического института РАН (г. Санкт-Петербург) Л. В. Фирсова и В. Г. Высоцкий, директор Центра окружающей среды Хяме Э. Келломяки (Министерство окружающей среды Финляндии) и сотрудник этого же центра Н. И. Рипатти с группой финских орнитологов-любителей.

Всем перечисленным выше лицам авторы приносят искреннюю и глубокую благодарность.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемьев А. В., Хохлова Т. Ю., Яковлева М. В. Птицы региональной Красной книги на юго-западе Архангельской области // Биоразнообразии Европейского Севера: Тезисы докладов междунар. конф. Петрозаводск, 2001. С. 14–15.
2. Артемьев А. В., Хохлова Т. Ю., Яковлева М. В. Охотничьи птицы Кенозерского национального парка // Материалы III Международного симпозиума «Динамика популяций охотничьих животных северной Европы (16–20 июня 2002 года. г. Сортавала, Карелия, Россия)». Петрозаводск, 2003. С. 17–20.
3. Борщевский В. Г. Размещение тетеревиных птиц в бассейне р. Илексы // Экология и рациональное использование охотничьих птиц: Сборник научных трудов ЦНИЛ Главохоты РСФСР. М., 1983. С. 118–124.
4. Борщевский В. Г. Предварительные данные по фауне наземных позвоночных бассейна р. Илексы // Эколого-экономические основы государственного природного национального парка «Водлозерский». М., 1991. Рукопись отчета. Архив НПП «Водлозерский». С. 124–154.
5. Воропанова Т. А., Кочин Н. Н. К изучению птиц Вологодской области // Ученые записки Вологодского пед. ин-та. 1954. Т. 1. С. 321–351.
6. Зимин В. Б., Сазонов С. В., Лапшин Н. В., Хохлова Т. Ю., Артемьев А. В., Анненков В. Г., Яковлева М. В. Орнитофауна Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1993. 220 с.
7. Келломяки Э., Хохлова Т. Ю. Список птиц Каргопольского района. Финско-Российская экспедиция 2001–2003 // Птицы Каргополя. Хямеенлинна: Name Regional Environment Center, 2004. С. 53–57.
8. Кондратьев А. В., Ковалев В. А. Гнездование кулика-сороки *Haematopus ostralegus* и большого веретенника *Limosa limosa* в Каргопольском районе Архангельской области // Русский орнитологический журнал. 2004. Экспресс-выпуск. № 13 (275). С. 965–966.
9. Мальчевский А. С., Пукинский Ю. Б. Птицы Ленинградской области и сопредельных территорий: история, биология, охрана: В 2 т. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983.
10. Носков Г. А., Гагинская А. Р. К методике описания состояния линьки у птиц // Сообщение Прибалтийской комиссии по изучению миграций птиц. Тарту: АН ЭССР, 1972. Вып. 7. С. 154–163.
11. Носков Г. А., Зимин В. Б., Резвый С. П., Рымкевич Т. А., Лапшин Н. В., Головань В. И. Птицы Ладожского орнитологического стационара и его окрестностей // Экология птиц Приладожья. Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. С. 3–86.
12. Плешак Т. В. К списку зимней орнитофауны Кенозерского национального парка // Русский орнитологический журнал. 2005. Экспресс-выпуск. № 14 (285). С. 351–352.
13. Плешак Т. В., Корепанов В. И. К зимней орнитофауне Кенозерского национального парка (Архангельская область) // Русский орнитологический журнал. 2001. Экспресс-выпуск. № 10 (142). С. 372–374.
14. Руденко Ф. А. Кулики среднего течения реки Илексы // Всесоюзное совещание по проблемам кадастра и учета животного мира: Тезисы докладов. Ч. 3. Уфа: Башкирское кн. изд-во, 1989. С. 194–195.
15. Рыков А. М., Рыкова С. Ю. Позвоночные животные Пинежского заповедника // Флора и фауна заповедников СССР. М., 1988. С. 1–27.
16. Рыкова С. Ю. Численность и биотопическое распределение птиц в Пинежском заповеднике // Размещение и численность животных на европейском Севере. М., 1986. С. 46–55.
17. Сазонов С. В. Общая характеристика орнитофауны национального парка «Водлозерский» // Природное и культурное наследие Водлозерского национального парка. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1995. С. 163–174.
18. Скокова Н. Н. Водоплавающие птицы озер Кубенского, Воже и Лача // Современное состояние ресурсов водоплавающих птиц: Тезисы всесоюзного семинара 20–23 октября 1984 г. М., 1984. С. 24–26.
19. Хохлова Т. Ю. Эколого-фаунистическая характеристика орнитофауны Заонежья // Вестник ЛГУ. Сер. биологии. 1977. Вып. 15. С. 22–30.
20. Хохлова Т. Ю. Орнитофауна Заонежья и тенденции ее изменений // Фауна и экология наземных позвоночных животных Республики Карелия. Петрозаводск, 1998. С. 86–128.
21. Хохлова Т. Ю., Артемьев А. В. Гнездование лебедя-кликуна (*Cygnus cygnus* L.) в Кенозерском национальном парке (Архангельская область) // Русский орнитологический журнал. 2000. Экспресс-выпуск. № 102. С. 22–23.
22. Хохлова Т. Ю., Артемьев А. В. Гнездование кулика-сороки (*Haematopus ostralegus* L.) на пресных водоемах Карелии // Русский орнитологический журнал. 2000. Экспресс-выпуск. № 91. С. 20–23.
23. Хохлова Т. Ю., Артемьев А. В. К уточнению границ ареалов птиц на Северо-Западе России // Актуальные проблемы изучения и охраны птиц Восточной Европы и Северной Азии: Материалы междунар. конф. (XI Орнитологическая конференция). Казань: Матбугат йорты, 2001. С. 622–623.
24. Хохлова Т. Ю., Артемьев А. В., Яковлева М. В. Концентрации водоплавающих птиц на озере Лача // Динамика популяций охотничьих животных Северной Европы: Материалы 2-го международного симпозиума (22–26 июня 1998 года, Петрозаводск). Петрозаводск, 1998. С. 105–108.
25. Хохлова Т. Ю., Артемьев А. В., Яковлева М. В. Орнитологические исследования Кенозерского государственного национального парка // Проблемы охраны и изучения природной среды Русского Севера: Материа-

- лы научно-практической конф., посвященной 25-летию Государственного природного заповедника «Пинежский» (Россия, п. Пинега, Архангельская обл. 16–20 августа 1999 г.). Архангельск: Изд. центр АГМА, 1999. С. 146–150.
26. Хохлова Т. Ю., Артемьев А. В., Яковлева М. В. Осенние скопления серых журавлей *Grus grus L.* на юго-западе Архангельской области // Журавли Евразии (биология, охрана, разведение). Вып. 2: Сборник трудов междунар. конф. «Журавли на рубеже тысячелетий» (7–10 октября 2003 года, Аскания-Нова). М.: Московский зоопарк, 2005. С. 134–143.
  27. Хохлова Т. Ю., Артемьев А. В., Яковлева М. В., Андреев В. А. Кенозерье // Ключевые орнитологические территории России. Т. 1. (Ключевые орнитологические территории международного значения в Европейской России). М.: Союз охраны птиц России, 2000. С. 98–99.
  28. Хохлова Т. Ю., Артемьев А. В., Яковлева М. В., Высоцкий В. Г. Осенняя миграция гусей в Каргопольском районе Архангельской области в 2001 году // Материалы III Международного симпозиума «Динамика популяций охотничьих животных Северной Европы (16–20 июня 2002 года. г. Сортавала, Карелия, Россия)». Петрозаводск, 2003. С. 86–88.
  29. Хохлова Т. Ю., Яковлева М. В., Артемьев А. В. О распространении белоспинного дятла *Dendrocopos leucotos* на Северо-Западе России // Русский орнитологический журнал. 1998. Экспресс-выпуск. № 39. С. 8–12.
  30. Шатковская Е. Ф., Торхов С. В., Тормосов Д. В., Синяговский С. А., Козыкин А. В., Болотов И. Н., Хохлова Т. Ю. Природное и культурное наследие Кенозерского национального парка. Петрозаводск: Петро-Пресс, 2002. 176 с.
  31. Important Birds Areas in Europe: Priority sites for conservation. Vol. 1–2 / M. F. Heath & M. I. Evans (eds.). Cambridge, 2000.
  32. Hохhlova T. Y., Artemyev A. V. Reassessment of the Southern Limit for Whooper Swans Breeding in Northwest Russia // E. C. Rees, S. L. Earnst and J. Coulson (Eds.). Proceedings of the Fourth International Swan Symposium, 2001. Waterbirds 25, Special Publication. 2002. P. 67–73 (USA).
  33. Kellomäki E., Khohlova T., Lehtinen A., Ripatti N., Rusanen P., Uronen P. Stop-over sites of migrating geese in Kargopol Region, Arhangelsk Oblast, NW-Russia // Современное состояние популяций, управление ресурсами и охрана гусеобразных птиц Северной Евразии (Management and conservation of waterfowl populations in Northern Eurasia (with special focus on White Sea – Baltic flyway)) // Тезисы докладов международного симпозиума (23–28.04.2003, Олонец, Республика Карелия, Россия). Петрозаводск, 2003. С. 67.

НАТАЛЬЯ ИВАНОВНА КОНДРАШОВА

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии КарНЦ РАН  
kondr@krc.karelia.ruКОРОВО-МАНТИЙНЫЙ МАГМАТИЗМ  
ЯЛОНВАРСКОЙ СТРУКТУРЫ (БАЛТИЙСКИЙ ЩИТ)

В статье приводятся данные о петрогеохимических особенностях вулканитов и гранитоидов Ялонварской структуры. Показано, что только гранитоиды первой фазы можно отнести к санукитоидам. В формировании магматических пород второй и третьей фаз массива участвовала континентальная кора.

Ключевые слова: Ялонварская структура, гранитоиды, санукитоиды, мантийно-коровое взаимодействие

По современным представлениям, основная масса архейской коры была сформирована в интервале 3,9–2,5 млрд лет продуктами тоналит-трондъемит-гранодиоритовой (TTG) серии. Архейская эволюция Карельской гранит-зеленокаменной области (Балтийский щит) завершилась внедрением поздне- и посттектонических санукитоидов, субщелочных и щелочных гранитов и лампрофировых даек [1].

Термин «санукитоид» стал общеупотребительным после публикации канадских геологов [14], которые назвали так субщелочные посттектонические гранитоиды с определенными геохимическими характеристиками (табл. 1), выделив их из гранитоидов TTG-серии.

Позднее санукитоиды были обнаружены на всех докембрийских щитах, в том числе и на территории Балтийского в пределах Карельской гранит-зеленокаменной области [6], [8], [9], [10]. Их выделили из гранитоидов, относившихся ранее к гранитам TTG-серии. Это массивы: Ялонварский, Панозерский, Ньюозерский, Хаутоварский, Таловейс, Эльмус, Бергаульский и Куйтила на территории Финляндии (рис. 1).

Таблица 1

Характеристика гранитоидов тоналит-трондъемит-гранодиоритовой (TTG) серии и санукитоидов

	TTG-граниты	Санукитоиды
SiO <sub>2</sub>	70 %	55–60 %
M#	0,43	> 0,60
Ni ppm	14	> 100
Cr ppm	29	> 200
Sr ppm	> 400	> 500
Sr/Y	> 40	≈ 50
(La/Yb) <sub>n</sub>	15–100	19–65
Y	< 15	≈ 17
Yb	< 1,6	≈ 2
Источник	[11]	[12], [14], [17]

Для них характерны небольшие площади выхода 5–30 км<sup>2</sup>, приуроченность к сдвиговым зонам, гетерогенное строение, проявившееся в многофазности, и близость по времени формирования – слагающие массивы породы имеют позднерхейский возраст и являются постскладчатými.



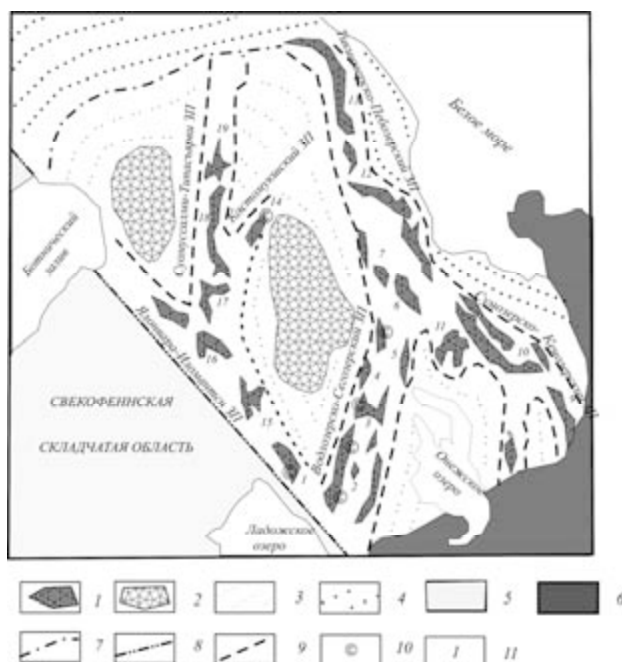


Рис. 1. Схема геологического строения Карельской гранит-зеленокаменной области Балтийского щита

Примечание. 1 – зеленокаменные структуры, 2 – интракратонные впадины, 3 – реоморфизованный катархейский фундамент, 4 – амфиболит-гнейсовый комплекс Беломорского пояса, 5 – Свеккофеннская складчатая область, 6 – образования палеозойского комплекса, 7 – границы Карельской гранит-зеленокаменной области (КГЗО), 8 – граница КГЗО и Свеккофеннского складчатого пояса, 9 – границы зеленокаменных поясов (ЗП), 10 – массивы санукитоидов, 11 – локальные зеленокаменные структуры: 1 – Ялонварская, 2 – Хаутаварская, 3 – Койкарско-Корбозерская, 4 – Совдозерская, 5 – Сайозерская, 6 – Парандовско-Надвоицкая, 7 – Тунгудская, 8 – Маткалахтинская, 9 – Токшинская, 10 – Каменноозерская, 11 – Рыбозерская, 12 – Пебозерская, 13 – Тикшозерская, 14 – Костомукшская, 15 – Иломантси, 16 – Ипатти, 17 – Типасъярви, 18 – Кухмо, 19 – Суомуссалми.

С санукитоидами пространственно [10], а в ряде случаев и генетически, связаны проявления золоторудной минерализации [3], что определило повышенный интерес к этой группе гранитоидов.

Гранитоидная Ялонварская интрузия, закартированная в одноименной структуре, также была отнесена к группе санукитоидов [9]. Ялонварская структура является частью позднеархейского зеленокаменного пояса Ялонвара – Иломантси – Тулос (рис. 1). Ее разрез выполнен андезибазальтами-андезидацитами и риодацитами ялонварской свиты. Отложения свиты прорываются интрузией диорит-лейкогранитового состава, которая и была отнесена к санукитоидам, а также многочисленными субвулканическими телами от основного до кислого состава. Фундаментом структуры предположительно являются нижнеархейские гранито-гнейсы. Отнесение данного массива к группе санукитоидов вызывает некоторые возражения. Ялонварская гранитоидная интрузия площадью 12\*15 км имеет трехфазное строение [2]. Первая фаза (1) внедрения представлена несколькими телами кварцевых диоритов, гранодиоритов в северо-

ро-восточной части структуры, вторая фаза (2), занимающая наибольшую площадь выходов интрузивного тела, сложена гранитами, и третья фаза (3) – штокообразные тела лейкократовых порфирированных гранитов в юго-западной и северо-западной частях интрузии.

Возраст крупночешуйчатого молибденита из гранитоидов 1-й фазы, определенный Re-Os методом ( $187\text{Os} = 3,516\text{--}7,298$  г/т и  $\text{Re} = 118,36\text{--}245,6$  г/т), равен  $2772 \pm 11\text{--}2773 \pm 11$  млн лет [3]. Pb-Pb изохронный возраст гранитоидов 2-й фазы оказался моложе почти на 170 млн лет, он равен  $2600 \pm 100$  млн лет [7].

Минеральный состав гранодиоритов и кварцевых диоритов представлен плагиоклазом, биотитом, амфиболом, кварцем и калиевым полевым шпатом (КПШ). Акцессорные минералы, встречающиеся в гранитоидах 1-й фазы, весьма разнообразны: апатит, титанит, рутил, пирит, халькопирит, магнетит. Граниты 2-й фазы сложены олигоклазом, КПШ и кварцем. Среди акцессорных минералов наряду с встречающимися и в гранитоидах предыдущей фазы распространены: циркон, анатаз, сидерит, флюорит, барит, турмалин, монацит, гранат, галенит, сфалерит, молибденит, шеелит. Лейкократовые порфирированные граниты 3-й фазы сложены вкрапленниками плагиоклаза, КПШ, кварца в более мелкозернистой массе плагиоклаз-кварц-полевошпат-мусковитового состава. Биотит присутствует спорадически. Состав акцессориев сходен с акцессорными минералами гранитов 2-й фазы, исключая анатаз, рутил, сидерит и барит.

По своим петрогеохимическим характеристикам гранитоиды Ялонварского массива являются гранитами I-типа (табл. 2).

Таблица 2

Химический состав гранитоидов Ялонварской структуры

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	Mg
1	61,88	0,54	15,07	2,70	2,66	3,71	4,28	3,93	0,56
2	70,32	0,28	13,91	1,42	1,27	1,36	1,54	4,04	0,49
3	74,52	0,13	13,20	0,88	0,63	0,60	1,28	4,46	0,43
	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Rb	Ba	Sr	Cr	Ni	Cu	
1	3,30	0,29	156	1164	327	285	122	75	
2	4,43	0,09	126	1224	142	156	19	77	
3	3,06	0,04	89	806	93	121	23	280	

Примечание. Гранитоиды:

1 – первой фазы внедрения,

2 – второй фазы,

3 – третьей фазы; содержания окислов даны в масс. %, элементов – в гт.

Гранитоидная интрузия внедрялась в пост-тектонический этап развития структуры; возраст вулканитов разреза 2,9 млрд лет [7].

На дискриминационных диаграммах точки составов гранитоидов располагаются в поле пород как нормального петрохимического ряда, так и субщелочного вблизи границы раздела пород нормальной и субщелочной серий. Учитывая высокую подвижность щелочей при метаморфизме и при метасоматических процессах, сле-

ды которых фиксируются в породах всех фаз внедрения, вряд ли можно считать повышенную щелочность данных гранитоидов информативным и надежным признаком.

Все разновидности пород соответствуют составам среднестатистических разновидностей пород соответствующей кремнекислотности, за исключением окиси калия для гранитоидов 1-й фазы и окиси натрия для гранитоидов 2-й и 3-й фаз, и относятся к породам нормального петрохимического ряда. Повышенное содержание щелочей может быть связано с последующими метаморфо-метасоматическими преобразованиями данных пород и не всегда являться первичной характеристикой рассматриваемых разновидностей гранитоидов структуры.

На многих петрохимических диаграммах точки составов гранитоидов Ялонварского массива и вулканиты разреза образуют единые тренды, что позволяет объединить данные разнофациальные группы пород в вулканоплутоническую ассоциацию [2] и что указывает на единый источник для этих групп пород. Основная масса вулканитов разреза структуры имеет среднекислый состав. В небольшом количестве присутствуют андезибазальты.

Вулканиты описывались ранее как производные известково-щелочной (ИЩ) серии, производных толеитовой (Т) серии в разрезе не отмечалось [2].

Анализ петрохимических данных не исключает однако присутствия в разрезе производных Т-серии (рис. 2). Для производных ИЩ-серии характерна положительная корреляция суммарного железа и окиси магния, для вулканитов Т-серии – отрицательная (тренды 1 и 2 на диаграмме  $FeO^*/SiO_2$ ).

При малых содержаниях окиси магния наблюдается резкое возрастание суммарного железа, что также типично для производных толеитовых серий (тренд 1 на диаграмме  $FeO^*/MgO - MgO$ ).

Большая часть петрогенных элементов характеризуется трендами, свойственными магматическому фракционированию. Ведущим фактором при формировании пород разреза структуры являлась кристаллизационная дифференциация, так как при возрастании содержания кремнезема происходит закономерное изменение содержания петрогенных окислов.

Однако отсутствие четких трендов на некоторых петрохимических диаграммах не исключает (рис. 3) при формировании вулканических пород структуры наложения на процессы кристаллизационной дифференциации и других петрогенетических процессов, предположительно контаминации и смешения расплавов. На явления контаминации указывает значительная дисперсия корреляционных связей между элементами, обогащенность вулканогенных пород литофильными элементами. Данные по изотопии свинца [2] также свидетельствуют о присутствии корового компонента в генезисе магм, исходных для формирования пород разреза структуры.

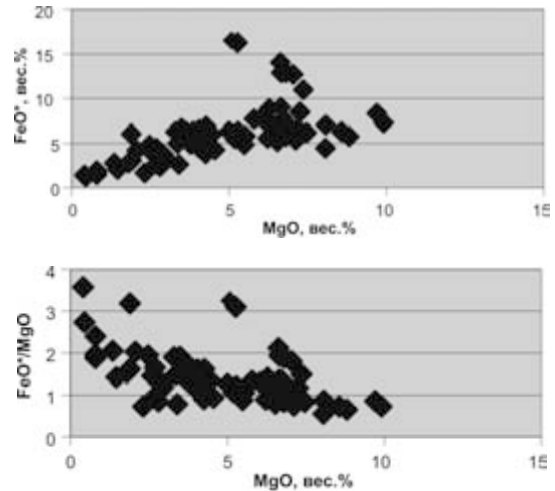


Рис. 2. Диаграммы, демонстрирующие присутствие в структуре производных толеитовой и известково-щелочной серий

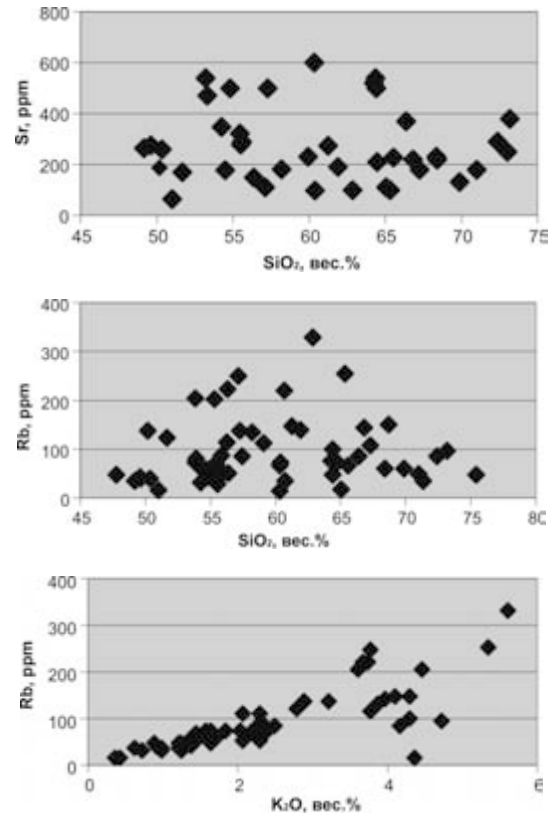


Рис. 3. Диаграммы, демонстрирующие эффект контаминации исходного расплава при образовании части пород структуры

Отсутствие единого тренда на графике Sr –  $SiO_2$  (рис. 3) указывает на другой исходный источник для пород структуры, обедненный литофильными элементами (при  $SiO_2 < 52\%$ ) и обогащенный ими (при  $SiO_2 > 52\%$ ). Учитывая, что в щелочных расплавах содержится много стронция и мало кальция, можно предположить, что исходный для части ялонварских вулканических пород расплав мог быть подщелоченным.

При содержании кремнезема 60–65 % – количество стронция постоянно (100–250 г/т), для кислых разновидностей пород (70–75 %  $\text{SiO}_2$ ) наблюдается рост содержания стронция от 100 до 400 г/т, что нетипично при фракционной дифференциации расплава. Не исключено, что это связано с контаминацией исходного расплава коровым материалом.

Рубидий и калий характеризуются положительной линейной корреляцией (рис. 3), особенно отчетливо фиксируемой при содержаниях  $\text{K}_2\text{O}$  от 0 до 4 %. При повышенных содержаниях окиси калия (4–6 %) исходный тренд осложняется наложением на него небольших по протяженности трендов, характеризующихся резким возрастанием содержания рубидия (от единиц до 350 г/т). Как и для стронция, это может быть связано с влиянием контаминации расплава коровым компонентом. Косвенно на это указывает и отсутствие линейной корреляции  $\text{Rb} - \text{SiO}_2$  (рис. 3), которая теоретически должна иметь место, так как рубидий при фракционной кристаллизации накапливается в остаточном расплаве.

Вулканиды разреза характеризуются высокими содержаниями хрома и никеля, которые достигают величин  $> 70$  ppm даже в кислых разновидностях (рис. 4).

Высокое содержание хрома и никеля в вулканогенных породах среднекислого состава указывает на возможный мантыйный генезис исходной для вулканитов структуры расплава либо на плавление нижней части континентальной коры. Часть точек среднекислых пород структуры характеризуется повышенной магниальностью, в разрезе встречаются андезиты с содержанием окиси магния до 9 %. Однако сами вулканиты разреза при плавлении не могли давать исходные для гранитоидов расплавы, так как характеризуются меньшими величинами магниевого показателя по сравнению с гранитами (рис. 5).

При нормальной кристаллизационной дифференциации, идущей с повышением кремнекислотности и щелочности, наблюдается закономерное фракционирование редкоземельных элементов с накоплением легких и крупных членов ряда. Однако для магматических пород Ялонварской структуры подобного не отмечается. Андезиты и риодациты характеризуются сходным распределением редких земель, что может быть связано с влиянием последующих гидротермальных изменений.

Известно, что в большинстве гидротермально-метасоматических систем легкие РЗЭ обогащают минералы фаций повышенной щелочности, а тяжелые – повышенной кислотности, являясь индикаторами эволюции кислотности-щелочности минералообразующей среды. Обогащенность легкими редкими землями магматических пород Ялонварской структуры подтверждает высказанное ранее предположение о формировании части пород структуры из магмы повышенной щелочности (табл. 3, рис. 6).

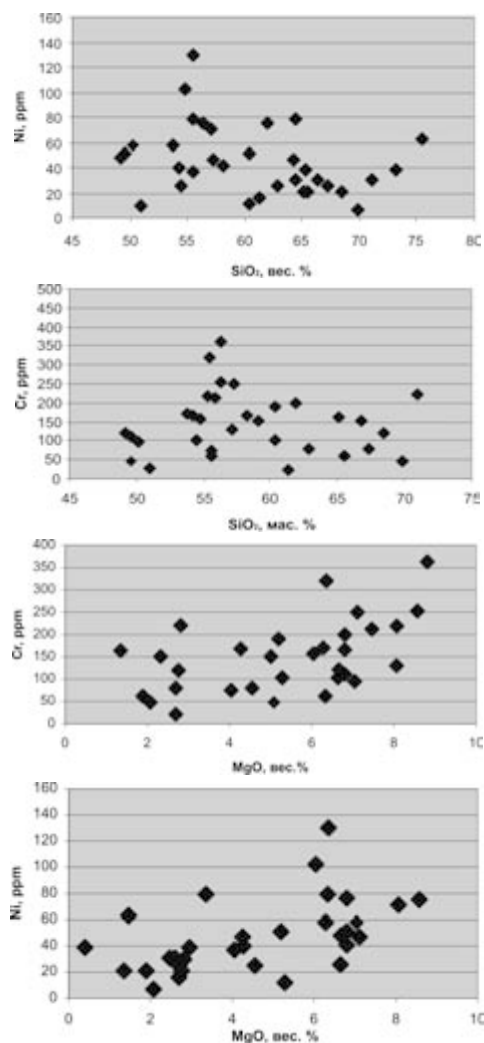


Рис. 4. Содержание когерентных элементов в вулканитах Ялонварской структуры

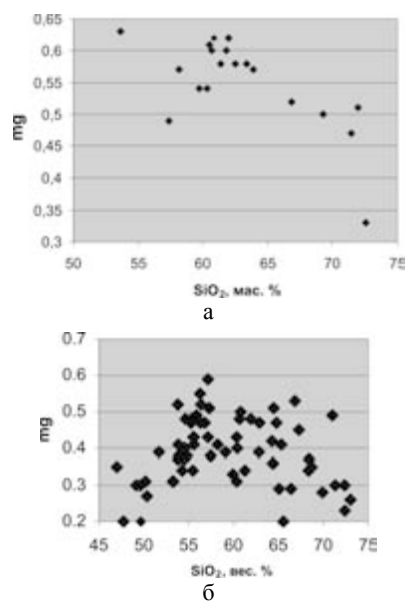


Рис. 5. Величина магниевого показателя в гранитоидах (а) и вулканитах (б) Ялонварской структуры

Распределение редкоземельных элементов в гранитоидах и вулканитах структуры сходно. Для тех и других характерно повышенное содержание легких редкоземельных элементов и низкие содержания тяжелых РЗЭ, концентрация редких земель в гранитоидах часто выше, чем во вмещающих их вулканитах.

Спектры распределения редких земель (рис. 6) указывают на вертикальную неоднородность плавящегося субстрата. Часть графиков (1-42, 1-101В) демонстрируют слабо проявленное фракционирование. На других трендах вулканогенных пород присутствует четкая отрицатель-

ная Eu-аномалия, что указывает на фракционирование плагиоклаза. Для интрузивных пород характерны различные тренды распределения редкоземельных элементов. Для части гранитоидов 1-й фазы эти спектры тождественны (1-13А, 0791), для других – заметно отличаются (13-43). Уменьшение отношения La/Yb в них идет за счет снижения концентрации легких РЗЭ, а отрицательная европиевая аномалия указывает на фракционирование плагиоклаза.

Различное содержание Hf, U, Th связано с разной степенью контаминации исходного расплава коровой компонентой.

Таблица 3

Содержания редкоземельных и некоторых других элементов (ppm)  
в магматических породах Ялонварской структуры

	1-101В	1-56	1-42	1-26В	0291А	1-99А	1-13А	13-43	0791	1-56В	14/10	1-51	0191В
	андезит-базальт	андезит	андезит	дацит	риодацит	риолит	Диорит (1-я фаза)	Диорит (1-я фаза)	Диорит (1-я фаза)	Гранит (3-я фаза)	аплит	габбро	Риолитит субвулканический
La	12,8	13,8	10,1	21,8	14,7	15,3	68	5,64	46,5	34,8	12,5	30,2	11
Ce	30,9	26,3	24,2	42,1	35,5	30,9	134	21,4	88,4	51,9	26,3	60,6	28,6
Nd	20,7	14,3	15,6	25,7	14	13,9	64,7	18	32,8	17,8	9,82	33,1	10,5
Sm	5,02	3,15	4	4,25	3,11	2,75	9,6	6,94	5,14	2,74	1,84	9,35	2,38
Eu	1,4	0,78	1,3	1,08	0,6	0,64	2,23	1,14	1,37	0,54	0,19	2,4	0,72
Gd	4,81	2,6	3,75	2,93	2,76	2,41	6,76	7,52	4,19	1,17	2,12	9,25	2,53
Tb	0,79	0,49	0,58	0,44	0,38	0,34	0,93	1,29	0,65	0,26	0,28	1,45	0,35
Tm			0,27	0,17								0,65	
Yb	1,44	0,99	1,74	1	1,33	0,73	1,58	1,32	1,32	1,09	0,72	4,59	0,47
Lu	0,22	0,15	0,28	0,13	0,16	0,09	0,19	0,17	0,19	0,14	0,11	0,75	0,06
Sr	264,8	151	283	379,7	259,6	87,5	628,6	< 65,0	485	312,0	102	159,2	261,9
Rb	58,3	118	38	93,7	96,6	38,5	140,2	15,7	91	40,2	127	142,6	65,9
Sc	33,8	18,8	23,2	15,1	0,99	6,58	13,6	67,9	9,6	1,95	1,18	34,9	1,83
U	0,55	1,25	< 3,62	1,51	0,33	1,19	5,1	1,30	< 4,19	6,2	11,5	0,79	2,69
Th	1,73	3,04	2,52	4,66	6,49	3,28	16,6	3,46	7,96	17,9	27,6	4,60	23,3
Hf	2,55	2,65	2,37	2,85	4,31	1,88	4,68	1,58	5,36	2,91	4,39	7,25	3,12

По содержанию  $(La/Yb)_n - Yb_n$  точки составов магматических пород структуры располагаются в поле амфиболитов верхней континентальной коры и часть точек – в поле плавления верхнемантийного субстрата, что согласуется с вышеприведенными петрохимическими данными и подтверждает присутствие в разрезе мантийных и коровых производных.

Источником для санукитоидов традиционно считают деплетированную мантию, обогатившуюся непосредственно перед плавлением рядом несовместимых элементов. Подобный мантийный метасоматоз связывают либо с воздействием образующихся при плавлении субдуцируемой океанической плиты флюидов [17], либо с взаимодействием расплавок, образующихся при плавлении погружающейся океанической плиты и перидотитов мантийного клина [13].

Образование карельских санукитоидов связывают с формированием обогащенного мантийного источника в результате корово-мантийного взаимодействия в зонах субдукции [4] и происшедшего позднее частичного плавления мантии с образованием санукитоидных расплавок.

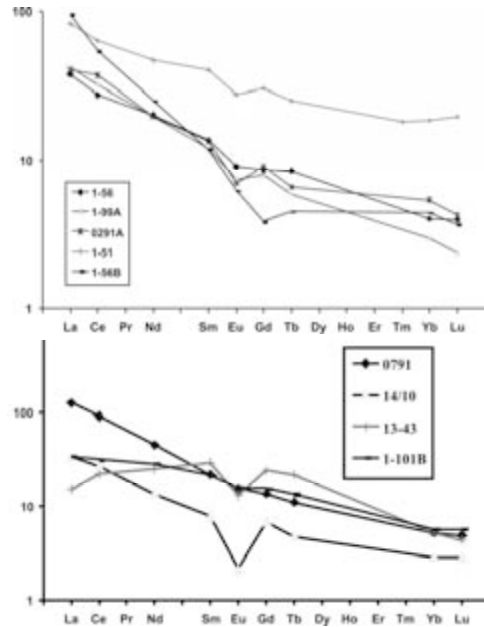


Рис. 6. Распределение редкоземельных элементов, нормированных по хондриту C1, в магматических породах Ялонварской структуры

Однако предположение о субдукционном происхождении этих пород не согласуется с наблюдающимися вариациями изотопно-геохимических характеристик карельских санукитоидов [5]. Е. В. Бибикина с соавторами считает, что с субдукционными процессами связаны гранитоиды TTG-серии, а санукитоиды отделены от них интервалом в 50–120 млн лет [1]. Этими авторами была предложена модель полистадийной субдукционной метасоматической переработки литосферной мантии КГЗО при деформации TTG-гранит-зеленокаменных ассоциаций, в след за которой происходило образование санукитоидов.

Величина  $\epsilon Nd$ , определенная для гранитоидов Ялонварского массива (амонционит), равна -1,6, что указывает на существенное присутствие в магме коровой компоненты. Близкие значения  $\epsilon Nd$  были получены для монцодиоритов и монционитов (-1,7; -0,7 соответственно) структуры Тулос этого же зеленокаменного пояса [4].

Вышеприведенные данные показывают, что только гранитоиды 1-й фазы Ялонварского массива можно считать условно санукитоидами, так как их петрогеохимические характеристики в

целом сходны с таковыми типичных санукитоидов (табл. 1). Особенности гранитоидов других фаз не позволяют отнести их к этой же группе.

Петрогеохимические данные не исключают образования пород 1-й фазы массива из расплавов мантийного генезиса. Приуроченность Ялонварского массива к разломам и сдвиговой зоне мощностью несколько десятков метров с азимутом простирания  $340^\circ$ , падением на юго-запад под углом  $70^\circ$  и протяженностью около 700 м способствовала поступлению в верхние коровые горизонты мантийных флюидов из глубинных очагов, что способствовало привносу ряда элементов, в первую очередь, редкоземельных и калия. Последующее плавление обогащенной этими элементами коры привело к формированию магматических пород второй и третьей фаз Ялонварского массива. Первоначально кора была переработана ювенильными флюидными растворами, затем подвергалась последующему плавлению. За мантийно-коровую природу слагающих Ялонварский массив пород ответственна вертикальная миграция магматического очага (верхняя мантия – кора), которая связана со сдвиговыми деформациями.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бибикина Е. В., Самсонов А. В., Петрова А. Ю., Кирнозова Т. И. Геохронология архея Западной Карелии // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2005. Т. 13. № 5. С. 3–20.
2. Иващенко В. И., Лавров О. Б. Магмато-генно-рудная (Mo, W, Cu, Au) система Ялонварского вулканоплутонического комплекса архея Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1994. 128 с.
3. Иващенко В. И., Лавров О. Б. Рудогенез и благородно-металльный потенциал Ялонварского вулканоплутонического комплекса архея Карелии // Палеовулканология, вулканогенно-осадочный литогенез, гидротермальный метаморфизм и рудообразование докембрия. Петрозаводск, 2001. С. 110–111.
4. Коваленко А. В. Sm-Nd данные как ключ к пониманию происхождения архейских санукитоидов Карелии, Балтийский щит // Геохимия. 2008. № 4. С. 403–413.
5. Ларионова Ю. А., Самсонов А. В., Шатагин К. Н. Источники архейских санукитоидов (высоко-Mg субщелочных гранитоидов) Карельского кратона: Sm-Nd и Rb-Sr изотопно-геохимические данные // Петрология. 2007. Т. 15. № 6. С. 571–593.
6. Лобач-Жученко С. Б., Роллинсон Х., Чекулаев В. П., Гусева Н. С., Арестова Н. А., Коваленко А. В. Геология и петрология архейского высококальциевого и высокомагнезиального Панозерского массива Центральной Карелии // Петрология. 2007. № 5. С. 493–523.
7. Попов В. Е. Генезис вулканогенно-осадочных месторождений и их прогнозная оценка. Л., 1991. С. 287.
8. Самсонов А. В., Бибикина Е. В., Ларионова Ю. А., Петрова А. Ю., Пухтель И. С. Магнезиальные гранитоиды (санукитоиды) Костомукшского района, Западная Карелия: петрология, геохронология и тектонические условия становления // Петрология. 2004. Т. 12. № 5. С. 495–529.
9. Чекулаев В. П. Архейские «санукитоиды» на Балтийском щите // Доклады АН. 1999. Т. 368. № 5. С. 676–678.
10. Чекулаев В. П., Лобач-Жученко С. Б., Арестова Н. А., Коваленко А. В., Гусева Н. С. Архейские высоко-Mg гранитоиды (санукитоиды) – индикаторы золотой минерализации в Карелии: геология, состав, пространственно-временное положение // Глубинное строение и геодинамика Фенноскандии, окраинных и внутриплатформенных гранитных зон: Тезисы докладов. Петрозаводск, 2002. С. 251–253.
11. Martin H. The Archean grey gneisses and the genesis of continental crust // Archean Crustal Evolution. Amsterdam: Elsevier, 1994. P. 205–259.
12. Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids // Lithos. 1999. Vol. 46. P. 411–429.
13. Rapp R., Shimizu N., Norman M. C., Applegate G. S. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge experimental constraints at 3.8 GPa // Chemical Geology. 2000. № 160. P. 335–356.
14. Shirey S. B., Hanson G. N. Mantle-derived Archean monzodiorites and trachyandesites // Nature. 1984. Vol. 310. P. 222–224.
15. Smithies R. H. The Archean tonalite-trondjemite-granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite // Earth and Planetary Science Letters. 2000. Vol. 182. P. 115–125.
16. Smithies R. H., Champion D. C. The Archean high-Mg diorite suite: lights to tonalite-trondjemite-granodiorite magmatism and implications for early Archean crustal growth // J. Petrology. 2000. Vol. 41. P. 1653–1671.
17. Stern R. A., Hanson G. N. Archean high-Mg granodiorite: A derivative of light rare earth element-enriched monzodiorite of mantle origin // J. Petrol. 1991. Vol. 32. P. 201–238.

УДК 553.9(470.22)

**ПАВЕЛ ВЛАДИМИРОВИЧ МЕДВЕДЕВ**

кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и геофизики физико-технического факультета ПетрГУ, старший научный сотрудник Института геологии КарНЦ РАН

*pmedved@krc.karelia.ru*

**ИСКОПАЕМАЯ НЕФТЬ, ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО И ФОССИЛИИ  
В ОТЛОЖЕНИЯХ НИЖНЕГО ПРОТЕРОЗОЯ ОНЕЖСКОГО СИНКЛИНОРИЯ**

В статье излагаются материалы, полученные в ходе выполнения раздела «Биопродуктивность осадочных бассейнов палеопротерозоя и эпигенез органического вещества» программы Президиума РАН № 18 «Происхождение и эволюция биосферы» в 2006–2008 годах. Проведены работы по изучению масштабов накопления и перераспределения органического вещества в палеопротерозойском Онежском осадочном бассейне (Фенноскандинавский щит) и предполагаемым биопродуцентам.

Ключевые слова: органическое вещество, шунгиты, фоссилии, нижний протерозой, Онежский синклинорий, Фенноскандинавский щит

**ВВЕДЕНИЕ**

Среди известных осадочных бассейнов протерозоя Онежский синклинорий уникален по масштабу накопления органического вещества (ОВ) [16]. В его пределах открыты необычные купольные структуры и локальные тела высокоуглеродистых пород (шунгитов и максовитов) с признаками дифференциации первичного органического вещества и миграции углеводородов [15]. На этой территории фиксируются разнообразные формы петрифицированных нафтеноидов, позволяющие изучать особенности генерации и миграции нефти в докембрии. В верхних стратиграфических горизонтах очевидны процессы разрушения и переотложения первичных залежей ОВ. Оценка продуктивности биоты в докембрийских бассейнах осложнена тем, что не решена проблема учета потерь ОВ на стадии формирования осадков, в диагенезе, катагенезе и при метаморфизме, не всегда возможно определение даже его типа (первичное, миграционное или переотло-

женное); недостаточно изучены процессы рассеивания и вторичного концентрирования ОВ. Предполагается, что исследование указанных процессов возможно на примере Онежского синклинория, поскольку относительно низкий уровень метаморфизма обусловил сохранность генетических признаков ОВ, а также следов первичного взаимодействия гелей водного кремнезема, глины и ОВ. Это позволило установить основные этапы формирования локальных купольных структур; определить развитие процесса генерации и миграции углеводородов в пределах залежей, их участие в формировании куполов; выяснить особенности разрушения залежей и рассеивания ОВ. В данной статье приведены доказательства биогенной природы ОВ, свидетельства его эпигенетического перераспределения, в том числе вторичного концентрирования в купольных структурах и рассеивания при миграции и переотложении. Все многообразие процессов, обусловивших накопление огромных масс ОВ, а также не менее впечатляющую по масштабам генерацию углеводородов, которые оказа-

ли влияние на становление современной биосферы, объединено термином «палеопротерозойский феномен “Шуньга”» [22].

Огромные объемы ОВ на территории Онежского синклиория приурочены к формированию глинисто-карбонатных осадков заонежской свиты мощностью до 1 км (людиковийский надгоризонт региональной стратиграфической шкалы, 2100–1920 млн лет [4]) в условиях мелководного бассейна с синхронным базальтовым вулканизмом. В настоящее время это метаморфизованные в зеленосланцевой фации шунгитоносные породы: алевролиты, аргиллиты туфы и туффиты, а также известняки, доломиты и силициты (лидиты). В составе свиты выделено девять горизонтов высокоуглеродистых пород, среди которых известны локальные залежи с исключительно высоким (30–80 %) содержанием свободного углерода (древнего ОВ). Согласно развиваемой гипотезе [15], породы с таким высоким содержанием древнего ОВ образованы в течение нескольких этапов. В начальный этап шло накопление сапропелевых илов, содержащих ОВ биогенного происхождения, водный кремнезем, глинистые минералы, в подчиненном количестве карбонатный, терригенный и пирокластический материал. В диагенезе ОВ взаимодействовало с водным кремнеземом и глинистыми минералами, в результате чего были образованы органо-минеральные соединения. После литификации осадков и перекрытия их более плотными породами в локальных участках структуры возникли благоприятные условия для развития складок нагнетания (куполов-диапиров) по горизонтам с ОВ. В этом процессе наблюдается постепенное вторичное обогащение ОВ центральных и верхних частей диапировых структур за счет дифференциации осадочного материала по плотности. Третий этап связан с обогащением верхних частей купольных структур миграционными углеводородами. Позднее породы заонежской свиты подверглись эрозии, и терригенный материал, содержащий ОВ, накапливался уже в составе вышележащей кондопожской свиты (калевийский надгоризонт региональной стратиграфической шкалы, 1920–1800 млн лет [13]).

### 1. МАСШТАБЫ НАКОПЛЕНИЯ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРВИЧНОГО ОВ

О масштабах накопления ОВ в Онежском бассейне (рис. 1) можно судить по ряду ранее сделанных оценок запасов сохранившегося углерода. Так, по данным Н. В. Лопатина, эта величина составляет  $65 \times 10^9 \text{ м}^3$  [7]; по Л. П. Галдобинной [4] –  $25 \times 10^{10} \text{ т}$ . При этом объем исходного ОВ измерялся  $650 \times 10^9 \text{ м}^3$ , а ежегодная биопродуктивность палеопротерозойского бассейна достигала 2–4 кг  $C_{\text{орг}}/\text{м}^2$  [8], что возможно при чрезвычайно благоприятных условиях. В расчетах Н. В. Лопатина принято, что мощность шунгитоносных отложений составляет 600 м, площадь распространения –  $8000 \text{ км}^2$ , мини-

мальное содержание шунгитового вещества 2 %, а в зоне раннего метагенеза сохранилось 10 % от объема исходного ОВ. Как видно, расчеты биопродуктивности были сделаны без учета факторов эпигенетического перераспределения ОВ.



Рис. 1. Схема расположения залежей шунгитов в Онежском синклиории

Примечание. 1 – Максого, 2 – Подсосонье, 3 – Чеболашка, 4 – о. Березовец.

Косвенным признаком огромных объемов отложения ОВ и генерации углеводородов в заонежских образованиях может служить легкий изотопный состав углерода карбонатных пород калевия ( $\delta^{13}C_{\text{carb}}$  до 17,6 ‰). Минимум значений  $\delta^{13}C_{\text{carb}}$  совпадает с максимальными концентрациями антраксолитовых включений в отложениях кондопожской свиты. Отрицательные значения  $\delta^{13}C_{\text{carb}}$ , достигающие до -11,8 ‰, становятся устойчивыми уже к верхней части заонежской свиты, что объясняется существованием мощного источника органического углерода, имеющего низкие значения  $\delta^{13}C_{\text{орг}}$ . Последствие заонежского резервуара проявляется в изотопном составе углерода вышележащих карбонатных пород суйсарской и кондопожской свит. Для суйсарских карбонатных конкреций  $\delta^{13}C_{\text{carb}}$  достигает -12,4 ‰, в нижней части кондопожской свиты карбонатные породы имеют -18,1 ‰, а в верхней -14,9 ‰. Нормальный изотопный состав углерода карбонатных пород ( $\delta^{13}C_{\text{carb}} = 0$  ‰) устанавливается лишь к верхам вазезерской свиты. Поскольку ни суйсарские, ни кондопожские отложения не содержат значимых количеств сингенетического ОВ, аномалии изотопного состава углерода можно объяснить лишь

влиянием его массового накопления в заонежское время. В процессе катагенеза и метаморфизма ОВ длительное время продуцировало жидкие и газообразные углеводороды и  $\text{CO}_2$ , которые частично и были ассимилированы карбонатными породами.

Аналогичная закономерность известна для отложений нижнего протерозоя Курской магнитной аномалии: отрицательные значения изотопного состава углерода карбонатных пород наблюдаются не во время накопления ОВ (рыльская свита), а в последующее время (тимская свита). Известно также, что карбонатные породы и бикарбонаты пластовых вод над нефтяными залежами обычно имеют легкий изотопный состав углерода. Поскольку максимум выхода газовой компоненты приходится на этап мезокатагенеза, а ее общее количество в этот период достигает 30 % от исходного ОВ, можно предположить, что временное распределение количества катагенетических углеводородов коррелируется с распределением изотопного состава свободного и карбонатного углерода вышележащих отложений.

Данные по изотопному составу углерода шунгитового вещества пород заонежской свиты и антраксолитов [16] свидетельствуют, во-первых, о том, что вверх по разрезу  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  существенно меняется (от -26,4 до -39,5 ‰ для Максковского месторождения) и, во-вторых, что не все антраксолиты по  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  контрастно отличаются от потенциальных материнских пород (шунгиты и антраксолиты Шуньгского месторождения имеют практически одинаковые значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ : -37,07 и -37,36 ‰ соответственно). Можно предположить, что доля миграционного органического вещества (углеводородов) в шунгитоносных породах верхних частей разреза заонежской свиты очень большая, причем первоначально оно было частично газообразным.

О существовании масштабного процесса расщепления органического вещества в постзаонежское время свидетельствуют данные по изотопному составу углерода шунгитоносных пород калевия:  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  углеродсодержащих сланцев месторождения Нигозеро (г. Кондопога) равно -33,1 ‰, а пород третьей пачки заонежской свиты – -33,4 ‰. Близость значений может служить признаком переотложенного характера генезиса шунгитового вещества калевийских пород, источником терригенного шунгитоносного материала которых, очевидно, служили верхние горизонты заонежской свиты.

## 2. СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СВИДЕТЕЛЬСТВАХ ЖИЗНИ В ПАЛЕОПРОТЕРО- ЗОЙСКОМ ОНЕЖСКОМ БАССЕЙНЕ

Биогенная природа ОВ (теперь – свободного углерода) пород заонежской свиты обоснована общими геологическими фактами, палеонтологическими, геохимическими (в том числе биогеохимическими) и физическими признаками [15]. В шунгитоносных толщах Онежского синклинория к настоящему времени установлен пол-

ный набор палеонтологических объектов докембрия: в карбонатных породах – строматолиты и онколиты, в шунгитоносных пелитах и алевролитах – микрофоссилии, в кремнистых породах – стириолиты и микрофоссилии; в высокоуглеродистых породах найдены следы цианобактериальных матов и хемофоссилии (биомаркеры).

Многообразие породообразующих строматолитов и онколитов в подстилающих карбонатных толщах ятулия Карелии свидетельствует о развитой цианобактериальной жизни и сильном ее влиянии на осадконакопление во время, предшествовавшее накоплению ОВ в осадках заонежской свиты [9]. В эвапоритовых условиях мелководных ятулийских водоемов жизнедеятельность многочисленных цианобактериальных сообществ способствовала осаждению и накоплению мощных (в сотни метров) толщ доломитов. При этом цианобактерии в ископаемом состоянии не сохранились, до нас дошли только следы их жизнедеятельности в виде построек строматолитов и онколитов. ОВ не уцелело из-за относительно высокого окислительного потенциала среды, способствовавшего «выгоранию» органики. Процесс накопления органических карбонатных пород продолжался вплоть до начала заонежского времени и был прерван интенсивной магматической деятельностью, изменившей характер осадконакопления с существенно карбонатного на вулканогенно-терригенный и хемогенный. При этом исчезли строматолитообразующие цианофицы и появились новые сообщества, в том числе бактерии-метаногены. Вулканические процессы способствовали жизнедеятельности микробных сообществ, а восстановительные условия среды обитания – сохранению ОВ в ископаемом состоянии.

Качественное и количественное многообразие фоссилий в шунгитоносных породах Онежского синклинория позволяет утверждать, что первичным источником ОВ в осадках является биомасса, накопленная в восстановительных условиях при сильном влиянии основного (базальтового) вулканизма. В шунгитоносных породах найдены микрофоссилии, интерпретируемые как остатки бентосных цианобактерий [6]. Последние являются представителями донных сообществ, обитающих в фотической зоне. Следовательно, и содержащие их остатки шунгитоносные породы образовались в мелководных, а не в глубоководных условиях из оседавших планктонных организмов, как предполагают некоторые исследователи [12]. Бентосные цианобактерии развиваются в составе сложных, хорошо структурированных микробных сообществ – цианобактериальных матов. Они известны сейчас во многих прибрежных местообитаниях и озерах. Продуктивность современных цианобактериальных матов достаточно высока: 8–12 г/м<sup>2</sup> органического углерода в сутки [18]. Таким образом, признание цианобактериальных матов как источника органического углерода [20] делает весьма возможным накопление больших объемов углеродсодержащих отложений.



## 3. НОВЫЕ ДАННЫЕ

Спороподобные органостенные микрофоссилии, или акритархи, в изобилии встречаются в докембрийских, палеозойских и более молодых отложениях. По современным представлениям, они являются остатками одноклеточного фитопланктона, на что указывает их приуроченность исключительно к морским фациям и химический состав, близкий кутину или спорополленину. Микрофоссилии известны с верхнего архея. Наиболее целенаправленно и систематически микрофитологическому изучению подвергались дорифейские породы Карелии, поэтому собран сравнительно полный материал, позволяющий судить о распределении микрофоссилий в разрезе раннего докембрия этого региона. Б. В. Тимофеевым в нигозерских сланцах (кондопожская свита) были обнаружены *Protosphaeridium densum* Tim., *P. tuberculiferum* Tim., *P. flexuosum* Tim., округлые силуэтные формы и обломки органических пленок [14]. В «глинисто-алевролитовых черных сланцах» бесовецкой свиты им установлены многочисленные «микрофитофоссилии», часть из которых была интерпретирована как эукариоты (*Nucellosphaeridium minutum* Tim.). Впоследствии многие из ранее описанных форм были критически пересмотрены. В последнем каталоге дорифейского комплекса акритарх оставлены как реально обоснованные лишь два вида: *Leiosphaeridia crassa* (Naum.), *Stictosphaeridium sinapticuliferum* (Tim.), а также *Symplassosphaeridium* sp. [10]. В ходе наших работ была предпринята попытка повторить находки микрофоссилий, сделанные Б. В. Тимофеевым. Изучались шлифы и препараты из коллекции образцов, отобранных из керна буровых скважин, а также из карьеров и естественных выходов горных пород. Поиск и изучение микрофоссилий проводились в отделе палеоботаники геологического департамента Льежского университета (Бельгия) с использованием современного оборудования по методике, разработанной профессором Э. Жаво при исследовании протерозойских акритарх Австралии [19]. Обнаружены микрофоссилии (акритархи) в мацерированных препаратах из метаглинистых прослоев пород верхней подсвиты кондопожской свиты Онежского синклиория. Находки предварительно отнесены к роду *Stictosphaeridium* (рис. 2). Микрофоссилии найдены и в породах верхней части калевийского надгоризонта (шуйская, вашезерская свиты) и их аналоги в синклиналиях второго порядка). Находки микрофоссилий (акритарх) стратиграфически приурочены к средней (верхняя подсвита кондопожской свиты) и верхней частям разреза калевийского надгоризонта в пределах Онежского синклиория. Фациально акритархи находятся в глинистых прослоях, накопившихся в бассейне до 200 м глубиной в удаленных от берега спокойных условиях во время отсутствия привноса грубозернистых продуктов переработки вулканического материала, а также ОВ (углерода).

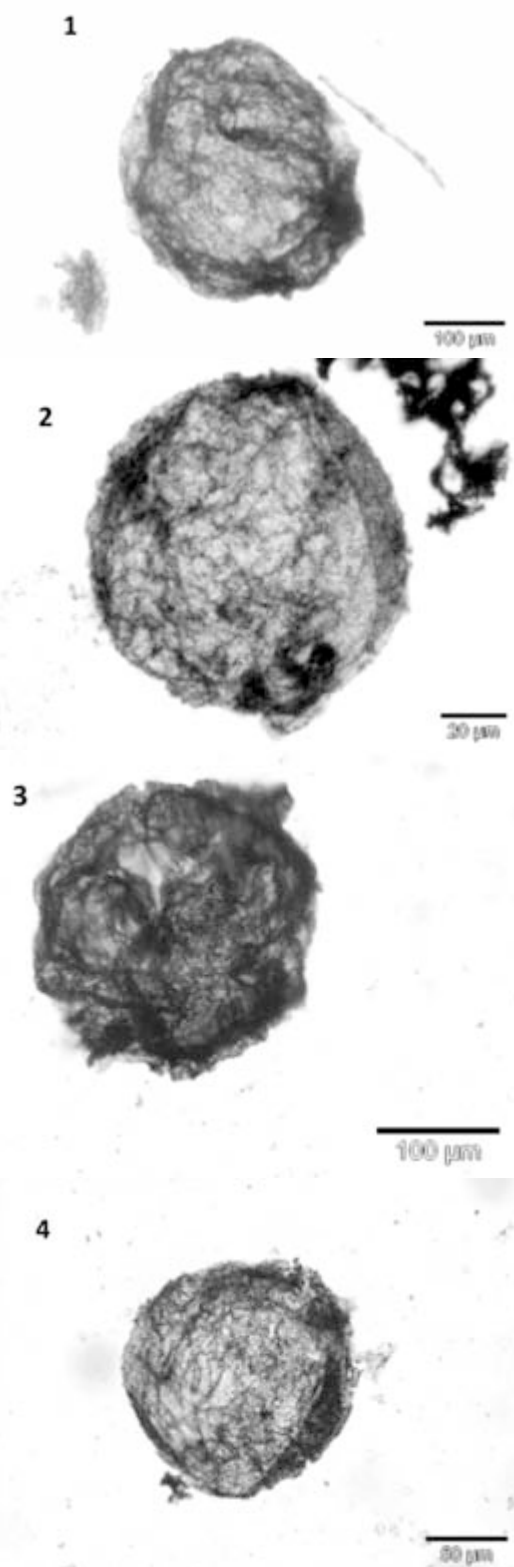


Рис. 2. Микрофоссилии (акритархи) рода *Stictosphaeridium* (Timofeev, 1966), emend. Mikhailova et Jankauskas, 1989 из метаглинистых прослоев верхов кондопожской свиты

Примечание. 1, 2 – скважина 110, глубина 17,0 м. 3, 4 – скважина 1, глубина 53,0 м.

В препаратах, изготовленных из шунгитоносных метапелитов верхнезаонежской подсвиты, были обнаружены единичные экземпляры акритарх плохой сохранности, определяемые как *Protosphaeridium sp.*, и обрывки углефицированных водорослевых пленок.

В дальнейшем будет определена биологическая принадлежность найденных микрофоссилий (прокариоты-цианобактерии или эукариоты-протисты). Планируется исследование kernового материала, полученного по проекту ICDP FAR-DEEP [21], с целью обнаружения новых морфофоссилий в шунгитоносных породах Онежского синклиория. Предполагается провести изучение их фациальной приуроченности, связи с осадконакоплением, закономерностей стратиграфического и площадного распространения, а также корреляционных возможностей. Будет продолжена работа по выявлению в шунгитоносных породах нижнего протерозоя геохимических признаков существования микробиальных сообществ.

#### 4. АРТЕФАКТЫ

Процессы регионального метаморфизма зеленосланцевой фации и низкотемпературного гидротермального метаморфизма, проявленные в Онежском синклиории, вызвали перекристаллизацию фоссилизированных остатков предполагаемых микроорганизмов и следов их жизнедеятельности. Часть выделенных ранее форм впоследствии была подвергнута критическому пересмотру. Ошибки в палеонтологическом определении могли возникнуть и возникали также из-за неправильной или неполной оценки геологического положения того или иного объекта исследований. Поскольку подобные просчеты подвергают сомнению биогенную гипотезу об источнике углерода в шунгитоносных породах в целом, предлагается альтернативный вариант трактовки происхождения ряда образований, описанных в литературе как морфофоссилии.

В лидитах заонежской свиты описаны колониальные коккоидные микрофоссилии [3]. Достоверность их идентификации в настоящее время подвергается сомнению. Поскольку лидиты диагнетического «лидит-доломит-шунгитового» комплекса имеют гидротермальную природу и текущие контакты с осадочными породами, скорее всего, это метаколломорфные глобулярные формы, образованные в процессе старения органокремнистых гелей. Метаколлоидными образованиями, вероятно, являются и «округлые онколитоподобные» формы, выявленные в высокоуглеродистых породах Зажогинского месторождения [5].

В антракосолитах Шунги, заполняющих субпластовую жилу, оптическими методами были обнаружены и описаны структурные элементы, «схожие со строением древесины» [2], которые, по-видимому, обусловлены мезофазным состоянием углефицированного природного битума.

Известны обломочные включения антракосолита (рис. 3) в алевролитах кондопожской свиты, интерпретировавшиеся ранее как проблематичные отпечатки водорослей, близких к классу багряных, «обитавших в мелких теплых бассейнах» [17]. Сейчас они отнесены к бывшим плавающим на поверхности бассейна сгусткам тяжелой нефти, окисленной сначала до мальты, и погруженным затем на дно [11]. В их составе много окатанного терригенного материала, захваченного битумом при его захоронении в условиях мелководной, волноприбойной зоны.



Рис. 3. Антракосолитовые включения в метаалевролите кондопожской свиты. Фото В. А. Мележика

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Материалы исследований по программе Президиума РАН № 18 «Происхождение и эволюция биосферы» отражены в «Атласе текстур и микроструктур шунгитоносных пород Онежского синклиория» [1]. Это систематизация накопленных за многие годы материалов о формах проявления шунгитового вещества, о его распределении в породах, о признаках происхождения минерального и шунгитового вещества, шунгитоносных пород и месторождений. Вместе с таблицами фотографий он дает наглядное представление о разнообразии проявления шунгитового вещества в раннепротерозойских отложениях; демонстрирует возможность выявления и изучения генетических признаков первичного ОВ (сапротелевое, миграционное, смешанное, переотложенное), основных процессов его преобразования, ведущих к появлению миграционных форм углеводородов. Исключением являются лишь максовиты и шунгиты, которые по ряду генетических признаков отнесены к экструзивным сапробитумолитам. Именно они образуются в процессе дифференциации первичного осадочного вещества по плотности и его выжимания (экструзии) в складки нагнетания, а шунгитовое вещество в них является смешанным (са-

пропелевым и миграционным). Этой группе пород в атласе уделено основное внимание. Шунгитоносные породы благодаря низкому уровню метаморфизма являются благодатным объектом для исследования условий осадконакопления в протерозое, для изучения потенциальных источников ОБ, процессов взаимодействия и взаимовлияния органического и минерального вещества в катагенезе и при метаморфизме; исходное ОБ пород является сапропелевым (биогенным), в изверженных породах оно либо ассимилированное (результат преобразования ксенолитов), либо миграционное. Одновременно показано, что многие экзотичные формы минерального вещества шунгитоносных пород, принимаемые за палеонтологические свидетельства происхождения ОБ, являются результатом химического взаимодействия и взаимного влияния коллоидов органического и минерального веществ.

Очевидна необходимость продолжения исследований осадочных пород ятулийского, людиковийского и калевийского надгоризонтов нижнего протерозоя Онежского синклинория с целью уточнения характера биоты, давшей первичное ОБ. Следует определить динамику ее развития, выявить причинно-следственные связи между ростом содержания кислорода в атмосфере и процессами накопления ОБ в осадках, изучить в стратиграфической последовательности изотопные данные, молекулярные биомаркеры, морфологические фоссилии начиная с первых проявлений захороненного ОБ. Предполагаемые морфофоссилии и биопленки уже описывались из кремней, сланцев и фосфоритов нижнего протерозоя Карелии и Кольского полуострова, но их природа остается невыясненной. Для того чтобы исключить такие формы, как газовой-жидкие включения и пустоты, необходимо убедиться, что предполагаемые микрофоссилии имеют органическую природу. Помимо простых форм, небиологические процессы могут также формировать микроскопические образования, способные абсорбировать простые абиогенные органические соединения. После метаморфизма подоб-

ные структуры могут демонстрировать морфологию и Рамановский спектр типичной микрофоссилии. Поэтому изучаются дополнительные химические, минералогические и изотопные свидетельства биологической активности. Интеграция морфологических характеристик с результатами, полученными различными неразрушающими методами, будет решающей как для распознавания самих микрофоссилий, так и для определения их эволюционного значения. Применение масс-спектрометрии для изучения состава отдельных углеродистых микрообразований в породах архея и протерозоя уже имеет положительный опыт. Эти неразрушающие методы анализа могут быть использованы для характеристики других предполагаемых биогенных образований, таких как строматолитовые наслоения, а также для установления связи между микрофоссилиями и вмещающей породой.

Необходимо также продолжение исследований эпигенетического перераспределения ОБ в пределах отдельных горизонтов и между горизонтами как процесса, ведущего к образованию высокоуглеродистых пород.

Эти проблемы предполагается изучить при реализации программы международного проекта «Архейско-палеопротерозойский переход: возникновение современной земной системы» в рамках Международной программы континентального бурения (ICDP). В период с 2009 по 2012 год интернациональным коллективом специалистов будут выполнены междисциплинарные исследования полученного в 2007 году керн буровых скважин по проблемам становления окислительной атмосферы, глобального изменения углеродного цикла в ятулии, образования самых древних гигантских залежей нефти (феномен «Шуньга») и ряда других событий, важных для понимания закономерностей формирования современной биосферы [23].

Исследования проведены при финансовой поддержке программы Президиума РАН № 18 (2006–2008 гг.).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бискэ Н. С., Медведев П. В., Мележик В. А., Ромашкин А. Е., Рычанчик Д. В., Филиппов М. М. Атлас текстур и структур шунгитоносных пород Онежского синклинория / Под науч. ред. М. М. Филиппова, В. А. Мележика. Петрозаводск: Скандинавия, 2007. 80 с.
2. Волкова И. Б., Богданова М. В. Шунгиты Карелии // Сов. геология. 1985. № 10. С. 93–100.
3. Вологдин А. Г. Остатки организмов из шунгитов докембрия Карелии // ДАН СССР. 1970. Т. 193. № 5. С. 1163–1166.
4. Галдобина Л. П. Шунгитовые породы // Докембрийские индустриальные минералы Карелии. Петрозаводск, 1993. С. 45–51.
5. Горлов В. И. Онежские шунгиты (геология, генезис, прогнозная оценка): Дисс. ... канд. г.-м. наук. Петрозаводск, 1984. 226 с.
6. Жмур С. И., Горленко В. М., Розанов А. Ю. и др. Цианобактериальная система – продуцент углеродистого вещества шунгитов нижнего протерозоя Карелии // Литология и полезные ископаемые. 1993. № 2. С. 122–127.
7. Лопатин Н. В. Эволюция биосферы и горючие ископаемые // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1979. № 7. С. 5–22.
8. Лопатин Н. В. Образование горючих ископаемых. М.: Недра, 1983. 192 с.
9. Макарихин В. В., Кононова Г. М. Фитолиты нижнего протерозоя Карелии. Л.: Наука, 1983. 156 с.
10. Микрофоссилии докембрия СССР. М.: Наука, 1989. 191 с.
11. Мишунина З. А. Литогенез органического вещества и первичная миграция нефти в карбонатных формациях. Л.: Недра, 1978. 152 с.
12. Негруца В. З. Раннепротерозойские этапы развития восточной части Балтийского щита. Л.: Недра, 1984. 270 с.

13. Общая стратиграфическая шкала нижнего докембрия России: Объяснительная записка. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002. 13 с.
14. Тимофеев Б. В. Микрофитофоссилии раннего докембрия. Л.: Наука, 1982. 128 с.
15. Филиппов М. М. Шунгитоносные породы Онежской структуры. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2002. 280 с.
16. Филиппов М. М., Голубев А. И., Медведев П. В. и др. Органическое вещество шунгитоносных пород Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1994. 208 с.
17. Яковлева В. В. О находках проблематических отпечатков водорослей в сланцах среднего протерозоя Карелии // Остатки организмов и проблематика протерозойских образований Карелии. Петрозаводск, 1966. С. 19–25.
18. Cohen Y., Aisenshat Z., Stoler A., Joergensen B. B. The microbial geochemistry of Solar Lake, Sinai // Biogeochemistry of ancient and modern environments / J. B. Ralph, P. Trudinger, M. R. Walter (Eds.). Berlin: Heidelberg; N.-Y.: Springer, 1980. P. 167–172.
19. Javaux E. J., Marshall C. P. Deciphering the record of early life in Precambrian oceans using combined microscopy and microchemistry of organic-walled microfossils. Goldschmidt Conference Abstracts. 2007. A 442.
20. Lanier W. P. Approximate growth rates of Early Proterozoic microstromatolites as deduced by biomass productivity // Palaios. 1986. № 1. P. 525–542.
21. Melezhik V. A., Fallick A. E., Hanski E. et al. Emergence of the Modern Earth System during the Archaean-Proterozoic Transition // GSA Today. 2005. Vol. 15. P. 4–11.
22. Melezhik V. A., Fallick A. E., Filippov M. M. et al. Karelian shungite – an indication of 2.0-Ga-old metamorphosed oil-shale and generation of petroleum: Geology, lithology and geochemistry // Earth-Science Reviews. 1999. Vol. 47. P. 1–40.
23. Melezhik V. A., Filippov M. M., Medvedev P. V. et al. Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project: Emergence Of The Aerobic Biosphere During The Archaean-Proterozoic Transition; Recent Achievements And Future Challenges // Северная Европа в XXI веке: природа, культура, экономика: Матер. междунар. конф. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 324–327.

УДК 616.858-009.1-000.3.612.53

**АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ МЕЙГАЛ**

доктор медицинских наук, профессор кафедры физиологии человека и животных медицинского факультета ПетрГУ  
*meigal@petrsu.ru*

**ЮРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ ЛУПАНДИН**

доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой физиологии человека и животных, декан медицинского факультета ПетрГУ  
*imaksim@petrsu.ru*

### «ТЕРМОРЕГУЛЯЦИОННЫЙ КОМПОНЕНТ» ДВИГАТЕЛЬНЫХ РАССТРОЙСТВ ПРИ ПАРКИНСОНИЗМЕ

В статье приводятся сведения о нейрофизиологических механизмах, формирующих двигательные расстройства при паркинсонизме. Показано, что в основе классических двигательных симптомов паркинсонизма (тремор, ригидность, акинезия) лежат универсальные спинальные моторные программы, которые могут быть активированы и модулированы сенсорными сигналами, в том числе термической природы. Также представлены данные о влиянии общего охлаждения и согревания на физическую работоспособность, ригидность и тремор у больных паркинсонизмом.

Ключевые слова: паркинсонизм, мышечный тонус, тремор, поза, двигательные расстройства, двигательная единица, спинной мозг, терморегуляция

#### ВВЕДЕНИЕ

Паркинсонизм является актуальной проблемой современной неврологии и нейрофизиологии. Классическими моторными симптомами паркинсонизма являются тремор покоя, акинезия / брадикинезия, ригидность [3]. Также для паркинсонизма характерны расстройство походки, нестабильность позы, повышенная утомляемость, нарушение психических и автономных функций мозга, включая терморегуляцию. Нарушается работоспособность и тонкие движения рук, что иногда вызывает полную инвалидность пациента.

Классическая триада моторных симптомов паркинсонизма формально очень напоминает моторные феномены, вызываемые охлаждением организма. Действительно, холод вызывает тремор покоя (холодовую дрожь), замедление и ослабление мышечного сокращения, повышение мышечного тонуса (терморегуляционный мы-

шечный тонус). Интересно отметить, что в зарубежной литературе принято использовать «терморегуляционные» термины в отношении паркинсонизма. Например, «*frozen movement*» («замороженное движение»), «*freezing of gate*» («замораживание походки») и «*insufficient energising of muscles*» («недостаточная энергетическая заряженность мышц»).

Таким образом, моторные симптомы паркинсонизма могут быть связаны с механизмами терморегуляции. Нами уже выдвигалась гипотеза об общности холодовой дрожи и патологического (паркинсонического) тремора [7], [12], [39], дополненная данными о влиянии охлаждения и согревания на мышечную ригидность и тремор при паркинсонизме [11] и данными о влиянии физической нагрузки на моторный дефицит при паркинсонизме и охлаждении [40]. Настоящий обзор сфокусирован на рассмотрении возможной общности механизмов терморегуляции и паркинсонизма.

По современным представлениям, двигательные расстройства при паркинсонизме отражают процесс *адаптации* или *компенсации* заболевания, а не являются следствием первичного расстройства [36]. В таком случае эти компенсаторные механизмы могут отражать *новый порядок* или *патофизиологическую систему* для минимизации первичного расстройства [3], [36]. Разумеется, двигательный дефицит при паркинсонизме и у охлажденных здоровых испытуемых имеет совершенно разные первичные причины (нейродегенерация черной субстанции и охлаждение организма соответственно), однако двигательная система при паркинсонизме и при охлаждении использует практически *идентичные стратегии* компенсации двигательного дефицита.

## I. МОТОРНЫЙ ДЕФИЦИТ ПРИ ПАРКИНСОНИЗМЕ И ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ОРГАНИЗМА

Одним из явных признаков паркинсонизма является замедление движений (брадикинезия), что обусловлено двукратным снижением мышечной силы, ригидностью мышц, тремором и даже пониженной мотивацией к движению. В условиях охлаждения скорость сокращения снижается на 4–5 %, а максимальная сила и анаэробная мощность мышцы – на 4–6 % на 1 °С падения внутримышечной температуры [47]. Быстрые движения больше подвержены негативному влиянию холода. Так, во время прыжков работоспособность мышц снижается на 16–17 % на 1 °С внутримышечной температуры, тогда как при медленных движениях – всего на 2–10 % на 1 °С [47], [49]. Причиной названных изменений могут быть замедление функционирования мышцы и периферических нервов и нарушение координации мышц-антагонистов (так называемый *«braking effect»* – тормозной эффект) [47].

При паркинсонизме и при охлаждении не нарушаются только самые простые медленные движения в одном суставе, тогда как быстрые и сложные движения, требующие последовательно или одновременного вовлечения нескольких суставов, нарушаются всегда [54]. Умеренное охлаждение не влияет на точные целенаправленные движения, даже на произвольное рекрутирование разрядов одного спинального  $\alpha$ -мотонейрона [15], хотя биомеханически моторный выход становится более вариабельным [45], [44].

Утомление считается нормальным, хотя и особым, состоянием двигательной системы. Жалобы на утомление предъявляют до 50 % пациентов с паркинсонизмом, тогда как среди здоровых пожилых людей того же возраста на утомление жалуются только 18 % [32]. Повышенная утомляемость у больных паркинсонизмом связана с дефицитом дофамина, поскольку дофаминергическая терапия снижает утомляемость. При охлаждении утомление наступает вдвое быстрее по сравнению с термонейтральными условиями [43], [48]. Снижение выносливости при охлаж-

дении может быть следствием более высокой концентрации метаболитов при сокращении мышц на холоде или более сильного действия метаболитов на охлажденную ткань мышц [56]. Повышенная активация мышц-антагонистов при охлаждении также может снижать работоспособность за счет «тормозного эффекта» [47].

При паркинсонизме доминирует активность *флексорной* мускулатуры, заметная по согнутой спине, наклоненной вперед голове, согнутых в локтевых суставах руках («поза манекена»). При охлаждении также активизируется *флексорная* мускулатура и тормозятся мышцы-экстензоры [42]. Это происходит при помощи *афферентов флексорного рефлекса* [7], [8]. У больных паркинсонизмом центр тяжести смещен вперед, наблюдается характерная «шаркающая» походка и короткие шаги. Поворот на месте для больных паркинсонизмом представляет большую трудность, им приходится совершать много мелких шажков при неподвижном туловище (поворот *en block*). При охлаждении стратегия ходьбы исследована очень мало, но можно предположить, что эта стратегия имеет такой же сценарий, как и при паркинсонизме [47].

Таким образом, существует аналогия между моторными симптомами паркинсонизма и моторными феноменами при охлаждении организма человека (табл. 1). Эта аналогия, естественно, носит формальный характер, поскольку первичные причины моторного дефицита при паркинсонизме и охлаждении человека абсолютно разные. Более того, при некоторых других состояниях, таких как старение, или при тяжелой физической нагрузке также наблюдаются повышенный мышечный тонус, тремор, утомление, нарушения походки и позы.

Таблица 1

Примеры внешнего сходства между основными симптомами паркинсонизма и моторными феноменами при охлаждении нормального испытуемого [40]

Моторные симптомы при паркинсонизме	Моторные феномены при охлаждении организма
Тремор покоя с частотой 3.5–7 Hz	Тремор покоя (холодовая дрожь)
Мышечная ригидность (сопротивление движению вследствие повышенного тонуса мышц)	Терморегуляционный мышечный тонус (преддрожательный тонус)
Брадикинезия (замедленное движение), акинезия (трудность с началом движения, «frozen movement»)	Снижение силы, мощности и скорости мышечного сокращения
Дефицит позного контроля, преобладание сгибательной позы («поза манекена»), расстройства походки	Активация флексорной мускулатуры для формирования теплосберегающей «эмбриональной позы»
Повышенная физическая утомляемость	Раннее наступление утомления по сравнению с термонейтральными условиями

## II. СПИНАЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ МЫШЕЧНОГО ТОНУСА И ТРЕМОРА ПРИ ПАРКИНСОНИЗМЕ И ОХЛАЖДЕНИИ

Все многообразие движения и позы человека осуществляют немногим более 200 тысяч двигательных единиц (ДЕ). Каждая ДЕ включает в свой состав  $\alpha$ -мотонейрон, его аксон и все мышечные волокна, которые получают иннервацию от данного мотонейрона. Мышца получает информацию о степени, длительности и скорости сокращения от своего  $\alpha$ -мотонейрона в виде частоты импульсации, степени синхронизации разных ДЕ и выбора «быстрых высокопороговых» или «медленных низкопороговых» ДЕ [19].

Нами установлено, что организация активности ДЕ при разных клинических формах паркинсонизма совпадает с базисными универсальными способами организации активности ДЕ. При акинетико-ригидной форме паркинсонизма наблюдается асинхронная переменная импульсация низкопороговых ДЕ с частотой 9–10 имп./с [9], [11], что характерно для позного тонуса и терморегуляционного мышечного тонуса. Интерференционная электромиограмма (ЭМГ) при акинетико-ригидной форме не отличается от ЭМГ нормального позного тонуса и по своей интенсивности соответствует позному тонусу силой 2–4 кг [1], [2].

Для дрожательной формы паркинсонизма характерно отчетливое группирование интерференционной ЭМГ с частотой 5–6 Гц и доминирование активности ДЕ в форме дуплетов (сдвоенных разрядов) с короткими (5–15 мс) и длительными (20–60 мс) межимпульсными интервалами, хорошо соответствующими частоте тремора 4–6 Гц [9], [22], триплетов (строенных разрядов), и долгосрочной синхронизации разрядов нескольких ДЕ. Таким образом, две крайние формы паркинсонизма (акинетико-ригидная и дрожательная) базируются на уже известных формах активности ДЕ, используемых при поддержании позы или при формировании активированной формы физиологического тремора.

Охлаждение теплокровного животного вызывает специфическую активность двигательной системы: 1) сократительный термогенез и 2) поведенческую терморегуляцию. Поведенческая терморегуляция представляет собой защитное поведение на холоде, а сократительный термогенез включает холододовую дрожь и терморегуляционный мышечный тонус. Сократительный термогенез запускается периферическими и центральными терморцепторами [24] и проприоцепторами [6], [51].

Терморегуляционный мышечный тонус (ТМТ) представлен низкоамплитудной электромиограммой. Наши исследования показали, что ТМТ человека и животных формируется за счет длительной асинхронной импульсации низкопороговых ДЕ с частотой 4–16 имп./с [10]. Эти ДЕ относятся к классу медленных ДЕ, которые устойчивы к утомлению и обычно активны во время слабого изо-

метрического сокращения мышцы, например при поддержании позы. Холодовая дрожь (ХД) отчетливо подразделяется на два паттерна – в виде коротких вспышек и в виде группирования ЭМГ. Вспышки ХД возникают 6–12 мин<sup>-1</sup> и представляют собой «медленные» модуляции ЭМГ [17], [31]. Группирование ЭМГ возникает при снижении центральной температуры и происходит с частотой 4–8 Гц [14]. Именно во время группирования наблюдается наиболее интенсивная дрожь, которая соответствует понятиям «*shuddering*» (вздрагивание) или «*shaking*» (встряхивание), впервые описанным Денни-Брауном с соавторами [25] как «максимальное проявление дрожи». Интенсивность холодовой дрожи достигает 10–20 % максимальной силы мышц [53]. Вспышки холодовой дрожи совпадают с периодами активности высокопороговых ДЕ, относящихся к классу быстрых ДЕ, или за счет долгосрочной синхронизации ДЕ [17]. Эти данные впоследствии были подтверждены канадскими исследователями, показавшими, что во время холодовой дрожи повышается потребление углеводов гликолитическими мышечными волокнами класса II (быстрые ДЕ), а во время терморегуляционного тонуса – потребление липидов медленными оксидативными волокнами (медленные ДЕ) [28].

Дуплеты, столь характерные для паркинсонизма спаренные разряды одной ДЕ, не были обнаружены ни во время холодовой дрожи, ни во время ТМТ. Вместе с тем в состоянии перегревания, с наступлением реакции потения, количество дуплетов в коротких сериях разрядов ДЕ увеличивается до 40–100 %, то есть некоторые ДЕ импульсируют только дуплетами [15]. Факт, что дуплеты с готовностью регистрируются при паркинсонизме и при перегревании, может указывать на связь спинальных механизмов, формирующих дрожательную форму паркинсонизма, с механизмами, включающимися при перегревании. Дуплеты мгновенно увеличивают силу мышцы, но при этом снижают количество теплопродукции. Поскольку при согревании дуплеты помогают поддерживать нормальное усилие, не вызывая увеличения теплопродукции, появление дуплетов «выгодно» при угрозе перегревания. Таким образом, во время мышечной активности, вызванной охлаждением, наблюдаются такие же паттерны активности ДЕ, как и при обычной позной и двигательной активности и при паркинсонизме.

Согласно классическим представлениям, «центр холодовой дрожи» локализуется в заднем гипоталамусе. Однако есть данные о том, что супраспинальная система «запуска» дрожи является «распределенной системой» («*distributed system*»), которая включает также хвостатое ядро, скорлупу, бледный шар, черную субстанцию, ретикулярную формацию среднего мозга и продолговатого мозга [21]. Это означает, что для активации холодовой дрожи центральная нервная система использует практически те же самые структуры, которые участвуют в формировании мышечного тонуса и

стереотипных ритмичных движений и которые вовлекаются в патофизиологические механизмы моторных нарушений при паркинсонизме [38].

Представленные данные показывают, что двигательная система человека использует ограниченное количество «базовых» паттернов активности ДЕ. Эти паттерны могут использоваться при движении у здорового человека и при патологически измененной двигательной активности. В этой связи нам представляется возможным сформулировать положение о том, что *практически все двигательные феномены, наблюдаемые при паркинсонизме и при охлаждении организма, базируются на уже известных формах активности мотонейронного пула*. Это положение является дальнейшим расширением теории о существовании единого позно-терморегуляционного мышечного тонуса, сформулированной Ю. В. Лупандиным [7], [10]. Различие между этими состояниями (паркинсонизм, охлаждение, произвольная поза и движение) заключается лишь в разных активирующих входах к «общему резерву» универсальных двигательных программ. Возможные соответствия между разными формами паркинсонизма, сократительного термогенеза и формами обычной двигательной активности на уровне спинальных ДЕ представлены в табл. 2.

**Таблица 2**

Соответствие между «базовыми» способами организации мотонейронного пула и видами двигательной активности, сократительного термогенеза и двигательными расстройствами при паркинсонизме

Способ организации мотонейронного пула	Произвольная активность двигательной системы	Двигательные расстройства при паркинсонизме	Формы сократительного термогенеза
Стационарная асинхронная импульсация медленных ДЕ	Позный тонус и физиологический тремор	Мышечная ригидность (акинетико-ригидная форма)	Терморегуляционный мышечный тонус
Периодическая активность высокопороговых ДЕ	Произвольные движения (одиночные и ритмические)	Различные виды гиперкинезов	Холодовая дрожь в виде периодических всплеск
Долгосрочная синхронизация ДЕ (группирование ЭМГ)	Позный тонус при утомлении и эмоциональном возбуждении (активированный физиологический тремор)	Дрожание при паркинсонизме (дрожательная и смешанные формы)	Холодовая дрожь в виде клонуса (с группированием ЭМГ)
Двойные и тройные ряды	Наблюдаются при инициации движения	Дрожание при паркинсонизме (дрожательная и смешанные формы)	При охлаждении не наблюдаются, но характерны для состояния перегревания

### III. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОЗЫ И ТЕРМОРЕГУЛЯЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ МЫШЦ

Нейрофизиологическая общность терморегуляционного и позного тонуса с мышечной ригидностью, рассмотренная в предыдущей главе, предполагает, что мышечный тонус можно модулировать сенсорными входами различной модальности. Действительно, одним из авторов было установлено, что охлаждение вызывает у кошек активацию *флексорных  $\alpha$ - и  $\gamma$ -мотонейронов* и торможение экстензорных  *$\gamma$ -мотонейронов* [7]. Также обнаружено однонаправленное и взаимопотенцирующее влияние холодовой и ноцицептивной (болевого) афферентной сигнализации. Это позволило постулировать, что терморегуляционный мышечный тонус активируется при помощи *афферентов флексорного рефлекса*, представленных нервными волокнами А $\delta$  и С [7]. Формирование сгибательной «эмбриональной» позы позволяет консервировать тепло за счет уменьшения поверхности теплоотдачи. Также показано, что растяжение мышцы во время терморегуляционного тонуса приводит к увеличению количества активных ДЕ, увеличению частоты их импульсации [6]. Это свидетельствует о прямом участии вторичных и первичных мышечных окончаний в окончательном формировании терморегуляционного мышечного тонуса.

У человека доминирование флексорной (сгибательной) мускулатуры во время холодовой дрожи не столь очевидно вследствие более сложной биомеханической функции мышц и сознательного поведенческого компонента в терморегуляции. Тем не менее показано, что у человека такая форма вызванного мышечного тонуса, как постактивационный эффект, при температуре среды 5 °C в *m. biceps brachii* (флексор) в два раза интенсивнее, а при 80 °C в два раза меньше по сравнению с термонейтральными условиями. Исследование постактивационного эффекта у человека в разгибательной (экстензорной) мускулатуре показало еще более интригующее взаимодействие позы и терморегуляции. Недавно нами установлено, что при согревании постактивационный эффект в дельтовидной мышце одновременно имеет тенденцию к увеличению амплитуды (для увеличения площади поверхности и усиления теплоотдачи) и к уменьшению длительности (для уменьшения теплопродукции) [18]. Это подтверждает «встроенность» позных механизмов в формирование конечного терморегуляционного ответа двигательной системы.

Односторонняя стимуляция вестибулярного аппарата во время терморегуляционного мышечного тонуса у кошек вызывала двустороннее торможение, а одностороннее разрушение – двустороннее усиление терморегуляционного тонуса сгибательных мышц [4]. Таким образом, вестибуло-спинальная система как часть системы регуляции позы регулирует также распределение и интенсивность терморегуляционного мышечного тонуса. Для человека также показана возможность участия



шейно- и лабиринтно-тонических позных рефлексов в регуляции терморегуляционного мышечного тонуса [43]. Кроме того, в распределении терморегуляционного тонуса в мышцах конечностей у человека участвует механизм «схемы тела» [13].

Участие позных механизмов в регуляции терморегуляционного мышечного тонуса подтверждается также тем, что холодовая дрожь у птиц может временно тормозиться так называемой *тонической иммобилизацией* – феноменом позной регуляции, когда птицу насильно переворачивают на спину и она «застывает» в этом положении на несколько минут. Таким образом, влияние термических рецептивных сигналов на позный тонус и нетермических – на терморегуляционный мышечный тонус подтверждает общность позной и терморегуляционной программ.

В вертикальном положении и при ходьбе человеку постоянно приходится поддерживать равновесие. Известно два основных типа корректирующих реакций, направленных на поддержание стабильной позы при потенциальном или действительном нарушении равновесия [36]:

1. *Упреждающие реакции* начинаются примерно за 100 мс до, например, реального подъема руки и заключаются в заранее проведенном отклонении туловища назад, чтобы центр тяжести тела оставался на месте. Упреждающие реакции являются обязательной «встроенной» частью программы движения. У здоровых испытуемых упреждающие реакции проявляются в отчетливой реципрокной (поперечной) активности мышц-антагонистов, например двуглавой и трехглавой мышц плеча при локтевом сгибании [26]. И при паркинсонизме, и при охлаждении наблюдается явный дефицит упреждающих реакций и коактивация антагонистов, что вызывает скованность и замедленность движения [37], [47], [49]. Возможно, что при паркинсонизме это является защитной реакцией двигательной системы в ответ на повышенную возможность падения [36].
2. *Компенсаторные (препрограммированные) реакции* возникают через 60–80 мс после начала движения и запускаются реальным сенсорным сигналом от проприоцепторов. В отличие от упреждающей реакции, компенсаторная реакция не *предсказывает*, а *оценивает реальное* нарушение равновесия при движении. Препрограммированные реакции нейрофизиологически наблюдаются на ЭМГ в виде длиннотентных компонентов (M2-3) рефлекса на растяжение. Эти реакции при паркинсонизме усилены, что видно по увеличению амплитуды ответов M2-3 рефлекса на растяжение [29]. При охлаждении также наблюдается усиление компонентов M2-3 [48]. Усиление препрограммированных реакций при паркинсонизме и охлаждении свидетельствует о ненормально увеличенном ответе на нарушение равновесия, что может быть свя-

зано с избыточной, аномально усиленной компенсацией нарушения равновесия [36].

Представленные выше данные нельзя в полной мере считать специфическим свидетельством взаимосвязи между терморегуляцией и паркинсонизмом, поскольку в таком физиологическом состоянии, как утомление [23], и при старении у здоровых людей [30] компенсаторные и упреждающие реакции очень похожи на таковые при охлаждении и паркинсонизме. Скорее это может быть отражением неспецифической стратегии, которую использует двигательная система для самоограничения функционирования, когда она «знает», что является «слабой», и ее обычное функционирование может привести к падениям и травмам. В таком случае ригидность мышц и повышенная активность антагонистов могут снизить риск чрезмерных движений и, соответственно, падения.

Данные, приведенные выше, позволяют постулировать существование «*терморегуляционного компонента*» в патогенезе двигательных симптомов при паркинсонизме. Нами было проведено несколько исследований, чтобы экспериментально документировать и количественно оценить «терморегуляционный компонент» в мышечной ригидности при паркинсонизме. Мы установили, что умеренное охлаждение (10 °C) провоцирует рекрутирование 2–4 новых ДЕ в дополнение к тем, которые спонтанно импульсировали в термонейтральных условиях. Частота импульсации ДЕ и частота группирования ЭМГ при этом не изменялись [11]. Следует отметить, что трудно опеределить, является ли увеличение количества активных ДЕ следствием «усиления ригидности» мышц на холоде или новые ДЕ отражали появление терморегуляционного тонуса, направленного на усиление теплопродукции.

Согревание больных паркинсонизмом теплым воздухом (40° C) вызывало полное торможение спонтанной активности ДЕ у больных акинетико-ригидной формой паркинсонизма [11]. В то же время при согревании не произошло полного подавления тремора при дрожательной форме паркинсонизма, хотя амплитуда ЭМГ значительно снижалась [35].

Нарушения терморегуляции и повышенная потливость часто сопровождают моторные нарушения при паркинсонизме и служат его вторичными симптомами. Злокачественный нейролептический синдром (*neuroleptic malignant syndrome – NMS*), который характеризуется мышечной ригидностью, гипертермией и повышенной потливостью, часто встречается как осложнение дофаминергической терапии паркинсонизма (в состоянии *off medication* – без лечения). Характерно, что наибольшая частота NMS обычно наблюдается в *теплый* сезон года, с мая по август [35].

Нейротрансмиттеры, участвующие в терморегуляции, вовлечены и в патогенез NMS. Дофамин в переднем гипоталамусе отвечает за нейрональные механизмы теплоотдачи и вызывает гипотермию, тогда как серотонинергические механизмы

увеличивают теплопродукцию и тем самым участвуют в патогенезе гипертермии и лихорадки [55]. В настоящее время предложена концепция, согласно которой дисфункция дофаминергических систем приводит к образованию патофизиологического каскада в виде дискоординации термоэффекторных механизмов, гиперактивности симпатической нервной системы и вовлечения базальных ганглиев, что приводит одновременно к гипертермии и ригидности [27].

Таким образом, некоторые феномены, вовлеченные в патофизиологию паркинсонизма, такие как дуплеты или NMS, могут использовать «готовые» нейрофизиологические и нейромедиаторные механизмы, которые уже используются в терморегуляции (при лихорадке, гипертермии) [40]. Холодовая дрожь также зависит от влияния центральных медиаторов, их блокаторов и миметиков. В исследованиях Ю. В. Лупандина установлено, что введение транквилизатора седуксена (ГАМК-миметик), фентоламина ( $\alpha_1$ - и  $\alpha_2$ -адреноблокатор), никотина (N-холиномиметик) угнетало холодовую дрожь у кошек, что вызывало гипотермический эффект, а введение их антагонистов, наоборот, усиливало холодовую дрожь [5].

#### IV. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СРЕДЫ НА ФИЗИЧЕСКУЮ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ПРИ ПАРКИНСОНИЗМЕ

Общность спинальных механизмов двигательной активности здорового человека и двигательных расстройств при паркинсонизме позволяет прогнозировать возможность влияния температуры среды на физическую работоспособность больных паркинсонизмом. Нами установлено, что при охлаждении ( $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) больные паркинсонизмом производят на 20 % меньше движений (сгибаний в локтевом суставе с грузом) по сравнению с термонеutralными условиями. Здоровые испытуемые того же возраста при той же нагрузке производили в 2–2.5 раза больше движений до утомления [1]. Холод вызывал 2–3-кратное усиление ЭМГ и провоцировал группирование ЭМГ у 30 % больных акинетико-ригидной формой паркинсонизма, что характерно для дрожательной формы паркинсонизма [1], [11]. Вместе с тем холод оказывает сходное действие на работоспособность мышц у здоровых молодых испытуемых [16], [49], поэтому есть вероятность того, что холод оказывает действие не только на генератор мышечной ригидности, но и прямое тормозящее действие на мышечную ткань.

Мы также исследовали работоспособность больных паркинсонизмом в термонеutralных условиях и при согревании в условиях *on-medication* (на фоне лечения) и *off-medication* [2]. Установлено, что больные паркинсонизмом в термонеutralных условиях *off-medication* производили  $24.7 \pm 0.3$  сгибания в локтевом суставе «до отказа». При согревании количество сгибаний достоверно увеличилось до  $31.5 \pm 1.2$ . На фоне лечения в термонеutralных условиях больные производили  $42.1 \pm 1.1$

сгибания, а в условиях согревания –  $64.6 \pm 2.7$  сгибания, что приближается к значениям, характерным для здоровых пожилых испытуемых того же возраста в термонеutralных условиях ( $96.0 \pm 3.0$  сгибания). Частота сокращений была в 1.5–2 раза больше при согревании, тогда как лечение не влияло на частоту сокращений [2]. Таким образом, больные на фоне лечения в условиях согревания находились в наиболее выгодных условиях, которые позволили им приблизить свою физическую работоспособность к здоровым пожилым испытуемым, находящимся в термонеutralных условиях. Анализ характеристик ЭМГ *m. biceps brachii* во время статической нагрузки до и после утомления также указывает на улучшение функционального состояния мышц [2]. Умеренное согревание не влияет на мышечную работоспособность у здоровых испытуемых [46]. Поэтому мы считаем, что согревание оказало специфическое тормозящее действие на генератор мышечной ригидности, что вызвало подавление «термозависимого компонента» ригидности.

Данные о влиянии согревания и охлаждения на физическую работоспособность у больных паркинсонизмом позволяют сделать предположение о существовании «матрицы соответствий» между определенными состояниями у больных паркинсонизмом и здоровыми пожилыми испытуемыми (табл. 3) [40]. Например, больной паркинсонизмом *on-medication* при одновременном согревании «соответствует» по своим биомеханическим и ЭМГ-характеристикам пожилым здоровым испытуемым в термонеutralных условиях. Аналогично, здоровый пожилой испытуемый в состоянии охлаждения «соответствует» больному паркинсонизмом *on-medication* в термонеutralных условиях или больному паркинсонизмом *off-medication* при согревании. Состояние охлаждения при отсутствии лечения у больных паркинсонизмом нами не исследовано, так как в «матрице соответствий» является крайне неблагоприятным и может значительно ухудшить состояние больного.

Таблица 3

«Матрица соответствий» между больными паркинсонизмом (БП) в различных температурных условиях и здоровыми испытуемыми [40]

БП off-medication при охлаждении (не исследовано)	БП off-medication в термонеutralных условиях	БП off-medication при согревании	
	БП on-medication при охлаждении	БП on-medication в термонеutralных условиях	БП on-medication при согревании
		Здоровые испытуемые при охлаждении	Здоровые испытуемые в термонеutralных условиях

Примечание. Аналогичные состояния находятся в вертикальных колонках.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спинальные механизмы двигательных расстройств у больных паркинсонизмом практически идентичны позно-двигательным и терморегуляционным механизмам. Во многом больные паркинсонизмом очень похожи на здорового человека, находящегося в состоянии охлаждения. Возможно, это сходство отражает общность стратегии компенсации моторного дефицита при паркинсонизме и охлаждении, тем более что похожая стратегия используется также при старении и утомлении двигательной системы. В определенной смысле больные паркинсонизмом ведут себя как «охлажденные» здоровые испытуемые [40].

Таким образом, несмотря на очевидно разные причины, которые вызывают мышечный тонус и дрожь при паркинсонизме, поддержании позы, при охлаждении, на спинальном уровне разные виды мышечной активности сводятся к ограниченному числу спинальных двигательных программ, которые могут быть активированы разными нисходящими супраспинальными и сегментарными входами. Между тем представленные

нами данные об общности некоторых механизмов терморегуляции, регуляции позы и паркинсонизма являются лишь частным проявлением принципа «конечного общего пути» (*«final common path»*). Этот принцип, известный также как «воронка Шеррингтона» (*«funnel»*), был открыт еще в 1906 году Ч. Шеррингтоном [52]. В данном случае конечный общий путь для программирования разнообразных двигательных актов и моторных симптомов при заболеваниях представлен двигательными единицами. Подобная точка зрения находит также поддержку и в исследованиях В. Б. Прозоровского, который обратил внимание на тот факт, что различные фармакологические модели тремора кроме специфических отличий в реакциях на фармакологические агенты могут иметь и некую общую организацию эфферентной системы [20]. Эта общность и формирует представленный выше «терморегуляционный компонент» в патофизиологии двигательных расстройств при паркинсонизме. Столь же универсальной является стратегия компенсации двигательных нарушений при паркинсонизме, поскольку похожая стратегия используется при утомлении, старении и охлаждении организма.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонен Е. Г., Мейгал А. Ю., Герасимова Л. И., Лупандин Ю. В. Электромиографические параметры мышечного утомления у больных паркинсонизмом при общем охлаждении организма // Физиология человека. 2001. Т. 27. № 5. С. 115–123.
2. Антонен Е. Г., Мейгал А. Ю., Лупандин Ю. В. Влияние общего согревания организма на мышечное утомление больных паркинсонизмом // Мед. акад. журн. 2003. Т. 2. № 3. С. 65–73.
3. Крыжановский Г. Н., Карабань И. Н., Магаева С. В. и др. Болезнь Паркинсона. М.: Медицина, 2002. 336 с.
4. Кузьмина Г. И., Бурачевская Л. Е. Участие вестибулярного аппарата в регулировании холодового тремора // Бюл. эксп. биол. и мед. 1978. Т. 91. № 4. С. 396–398.
5. Лупандин Ю. В. Сравнительная характеристика механизмов, регулирующих тубокурариновый и холодовый тремор // Физиол. журн. СССР им. И. М. Сеченова. 1978. Т. 64. № 10. С. 1468–1474.
6. Лупандин Ю. В. Роль фузимоторной системы в регуляции дрожи // Физиол. журн. СССР им. И. М. Сеченова. 1979. Т. 65. № 11. С. 1661–1670.
7. Лупандин Ю. В. Взаимодействие термической и нетермической рецептивной сигнализации в механизме формирования терморегуляционной активности мотонейронного пула // Сенсорные системы, сенсорное взаимодействие и протезирование. Л.: Наука, 1983. С. 95–110.
8. Лупандин Ю. В. Регуляция функции гамма- и альфа-мотонейронов мышц-антагонистов во время холодового тремора у кошек // Нейрофизиология. 1983. Т. 15. № 5. С. 242–248.
9. Лупандин Ю. В., Антонен Е. Г., Мейгал А. Ю. Паттерны биоэлектрической активности двигательных единиц при различных формах паркинсонизма // Журн. неврол. и психиатр. им. С. С. Корсакова. 1993. Т. 93. № 6. С. 30–34.
10. Лупандин Ю. В., Белоусова Г. П., Кузьмина Г. И. и др. Двигательные механизмы защиты организма от холода. Л.: Изд-во ЛГУ, 1988.
11. Лупандин Ю. В., Мейгал А. Ю., Антонен Е. Г. Влияние охлаждения и согревания на функцию двигательных единиц у больных разными клиническими формами паркинсонизма // Журн. неврол. и психиатр. им. С. С. Корсакова. 1996. Т. 96. № 6. С. 86–87.
12. Лупандин Ю. В., Мейгал А. Ю., Сорокина Л. В. Терморегуляционная активность двигательной системы. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1995.
13. Мейгал А. Ю., Кузьмина Г. И. Влияние позы на терморегуляционную активность мышц плеча // Физиология человека. 1989. Т. 15. № 6. С. 147–149.
14. Мейгал А. Ю., Герасимова Л. И., Золотова Е. В., Лупандин Ю. В. Произвольное рекрутирование двигательных единиц в условиях холодовой дрожи // Физиология человека. 1997. Т. 23. № 5. С. 64–68.
15. Мейгал А. Ю., Герасимова Л. И., Лупандин Ю. В. Произвольный контроль двигательных единиц при перегревании организма // Физиология человека. 1999. Т. 25. № 2. С. 111–116.
16. Мейгал А. Ю., Ивуков А. Ю., Герасимова Л. И. и др. Влияние общего охлаждения на электромиографические характеристики мышечного утомления, вызванного динамической нагрузкой // Физиология человека. 2000. Т. 26. № 2. С. 80–86.
17. Мейгал А. Ю., Лупандин Ю. В., Кузьмина Г. И. Электромиографические паттерны терморегуляционной активности двигательных единиц в процессе охлаждения организма // Физиология человека. 1993. Т. 19. № 3. С. 106–114.

18. Мейгал А. Ю., Письменный К. Н. Влияние общего согревания и охлаждения организма на постактивационный эффект в мышцах верхних конечностей // Физиология человека. 2008. Т. 34. № 6. С. 83–89.
19. Персон Р. С. Спинальные механизмы управления мышечным сокращением. М.: Наука, 1985.
20. Прозоровский В. Б. О фармакологической характеристике нейронов, участвующих в формировании тремора // Бюл. эксп. биол. мед. 1961. № 10. С. 64–66.
21. Amini-Sereshki L. Brainstem control of shivering in the cat // Am. J. Physiol. 1977. Vol. 232. P. 190–202.
22. Baker J. R., Davey N. J., Ellaway P. H. et al. Short-term synchrony of motor unit discharge during weak isometric contraction in Parkinson's disease // Brain. 1992. Vol. 115. P. 137–154.
23. Balestra C., Duchateau J., Hainaut K. Effects of fatigue on the stretch reflex in a human muscle // Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. 1992. Vol. 85. H. 46–52.
24. Blich J. Temperature regulation in mammals and other vertebrates // Frontiers of Biology. 1973. Vol. 30. 436 p.
25. Denny-Brown D., Gaylor J. B., Uprus V. Note on the nature of motor discharge in shivering // Brain. 1935. Vol. 58. P. 233–237.
26. Gottlieb G. L., Latash M., Corcos D. M. et al. Organizing principles for single joint movements: V. Agonist-antagonist interactions // J. Neurophysiol. 1992. Vol. 67. P. 1417–1427.
27. Gurrera R. J. Sympathoadrenal hyperactivity and the etiology of neuroleptic malignant syndrome // Am. J. Psychiatry. 1999. Vol. 156. P. 169–180.
28. Hama F., Legault S. R., Weber J. M. Fuel selection during intense shivering in humans: EMG pattern reflects carbohydrate oxidation // J. Physiol. 2004. Vol. 556. P. 305–313.
29. Hayashi R., Hashimoto T., Tada T. et al. Relation between changes in long-latency stretch reflex and muscle stiffness in Parkinson's disease: comparison before and after unilateral pallidotomy // Clin. Neurophysiol. 2001. Vol. 112. P. 1814–1821.
30. Häkkinen K., Kallinen M., Izquierdo M. et al. Changes in agonist-antagonist EMG, muscle CSA, and force during strength training in middle-aged and older people // J. Appl. Physiol. 1998. Vol. 84. P. 1341–1349.
31. Israel D. J., Pozos R. S. Synchronised slow-amplitude modulations in the electromyograms of shivering muscles // J. Appl. Physiol. 1989. Vol. 66. P. 2358–2363.
32. Karlsen K., Larsen J. P., Tandberg E. et al. Fatigue in patients with Parkinson's disease // Mov. Disord. 1999. Vol. 14. P. 237–241.
33. Kleinebeckel D., Klussmann F. W. Shivering // Thermoregulation: Physiology and Biochemistry. NY: Pergamon Press, 1990. P. 235–253.
34. Kudina L. P., Alexeeva N. I. Repetitive doublets of human motoneurons: analysis of interspike intervals and recruitment pattern // Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. 1992. Vol. 85. P. 243–247.
35. Kuno S., Mizuta E., Yamasaki S. Neuroleptic malignant syndrome in parkinsonian patients: risk factors // Eur. Neurol. 1997. Vol. 38. P. 56–59.
36. Latash M. L. Neurophysiological basis of movement. Leeds: Human Kinetics, 1998.
37. Latash M., Aruin A. S., Neyman I. et al. Feedforward postural adjustments in simple two-joint synergy in patients with Parkinson's disease // Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. 1995. Vol. 97. P. 77–89.
38. Mandir A. S., Vaughan C. Pathophysiology of Parkinson's disease // Internat. Rev. Psychiatry. 2000. Vol. 12. P. 270–280.
39. Meigal A. Iu. Gross and fine neuromuscular performance at cold shivering // Int. J. Circumpolar Health. 2002. Vol. 61. P. 163–172.
40. Meigal A. Iu., Lupandin Iu. V., Hänninen O. Influence of cold and hot conditions on postactivation in human skeletal muscles // Pflüg. Arch. – Eur. J. Physiol. 1996. Vol. 432. P. 121–125.
41. Meigal A. Iu., Lupandin Iu. V. «Thermoregulation-dependent component» in pathophysiology of motor disorders in Parkinson's disease? // Pathophysiology. 2005. Vol. 11. P. 187–196.
42. Meigal A. Iu., Lupandin Iu. V., Hänninen O. Head and body position affect thermoregulatory tonus in deltoid muscles // J. Appl. Physiol. 1996. Vol. 80. P. 1397–1400.
43. Meigal A. Iu., Oksa J., Gerasimova L. I. et al. Muscle fatigue and recovery in cold environment // Proc. of the IX ICEE. Aachen: Shaker Verlag, 2000.
44. Meigal A. Iu., Oksa J., Gerasimova L. I. et al. H. Force control of isometric elbow flexion with visual feedback in cold with and without shivering // Aviat. Space Environ. Med. 2003. Vol. 74. P. 816–821.
45. Meigal A. Iu., Oksa J., Hohtola E. et al. Influence of cold shivering on fine motor control in the upper limb // Acta Physiol. Scand. 1998. Vol. 163. P. 41–47.
46. Oksa J. Cooling and neuromuscular performance in man. Jyväskylä: University of Jyväskylä, 1998.
47. Oksa J. Neuromuscular performance limitations in cold // Int. J. Circumpolar Health. 2002. Vol. 61. P. 154–162.
48. Oksa J., Ducharme M. B., Rintamäki H. Combined effect of repetitive work and cold on muscle function and fatigue // J. Appl. Physiol. 2002. Vol. 92. P. 354–361.
49. Oksa J., Rintamäki H., Mäkinen T. et al. Cooling-induced changes in muscular performance and EMG activity of agonist and antagonist muscles // Aviat. Space Environ. Med. 1995. Vol. 66. P. 26–31.
50. Petajian J. H., Williams D. D. Behaviour of single motor units during preshivering tone and shivering tremor // Am. J. Phys. Med. 1972. Vol. 51. P. 16–23.
51. Schäfer S., Schäfer S. The role of the primary afferents in the generation of a cold shivering tremor // Exp. Brain Res. 1973. Vol. 17. P. 381–393.
52. Sherrington C. The integrative action of the nervous system. Cambridge: At the University Press, 1947.
53. Tikuisis P., Bell D. G., Jacobs I. Shivering onset, metabolic response, and convective heat transfer during cold air exposure // J. Appl. Physiol. 1991. Vol. 70. P. 1996–2002.
54. Vaillancourt D. E., Slifkin A. B., Newell K. M. Intermittency in the visual control of force in Parkinson's disease // Exp. Brain Res. 2001. Vol. 138. P. 118–127.
55. Wappler F., Fiege M., Schulte am Esch J. Pathophysiological role of serotonin system in malignant hyperthermia // Br. J. Anaesth. 2001. Vol. 87. P. 794–798.
56. Westerblad H., Allen D. G., Bruton J. D. et al. Mechanisms underlying the reduction of isometric force in skeletal muscle fatigue // Acta Physiol. Scand. 1998. Vol. 162. P. 253–260.

УДК 614.2

**ЮРИЙ ГАЕВИЧ ИОФФЕ**

управляющий Благотворительным фондом «Карельский регистр неродственных доноров гемопоэтических стволовых клеток», врач-гематолог  
*feva@karelia.ru*

**ИРИНА МИХАЙЛОВНА МАРУСЕНКО**

доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры госпитальной терапии медицинского факультета ПетрГУ  
*feva@karelia.ru*

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ РОССИЙСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО РЕГИСТРА НЕРОДСТВЕННЫХ ДОНОРОВ ГЕМОПОЭТИЧЕСКИХ СТВОЛОВЫХ КЛЕТОК

В статье обсуждается проблема подбора совместимого донора для выполнения аллогенной трансплантации гемопоэтических стволовых клеток и создания регистров потенциальных доноров. Проанализирована ситуация по созданию регистров как в нашей стране, так и зарубежом, приведены данные о деятельности Карельского регистра. Также обсуждается проблема сотрудничества российских трансплантационных клиник с отечественными регистрами и пути ее решения.

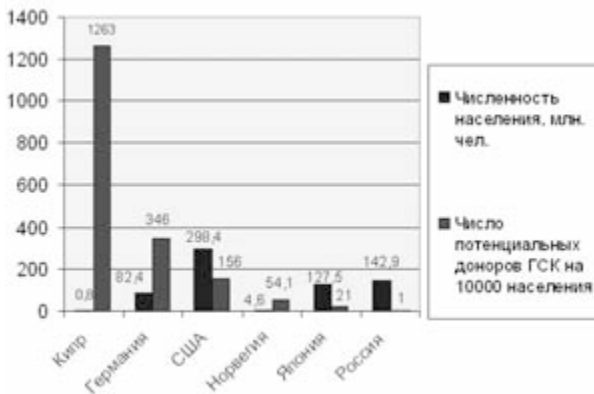
Ключевые слова: аллогенная трансплантация гемопоэтических стволовых клеток, донор стволовых клеток, регистр, фенотип

Для выполнения аллогенной трансплантации гемопоэтических стволовых клеток (ГСК) абсолютно необходимым условием является наличие совместимого донора. К сожалению, только для 30 % больных, нуждающихся в трансплантации ГСК, удается найти донора-родственника. Остальным пациентам необходим поиск неродственного донора. Как известно, подбор донора осуществляется по HLA-системе. Количество возможных комбинаций антигенов очень велико, поэтому, согласно международной статистике, вероятность нахождения неродственного донора ГСК лежит в пределах 1:5000, то есть, для того чтобы найти совместимого донора для одного больного, нужно провести типирование крови в среднем у 5000 человек. Таким образом, для эффективного поиска 1 неродственного донора необходимо иметь сотни тысяч предварительно протипированных потенциальных доноров. Чем больше потенциальных доноров, тем выше шанс найти реального донора для больного. Ввиду того что имеются существенные генетические

различия между представителями разных этнических групп населения, то и HLA-фенотип крови разных этнических групп также различается. Поэтому многим российским пациентам, даже в случае прямого доступа к международным регистрам доноров ГСК, не удастся найти совместимого донора среди иностранных доноров. Кроме того, поиск и активация доноров в иностранных регистрах стоит от 15000 до 20000 евро, что недоступно подавляющему большинству российских пациентов. Таким образом, необходимость создания в России Национального регистра неродственных доноров ГСК обусловлена генетическими национальными особенностями россиян, не позволяющими в большинстве случаев найти совместимых доноров в иностранных регистрах, и высокой стоимостью поиска и активации доноров в иностранных регистрах [1], [3], [4], [6], [7], [10].

В настоящее время в России существует всего несколько разрозненных регистров, суммарно насчитывающих около 18000 доноров. По дан-

ным BMDW (Международной поисковой системы доноров костного мозга) (2006 г.), число потенциальных доноров ГСК на 10000 человек в некоторых странах составляет: Кипр (население – 800 тыс. чел.) – 1263; Сан-Марино (население – 30 тыс. чел.) – 268; Германия (население – 82.4 млн чел.) – 346; США (население – 298.4 млн чел.) – 156; Норвегия (население – 4.6 млн чел.) – 54.1. В России же, при населении 142.9 млн человек, число потенциальных доноров ГСК составляет всего лишь 1 на 10000 чел. (см. рисунок) [2], [5]. Это является одной из главных причин существенного ограничения применения неродственной трансплантации ГСК в России, которая в настоящее время осуществляется исключительно от иностранных доноров. Следует отметить, что неродственные трансплантации ГСК стали проводиться в России лишь с 2000 года, отстав от мировой трансплантологии почти на 25 лет.



Число потенциальных доноров на 10000 человек в некоторых странах мира в 2006 году (по данным BMDW)

Система регистров неродственных доноров ГСК распространена по всему миру уже более 25 лет, и все они объединены в Международную ассоциацию доноров костного мозга (WMDA). Это позволяет достаточно быстро и эффективно найти совместимого донора каждому нуждающемуся пациенту независимо от страны проживания. Международная поисковая система доноров костного мозга (BMDW) содержит информацию почти о 12 млн потенциальных доноров ГСК [2], [3], [5], [6], [7], [9]. Напомним, что Регистр доноров ГСК – это информационная база, включающая в себя данные о донорах, а именно: индивидуальный код донора, личные данные, возраст, пол, адрес, HLA-фенотип, вес, рост и информацию о состоянии здоровья на момент вступления в регистр. Следует подчеркнуть, что Регистр доноров ГСК не является медицинским учреждением.

Основные принципы Международного донорства ГСК: анонимность, добровольность и безвозмездность. Они отражены в стандартах WMDA. В частности, существуют общепринятые мировые требования о закрытости личной информации о доноре для пациента и его лечащего

врача [5], [8], [10]. В соответствии с ними, в работе регистров потенциальных доноров ГСК необходимо разделение центров ответственности за пациента и донора. Разделение центров ответственности заключается в том, чтобы существовали независимо 3 функциональных центра:

- регистр доноров ГСК – организация, предоставляющая совместимого неродственного донора ГСК;
- центр забора стволовых клеток – медицинское учреждение, в котором осуществляется забор ГСК у донора;
- трансплантационный центр – медицинское учреждение, в котором осуществляется трансплантация продукта донорских ГСК.

Однако российским законодательством не установлено требование о разделении вышеуказанных центров ответственности. Иначе говоря, в России сложилась ситуация, при которой центры забора ГСК и трансплантационный центр совпадают и являются фактически одним отделением медицинского учреждения.

Карельский регистр неродственных доноров ГСК существует с 2001 года. В 2004 году, впервые в России, в Центре трансплантации костного мозга СПбГМУ имени академика И. П. Павлова были осуществлены 2 неродственные трансплантации ГСК от доноров из Карельского регистра. Наш регистр имеет большой опыт по привлечению новых доноров. За время своего существования Карельский регистр провел 11 массовых акций по привлечению новых доноров в Республике Карелия, а в 2006 году – в Москве и Астрахани. С 2006 года в Петрозаводске функционирует постоянный пункт по набору новых доноров. Кроме того, мы не отказываем во вступлении в регистр жителям других регионов России. В результате в нашем регистре имеется информация о потенциальных донорах ГСК из Карелии, Мурманской области, Москвы, Московской области, Санкт-Петербурга, Казани, Нижнего Новгорода, Новосибирска и других регионов. В 2006 году Карельский регистр стал членом Международной ассоциации доноров костного мозга (WMDA), а в 2007 году вошел в Международную поисковую систему доноров костного мозга (BMDW). Несмотря на небольшое число доноров в базе данных Карельского регистра (около 2300 человек), частота совместимости донора и пациента, в сравнении с международными данными 1:5000, у нас составляет 1:700, то есть из 700 человек 1 донор оказывается полностью совместимым с пациентом. Мы получали и обрабатывали запросы на поиск доноров из Дании, Израиля, Германии, Турции, США, Афганистана и Эстонии.

В себестоимость включения одного нового донора в регистр до 90 % составляет стоимость определения его HLA-фенотипа. Стоимость включения одного донора в наш регистр составляет около 2600 рублей (при молекулярно-биологическом выявлении генотипов А и В). Столь высокие затраты

существенно ограничивают возможности набора новых доноров. Основная проблема, с которой мы столкнулись за время своей работы, – почти полное отсутствие запросов из российских трансплантационных клиник на поиск доноров в Карельском регистре и других российских регистрах. По нашему мнению, причины такого положения состоят в следующем:

- крайне малое число существующих российских регистров доноров ГСК (всего 4), имеющих небольшую базу данных доноров;
- разобщенность российских регистров;
- отсутствие федеральной государственной программы развития донорства ГСК в России;
- отсутствие законодательной базы донорства ГСК в России;
- отсутствие международной аккредитации у российских HLA-лабораторий, которая гарантирует качество выполнения лабораторией HLA-типирования низкого, среднего и высокого разрешения;
- отсутствие активной кооперации и сотрудничества с WMDA и BMDW.

*Решить эти проблемы возможно следующими путями.*

Во-первых, учитывая протяженность территории России, многонациональный состав населения, имеющий свои особенности HLA-фенотипа, необходимо создание в каждом регионе регистров потенциальных доноров ГСК, отвечающих международным стандартам (в первую очередь – стандартам WMDA).

Во-вторых, создание Национального российского регистра неродственных доноров ГСК как организации, имеющей базу данных обо всех потенциальных донорах ГСК в России, координирующей деятельность региональных регистров доноров ГСК, трансплантационных центров, центров по забору ГСК и HLA-лабораторий и отвечающей стандартам WMDA. Национальный российский регистр неродственных доноров ГСК должен нести ответственность за обработку просьб о поисках доноров, поступающих от трансплантационных центров. База данных Национального российского регистра неродственных доноров ГСК должна включать индивидуальный код донора ГСК, его HLA-фенотип и принадлежность донора к конкретному региональному регистру неродственных доноров ГСК. Национальный российский регистр нерод-

ственных доноров ГСК должен осуществлять поиск неродственного донора ГСК по запросам трансплантационных центров, как в региональных регистрах доноров ГСК, так и в Международной поисковой системе доноров костного мозга, в случае, когда отсутствуют совместимые доноры в базе данных Национального российского регистра неродственных доноров ГСК.

В-третьих, для обеспечения набора новых доноров, выполнения подтверждающего типирования необходимо создание региональных HLA-лабораторий, которые могли бы выполнять молекулярно-биологическое типирование низкого, среднего и высокого разрешения на одинаково высоком уровне качества при одинаковой воспроизводимости результатов всеми HLA-лабораториями. Необходимо проведение процедуры международной аккредитации этих лабораторий, наличие которой гарантирует высокое качество HLA-типирования.

В-четвертых, создание законодательной базы для развития донорства ГСК в России путем создания отдельного законодательного акта или внесения изменений в действующий Закон РФ «О донорстве крови и ее компонентов». Необходимо законодательно закрепить: положение о регистрах доноров ГСК, возможность их образования как в государственной, так и в частной форме; положение о Национальном российском регистре доноров ГСК; положение о центрах забора ГСК; юридическое разделение ответственности между трансплантационным центром, центром забора ГСК и регистром доноров ГСК; положение о страховании профессиональной ответственности регистров доноров ГСК.

В-пятых, массовое вовлечение в донорство ГСК граждан России через СМИ, Интернет и другие ресурсы.

Для решения всех этих вопросов необходимо создание федеральной государственной целевой программы развития донорства ГСК в России с обеспечением ее за счет средств федерального бюджета.

Несомненно, привлечение активного внимания государственных органов и всего гражданского общества к проблеме донорства ГСК в России позволит кардинально изменить ситуацию с проведением аллогенных неродственных трансплантаций ГСК и дать шанс на излечение многим нашим гражданам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев Б. В., Зубаровская Л. С., Семенова Е. В., Иванова Н. Е. и др. Опыт применения неродственной аллогенной трансплантации стволовых гемопоэтических клеток в клинике трансплантации костного мозга СПбГМУ им. акад. И. П. Павлова // Терапевтический архив. 2007. № 7. Р. 36–43.
2. Менделеева Л. П., Савченко В. Г. Трансплантация гемопоэтических клеток в Российской Федерации (Отчет Межрегионального Регистра трансплантации гемопоэтических клеток за 1996–2006 гг.) // Гематология и трансфузиология. 2007. № 6. Р. 31–35.

3. Atsuta Y., Suzuki R., Yoshimi A., Gondo H. et al. Unification of hematopoietic stem cell transplantation registries in Japan and establishment of the TRUMP System // *Int. J. Hematol.* 2007. Vol. 86 (3). P. 269–274.
4. Bolan C. D., Hartzman R. J., Perry E. H., Trainor L. et al. Donation activities and product integrity in unrelated donor allogeneic hematopoietic transplantation: experience of the National Marrow Donor Program // *Biol. Blood Marrow Transplant.* 2008. Vol. 14. P. 23–28.
5. Bone Marrow Donors Worldwide. Annual Report. 2006.
6. Johansen K. A., Schneider J. F., McCaffree M. A., Woods G. L. Efforts of the United States' National Marrow Donor Program and Registry to improve utilization and representation of minority donors // *Transfus. Med.* 2008. Vol. 18 (4). P. 250–259.
7. Kanga U., Panigrahi A., Kumar S., Mehra N. K. Asian Indian donor marrow registry: All India Institute of Medical Sciences experience // *Transplant. Proc.* 2007. Vol. 39 (3). P. 719–720.
8. Miller J. P., Perry E. H., Price T. H., Bolan C. D. et al. Recovery and safety profiles of marrow and PBSC donors: experience of the National Marrow Donor Program // *Biol. Blood Marrow Transplant.* 2008. Vol. 14. P. 29–36.
9. Peffault de Latour R., Cabrespine-Faugeras A., Bay J. O. Ten years of changes in conditioning regimen for allogeneic hematopoietic stem cell transplantation in adults // *Bull. Cancer.* 2008. Vol. 95 (1). P. 87–97.
10. Sacchi N., Costeas P., Hartwell L., Hurley C. K. et al. Haematopoietic stem cell donor registries: World Marrow Donor Association recommendations for evaluation of donor health // *Bone Marrow Transplant.* 2008. Vol. 42 (1). P. 9–14.



УДК 619:618.19–002:636.221.28

**АНАТОЛИЙ ЕФРЕМОВИЧ БОЛГОВ**

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой зоотехнии, товароведения и экспертизы продовольственных товаров агротехнического факультета ПетрГУ  
*bolg@psu.karelia.ru*

**ЕКАТЕРИНА ПЕТРОВНА КАРМАНОВА**

доктор сельскохозяйственных наук, профессор агротехнического факультета ПетрГУ  
*bolg@psu.karelia.ru*

**ЛАРИСА НИКОЛАЕВНА МУРАВЬЯ**

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры зоотехнии, товароведения и экспертизы продовольственных товаров агротехнического факультета ПетрГУ  
*bolg@psu.karelia.ru*

**ВЕРА ЕВГЕНЬЕВНА МАКАРОВА**

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры зоотехнии, товароведения и экспертизы продовольственных товаров агротехнического факультета ПетрГУ  
*bolg@psu.karelia.ru*

**СВЕТЛАНА ГЕННАДЬЕВНА ШТЕРКЕЛЬ**

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры зоотехнии, товароведения и экспертизы продовольственных товаров агротехнического факультета ПетрГУ  
*shterkel@psu.karelia.ru*

**НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА ГРИШИНА**

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры зоотехнии, товароведения и экспертизы продовольственных товаров агротехнического факультета ПетрГУ  
*grishina@psu.karelia.ru*

## **ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА РЕЗИСТЕНТНОСТЬ МОЛОЧНЫХ КОРОВ К МАСТИТУ**

Изучена частота мастита у более 28 тысяч коров. Представлены материалы о влиянии на заболеваемость маститом года обследования, возраста и уровня продуктивности коров, сезона года, квалификации персонала, свойств вымени и наследственных факторов. Обоснована необходимость и возможность селекции молочного скота на повышение резистентности к маститу одновременно с селекцией по продуктивности.

Ключевые слова: мастит, наследственность, генетическая резистентность, селекция, крупный рогатый скот

Мастит (воспаление вымени) – одна из самых распространенных и дорогостоящих болезней коров. Заболеваемость маститом варьирует в пределах 12–40 %, а в отдельных стадах – до 50–80 % [42], [22], [35], [46], [57], [7], [5]. От каждой больной маститом коровы недополучают от 3,2 до 25 % годового удоя молока [1]. Потери от одного случая мастита эквивалентны по стоимости 240 кг молока в Дании [29] и 400–470 кг в США [36]. Возникновение и распространение этой болезни зависит от множества факторов, прежде всего паратипических [30], [19], [37], состояния иммунной системы [52] и возраста животных [50], [45], уровня продуктивности в стадах [31], [21], [23], [26]. В последние годы активно исследуется роль генетических факторов в распространении мастита [18], [6], [27], [3], [28], [55], [60], [24]. Однако практические достижения в борьбе с маститом и в повышении

резистентности к данной болезни пока невелики. Это вызывает необходимость продолжения исследований по данной проблеме.

Целью нашей работы было изучение влияния различных факторов на резистентность молочных коров к маститу.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ****Ж и в о т н ы е**

На основе систематического и долговременного (1976–1999 гг.) мониторинга собрана и обработана информация о заболеваемости маститом более 28 тысяч коров в семи крупных стадах в Республике Карелия.

Под наблюдением находились стада (800–1000 коров) айрширской, холмогорской и бурой латвийской пород. Во всех хозяйствах применялось привязное содержание коров в типовых

скотных дворах на 200–400 голов. Летом в течение 110–120 дней животные находились на пастбище. Уровень кормления коров в большинстве хозяйств был сходный и составлял 3700–4800 кормовых единиц (корм. ед.) на одну корову в год при удое 3300–4500 кг молока. В племенном заводе «Сортавальский» затраты кормов и уровень продуктивности были выше – 5000–5300 корм. ед. и 4600–5100 кг молока соответственно. Применялось трехкратное доение коров в течение суток, а со второй половины лактации – двухкратное. Один дояр обслуживал 30–35 коров.

#### Диагностика мастита

*Тест на димастин.* Для диагностики субклинического мастита использовали тест на димастин [12]. Этот тест является аналогом калифорнийского маститного теста (California Mastitis Test – СМТ). Димастин – это реактив из поверхностно-активных веществ. Димастиновая проба косвенно указывает на количество лейкоцитов в молоке. Молоко после окончания доения (альвеолярное молоко) из каждого соска вымени в количестве 1 мл помещали в соответствующую лунку молочно-контрольной пластинки и вносили по 1 мл 5%-го раствора димастина. Полученную смесь перемешивали в течение 20–30 секунд стеклянной палочкой и оценивали характер образовавшегося сгустка, его плотность и цвет. Больными маститом считали коров с оценкой реакции на димастин +++ и ++++ при наличии положительной пробы отстаивания.

*Пробу отстаивания* [12] применяли для подтверждения диагноза в случае положительных и сомнительных результатов теста на димастин. Из каждой четверти вымени после доения коровы в отдельные пробирки брали по 10–15 мл альвеолярного молока и выдерживали при температуре 4–8 °С в течение 16–18 часов. После этого оценивали цвет молока, наличие и объем осадка, высоту и характер слоя сливок. Отсутствие осадка считалось отрицательной пробой (отсутствие мастита), слабый осадок – результат сомнительный, заметный и сильный осадок высотой 0,1–0,15 см и более – наличие мастита. Клинический мастит устанавливали по характеру секрета молока и состоянию вымени.

#### Сбор и обработка информации

Молоко каждой коровы на протяжении лактации от 4 до 7 раз исследовали на скрытый (субклинический) мастит. Регистрировали также случаи клинического мастита. Здоровыми считали коров, у которых не было ни одного случая мастита в течение всей лактации. Больными признавали тех животных, у которых регистрировали любую форму мастита хотя бы один раз за лактационный период. Об уровне заболеваемости судили по доле больных животных в процентах от обследованного поголовья за определенное время. Исследовали влияние на заболеваемость коров года обследования, сезона года, квалификации персонала, возраст

та и уровня молочной продуктивности животных, свойств вымени, наследственных факторов.

Для оценки равномерности развития вымени у коров проводили раздельное выдаивание и учет молока из каждой четверти. Учитывались следующие показатели равномерности развития вымени: индекс – отношение удою из передних четвертей к удою из всех четвертей (в процентах); максимальное отклонение по удою одной из четвертей от параметров идеального вымени (то есть от 25 %), в процентах; максимальная разница в удоях четвертей с самой высокой и минимальной продуктивностью, в процентах; отношение удою из наиболее продуктивной четверти к удою из наименее продуктивной – индекс, М/м; отношение удою из наиболее продуктивной четверти к суммарному удою остальных долей – коэффициент равномерности (КР).

Коэффициенты генетической корреляции между маститом и удоем рассчитывали на основе однофакторного дисперсионного и ковариационного анализа в группах полусибсов по отцу. Коэффициенты наследуемости по женской линии устанавливали с помощью коэффициентов фенотипической корреляции у матерей и дочерей. Наследуемость по отцам выявляли по корреляции полусибсов по отцу. Повторяемость оценок быков по резистентности их дочерей к маститу за разные лактации определяли по коэффициенту ранговой корреляции по Спирмену ( $r_s$ ).

Для оценки характера распределения родственных групп коров – женских семейств и полусибсов по отцу – по заболеваемости маститом были построены гистограммы и вычислены средняя арифметическая, медиана, мода, коэффициенты асимметрии ( $A_s$ ) и эксцесса ( $E_x$ ). Ошибки репрезентативности для  $A_s$  и  $E_x$  определяли по известным формулам [10].

Племенную ценность (ПЦ) быков по резистентности к маститу определяли также по известным формулам [5].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Факторы, влияющие на частоту мастита у коров

*Год обследования.* Частота мастита у коров в одном и том же стаде сильно варьирует в разные годы (от 11,1 до 34,9 %) и характеризуется высокой изменчивостью ( $C_v = 40,8$  %), что свидетельствует о сильном влиянии различных факторов на состояние вымени коров. Поэтому необходимо вводить поправку на год исследования.

*Порода.* Коровы разных пород обладали неодинаковой устойчивостью к маститу. У животных айрширской породы мастит встречался значительно реже, чем у холмогорских и бурых латвийских коров (12,3 % против 17,6 и 33,1 % соответственно). Особенно устойчивы к этому заболеванию чистопородные айрширы племязова «Сортавальский», среди которых выявлено всего 7,8 % маститных коров. Согласно литера-

турным данным, ни одна порода крупного рогатого скота не считается свободной от мастита. Madsen et al. [41], Saloniemi [49] отмечают, что большинство или практически все породы скота подвержены маститу, но устойчивость животных к этому заболеванию в разных породах различна.

*Возраст* оказывает существенное влияние на заболеваемость коров маститом (табл. 1). Наиболее устойчивыми в наших хозяйствах были коровы-перволетки. В среднем по семи стадам частота мастита возрастала с 5,5 % в первую лактацию до 30,5 % в восьмую. В практической работе представляет интерес раннее выявление животных с повышенной предрасположенностью к маститу. Нами установлено, что коровы, больные маститом в первые две лактации, заболели в третью лактацию в среднем в 2,8, а в отдельных стадах – в 4,6 раза чаще, чем коровы, здоровые в молодом возрасте (37,8 % против 13,6 %). Коэффициент повторяемости мастита между указанными группами коров равен в среднем  $0,216 \pm 0,024$  ( $P < 0,001$ ). Очевидно, у переболевших коров уровень резистентности к маститу остается по-прежнему ниже порога вредного воздействия среды. В результате этого вновь происходило заболевание вымени. На снижение резистентности к маститу по мере взросления и старения коров указывали Бороздин и др. [2], Sandholm and Pyörälä [51] и многие другие.

Таблица 1

Встречаемость мастита у коров разного возраста (средняя по 7 стадам)

Лактация по счету	Обследовано коров (n)	Из них больных	
		n	%
1	2596	142	5,5
2	2748	286	10,4
3	2261	354	15,7
4	1602	338	21,1
5	1185	289	24,4
6	760	191	25,1
7	422	121	28,7
8 и старше	459	140	30,5

*Сезон года.* Определенное влияние на заболеваемость коров маститом оказывает сезон года. Многолетние наблюдения в хозяйстве имени Зайцева показали, что самая низкая заболеваемость была зимой – 16,9 %. Весной заболеваемость коров резко возрастала (почти в два раза) и достигала 32,7 % ( $P < 0,001$ ). Летом, в пастбищный период, она несколько снижалась, но оставалась на высоком уровне (28,9 %). Осенью число больных коров существенно уменьшалось (до 21,5 %,  $P < 0,05$ ). Аналогичные данные представлены в работах Schultze et al. [52], Rabold et al. [47]. В других хозяйствах сезонные различия были выражены слабее или вовсе не проявлялись. Литературные данные на этот счет тоже противоречивы. Вероятно, к маститу предрасполагает не сезон года, а несоблюдение правил кормления, содержания и обслуживания животных.

*Дояр.* Выявлена различная заболеваемость в группах коров, обслуживаемых разными доярами, – от 0 до 62 %. Сила влияния фактора «дояр» на заболеваемость коров была невысокой ( $\eta_k^2 = 0,06$ ), но статистически достоверной. Это говорит о том, что из всех факторов, влияющих на частоту мастита, доля влияния квалификации дояра составляет 6 %. Сходные данные представлены в работах Клаассен [8], Sandholm and Pyörälä [51] и других.

*Уровень удоя.* Многие авторы изучали зависимость заболеваемости маститом от уровня молочной продуктивности коров, однако единого мнения до настоящего времени не сложилось. Ряд исследователей отмечают, что мастит чаще поражает высокопродуктивных животных [14], [20]. В некоторых исследованиях зависимость между продуктивностью и частотой мастита вообще не отмечена [33], [15]. Изучение этой проблемы в нашей работе показало, что в стадах с разным уровнем молочной продуктивности проявляется слабая зависимость между удоем и маститом. Сила влияния величины удоя за лактацию на распространение мастита оказалась низкой и недостоверной ( $\eta_k^2 = 0,015-0,066$ ). Фенотипическая корреляция между удоем и маститом, найденная по бисериальному показателю связи, была низкой и в большинстве случаев положительной ( $r_b = 0,062$  с вариациями от -0,122 до 0,445). У коров с удоем 5500 кг и более заболеваемость чаще соответствовала средним данным. Отмечены случаи высокой поражаемости маститом коров с удоем менее 3000 кг молока.

Результаты исследований генетической корреляции рассматриваемых признаков также противоречивы. Большинство исследователей обнаружили положительную генетическую корреляцию величины удоя с частотой мастита с оценкой от 0,11 до 0,70 [34], [43]. Данная связь предполагает рост заболеваемости маститом при увеличении молочной продуктивности. В то же время некоторые исследователи установили отрицательную генетическую корреляцию [17]. Наши расчеты (табл. 2) показали, что за первую лактацию между удоем и частотой мастита существует положительная генетическая корреляция (0,335; 0,318). При более объективной оценке по средним данным за три лактации коэффициенты генетической корреляции оказались высоко отрицательными: -0,814 и -0,792. Поэтому можно считать, что быки с высоким генетическим потенциалом продуктивности дают дочерей с пониженной частотой заболеваемости маститом. И наоборот, низкопродуктивные дочери быков имеют большой риск воспаления вымени. Сходные с нашими результаты получены Coffey et al. [25], Lyons et al. [40]. Слабая положительная генетическая корреляция между количеством соматических клеток и удоем установлена Monardes et al. [44] у айрширских коров в первую лактацию (0,36), высокая отрицательная – во вторую и последующие (-0,97), а также за все лактации (-0,50).

Таблица 2

Генетическая корреляция между молочной продуктивностью и частотой мастита у коров айрширской породы ( $P < 0,001$ )

Лактация	Число дочерей	Коэффициент корреляции	
		между маститом и удоем за 305 дней лактации	между маститом и продукцией молочного жира за 305 дней лактации
1	521	0,335 ± 0,039	0,318 ± 0,039
3	336	-0,318 ± 0,045	0,201 ± 0,048
Первые три	354	-0,841 ± 0,016	-0,792 ± 0,019

*Свойства вымени.* Животные с относительно приподнятым выменем более резистентны к маститу. Заболеваемость коров, у которых расстояние от нижней горизонтальной линии вымени до пола равно 45–55 см, составила 25,6 %, 56–66 см – 13,3 %, 67 см и более – 8,3 %. К аналогичному выводу пришли Janicki and Balukiewicz [33], Rogers et al. [48] и другие. Seykora and McDaniel [54] нашли существенную отрицательную генетическую корреляцию между высотой вымени над полом и количеством соматических клеток в молоке. Наши данные свидетельствуют о том, что на частоту мастита влияет продолжительность доения. Наиболее высокая резистентность к маститу (7,7 % больных) была в группах быстровыдаивающихся коров – с продолжительностью доения разового удоя менее 5 минут, а наибольшая восприимчивость – у сверстниц с временем выдаивания более 8 минут (23,2 %). О слабой связи между частотой мастита и особенностями вымени или интенсивностью молокоотдачи у потомства быков сообщали Lindström and Syväjärvi [39], Jahnke et al. [32]. В нашей работе корреляция рангов быков по заболеваемости дочерей маститом с рангами по интенсивности и времени доения была существенной,  $r_s = -0,659$  и  $r_s = 0,618$  соответственно ( $P < 0,05$ ). Эти данные подтверждают материалы о повышенной восприимчивости тугодойких коров к маститу. Широкое распространение тугодойкости среди потомства отдельных быков можно рассматривать как косвенный критерий нежелательного генотипа по резистентности к маститу.

В литературе нет единого мнения по вопросу о различиях предрасположенности передних и задних четвертей вымени к воспалению. В наших наблюдениях (учтено 4690 больных четвертей) субклиническим маститом чаще поражались задние четверти вымени (54,3 против 45,7 % от общего числа выявленных больных четвертей). Клиническая форма мастита, наоборот, чаще встречалась в передних четвертях (54,4 против 45,6 %). В целом вероятность заболевания задних четвертей вымени у коров выше, чем передних. Они более объемистые, выдаиваются дольше, стресс-факторы могут тормозить молокоотдачу, обуславливать неполное выдаивание и предрасположенность к маститу.

Нами установлено, что коровы, обладающие более равномерно развитым выменем, болеют маститом реже, чем животные с выраженной диспропорцией четвертей вымени. Наиболее высокая ранговая корреляция была между заболеваемостью и показателем М/м, который характеризует отношение количества молока из четвертей с максимальным удоем к четверти с минимальным удоем ( $r_s = 0,740$ ;  $P < 0,001$ ). Такая же ранговая корреляция выявлена между встречаемостью мастита и коэффициентом равномерности (КР) вымени ( $r_s = 0,740$ ;  $P < 0,001$ ). Также высокой была корреляция рангов быков по заболеваемости дочерей с рангами по максимальной разнице в удоях четвертей вымени ( $r_s = 0,762$ ;  $P < 0,05$ ).

Показатели равномерности развития вымени могут служить критерием ранней оценки коров по признаку резистентности к маститу. Коров айрширской породы с индексом мастита вымени более 45 %, максимальной разницей в удоях четвертей менее 8 %, индексом М/м менее 1,4, коэффициентом равномерности менее 0,400 можно рассматривать как потенциально устойчивых к воспалению вымени.

*Влияние генотипа матерей на устойчивость и восприимчивость их дочерей к маститу.* Для изучения влияния генотипа матерей на заболеваемость их дочерей были проанализированы пары матерей и дочерей. Дочери от больных или переболевших матерей чаще, чем от здоровых матерей, поражались маститом (табл. 3). В среднем по всем обследованным стадам от здоровых матерей было 13,6 % больных дочерей, а от больных матерей – 34,5 % ( $\chi^2 = 22,4$ ;  $P < 0,001$ ), то есть в 2,5 раза больше.

Таблица 3

Заболеваемость коров маститом в зависимости от состояния здоровья их матерей

Хозяйство	Порода	Число пар мать – дочь	Матери здоровые				Матери больные			
			п	их дочери		п	их дочери			
				здоровые, п	больные		здоровые, п	больные		
			п	%	п	%	п	%		
Племзавод «Сортавальский»	айрширская	96	71	66	5	7,0	25	19	6	24,0
«Большевик»	айрширская	62	46	43	3	6,5	16	9	7	43,7
«Ведлозерский»	холмогорская	138	80	64	16	20,0	58	40	18	31,0
Им. Зайцева	холмогорская	258	119	88	31	26,0	139	79	60	43,2
Им. Зайцева	айрширская	1029	905	794	111	12,3	124	90	34	27,4
По всем хозяйствам		1583	1221	1055	166	13,6	362	237	125	4,5

На наличие положительной связи между заболеваемостью молочной железы у коров-матерей и их дочерей указывали и другие исследователи [39]. Следовательно, выбраковка больных коров и приоритетное использование дочерей от устойчивых к маститу матерей может быть средством повышения резистентности животных к данному заболеванию. Коэффициенты фенотипической корреляции подтвердили зависимость устойчивости коров-дочерей к маститу от генотипа матерей. По всей выборке из 1567 пар «мать–дочь» коэффициент корреляции был равен 0,227 ( $P < 0,001$ ), а  $h^2 = 2r = 0,454$ . Все эти данные свидетельствуют о том, что дочери наследуют от своих матерей предрасположенность к данному заболеванию. Наши данные также показали, что целесообразно рассчитывать коэффициенты корреляции на основе информации, полученной по матерям и дочерям за несколько лактаций.

**Резистентность в семействах.** Исследовали частоту мастита у коров в 83 семействах. Полученные данные свидетельствуют о неодинаковой резистентности коров к маститу в разных семействах: заболеваемость варьировала в больших пределах – от 0 до 57 %. В хозяйстве «Ведлозерский» каждое девятое семейство (11,1 %) было свободно от мастита, а в племзаводе «Сортвальский» – более половины (57,5 %).

**Генотип быка как фактор устойчивости коров к маститу.** На частоту мастита в популяциях существенное влияние оказывает генотип производителя. В 1989–1994 годах при учете за первые три лактации заболеваемость дочерей разных быков варьировала от 9,0 до 34,7 % при средней величине 21,9 %. По данным за первую лактацию выделены лучшие быки – Сумрак 259, Атлас 348, Инто 101/205, заболеваемость дочерей которых не превышала 3,5 %. В то же время заболеваемость дочерей-первотелок быков Юнга 207/2 и Диктора 1170 составила 18,5 и 20,7 % соответственно. Различия между лучшими и худшими быками отклоняются от нулевой гипотезы. И в последующие лактации лучшие быки сохранили свой статус. В других стадах также выделены по маститоустойчивости дочерей лучшие и худшие быки. Различия в резистентности к маститу у дочерей разных быков выявили Меркурьева и др. [11], Wolf and Schönstedt [59] и другие.

**Распределение групп родственных животных.** Для определения типа наследования резистентности к маститу были построены гистограммы распределения полусестер по отцу (рис. 1) и женских семейств по заболеваемости маститом (рис. 2). Расчеты показали, что по отцовским полусибсам средняя арифметическая (19,2), медиана (19,5) и мода (20,6) близки по величине. Коэффициент асимметрии равен  $-0,074 \pm 0,045$  ( $t_{As} = 1,64 < 3$ ), коэффициент эксцесса  $+0,356 \pm 0,091$  ( $t_{Es} = 3,91 < 3$ ). Это означает, что распределение групп дочерей разных быков по заболеваемости маститом фактически подчиняется нормальному закону, хотя и при

наличии некоторого положительного эксцесса. По женским семействам величины средней арифметической (29,0), медианы (30,2) и моды (29,2) еще более совпадают, а критерий достоверности коэффициентов асимметрии и эксцесса был меньше 3:  $A_s = -0,127 \pm 0,162$  ( $t_{As} = 0,78 < 3$ ) и  $E_x = -0,463 \pm 0,324$  ( $t_{Es} = 1,43 < 3$ ).

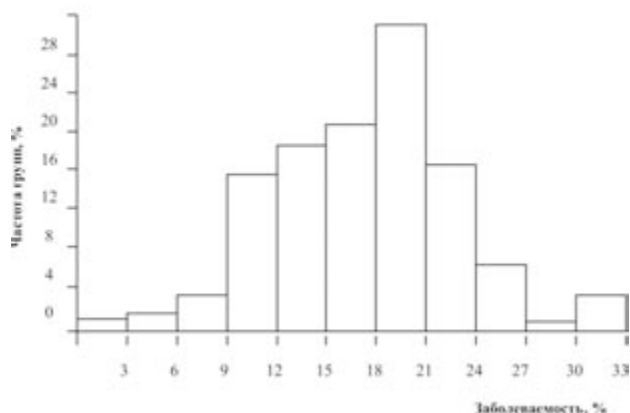


Рис. 1. График распределения дочерей холмогорских быков по заболеваемости маститом за все лактации (35 быков, 2876 лактаций у дочерей)

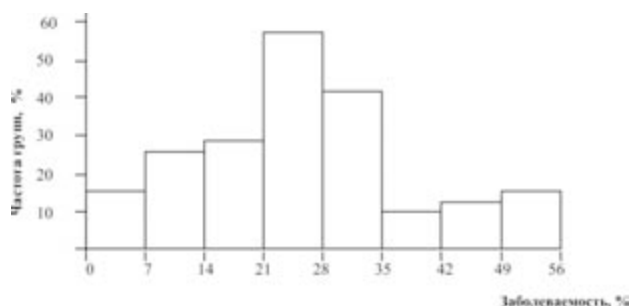


Рис. 2. График распределения семейств коров холмогорской породы по заболеваемости маститом

Следовательно, различия между эмпирической и Гауссовской кривыми соответствуют нулевой гипотезе, и представленное распределение полусестер по отцу и семейств коров подчиняется закону нормального распределения. Обычно такая закономерность характерна для количественных признаков, обусловленных аддитивным действием генов. Данный факт следует рассматривать как довод в пользу гипотезы о полигенном типе наследования устойчивости – восприимчивости коров к маститу.

**Повторяемость оценок быков по частоте мастита у дочерей.** О повторяемости судили по коэффициенту рангов ( $r_s$ ) по частоте мастита у дочерей в разные лактации. Ранги быков айрширской породы за первую, вторую и третью лактации коррелировали с оценкой за первые три лактации:  $+0,605$  ( $P < 0,05$ ),  $+0,573$  ( $P < 0,05$ ) и  $+0,773$  ( $P < 0,01$ ). Стабильность оценки

быков по маститоустойчивости зависит от числа дочерей. Чем больше учтено дочерей, тем выше повторяемость оценки быков за разные лактации.

На основе информации по большому числу дочерей в трех стадах коэффициенты ранговой корреляции холмогорских быков были во всех случаях выше 0,7 (табл. 4). При большом числе потомков первое предварительное суждение о достоинстве производителя можно получить на основе обследования первотелок. На достоверные различия между быками по устойчивости к маститу их дочерей, оцененных по первой лактации, указывали Laben [38], Vecht et al. [58]. В большинстве случаев различия по резистентности дочерей разных быков к маститу проявляются рано. Это обуславливает возможность объективной аттестации и их отбора по данному признаку. Наши данные также показали, что частота заболеваний маститом в потомстве отдельных быков не всегда связана с молочной продуктивностью. Поэтому оценку производителей по молочной продуктивности необходимо дополнять оценкой по устойчивости их дочерей к маститу.

*Наследуемость устойчивости к маститу по отцам.* По литературным данным, коэффициенты наследуемости ( $h^2$ ) частоты мастита сильно колеблются – от 0 до 0,5. Высокие коэффициенты (более 0,4) получены при использовании методов расчета  $h^2$  по корреляции признака у матерей и дочерей. При определении  $h^2$  методом полусибсов по отцу на большом экспериментальном материале его величина находится в пределах 0,1–0,2 [4], [16] и др. В ряде работ представлен  $h^2$  менее 0,1 [28], [43] и др.

В нашей работе наследуемость частоты мастита вычисляли по отдельно взятым лактациям и средним данным по ряду лактаций у полусибсов по отцу. Тем самым было выровнено большинство средовых факторов. По холмогорской породе коэффициенты наследуемости частоты мастита были невысокими, но статистически достоверными (табл. 5).

Таблица 4

Коэффициенты ранговой корреляции холмогорских быков по заболеваемости их дочерей маститом, данные по трем стадам ( $P < 0,05$ )

Показатели	Сопоставляемые лактации у дочерей					
	первая и вторая	первая и третья	первая и три первые	вторая и третья	вторая и три первые	третья и три первые
Число лактаций у дочерей	1669	1212	2667	1273	2723	2271
$r_s$	0,715*	0,900	1,000	0,900	0,800	0,900

\* $P > 0,05$ .

Таблица 5

Коэффициенты наследуемости частоты мастита по отцам (по материалам трех стад, холмогорская порода)

Лактация	Показатели				
	число быков	число дочерей	среднее число дочерей на 1 быка	$h^2$	P
Первая	6	804	134	0,171	< 0,001
Вторая	6	865	144	0,088	< 0,01
Третья	5	408	82	0,098	< 0,05
За три первые лактации	5	1863	373	0,135	< 0,001

Число дочерей на одного быка в данном дисперсионном комплексе достигало 134–144. В этом случае наиболее высокий  $h^2$  был по первой лактации дочерей – 0,171. По второй и третьей лактации – 0,085 и 0,098 соответственно. В исследовании Laben [38] при среднем числе 81 дочь на каждого из 197 быков по результатам первой лактации получен очень высокий  $h^2$  (0,48).

По айрширской породе наиболее высокий коэффициент наследуемости мастита нами также был получен у первотелок (0,200;  $P < 0,01$ ), в последующие лактации он снижался до 0,035–0,091. При учете всех лактаций  $h^2 = 0,088$  ( $P < 0,05$ ).

Результаты дисперсионного анализа в нашей работе показали, что в фенотипическое разнообразие по частоте мастита включается и генетическая изменчивость (или аддитивная изменчивость). Согласно результатам оценки, за первую лактацию генетическая дисперсия ( $\sigma_s^2$ ) равна 0,055, случайная  $\sigma_E^2 = 0,034$ , критерий Фишера (F) – 1,62 ( $P < 0,01$ ); за вторую лактацию соответственно 0,115, 0,093, 1,24 ( $P > 0,05$ ); за третью – 0,147, 0,113, 1,30 ( $P > 0,05$ ). Особенно четко проявилось влияние генотипа отца на маститоустойчивость потомков при анализе результатов за все лактации:  $\sigma_s^2 = 0,231$ ,  $\sigma_E^2 = 0,107$ , F = 2,16 ( $P < 0,001$ ).

Таким образом, анализ коэффициентов наследуемости свидетельствует о наличии достоверной и реальной генетической изменчивости в стадах по заболеваемости маститом и возможности проведения селекции на резистентность к данной болезни. Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод о том, что в холмогорских и айрширских стадах  $h^2$  частоты мастита равен в среднем около 0,1 с вариациями по отдельным лактациям от 0,04 до 0,24. Установленные нами величины  $h^2$  обуславливают при наличии достаточно большого числа дочерей возможность уверенно оценивать генотип быка по маститоустойчивости уже по первой лактации. В работе рассчитана шкала для определения минимального числа дочерей, необходимого для 70%-й точности оценки быка в зависимости от значения коэффициента наследуемости.

*Племенная ценность быков по резистентности к маститу* сильно варьирует. ПЦ холмогор-

ских быков колебалась от -3,7 до 21,9 % (табл. 6). Лучшим был бык Жиклер 634, ПЦ которого равна -3,7 %. Знак «минус» указывает, что этот бык является улучшателем резистентности к маститу и снижает заболеваемость по отношению к средней частоте мастита в стадах. Среди айрширских быков также выявлены особи с высокой и низкой племенной ценностью, которая варьировала в еще больших пределах – от -4,2 до 24,0 %. Следовательно, быки передают своим дочерям неодинаковую концентрацию аддитивных генов резистентности к маститу. Расчеты показали, что ранги производителей по племенной ценности обладают довольно высокой повторяемостью при оценке их на коровах разного возраста –  $r_s = 0,772-1,00$ . О существенной корреляции (0,62) оценок племенной ценности канадских голштинских быков по соматическим клеткам за первую и последующие лактации дочерей сообщали Zhang et al. [60]. Оцененные нами быки с установленной племенной ценностью по маститоустойчивости были распределены на три племенные категории. Улучшателей признака резистентности оказалось 29,6 %, нейтральных – 44,4 %, ухудшателей – 26,0 %.

Таблица 6

Племенная ценность холмогорских быков по резистентности к маститу (данные по трем стадам, первая лактация у дочерей)

Быки	Число дочерей	Заболеваемость дочерей, %	ПЦ, %
Жиклер 634	326	2,5	-3,7
Удачник 5	138	2,9	0,3
Заслон 725	80	7,5	9,0
Зодчий 2284	101	13,0	19,2
Завар 2270	60	16,0	21,9

*Возможный генетический прогресс.* Эффект селекции ( $E_M$ ) при браковке больных матерей находится как произведение коэффициента регрессии ( $R_{D/M}$ ) на селекционный дифференциал ( $S_M$ ):  $E_M = R_{D/M} \times S_M$ . По всем обследованным стадам прогнозируемый эффект селекции был невысоким и равнялся 0,089 (табл. 7). Это значит, что при выбраковке больных и переболевших маститом коров-матерей число здоровых дочерей в следующем поколении повысится на 8,9 %. Если принять интервал между поколениями коров за 5 лет, то ежегодный эффект селекции на маститоустойчивость составит 1,8 %. Сходные показатели по возможному эффекту селекции получены Скрипниченко [13]. При учете разного числа лактаций в совхозе имени Зайцева (айрширская порода) прогнозируется меньший эффект селекции. Так, при отборе матерей за первые три лактации число здоровых дочерей повысится на 4,53 %, ежегодный эффект селекции составит 0,9 %. Следовательно, размножение всех без исключения здоровых матерей может обеспечить такой же генетический прогресс, как и при селекции по величине удоя. Однако из-за

низкой продуктивности часть здоровых коров выбраковывается, а некоторые высокопродуктивные животные, предрасположенные к маститу, используются в стаде. Поэтому фактический эффект селекции на снижение заболеваемости маститом при массовом отборе будет меньше. Однако это не означает, что такая селекция не должна проводиться.

Таблица 7

Показатели возможного эффекта селекции на маститоустойчивость, обусловленного отбором матерей

Хозяйство	Порода	$R_{D/M}$	$S_M$	$E_M$ , %
«Большевик»	айрширская	0,372	0,258	9,5
ГПЗ «Сортавальский»	айрширская	0,169	0,260	4,3
Им. Зайцева	холмогорская	0,171	0,538	9,1
«Ведлозерский»	холмогорская	0,110	0,420	4,6
По всем стадам		0,208	0,429	8,9

*Реализованный генетический тренд.* Реализованный генетический тренд по резистентности коров к маститу оценивали по методу Smith [56] в модификации Кузнецова [9]. Среднегодовой эффект селекции при учете первой лактации дочерей равен +6,10 и +9,38 % соответственно двум вариантам расчета. Это означает, что доля свободных от мастита первотелок в стаде увеличивается ежегодно на 6–9 % за счет влияния наследственных факторов. При оценке за ряд лактаций реализованный генетический прогресс был ниже – от 2 до 5 %. Следовательно, и при отсутствии прямой селекции на маститоустойчивость в стадах все же наблюдаются положительные генетические сдвиги в частоте мастита.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На частоту мастита у коров влияют многие факторы. Это указывает на необходимость оптимизации паратипических факторов, улучшения условий кормления, содержания и обслуживания коров, повышения качества вымени путем селекции, совершенствования технологии доения и квалификации персонала. В работе на разных селекционных уровнях показана важная роль генетических факторов в резистентности коров к маститу. Представленные материалы доказывают необходимость и возможность использования генетических методов для повышения резистентности молочного скота к маститу. Поэтому в рамках комплексных программ борьбы с маститом следует предпринимать усилия по накоплению или повышению в популяциях скота концентрации генов резистентности к данному заболеванию. Существенное влияние на повышение генетической устойчивости коров к маститу могут оказывать быки. Оценка быков по резистентности их дочерей к маститу и использование выявленных улучшателей необходимы наравне с оценкой по продуктивности. При включении показателя маститоустойчивости в

число селекционных признаков и ведении соответствующего отбора можно ожидать генетически закрепленного снижения частоты мастита.

*Статья впервые была опубликована на английском языке в Journal of Animal and Feed Sciences. 2002. № 11. P. 237–254.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болгов А. Е., Карманова Е. П. Использование айрширского скота для улучшения молочных пород. М.: Росагропромиздат, 1989. 304 с.
2. Бороздин Э. К., Клееберг К. В., Зимин Г. Я. Устойчивость крупного рогатого скота к маститу. М.: ВНИИплем, 1993. 207 с.
3. Гарькавый Ф. Л., Бриде Дз. Я. Наследственная устойчивость и восприимчивость коров к маститу // Сельскохозяйственная биология. 1984. № 8. С. 24–26.
4. Кальмыкова О. А. Наследственная обусловленность резистентности к маститу // Зоотехния. 2000. № 4. С. 11–12.
5. Карликов Д. В., Лебедев М. М., Нахмансон В. М. и др. Селекция крупного рогатого скота на устойчивость к лейкозам // Животноводство. 1979. № 5. С. 31–34.
6. Карманова Е. П., Болгов А. Е. Наследование резистентности к маститу у молочного скота // Генетика. 1979. Т. 15. № 7. С. 1298–1303.
7. Копытин В. К., Новиков О. Г. Мастит коров // Ветеринария. 1999. № 2. С. 12–14.
8. Клаассен М. Х. Диагностирование, профилактика и лечение маститов у коров в молочных комплексах: Автореф. дисс. ... канд. вет. наук. Тарту, 1989. 17 с.
9. Кузнецов В. М. Оценка генетических изменений в стадах и популяциях сельскохозяйственных животных (методические рекомендации). Л.: ВНИИРГЖ, 1983. 44 с.
10. Лакин Г. Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1980. 293 с.
11. Меркурьева Е. К., Скрипниченко Г. Г., Беляева Н. Б. и др. Характеристика стада айрширской породы по заболеваемости субклиническими формами мастита в связи с генетической принадлежностью // Сб. науч. тр. / Моск. вет. академия. 1980. Т. 115. С. 3–7.
12. Мутовин В. И. Борьба с маститами коров. 2-е изд. М.: Колос, 1974. 225 с.
13. Скрипниченко Г. Г. Генетические параметры естественной резистентности молочных пород крупного рогатого скота и использование их в селекции: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М., 1991. 32 с.
14. Солдатов А. П., Холодков С. А. Резистентность алатауских коров к маститам // Селекция сельскохозяйственных животных на устойчивость к болезням и повышение резистентности в условиях промышленной технологии. М., 1988. С. 26–28.
15. Шокуров А. Е., Сафонова Л. Д., Юсупова И. Ф. Роль генотипа и некоторых факторов в заболеваемости коров маститом // Животноводство. 1984. № 6. С. 44–45.
16. Эрнст Л. К., Карликов Д. В. Итоги и перспективы научных исследований по генетической устойчивости сельскохозяйственных животных к заболеваниям // Генетическая устойчивость сельскохозяйственных животных к заболеваниям. М.: ВНИИплем, 1983. Вып. 3. С. 3–4.
17. Al-Rawi A. A., Pollak E. J., Laben R. C. Genetic analysis of California Mastitis Test records. 2. Score for resistance to elevated tests // J. Dairy Sci. 1979. Vol. 62. P. 1125–1131.
18. Andersen E. On the possibility of breeding for genetic resistance to disease in cattle // 29<sup>th</sup> Annual Meeting EAAP. Stockholm, 1978. 52 p.
19. Arney D., Phillips C. J. C., Chiy P. C. Alkali metal effect on dairy cow production and somatic cell count // Abstracts of the 47<sup>th</sup> Annual Meeting of the EAAP. Lillehammer (Norway), 1996. P. 155.
20. Badran A. E. Genetic analysis of mastitis score in Friesian cows and its relationship to environmental factors // Indian J. Anim. Sci. 1989. Vol. 59. P. 703–706.
21. Banos G., Shook G. E. Genotype by environment interaction and genetic correlation among parities for somatic cell count and milk yield // J. Dairy Sci. 1990. Vol. 73. P. 2563–2573.
22. Boettcher P. J., Van Doornmaal B. J. Tools for selection for functional traits in Canada // Proceedings of International Workshop on EU Concerted Action on Genetic Improvement of Functional Traits in Cattle (GIFT); Breeding Goals and Selection Schemes. Wageningen (The Netherlands): Wageningen Press, 1999. P. 29–39.
23. Boettcher P. S., Hansen L. B., Van Raden P. M., Ernst C. A. Genetic evaluation of Holstein bulls for somatic cell in milk of daughters // J. Dairy Sci. 1992. Vol. 75. P. 1127–1137.
24. Boichard D., Rupp R. Phenotypic and genetic relationships between somatic cell counts and clinical mastitis in French dairy Holstein cows. Proceeding of the Inter bull Technical Workshop. Verden (Germany), 2001. P. 66–72.
25. Coffey E. M., Vinson W. E., Pearson R. E. Potential of somatic cell concentration in milk as a sire selection criterion to reduce mastitis in dairy cattle parities // J. Dairy Sci. 1986. Vol. 69. P. 2163–2172.
26. Collean J. S., le Bihan-Duval E. A simulation study of selection methods to improve mastitis resistance of dairy cows // J. Dairy Sci. 1995. Vol. 78. P. 659–671.
27. Egan J. Mastitis – a review // Irish. Vet. News. 1984. Vol. 3. P. 5–18.
28. Emanuelson U., Dannel B., Philipsson J. Genetic parameters for clinical mastitis, somatic cell counts and milk production estimated by multiple-trait restricted maximum likelihood // J. Dairy Sci. 1988. Vol. 2. P. 467–476.
29. Eriksson J. Å. Mastitis in Cattle Breeding for Diseases Resistance in Farm Animals // ED School of Agricultural and Forest Sciences, University of Wales. Bangor, 1991. P. 394–410.
30. Fourichon C., Seegers H., Beaudeau F., Bareille N. Critical control points analysis for udder health management in dairy herds // Abstracts of the 47<sup>th</sup> Annual Meeting of the EAAP. Lillehammer (Norway), 1996. P. 152.
31. Heuven H., Bovenhuis H., Politiek R. Inheritance of somatic cell count and its genetic relationship with milk yield in different parities // Livest. Prod. Sci. 1988. Vol. 18. P. 115–127.
32. Jahnke B., Funke U. Breeding improvement of udder // Methodological aspects. Fortschr. Landw. Nahrungs. 1989. Vol. 27. P. 103–104.
33. Janicki C., Balukiewicz A. Genetic conditions of cow's mastitis appearance // Roczn. Akad. Roln. w Poznaniu. 1980. Vol. 120. P. 59–66.
34. Jensen N. E., Madsen P., Larsen B. Heritability of and markers of resistance against mastitis in the Danish RDM breed // Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte. 1985. Vol. 37. P. 506–510.



35. Juga J., Mäntysaari E. A., Pösö J. Economic response to total merit selection in Finish Ayrshire breeding // Proceeding of International Workshop on EU Concerted Action on Genetic Improvement of Functional Traits in Cattle (GIFT); Breeding Goals and Selection Schemes. Wageningen (The Netherlands): Wageningen Press, 1999. P. 79–87.
36. Kaneene J. B., Hurd H. S. The National animal health monitoring system in Michigan // *Prev. Veter. Med.* 1990. Vol. 8. P. 103–114.
37. Kaustell K. V., Mäntysaari E. A., Huhtanen P. Utilisation of feed consumption date and contemporary group solution in management of milk recorded herds // Abstracts of the 47<sup>th</sup> Annual Meeting of the EAAP. Lillehammer (Norway), 1996. P. 129.
38. Laben R. The inheritance of mastitis resistance // *J. Dairy Cattle Day.* 1979. Vol. 18. P. 43.
39. Lindström U. B., Syväjärvi J. Use of field records in breeding for mastitis resistance in dairy cattle // *Livest. Prod. Sci.* 1978. Vol. 5. P. 29–44.
40. Lyons D. T., Freeman A. E., Berger P. J. Evaluation of health related traits in Holstein cattle // *J. Dairy Sci.* 1986. Vol. 69. P. 124.
41. Madsen P. S., Nielsen S. M., Rasmussen M. D., Klastrup O., Jensen N. E., Jensen P. T., Larsen B., Hyldgaard-Jensen J. Research of the genetically conditioned resistance to mastitis // National Institute of Animal Science. Copenhagen (Denmark), 1987. 227 p.
42. Miller G. Y., Dorn C. R. Costs of dairy cattle diseases to producers in Ohio // *Prev. Veter. Med.* 1990. Vol. 8. P. 171–182.
43. Monardes H. G., Hayes J. F. Genetic and phenotypic relationships between location cell counts and milk yield and composition of Holstein cows // *J. Dairy Sci.* 1985. Vol. 68. P. 1250.
44. Monardes H. G., Hayes J. F., Moxley J. E. Heritability of lactation cell count measures and their relationships with milk yield and composition in Ayrshire cows // *J. Dairy Sci.* 1984. Vol. 67. P. 2429–2435.
45. Pösö J., Mäntysaari E. A. Relationships between clinical mastitis, somatic cell score and production for the first three lactations of Finnish Ayrshire // *J. Dairy Sci.* 1996. Vol. 79. P. 1284–1291.
46. Pryce J., Simm G., Amer O., Coffy M., Stott A. Returns from genetic improvement on indices that include production, longevity, mastitis and fertility in UK circumstances // Proceedings of International Workshop on EU Concerted Action on Genetic Improvement of Functional Traits in Cattle (GIFT); Breeding Goals and Selection Schemes. Wageningen (The Netherlands): Wageningen Press, 1999. P. 55–61.
47. Rabold K., Sastry N. S. R., Metz A., Grimm H. About influence of environment on mastitis incidence // *Wien. Tierärztl. Monatsschr.* 1988. Vol. 75. P. 49–254.
48. Rogers G. W., Hargrove G. L., Lawlor T. J., Ebersole J. L. Correlations among linear type traits and somatic cell counts // *J. Dairy Sci.* 1991. Vol. 74. P. 1087–1091.
49. Saloniemä H. Use of somatic cell count in udder health work // *The bovine udder and mastitis.* University of Helsinki, Faculty of Veterinary Medicine. Helsinki, 1995. P. 105–114.
50. Sandholm M. Detection of inflammatory changes in milk // *The bovine udder and mastitis.* University of Helsinki, Faculty of Veterinary Medicine. Helsinki, 1995. P. 89–104.
51. Sandholm M., Pyörälä S. Clinical examination of a mastitic cow // *The bovine udder and mastitis.* University of Helsinki, Faculty of Veterinary Medicine. Helsinki, 1995. P. 83–88.
52. Schukken Y. U., Mallard B. A., Dekkers J. C. M., Leslie K. E., Stear M. J. Genetic impact on the risk of intramammary infection following *Staphylococcus aureus* challenge // *J. Dairy Sci.* 1994. Vol. 77. P. 639–647.
53. Schultze W. D., Stroud B. H., Brasso U. B. Dairy herd problem with mastitis caused by a rapidly growing *Mycobacterium* species // *Amer. J. Vet. Res.* 1985. Vol. 46. P. 42–47.
54. Seykora A. J., McDaniel B. T. Heritabilities of teat traits and their relationships with milk yield, somatic cell count and percent two minute milk // *J. Dairy Sci.* 1985. Vol. 68. P. 2670–2683.
55. Shook G. E., Schutz M. M. Selection on somatic cell score to improve resistance to mastitis in the United States // *J. Dairy Sci.* 1994. Vol. 77. P. 648–658.
56. Smith C. Estimation of genetic change in farm livestock using field records // *Anim. Prod.* 1962. Vol. 4. P. 239–251.
57. Van der Beek S. Breeding for profit in the Netherlands // Proceedings of International Workshop on EU Concerted Action on Genetic Improvement of Functional Traits in Cattle (GIFT); Breeding Goals and Selection Schemes. Wageningen (The Netherlands): Wageningen Press, 1999. P. 75–78.
58. Vecht U., Shook G. E., Politiek R. D., Grootenhuys G. Effect of bull selection for somatic cell count in first lactation // *J. Dairy Sci.* 1985. Vol. 68. P. 2995–3003.
59. Wolf J., Schönstedt G. Breeding aspects of dairy cows mastitis frequency // *Arch. Tierzucht.* 1982. Vol. 25. P. 461–468.
60. Zhang W. C., Dekkers J. C., Banos G., Burnside E. B. Adjustment factors and genetic evaluation for somatic cell score and relationships with other traits in Canadian Holsteins // *J. Dairy Sci.* 1994. Vol. 77. P. 659–665.

УДК 533.9.082.5

**ЛИДИЯ АНДРЕЕВНА ЛУИЗОВА**

кандидат физико-математических наук, доцент, профессор кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета ПетрГУ  
*alim@karelia.ru*

**АНАТОЛИЙ ДИАМИДОВИЧ ХАХАЕВ**

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета ПетрГУ  
*alim@karelia.ru*

**НЕВОЗМУЩАЮЩИЕ МЕТОДЫ  
ЛОКАЛЬНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ПЛАЗМЫ**

Для определения локальных параметров неоднородной плазмы, таких как концентрации нормальных и возбужденных атомов и электронов, атомной и электронной температуры, большой массив экспериментальных данных должен быть собран и обработан рациональными алгоритмами, которые позволяют уменьшить влияние шумов на результаты. В статье описаны методы сбора и обработки данных, разработанные в Петрозаводском государственном университете.

Ключевые слова: алгоритмы сбора и обработки данных, атомы, диагностика неоднородной плазмы, спектроскопия, электроны

Плазма – это частично или полностью ионизованный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы, а линейные размеры области, занимаемой им, значительно превосходят расстояние, на котором электрическое поле отдельной заряженной частицы исчезает вследствие экранирования другими частицами. Плазма является рабочей средой источников света, в том числе и лазеров; многих технологических процессов, например сварки, напыления тонких пленок в оптике и микроэлектронике; медицинских процедур. Плазма присутствует в атмосферах звезд и планет и в межзвездном пространстве. Регистрация и анализ спектров излучения и поглощения плазмы – одно из эффективных средств ее диагностики, то есть определения локальных и мгновенных значений основных ее параметров: концентраций электронов, атомов и молекул, входящих в состав плазмообразующей среды в основном и различных возбужденных состояниях, а также функции распределения различных

компонент плазмы по энергиям [28]. Целью диагностики является определение характеристик объектов. Построение и проверка физических и математических моделей плазмообразующей среды часто производятся на основе результатов диагностики. Такие модели имеют как фундаментальное научное значение (так как плазма – это уникальная «лаборатория» элементарных процессов взаимодействия атомов, молекул и заряженных частиц), так и прикладное, поскольку понимание условий в плазме и процессов, протекающих в технологическом объекте, позволяет направленно совершенствовать его рабочие характеристики.

Данный обзор посвящен современным методам локальной спектроскопии плазмы, разрабатываемым или применяемым в Петрозаводском государственном университете по инициативе или при участии авторов этого обзора. При этом рассматриваются только методы, которые используются собственное излучение плазмы или результат ее просвечивания внешним, например, мало-

мощным несфокусированным лазерным излучением, поскольку доказано [34], что развиваемые в последнее время приемы локальной диагностики, использующие воздействие на плазму мощного лазерного излучения [28], не гарантируют отсутствия различий параметров среды до начала и в момент выполнения измерений.

### 1. ОБЩАЯ СХЕМА СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ. «ПРЯМАЯ» И «ОБРАТНАЯ» ЗАДАЧИ

При регистрации собственного излучения плазмы или ее просвечивании внешним излучением результат отражает свойства среды как целого, и переход к локальным характеристикам требует специальной математической обработки регистрируемых сигналов, основанной на определенных моделях изучаемого объекта, а также на модели преобразования оптического сигнала в измерительной аппаратуре.

Введем понятие «элементарный объем плазмы», понимая под этим достаточно маленький объем, в котором плазму можно считать однородной, а все процессы взаимодействия компонентов плазмы с внешним излучением – однократными. Параметры плазмообразующей среды, характерные для каждого элементарного объема, связаны известными из теории соотношениями с его оптическими характеристиками, к которым относятся:

а) Интенсивность спектральной линии.

Мощность спонтанного излучения ( $I$ ), приходящая на единицу объема, в спектральной линии, соединяющей уровни  $j$  и  $k$  конкретного атома (иона или молекулы), называют интегральной интенсивностью спектральной линии.

$$I = N_j A_{jk} \hbar \omega_{jk}, \quad (1)$$

где  $N_j$  – заселенность верхнего уровня данного перехода,  $\hbar$  – постоянная Планка,  $\omega_{jk}$  – частота, соответствующая длине волны ( $\lambda_{jk}$ ) излучения данной линии ( $\omega_{jk} = 2\pi c/\lambda_{jk}$ ,  $c$  – скорость света);  $A_{jk}$  – вероятность перехода в данной линии. Значения  $A_{jk}$  для многих линий можно найти в мировых базах спектроскопических данных, например [30]. В справочниках, например [11], [26], вместо величины  $A_{jk}$  приводятся значения сил осцилляторов переходов  $f_{jk}$ , связь между  $A_{jk}$  и  $f_{jk}$  дается соотношением:

$$A_{jk} = 0.67(g_k/g_j)\lambda_{jk}^{-2} f_{jk}, \quad (2)$$

где  $g_k$ ,  $g_j$  – статвеса нижнего и верхнего уровней перехода соответственно, а  $\lambda_{jk}$  выражено в сантиметрах.

б) Контур линии спонтанного излучения.

Распределение мощности спонтанного излучения внутри контура спектральной линии принято описывать функцией  $\varphi(\lambda)$  или  $\varphi(\omega)$ , норми-

рованной по площади на 1, так что мощность спонтанного излучения единицы объема, отнесенная к единичному интервалу частот (длин волн) и единице телесного угла, называется спектральным коэффициентом излучения  $\varepsilon(\lambda)$  и представляется в виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon(\lambda) &= (4\pi)^{-1} I \varphi(\lambda), \\ \varepsilon(\omega) &= (4\pi)^{-1} I \varphi(\omega). \end{aligned} \quad (3)$$

При этом

$$\begin{aligned} \int \varphi(\omega) d\omega &= \int \varphi(\lambda) d\lambda = 1; \\ \varphi(\lambda) &= \varphi(\omega) \cdot (d\omega/d\lambda). \end{aligned} \quad (4)$$

Функции  $\varphi(\lambda)$ ,  $\varphi(\omega)$  будем называть формой контура линии спонтанного излучения тонкого слоя. Именно эта функция может нести информацию о таких локальных параметрах плазмообразующей среды, как температура атомов и электронов, концентрация электронов, концентрация атомов в основном энергетическом состоянии, в зависимости от того, какой фактор в данных условиях вносит основной вклад в формирование контура [4], [14], [18], [28].

в) Контур коэффициента поглощения и интегральный коэффициент поглощения в линии.

Коэффициент поглощения  $k(\lambda)$  определяет изменение потока монохроматического излучения  $P(\lambda)$  при прохождении слоя плазмы малой толщины  $dx$ :

$$dP(\lambda) = -k(\lambda)P(\lambda)dx. \quad (5)$$

$k(\lambda)$  можно представить в виде произведения интеграла от  $k(\lambda)$  в пределах контура линии ( $K$ ) и функции контура  $\varphi_k(\lambda)$ :

$$k(\lambda) = K \varphi_k(\lambda). \quad (6)$$

Интегральный коэффициент поглощения  $K$  связан с заселенностями нижнего  $N_k$  и верхнего  $N_j$  уровней и вероятностью соответствующего перехода  $A_{ik}$  [14], [28]:

$$K = (g_j/g_k) \lambda_{jk}^4 A_{jk} (8\pi c)^{-1} N_k \{1 - (g_k/g_j)N_j\}, \quad (7)$$

где  $\lambda_{jk}$  – длина волны центра соответствующей линии.

Для простой линии (не имеющей тонкой или сверхтонкой структуры) и для линии со структурой, если заселенности подуровней нижнего и верхнего состояний подчиняются Больцмановскому распределению с одной и той же температурой, контур спонтанного излучения тонкого слоя  $\varphi(\lambda)$  и контур коэффициента поглощения  $\varphi_k(\lambda)$  в той же точке плазмообразующей среды совпадают. Это отнюдь не означает совпадения формы линий испускания и поглощения для источника в целом.

г) Спектральные коэффициенты излучения и поглощения в сплошном спектре.

Сплошной спектр излучения плазменного объекта формируется целым рядом процессов:

- наложением неразрешенных молекулярных полос;
- наложением неразрешенных сильно уширенных спектральных линий;
- тепловым излучением нагретых макроскопических тел, в том числе пылевых частиц и кластеров, электродов и других элементов конструкций, помещенных в плазму;
- процессами, формирующими вклад электронов в сплошной спектр: торможением электронов в поле иона и атома и рекомбинацией электрона и иона.

Первые два процесса поддаются количественной оценке для вполне определенных конкретных плазменных объектов, и здесь не может быть построена какая-то общая теория.

Излучение кластеров и пылевых частиц интенсивно исследуется в последнее время [23], [28]. Свечение других тел требует отдельного учета. Теория вклада электронов в сплошной спектр излучения и поглощения плазмы и использование этого спектра в задачах диагностики конкретных плазменных объектов освещены в литературе [17], [18]. Обилие факторов, формирующих сплошной спектр, сильно осложняет его использование для диагностики, поэтому, как правило, исследователи предпочитают определять параметры плазмы по излучению и поглощению в спектральных линиях.

Однако локальные спектроскопические характеристики элементарного объема не могут быть измерены непосредственно. При прохождении излучения через различные участки источника происходит его поглощение, рассеяние, наложение излучений с различными характеристиками, исходящих из разных участков плазмы.

К спектроскопическим характеристикам источника в целом относятся:

а)  $b(\lambda)$  – спектральная плотность мощности излучения единичной площади поверхности источника, которое распространяется в единичном телесном угле в направлении наблюдения.

Часто эту величину называют интенсивностью излучения или яркостью [28]. Строго говоря, согласно стандарту [7], энергетическая яркость определяется через мощность излучения в направлении, перпендикулярном к поверхности источника. При диагностике плазменных объектов измеряется мощность излучения в определенном направлении, которое только при некоторых положениях объекта, например при наблюдении вдоль диаметра цилиндрического разряда, совпадает с нормалью к его поверхности. Однако величину  $b(\lambda)$ , которая была определена выше, проще связать с распределением локальных спектральных характеристик плазмы. В частности, для спектральной линии  $b(\lambda)$  определяют контур линии излучения источника. Эта величина может

быть представлена как интеграл вдоль оси  $y$  (направления наблюдения) от мощности излучения отдельных участков плазмы в малый телесный угол, отнесенный к величине этого угла и единичному интервалу длин волн, в предположении, что спонтанное излучение элементарных объемов изотропно во всех направлениях и при распространении от каждой точки источника до его поверхности испытывает поглощение:

$$b(\lambda) = \int_0^{y_0} \frac{I(y)}{4\pi} \varphi(\lambda, y) \exp\left[-\int_y^{y_0} K(y') \varphi(\lambda, y') dy'\right] dy. \quad (8)$$

Здесь  $y_0$  – размер источника вдоль направления наблюдения (во всех экспериментах предполагается известной величиной),  $I$ ,  $K$ ,  $\varphi$  определяются формулами (1), (4), (7) для области плазмы с координатой  $y$ .

б)  $\tau(\lambda)$  – оптическая толщина плазмы.

Это интеграл от коэффициента поглощения вдоль луча наблюдения по всему объему источника. Просветим плазму в направлении  $y$  монохроматическим излучением мощностью  $P_0(\lambda)$ . На выходе из плазмы мощность излучения будет ослаблена поглощением. Используя определение (5), в котором положим, что  $P(\lambda)$  и  $k(\lambda)$  являются функциями  $y$ , и граничное условие:  $P(\lambda, 0) = P_0(\lambda)$ , получим:

$$P(\lambda, y_0) = P_0(\lambda) \exp\left(-\int_0^{y_0} K(y) \varphi(\lambda, y) dy\right). \quad (9)$$

Интеграл в показателе экспоненты и называют оптической толщиной плазмы.

Связь  $b(x, z, \lambda)$ ,  $\tau(x, z, \lambda)$  (здесь  $x, z$  – пространственные координаты в направлениях, перпендикулярных направлению наблюдения  $y$ ) с локальными оптическими характеристиками полностью определяется пространственной структурой объекта, степенью его неоднородности, свойствами симметрии – все это объединяется в понятие «модель источника».

Для измерения  $b(\lambda)$  (в задачах эмиссионной спектроскопии) или  $P(\lambda)$ ,  $P_0(\lambda)$  (при реализации методов абсорбционной спектроскопии) используется измерительная аппаратура, на выходе которой формируется массив отсчетов, определяемый функцией на входе системы. В общем случае для пространственно-неоднородных и нестационарных источников связь отсчетов  $Y(\lambda', x', z', t')$ , даваемых прибором, с измеряемыми величинами  $b(\lambda, x, z, t)$ , поступающими на вход измерительной системы в определенный момент времени ( $t$ ), определяется свойствами прибора («моделью прибора»). Практически диагностика возможна, только если эта модель известна, то есть установлена однозначная связь массива отсчетов с функцией на входе (определена «аппаратная функция» прибора).

Из вышеизложенного видно, что есть два пути определения пространственных распределений параметров неоднородной плазмы:

1) Сначала, используя связь искомого локального параметра плазмы с оптическими характеристиками (1–7) и задавшись определенной моделью источника с некоторым числом варьируемых параметров, связанных с искомыми распределениями, вычисляют пространственное распределение характеристик источника, например  $b(\lambda)$  (8), для нескольких фиксированных пространственных точек (для нестационарных источников и для фиксированного момента времени). Затем, зная свойства измерительной системы, рассчитывают массив отсчетов на ее выходе и сравнивают результаты расчета с экспериментальными данными; варьируя параметры модели, добиваются наилучшего совпадения экспериментальных и рассчитанных спектров и тем самым находят распределение локальных параметров плазмы. Такой метод спектроскопической диагностики называют решением «прямой» задачи. Очевидно, достоверность полученных результатов существенно зависит от справедливости априорных предположений, лежащих в основе использованных моделей, и решения могут быть неоднозначны.

2) Собрав массив отсчетов  $Y(\lambda', x', z', t')$  для каждой пространственно-временной точки, исключают аппаратные искажения, внесенные прибором, и восстанавливают распределения  $b(\lambda, x, z, t)$  или  $\tau(\lambda, x, z, t)$ . Затем для каждой длины волны при фиксированных значениях координат и времени восстанавливают распределения параметров элементарных объемов ( $\varepsilon, k$ ), в общем случае применяя методы томографии [3], [5], [19], [20]. Задача упрощается для источников с осевой симметрией. Для определения локальных параметров плазмы в одном сечении, перпендикулярном оси симметрии  $z$ , при фиксированных  $\lambda$  и  $t$  достаточно измерить распределение характеристики источника, например  $b(\lambda)$ , вдоль координаты  $x$ . Если можно пренебречь самопоглощением в плазме излучения с длиной волны  $\lambda$ , радиальное распределение соответствующего локального параметра  $\varepsilon(\lambda, r)$  находится из решения интегрального уравнения типа:

$$b(\lambda, x) = 2 \int_x^{r_0} \frac{\varepsilon(\lambda, r) r dr}{\sqrt{r^2 - x^2}}. \quad (10)$$

Это интегральное уравнение Абеля, математическое решение которого хорошо известно:

$$\varepsilon(\lambda, r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^{r_0} \frac{(db(\lambda, x)/dx) dx}{\sqrt{x^2 - r^2}} = \mathbf{R}\{b(\lambda, x)\}. \quad (11)$$

Здесь  $r$  – расстояние от оси симметрии,  $\mathbf{R}$  обозначает оператора радиального преобразования, то есть решения уравнения (10). Аналогично можно найти  $k(\lambda, r) = \mathbf{R}\{\tau(\lambda, x)\}$ .

Такой метод диагностики называют решением «обратной» задачи. На первый взгляд кажется, что здесь не используются никакие априорные предположения (кроме часто применяемого предположения об аксиальной симметрии источника), и в этом преимущество метода перед решением «прямой» задачи. Однако исключение аппаратных искажений и восстановление внутренней структуры объекта по его внешним характеристикам относятся к классу так называемых «некорректных» или «некорректно поставленных» обратных задач [27]. «Некорректными» обратными задачами называют такие физические задачи, в которых некоторые параметры объекта связаны с измеряемыми величинами, известными уравнениями или системой уравнений, имеющих строгое математическое решение, однако на практике решить их и найти из эксперимента нужные параметры не удается, так как экспериментальные данные «поражены» шумами (случайными погрешностями). Для решения таких задач предложены различные алгоритмы, суть которых сводится к использованию некоторой априорной информации об искомым функциях (например, задание степени их «гладкости» [27] или описание искомым функций моделями с малым числом параметров [22]).

## 2. МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ

Системы сбора массивов отсчетов в задачах эмиссионной и абсорбционной спектроскопии принципиально не отличаются, во втором случае надо просто найти отношение спектральных плотностей мощностей излучения, прошедшего через объект (например, разрядную камеру) при наличии и отсутствии в нем плазмы.

При использовании одноэлементного приемника излучения необходимо сканирование по спектру и пространственным координатам с программным или аппаратным выделением момента регистрации для изменяющихся во времени источников. В работах [8], [9] описан разработанный и применяемый в ПетрГУ в научных и учебных целях программно-аппаратный спектроскопический комплекс, построенный на основе дифракционного спектрометра ДФС-12 (линейная дисперсия – 0,5 нм/мм), модулей спектрального и пространственного стробирования, приборного интерфейса КАМАК [12] и программной среды LabVIEW [10]. Программные и аппаратные модули удовлетворяют требованиям унификации, стандартизации и переносимости. Спектральное оборудование, модули фотоэлектрического преобразования и модули пространственного стробирования могут быть заменены, а программы сбора, протоколирования, отображения и обработки информации практически останутся неизменными и могут функционировать в среде различных операционных систем при минимальных усилиях по их

адаптации к конкретному оборудованию и операционной системе. Комплекс позволяет регистрировать спектры в диапазоне 360–800 нм с шагом по длине волны 0.015 нм в различных пространственных точках (минимальный шаг пространственного стробирования равен 0.0076 мм в диапазоне 3 см) и в 8 фазах переменного тока промышленной частоты.

Использование фотоприемных линеек и матриц позволяет сократить число переменных, по которым необходимо сканирование. Приборы, позволяющие регистрировать спектры одновременно в различных пространственных точках источника, получили название «спектрометров изображения». В работах [1], [33] описаны разработанные и применяемые в ПетрГУ спектрометры изображения на основе интерференционных приборов – Фурье-спектрометра и интерферометра Фабри – Перо.

### 3. РАЦИОНАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ

Предположим, что исследуется сечение осесимметричного источника, и для определенной спектральной линии и фиксированного момента времени собран массив отсчетов  $Y(\lambda_i, x_k)$ , соответствующих настройке спектрального прибора на длину волны  $\lambda_i$  и системы пространственного сканирования на точку, отстоящую на расстояние  $x_k$  от оси симметрии. Даже если считать, что отсчет регистрирующей системы пропорционален мощности излучения, попадающей на фотоприемник (это всегда должно быть предварительно проверено), этот отсчет еще не дает точной информации о величине  $b(\lambda_i, x_k)$ , так как любая измерительная система обладает конечным разрешением, то есть собирает излучение с некоторого участка пространства и в некотором интервале длин волн и усредняет его по некоторому промежутку времени. В большинстве случаев техническими средствами удается достичь необходимого пространственного и временного разрешения, то есть можно пренебречь различием  $b(\lambda_i, x_k)$  в пространственно-временных точках, излучение из которых интегрируется прибором. Но добиться пренебрежимо малого влияния прибора на спектральное распределение при использовании методов диагностики, основанных на анализе формы контуров спектральных линий, как правило, не удается. Поэтому влияние аппаратных искажений спектра необходимо учитывать. При соблюдении определенных условий (пропорциональность отсчетов мощности излучения, попадающего в прибор, и постоянство характера аппаратных искажений в интервале длин волн, соответствующем контуру исследуемой линии) сигнал на выходе прибора для фиксированных значений  $x$  есть свертка сигнала на входе и некоторой характеризующей свойства прибора функции  $g(\lambda)$ , называемой аппаратной функцией или импульсным откликом прибора:

$$Y(\lambda') = \eta \int b(\lambda) \cdot g(\lambda - \lambda') d\lambda = C\{b(\lambda), g(\lambda)\}, \quad (12)$$

где  $C$  – оператор свертки. Коэффициент пропорциональности  $\eta$  должен быть постоянен по крайней мере в пределах контура одной спектральной линии и может быть определен с помощью эталонного источника [14].

Обратный оператор, который позволяет найти  $b(\lambda)$  по известным  $Y(\lambda)$ ,  $g(\lambda)$  путем решения интегрального уравнения, (12) обозначим  $C^{-1}$ .  $g(\lambda)$  можно оценить теоретически [14] или определить экспериментально, осветив прибор источником (например, лазером), ширина линии излучения которого заведомо много меньше ширины функции  $g(\lambda)$ .

Таким образом, чтобы получить распределение  $\varepsilon(\lambda, r)$  для определенного момента времени в определенном сечении осесимметричной плазмы, надо подвергнуть двумерный массив отсчетов  $Y(\lambda_i, x_k)$  следующим операциям:

1) Для каждого значения  $x_k$  решить уравнение (12). Опуская постоянный коэффициент  $\eta$ , получим:

$$b(\lambda, x_k) = C^{-1}\{Y(\lambda, x_k)\}. \quad (13)$$

Один из методов решения состоит в использовании известной «теоремы о свертке»:  $W(\omega) = B(\omega) \cdot G(\omega)$ , где  $W(\omega)$ ,  $B(\omega)$ ,  $G(\omega)$  – Фурье-образы функций  $Y$ ,  $b$  и  $g$  соответственно. Однако на практике сигнал на выходе измерительной системы описывается не формулой (12), а содержит слагаемое  $\zeta(\lambda')$  – шум или погрешность измерения:

$$Y(\lambda') = \int b(\lambda) \cdot g(\lambda - \lambda') d\lambda + \zeta(\lambda'),$$

откуда  $W(\omega) = B(\omega) \cdot G(\omega) + S(\omega)$ . (14)

Поделив Фурье-образ измеренного сигнала на Фурье-образ аппаратной функции, мы получим два слагаемых: Фурье-образ сигнала на входе:  $B(\omega)$  и отношение Фурье-образов шума  $S(\omega)$  и аппаратной функции  $G(\omega)$ . Так как Фурье-образ шума, как правило, много «шире» Фурье-образа аппаратной функции, это отношение становится очень большим в области высоких частот, что и ведет при обратном Фурье-преобразовании к результату, подчас лишенному физического смысла, то есть исключение аппаратных искажений – типичная некорректная задача.

2) По найденным для каждой длины волны  $\lambda_i$  распределениям  $b(\lambda_i, x_k)$  найти  $\varepsilon(\lambda_i, r)$ , решив интегральное уравнение (10). «Некорректность» этой задачи связана с наличием под интегралом производной от распределения яркости. Ясно, что наличие шумов приводит к нарушению «гладкости» регистрируемого распределения, и при конкретном значении  $\lambda_i$  производная может непредсказуемо менять знак. Отметим, что операторы  $R$  и  $C^{-1}$  линейны и действуют на разные переменные, поэтому порядок их применения может быть изменен.

Ниже описан оригинальный алгоритм обработки массивов спектроскопической информации [29], в котором используется только одно очевидное априорное предположение: пространственные распределения коэффициентов излучения для различных длин волн внутри контура одной линии не являются независимыми. Алгоритм, обеспечивающий устойчивость к шумам результатов решения одновременно двух «некорректных» обратных задач: исключения аппаратных искажений распределений  $b(\lambda)$  при фиксированных «х» и решения уравнения Абеля для фиксированной длины волны, основан на использовании метода главных компонент (МГК) [31].

Для реализации алгоритма необходим массив отсчетов  $Y_{ik}$ .  $Y_{i,k} = Y(\lambda_i, x_k)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $k = 1, 2, \dots, m$ ;  $n$  – полное число точек по спектру,  $m$  – число пространственных точек, в которых выполнена регистрация яркости). Необходимо также путем  $p$  повторных измерений при одних и тех же значениях  $\lambda_i$  и  $x_k$  получить оценку дисперсии воспроизводимости отсчета.

$$S_Y^2 = \frac{\sum_{v=1}^p (Y_v - \bar{Y})^2}{p-1}. \quad (15)$$

Предположим, что погрешности всех отсчетов одинаковы и независимы.

Представим массив  $Y_{i,k}$  в виде таблицы, где каждая строка соответствует определенной длине волны (на языке МГК это «объект»), а каждый столбец соответствует определенной координате (на языке МГК это «признак»). Каждый объект – это точка в  $m$ -мерном пространстве признаков, но она окружена «сферой» возможных погрешностей. Корреляция между отсчетами при различных  $x_k$  ведет к тому, что область, занятая объектами, только в некоторых направлениях выходит за пределы «сфер» погрешностей. Только эти направления, называемые «главными компонентами», несут полезную информацию об объекте. Каждый объект может быть представлен средним значением отсчетов для каждого  $x_k$  («центр тяжести» области в  $m$ -мерном пространстве) и проекциями на главные направления, которые являются собственными векторами  $U_p$  ковариационной матрицы  $A$  массива отсчетов

$$A_{k,j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{i,k} - \bar{Y}_k)(Y_{i,j} - \bar{Y}_j);$$

$$\bar{Y}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{i,k}. \quad (16)$$

В дальнейшем учитываются только векторы  $U_p$ , отвечающие собственным значениям, превосходящим оценку дисперсии отсчета  $S_Y^2$  (обозначим число этих значимых векторов  $q$ , оно суще-

ственно меньше  $m$ ). Только эти векторы и средний вектор  $Y$  несут информацию о пространственном распределении отсчетов и должны быть подвергнуты радиальному преобразованию.

Информация о спектральных характеристиках содержится в проекциях  $M_{i,p}$  спектральных распределений на векторы  $U_p$ , и аппаратные искажения исключаются из этих проекций.

$$M_{i,p} = \sum_{k=1}^m (Y_{i,k} - \bar{Y}_k) U_{p,k}; L_p(\lambda_i) = C^{-1} \{M_p(\lambda_i)\}. \quad (17)$$

В результате получаем искомые контуры в различных точках плазмы, согласно соотношению:

$$\varepsilon(\lambda, r) = \mathbf{R} \{ \bar{Y}_k \} + \sum_{p=1}^q L_p(\lambda) \mathbf{R} \{ U_p \}. \quad (18)$$

Таким образом, существенно сокращается число операций решения интегральных уравнений: вместо исключения аппаратных искажений из каждого профиля ( $m$  операций) и радиального преобразования каждой спектральной компоненты ( $n$  операций) выполняется всего  $q$  исключений аппаратных искажений и  $q+1$  радиальное преобразование. Но главное, что каждая операция совершается над распределением, полученным путем усреднения значительного числа отсчетов, что существенно повышает устойчивость результатов к шумам эксперимента.

Примером приложения алгоритма к реальным объектам может служить его использование при диагностике дугового разряда тока промышленной частоты в парах ртути с добавкой иодида таллия [29], которая потребовалась при разработке металлгалогенных ламп. Измерения выполнялись на автоматизированном комплексе на основе дифракционного спектрометра ДФС-12 [9]. Контуров линий излучения регистрировались в центральном сечении цилиндрической разрядной трубки вдоль диаметра разряда ( $x_k = 0$ ) и еще в восьми положениях  $x_k$ . Аппаратная функция определена путем регистрации контуров линий излучения разряда низкого давления в парах ртути и кадмия и аппроксимирована гауссианой с шириной 0.08 нм. Для радиального преобразования использована замена интегрального уравнения (13) системой 10 алгебраических уравнений без какой-либо дополнительной регуляризации.

Для исключения аппаратных искажений применено деление Фурье-образа проекции на Фурье-образ аппаратной функции с умножением результата перед обратным Фурье-преобразованием на функцию аподизации, которая постоянна в интервале частот  $\Omega$  от  $-0.8\omega_{\max}$  до  $0.8\omega_{\max}$ , а вне этого интервала равна 0 [24].

В качестве примера на рис. 1а, б приведены результаты применения алгоритма к массиву контуров линии излучения 552.7 нм (переход  $9^2P_{3/2} \rightarrow 7^2S_{1/2}$ ) в момент времени, соответствующий максимуму тока.

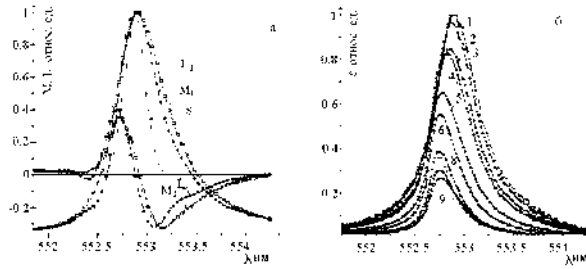


Рис. 1. а – коэффициенты разложения контуров линий таллия 555.7 нм по собственным векторам ковариационной матрицы до исключения аппаратных искажений (M1, M2) и после исключения (L1, L2); s – аппаратный контур; б – контуры той же линии для различных расстояний  $x_k$  от оси разряда (1 –  $x_k = 0$ , 9 –  $x_k = 0.32$  см)

Эта линия испытывает, в основном, штарковское уширение [4], что дает возможность найти радиальное распределение концентрации электронов. Эффективность алгоритма иллюстрируется рис. 2.

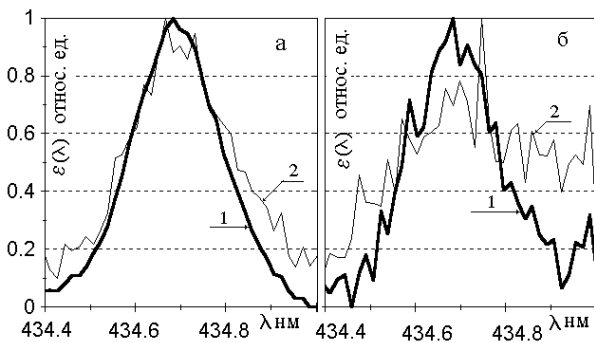


Рис. 2. Контуры линии ртути 434.7 нм (71D2–61P1) в центре разряда в моменты, когда ток максимален (а) и минимален (б), восстановленные описанным алгоритмом (линия 1) и путем исключения аппаратных искажений для каждой пространственной точки и радиального преобразования для каждой длины волны (2)

Если не выполняется условие постоянства дисперсии для всех элементов массива, то небольшое усложнение алгоритма заключается в том, что разложение элементов массива осуществляется не по собственным векторам матрицы  $\mathbf{A}$  (18), а по собственным векторам матрицы  $\mathbf{AD}^{-1}$ , где  $\mathbf{D}$  – ковариационная матрица погрешностей эксперимента, определенная по  $p$  повторным измерениям в одних и тех же условиях.

$$\mathbf{D}_{k,j} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^n (Y_{i,k} - \bar{Y}_k)(Y_{i,j} - \bar{Y}_j). \quad (19)$$

Здесь  $i$  – номера отсчетов при постоянной длине волны;  $j, k$  – номера пространственных точек. В этом случае учитываются только собственные вектора матрицы  $\mathbf{AD}^{-1}$ , соответствующие собственным значениям, большим 1.

#### 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКА ПРИ РЕШЕНИИ «ПРЯМОЙ» ЗАДАЧИ

Предполагая определенное распределение характеристик плазмы и описав эти распределения моделями с некоторым числом параметров, можно рассчитать либо профили спектральной энергетической яркости отдельных линий, либо распределение интегральных интенсивностей линий в широком участке спектра. Эти параметры можно определить, добываясь путем изменения параметров модели наилучшего совпадения расчета и эксперимента. Очень актуальна задача определения электронной концентрации и функции распределения электронов по энергиям внутри плазменно-пылевой структуры. Стандартные зондовые методы в этом случае неприменимы, но распределение интенсивностей линий с различными потенциалами ионизации и абсолютные значения этих интенсивностей могут быть рассчитаны при заданных значениях электронной концентрации и определенной форме функции распределения на основе уравнений баланса заселенностей энергетических уровней и сравнены с результатами измерений этих величин. Таким способом, в частности, можно оценить электронную концентрацию и температуру и обнаружить влияние пылевых структур на параметры плазмообразующей среды [6]. Однако реализация таких моделей требует использования большого объема априорной информации о параметрах элементарных процессов в плазме и атомных константах (вероятности переходов между многими уровнями), которой мы, как правило, не располагаем, и поэтому их трудно использовать в целях диагностики.

Более надежные результаты можно получить, моделируя контуры спектральных линий.

Если оптическая толщина в центре линии  $\tau(\lambda_0)$  достаточно велика и коэффициент поглощения возрастает от центра к краю источника, линия излучения самообращена, то есть спектральная яркость в ее центре меньше, чем в некоторых точках на крыльях. Самообращенные линии давно используются в целях диагностики неоднородной плотной плазмы [21], [32]. При этом, как правило, моделируется функция источника  $S(\xi)$ , зависящая от одного «параметра неоднородности», реже – от нескольких параметров, причем они подбираются до достижения наилучшего совпадения экспериментального и рассчитанного с этими параметрами контуров.

Высокая информативность массива самообращенных контуров, зарегистрированных при наблюдении вдоль хорд, проходящих на разных расстояниях от центра осесимметричного неоднородного источника, позволяет непосредственно определить по ним большое число параметров, описывающих пространственные распределения компонент плазмы [15], [25]. В частности, для диагностики дугового разряда переменного тока в закрытой ртутной дуге с добавкой иодида



таллия использованы самообращенные контуры резонансных линий таллия 377 нм (переход  $7^2S_{1/2}-6^2P_{1/2}$ ) и 535 нм (переход  $7^2S_{1/2}-6^2P_{3/2}$ ), зарегистрированные в различных фазах тока разряда, в различных сечениях разряда при наблюдении вдоль диаметра цилиндрической разрядной трубки и вдоль хорд, проходящих на различных расстояниях от оси разряда. Оценки показывают, что в данном случае форма контура излучения (9) зависит от распределения вдоль луча зрения: концентрации излучающих атомов (Т1 в состоянии  $7^2S_{1/2}$ ), определяющей  $I(y)$ ; концентрации поглощающих атомов (Т1 в состоянии  $6^2P_{1/2}$ , для  $\lambda = 377$  нм и  $6^2P_{3/2}$  для  $\lambda = 535$  нм), определяющих  $K(y)$ ; концентрации нормальных атомов ртути, которая, в свою очередь, зависит от давления в объеме дуги и поля атомной температуры  $T_a(y)$ , и концентрации электронов  $N_e(y)$ . Контур излучения в элементарном объеме  $\varphi(\lambda, y)$  формируется в основном ван-дерваальсовским взаимодействием с ртутью, а для осевой области разряда следует учесть также и шарковское уширение [4].

Разряд предполагается аксиально-симметричным, и каждое из перечисленных выше радиальных распределений описывается моделью типа:

$$Z(r) = Z(0) - [Z(0) - Z(r_0)] \cdot (r/r_0)^p, \quad (20)$$

где  $r$  – расстояние от центра разряда,  $r_0$  – радиус границы плазмы,  $Z(r_0)$  – значение величин на границе источника,  $Z(0)$  – в центре,  $p$  – варьируемый параметр.

К числу варьируемых параметров относится также давление в разряде. С учетом того, что все температуры на границе разряда принимаются одинаковыми, а концентрация электронов – равной 0, общее число варьируемых параметров модели для одной спектральной линии равно 10. Это число нельзя считать слишком большим, так как обрабатывается одновременно до 10 экспериментальных контуров, относящихся к разным линиям и разным направлениям наблюдения. В каждом из контуров было не менее 100 отсчетов. Подбор параметров до наилучшего совпадения расчетных и экспериментальных контуров осуществляется с использованием последовательного симплекс-метода [16]. Минимизируется общая по всем контурам одной линии сумма квадратов отклонений экспериментальных и расчетных контуров. При этом все контуры нормируются на единицу по максимуму (рис. 3). Таким путем были определены радиальные распределения нормальных атомов таллия и ртути и атомов таллия, возбужденных в состоянии  $7^2S_{1/2}$  и  $6^2P_{3/2}$ . Эти результаты были использованы для оптимизации температурных режимов закрытого дугового разряда и, в конечном счете, для достижения максимального к. п. д. при преобразовании электрической энергии в световую.

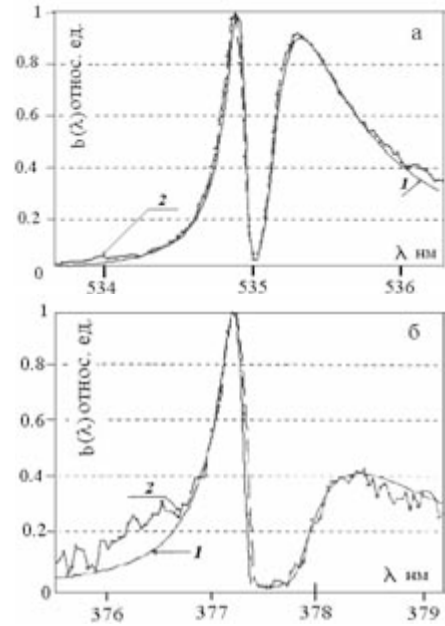


Рис. 3. Смоделированные (1) и экспериментальные (2) контуры линий таллия при наблюдении вдоль хорды, проходящей на расстоянии от оси, равном половине радиуса разрядной трубки:

а – линия 377 нм, б – 535 нм

Рассмотренные в данной статье методы диагностики неоднородной плазмы сложного состава в настоящее время становятся доступными для широкого круга академических, вузовских и заводских лабораторий, решающих широчайший круг проблем: от фундаментальных проблем науки об атомах и молекулах, проблем газоразрядных лазеров, плазмохимии, плазмотронной техники и технологий, разработки и создания высокоэффективных источников света общего и специального назначения до проблем плазменной энергетики, плазменной гидродинамики, управляемого термоядерного синтеза. Обусловлено это возможностями аппаратной базы современного приборостроения, мощностью средств вычислительной техники.

Еще более 20 лет назад программно-аппаратный комплекс «Свет» (разработка ПетрГУ, отмеченная золотой медалью ВДНХ в 1980 году), созданный на основе авторского свидетельства [13], позволил в сотни раз уменьшить время, необходимое для получения информации о параметрах плазмы закрытой дуги сложного состава [2], по сравнению с временем достижения тех же результатов традиционными для тех лет методами при несравненно большей надежности и объективности данных.

Современная техника и усовершенствованные алгоритмы сбора и обработки данных позволяют еще более ускорить получение надежной, объективной, полной, хранимой и переносимой информации о плазменной среде, что дает возможность осуществлять многие исследования в реальном масштабе времени.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженова М. Е., Луизова Л. А., Чугин В. П. Многоканальный Фурье-колориметр // Оптика и спектроскопия. 1996. Т. 80. Вып. 1. С. 173–176.
2. Босенко А. Г., Луизова Л. А., Хахаев А. Д., Штивельман Я. Е. Автоматизированный комплекс для спектроскопических исследований // Известия АН СССР. Сер. физическая. 1984. Т. 48. Вып. 4. С. 796–801.
3. Бульба А. В., Луизова Л. А., Хахаев А. Д. Обучение принципам компьютерной томографии для решения задач диагностики плазмы // Исследовано в России: [Электронный ресурс]. 2006. 68. С. 677–686. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/068.pdf>.
4. Вайнштейн Л. А., Собельман И. И., Юков Е. А. Возбуждение атомов и уширение спектральных линий. М.: Физматгиз, 1979. 320 с.
5. Вишняков Г. И., Левин Г. Г. Оптическая томография плазменных объектов // Опт. и спектр. 1982. Т. 53. Вып. 4. С. 731–736.
6. Власов Д. В., Депутатова Л. В., Луизова Л. А., Подрядчиков С. Ф., Торчинский В. М., Хахаев А. Д. Материалы ФНТП-2001. Т. 2. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2001. С. 124.
7. ГОСТ 26148-84. Фотометрия, термины и определения.
8. Екимов К. А., Луизова Л. А., Приходченко Р. В., Соловьев А. В., Хахаев А. Д. Лабораторные работы по спектроскопии с использованием виртуальных инструментов и удаленного доступа. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003. 62 с.
9. Екимов К. А., Луизова Л. А., Приходченко Р. В., Хахаев А. Д. Использование программной среды LabVIEW в спектроскопическом эксперименте // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2004. Т. 47. № 6. С. 51–56.
10. Жарков Ф. П., Каратаев В. В., Никифоров В. Ф., Панов В. С. Использование виртуальных инструментов LabView. М.: Радио и связь, 1999. 268 с. (см. также: <http://www.labview.ru>).
11. Касабов Г. А., Елисеев В. В. Спектроскопические таблицы для низкотемпературной плазмы: Справочник. М.: Атомиздат, 1973. 160 с.
12. Курочкин С. С. Системы КАМАК-ВЕКТОР. М.: Энергоиздат, 1981. 232 с.
13. Кюльмясу И. И., Попов Э. Т., Хахаев А. Д. Устройство для автоматической регистрации коэффициентов излучения и поглощения пространственно-неоднородных изменяющихся во времени источников излучения: А. с. № 399738; опубл. 03.10.73. Бюлл. № 39.
14. Луизова Л. А. Оптические методы диагностики плазмы. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003. 148 с.
15. Луизова Л. А., Патроев А. В., Хахаев А. Д. Формирование самообращенных контуров спектральных линий в закрытой ртутной дуге с добавкой йодида таллия // Изв. Академии наук. Сер. физ. 1999. Т. 63. № 11. С. 2291.
16. Математическая теория планирования эксперимента. М.: Наука, 1983. 344 с.
17. Методы исследования плазмы / Под ред. В. Лохте-Хольтгрена. М.: Мир, 1971. 551 с.
18. Очкин В. Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. М.: Физматгиз, 2006. 471 с.
19. Пикалов В. В. Прикладные аспекты эмиссионной томографии плазмы // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Сер. Б. Т. V-1. Ч. 2. М.: Изд-во Янус-К, 2006. С. 285–301.
20. Пикалов В. В., Мельникова Т. С. Томография плазмы. Новосибирск: Наука, 1995. 228 с.
21. Преображенский Н. Г. Спектроскопия оптически плотной плазмы. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1971. 178 с.
22. Сизиков В. С. Математические методы обработки результатов измерений. СПб.: Политехника, 2001. 240 с.
23. Смирнов Б. М. Кластерная плазма // УФН. 2000. Т. 170. Вып. 5. С. 495–534.
24. Соловьев А. В. Аппаратные искажения: Моделирование и исключение. [Электронный ресурс]. <http://dims.karelia.ru/distort>.
25. Соловьев А. В. Программа моделирования контура спектральной линии. [Электронный ресурс]. <http://plasma.karelia.ru/contour/>.
26. Справочник констант элементарных процессов с участием атомов, ионов, электронов, фотонов / Под ред. А. Г. Жиглинского. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1994. 335 с.
27. Тихонов А. И., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 285 с.
28. Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. В. Е. Фортова. Вводный том. Кн. 2. М.: Наука, 2000. 635 с.
29. Eкимов К., Луизова Л., Soloviev A., Khakhaev A. Data array acquisition and joint processing in local plasma spectroscopy // J. of Quant. Spectr. & Radiat. Trans. 2005. Vol. 96. P. 513–523.
30. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/index.html>.
31. Jackson J. E. A User's Guide to Principal Component. N.-Y.: John Wiley & Sons, 1991. 571 p.
32. Karabourniotis K., J. van der Mullen. Numerical validation of a self-absorption model for plasma radiation // Journal of Physics D: Applied Physics. 2005. Vol. 38. P. 3016–3027.
33. Kravchenko A. A., Luizova L. A., Soloviev A. V. High resolution local spectroscopy of inhomogeneous plasma structures // XVI International Conference on Gas Discharges and their Applications, Xi'an, China, September 11–13, 2006. Vol. 2. 2006. P. 649–652.
34. Murphy A. B. Electron heating in the measurement of electron temperature by Thomson scattering // Phys. Rev. Lett. 2002. Vol. 89. 25002.

УДК 536.244

ВЛАДИМИР АНДРЕЕВИЧ БАБКИН

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры  
механики строительного факультета ПетрГУ  
*babkin@karelia.ru*

## ПРОФИЛИ СКОРОСТЕЙ И ТЕПЛООБМЕН ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ГЛАДКОЙ КРУГЛОЙ ТРУБЕ НЕМАЛОГО ДИАМЕТРА

Модель вихревой анизотропной турбулентности используется для определения полей скоростей и температур при установившемся турбулентном течении несжимаемой жидкости в прямой круглой трубе. Область течения разбивается на пристеночный слой и ядро течения. В пристеночном слое турбулентное течение рассматривается как течение ориентируемой жидкости, локальная анизотропия которой задается так называемым директором (вектором-ориентиром вихревого типа). Турбулентные вязкость и теплопроводность в ядре течения считаются постоянными. Задача о теплообмене при постоянной температуре стенки решается методом Галеркина.

Ключевые слова: вихревые структуры, анизотропная турбулентность, директор, турбулентная вязкость, турбулентная теплопроводность

### ВВЕДЕНИЕ

Существует тесная связь между турбулентностью вязкой жидкости и находящимися в ней вихрями. Переход жидкости из ламинарного режима течения в турбулентный у твердой стенки сопровождается образованием когерентных вихревых структур, называемых  $\Lambda$ -вихрями, или подковообразными вихрями [4], [16], которые в развитом турбулентном течении вблизи твердой стенки образуют устойчивую, плотно упакованную систему [16].

Наблюдаемая в экспериментах связь между турбулентностью и вихревыми структурами стимулировала создание моделей турбулентности, которые тем или иным способом учитывают эту связь. Эти модели называют моделями вихревой турбулентности [1], [8], [17]. Одной из таких моделей является рассматриваемая здесь наша модель [1], [2], предназначенная для описания турбулентных течений в слое, непосредственно прилегающем к твердой поверхности (стенке). В ней

пристеночные структуры рассматриваются как носители локальной вихревой анизотропии, определяющей как турбулентную вязкость, так и турбулентную теплопроводность среды. В связи с этим данная модель называется моделью анизотропной вихревой турбулентности.

В настоящей работе модель пристеночной анизотропной турбулентности [1], [2] используется для решения двух задач – об определении поля скоростей и поля температур при установившемся турбулентном течении несжимаемой жидкости в круглой трубе. Пристеночный слой вихревой турбулентности имеет довольно небольшую толщину, порядка нескольких сантиметров [13], [16], поэтому во всем потоке модель можно применять только в тех случаях, когда толщина пристеночного слоя достигает оси трубы или близка к ней. В трубах больших диаметров поток необходимо делить на две части – пристеночный слой и ядро течения, подобно тому, как это делается в [5], [10]. Если пренебречь влиянием теплообмена на

течение жидкости, то задачи об определении полей скорости и температуры можно решать раздельно [9], [10], что и будет сделано ниже.

*Уравнения модели анизотропной турбулентности.* В модели [1], [2] пристеночное турбулентное течение вязкой жидкости рассматривается как движение анизотропной среды, анизотропию которой создает система  $\Lambda$ -вихрей.  $\Lambda$ -вихрь имеет вершину как наиболее удаленную от стенки точку вихря и две ветви, убегающие вниз по потоку. При удалении от вершины ветви приближаются к стенке, в пределе располагаясь вдоль нее. По наблюдениям [13], [16], угол наклона вихря к направлению течения у вершины в среднем равен  $40\text{--}45^\circ$ . Согласно [16], вихри создают статистически равное, противоположное вращение, так что среднее значение продольной завихренности равно нулю. В этой ситуации одной из характеристик структуры в точке, влияющих на течение жидкости, является среднее направление вихревых линий, характеризуемое вектором  $\mathbf{n}$ , который, вообще говоря, может быть как единичным, так и произвольной длины, в зависимости от того, учитывается или не учитывается плотность вихревых линий. Вектор  $\mathbf{n}$  называется директором.

Все локальные величины, характеризующие состояние и движение среды, в модели [1], [2] по определению считаются осредненными по объему. Кинематическими параметрами среды в точке являются скорость  $\mathbf{u}$  и директор  $\mathbf{n}$  единичной длины. При таком определении турбулизованная жидкость может рассматриваться как ориентируемая жидкость, модель которой, нацеленная первоначально на описание динамики жидких кристаллов, построена в [11], [15]. Уравнение неразрывности и уравнения движения несжимаемой ориентируемой жидкости в декартовых координатах  $x_i$  имеют вид

$$\frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\alpha} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{du_i}{dt} = \frac{\partial p_{i\alpha}}{\partial x_\alpha} + \rho f_i, \quad (2)$$

$$\rho \frac{d}{dt} \left( J \frac{dn_i}{dt} \right) = \frac{\partial \beta_{ij}}{\partial x_j} + g_i + \rho G_i, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $u_i$  – скорость,  $p_{ij}$  – напряжения,  $f_i$  – плотность массовой силы. Уравнение (3) является характерным уравнением движения ориентируемой жидкости [11], [15]. Величины  $\beta_{ij}$ ,  $g_i$ ,  $G_i$  называются соответственно обобщенными напряжениями, обобщенной внутренней и обобщенной внешней массовой силой. Параметр  $J$  характеризует осредненную инерционность структуры при повороте элементов вихревых нитей. Здесь и ниже по повторяющимся индексам предполагается суммирование от 1 до 3.

Определяющие уравнения учитывают специфику среды. Для турбулизованной жидкости вблизи стенки они имеют вид [1], [2]

$$p_{ij} = -p \delta_{ij} + \sigma_{ij} + \tau_{ij}, \quad (4)$$

$$\sigma_{ij} = K n_{\alpha,i} (n_{j,\alpha} - n_{\alpha,j} + n_j n_\beta n_{\alpha,\beta}), \quad (5)$$

$$\tau_{ij} = \mu_1 n_\alpha n_\beta e_{\alpha\beta} n_i n_j + \mu_0 e_{ij}, \quad (6)$$

$$\beta_{ij} = \kappa_j n_i + K (n_{i,j} - n_{j,i} - n_j n_\alpha n_{i,\alpha}), \quad (7)$$

$$g_i = \chi n_i - (\kappa_\beta n_i)_{,\beta} + K n_\alpha n_{\beta,\alpha} n_{\beta,i}, \quad (8)$$

$$n_{i,j} = \frac{\partial n_i}{\partial x_j}, \quad e_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (9)$$

где  $p$  – давление;  $\mu_0, \mu_1, K$  – коэффициенты модели;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $\chi$  и  $\kappa_i$  – произвольные скалярная и векторная функции соответственно. Поскольку свойства жидкости вблизи твердой стенки определяются пристеночной вихревой структурой потока, коэффициенты  $\mu_0, \mu_1, K$  могут зависеть от параметров, глобально характеризующих течение, например от числа Рейнольдса.

Для исследования изотермических течений уравнений (1)–(8) достаточно. Однако при решении задачи о теплообмене их необходимо дополнить уравнением притока тепла [15]:

$$\rho \frac{dU}{dt} = p_{ij} e_{ij} + \beta_{ij} N_{ij} - g_i N_i + Q - \frac{\partial q_i}{\partial x_i}, \quad (10)$$

где  $U$  – внутренняя энергия, отнесенная к единице массы,  $Q$  – интенсивность источника тепла,  $q_i$  – плотность потока тепла. Кинематические параметры  $N_i, N_{ij}$  определяются формулами:

$$N_i = \dot{n}_i - \omega_{i\alpha} n_\alpha, \quad N_{i,j} = \dot{n}_{i,j} - \omega_{i\alpha} n_{\alpha,j} \quad (11)$$

$$2\omega_{ij} = u_{i,j} - u_{j,i}, \quad \dot{n}_i = \frac{dn_i}{dt}.$$

*Профиль скоростей.* Пусть в бесконечной прямой круглой трубе радиуса  $R$  в режиме установившегося турбулентного течения движется вязкая несжимаемая жидкость. Введем цилиндрическую систему координат  $r, \varphi, x$  с осью  $x$  по оси трубы в направлении течения. Область течения зададим как объединение ядра течения  $0 \leq r < r_0$  и пристеночной области  $r_0 \leq r \leq R$ . Найдем вначале профиль скоростей в пристеночной области. Предположим, что коэффициенты  $\mu_0, \mu_1, K$  и инерционный параметр  $J$  при заданных условиях течения постоянны. Пренебрегая внешними массовыми силами  $f_i$  и  $G_i$ , скорость  $u_i$  и директор  $n_i$  будем искать в виде

$$u_x = u(r), \quad u_r = u_\varphi = 0, \quad n_x = \cos \theta(r), \quad (12)$$

$$n_r = \sin \theta(r), \quad n_\varphi = 0,$$

где  $\theta$  – угол между директором  $n_i$  и осью  $x$ .

Подстановка выражений (12) в уравнения (1)–(8) с учетом сделанных предположений при-

водит к необходимым для решения задачи уравнениям. Уравнение неразрывности (1) удовлетворяется тождественно. Пользуясь произволом  $\chi$  и  $\kappa_i$  в формулах (7) и (8), положим их равными нулю. В результате из уравнений (3) получим одно уравнение для  $\theta(r)$  в виде [1], [2]

$$\sin \theta \cos \theta \left( \theta'' + \frac{\theta'}{r} \right) - (2 - 3 \cos^2 \theta) \theta'^2 = 0. \quad (13)$$

Здесь и далее штрихами обозначены производные по координате  $r$ .

Уравнения (2), (4)–(6), совместно с (12) после небольших преобразований дают уравнение для профиля скоростей  $u(r)$  [1], [2]

$$\left( \mu_1 \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\mu_0}{2} \right) u' = -\frac{r}{R} \tau_w, \quad (14)$$

где  $\tau_w$  – модуль касательного напряжения на стенке трубы.

Для трубы с гладкими стенками граничные условия прилегания вихревых линий к стенке и прилипания жидкости к ней имеют вид

$$\theta_{|r=R} = 0, \quad u_{|r=R} = 0. \quad (15)$$

Первое интегрирование уравнения (13) дает

$$r \sin \theta \cos^2 \theta \theta' = -bR, \quad (16)$$

где  $(-b)$  – постоянная интегрирования, которую на данном этапе исследований приходится определять экспериментально; перед  $b$  взят знак минус, чтобы  $b > 0$ . При сравнении решений ряда задач с опытными данными для воздуха выяснилось, что  $b = 4,83 \text{ м}^{-1}$  [3].

Интегрируя уравнение (16) с первым граничным условием (15), имеем

$$\cos^3 \theta = 1 + 3bR \ln \xi, \quad \xi = \frac{r}{R}. \quad (17)$$

Вблизи стенки трубы функцию  $\ln \xi$  заменим первым членом ее разложения в ряд Тейлора – функцией  $(\xi - 1)$ , тогда получим

$$\cos \theta = [1 - 3bR(1 - \xi)]^{1/3}. \quad (18)$$

Подстановка формулы (18) в уравнение (14) и интегрирование его затем со вторым граничным условием (15) дают искомый профиль скоростей в пристеночном слое:

$$\begin{aligned} u &= Au_* [\Phi(\xi) - \Phi(1)], \\ \Phi(\xi) &= F(t(\xi)), \\ t(\xi) &= [1 - 3bR(1 - \xi)]^{1/3}, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} F(t) &= \frac{3bR - 1}{2\gamma^2 - 1} \left( \sqrt{\gamma^2 - 1} \arctg \frac{t}{\sqrt{\gamma^2 - 1}} + \frac{\gamma}{2} \ln \frac{\gamma - t}{\gamma + t} \right) + \\ &+ \frac{1 + 2\varepsilon}{4(2\gamma^2 - 1)} \ln \frac{\gamma^2 - t^2}{t^2 + \gamma^2 - 1} + \frac{1}{4} \ln |t^4 - t^2 - \varepsilon| + \frac{t^2}{2}, \\ A &= \frac{\rho u_*}{3\mu_1 b^2 R}, \quad u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, \quad \varepsilon = \frac{\mu_0}{2\mu_1}, \quad 2\gamma^2 = 1 + \sqrt{1 + 4\varepsilon}, \end{aligned}$$

где  $u_*$  – динамическая скорость.

При определении профиля скоростей в ядре течения, как и в [5], [10], воспользуемся предположением о постоянстве турбулентной вязкости в ядре при фиксированных числе Рейнольдса и радиусе трубы. Условием сращивания профилей является равенство турбулентных вязкостей на границе областей  $r = r_0$ . Как видно из уравнения (14), динамическая турбулентная вязкость в пристеночном слое задается формулой

$$\mu_T = \mu_1 \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{1}{2} \mu_0. \quad (20)$$

На рис. 1 даны графики зависимости безразмерной кинематической турбулентной вязкости  $N = \mu_T / (\rho u_* R)$  от безразмерного расстояния от стенки  $\eta = (1 - \xi)$  при течении воздуха (плотность  $\rho = 1,205 \text{ кг/м}^3$ , кинематическая вязкость  $\nu = 1,50 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ) в трубе диаметром  $d = 247 \text{ мм}$  и числом Рейнольдса  $Re = 40260$  ( $Re = wd/\nu$ , где  $w$  – средняя скорость). Кривая 1 – расчет по формулам (20) и (17) при  $b = 4,83 \text{ м}^{-1}$ ,  $\mu_0 = 1,85 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ,  $\mu_1 = 0,047 \cdot u_* \text{ Па} \cdot \text{с}$ , [3]; кривая 2 – аппроксимация [19] опытных данных Лауфера [14]; кривая 3 – график эмпирической формулы Рейхардта [18]

$$N = 0.0666 [1 - (1 - \eta)^2] [1 + 2(1 - \eta)^2]. \quad (21)$$

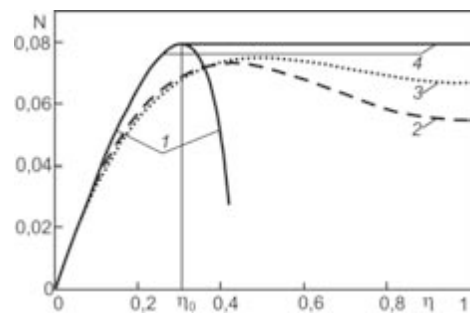


Рис. 1

В пристеночной области графики аналогичны: все кривые монотонно растут, достигая в близких точках близких максимальных значений. За точкой экстремума кривая 1 резко падает, тогда как кривые 2 и 3 показывают слабое падение за точками экстремума при приближении к оси потока. Существование точки экстремума на графиках  $N(\eta)$ , особенно явное на кривой 1, дает основания определить границу между пристеночным слоем и ядром течения как поверхность  $r = r_0$  (на рис. 1 точка  $\eta_0 = (R - r_0)/R$ ), на которой

турбулентная вязкость (20) достигает максимального значения. Очевидно, в этой точке угол  $\theta = 45^\circ$ , что вполне согласуется с максимальными наблюдаемыми значениями углов наклона пристеночных вихрей [13], [16].

По условию сращения скоростей на границе областей постоянной турбулентную вязкость в ядре  $\mu_{T0}$  определим как  $\mu_{T0} = \mu_T(\eta_0)$ , где  $\mu_T$  – функция, определяемая формулами (20) и (17). На рис. 1 принятой по всему сечению трубы вязкости соответствует кривая 4. Максимальное значение  $\mu_{T0}$  и точка максимума  $\eta_0$  имеют значения:

$$\mu_{T0} = \frac{\mu_1}{4} + \frac{\mu_0}{2}, \quad \eta_0 = 1 - \exp\left(\frac{\sqrt{2}-4}{12bR}\right). \quad (22)$$

Если угол  $\theta$  определен приближенной формулой (18), то

$$\eta_0 = \frac{4 - \sqrt{2}}{12bR}. \quad (23)$$

Графики зависимости  $N(\eta)$ , очень близкие и качественно, и количественно к кривой 4, другими подходами получены в [5], [17].

При постоянной турбулентной вязкости профиль скоростей в ядре течения  $0 \leq \xi \leq \xi_0$  имеет вид

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u_0}{u_*} + \frac{1}{2N_0}(\xi_0^2 - \xi^2), \quad N_0 = \frac{\mu_{T0}}{\rho u_* R}, \quad (24)$$

$$u_0 = Au_* [\Phi(\xi_0) - \Phi(1)].$$

На рис. 2 для примера представлены профили скоростей при течении воздуха в трубе диаметра  $d = 247$  мм при числе Рейнольдса  $Re = 40260$ . Точками обозначены результаты экспериментов Лауфера [14]. Расчетный профиль скоростей (19), (24) (кривая 1) найден в условиях эксперимента и при тех же расчетных значениях для  $b$ ,  $\mu_0$  и  $\mu_1$ , которые использованы в расчетах для рис. 1. Кривая 2 – график эмпирической формулы [9]

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln(1 + \kappa y_+) + \frac{0,29\kappa y_+^2}{1 + 0,0935(\kappa y_+)^2} + \frac{\eta y_+}{1 + \kappa(y_+/\eta)} [1 + 6\Pi - (1 + 4\Pi)\eta], \quad (25)$$

$$y_+ = \frac{(R-r)u_*}{\nu}$$

при  $\kappa = 0,41$  и  $\Pi = 0,2$ . Кривая 3 – график эмпирической формулы [10]

$$\frac{u}{u_*} = \begin{cases} (u_{\max}/u_*) + 2,44 \ln(\eta) - 0,8 & \text{при } 0 < \eta \leq 0,15 \\ (u_{\max}/u_*) - 7,8(1-\eta)^2 & \text{при } \eta > 0,15 \end{cases} \quad (26)$$

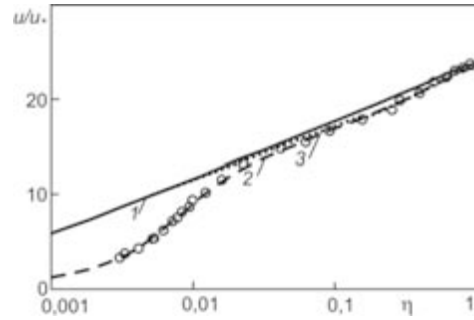


Рис. 2

Очевидно, за исключением очень узкой области, прилегающей к стенке трубы, расчетный профиль близок как к опытным точкам, так и к графикам формул (25), (26).

Из формулы (22) следует, что при уменьшении радиуса трубы  $R$  относительная толщина пристеночного слоя растет, достигая в пределе единицы при стремлении радиуса к нулю. В этом случае область, занимаемая ядром, сужается, так что, не делая большой ошибки, все течение в трубе можно считать анизотропно турбулентным, определяя профиль скоростей во всей области течения формулами (19). Трубы, в которых профиль скоростей (19) имеет место во всей области течения, естественно назвать трубами малого диаметра. Для максимального радиуса труб малого диаметра  $R_{\max}$  формула (22) дает значение  $R_{\max} = 0$ . Однако, если воспользоваться приближенной формулой (23), получим  $R_{\max} = (4 - \sqrt{2})/(12b)$ . Для течений воздуха  $R_{\max} \approx 45$  мм, причем при этом значении радиуса из формулы (22) следует  $\eta_0 = 0,63$ . Использование модели во всей области течения в трубе малого диаметра хорошо согласуется с результатами экспериментов. На рис. 3 приведены расчетные профили скоростей 1 и 4, полученные соответственно по формуле (19) по всему сечению и формулам (19), (24) двухслойной модели для течения воздуха в трубе диаметром  $d = 120$  мм при числе Рейнольдса  $Re = 40000$ ; на рисунке графики совпадают. Кривые 2 и 3 соответственно являются графиками эмпирических формул (25) и (26), полученных при тех же значениях параметров.

Этот факт, по-видимому, можно объяснить тем, что модель не учитывает наличие в структуре вихрей разной длины, так называемой «иерархии вихрей» [16], а ограничивается средним уровнем.

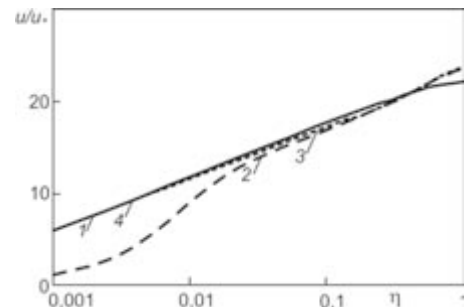


Рис. 3

Предложенная в работе [10] формула (26) также предполагает двухслойность турбулентного течения, что очевидно из самой формулы. Однако природа двухслойности осталась не до конца проясненной, поэтому и толщина пристеночного слоя  $\eta \leq 0,15$  воспринимается просто как результат подгонки при обработке опытных данных.

*Теплообмен.* Имея выражения (19) и (24) для турбулентного профиля скоростей в трубе, можно приступить к решению задачи о теплообмене. Найдем установившееся распределение температуры в полубесконечной трубе  $x \geq 0$  с постоянной температурой стенки  $T_w$ . В принятой системе координат  $r, \varphi, x$  температуру  $T$  отыскиваем в виде  $T = T(r, x)$ . Как и при определении профиля скоростей, задача о распределении температуры в пристеночном слое и ядре течения рассматривается отдельно.

В пристеночном слое движущаяся среда (турбулентная жидкость) имеет локальную симметрию, задаваемую директором  $n_i$ , поэтому с учетом зависимости  $T(r, x)$  закон Фурье записывается в виде

$$\begin{aligned} q_r &= -(\lambda_0 + \lambda_1 n_r^2) \frac{\partial T}{\partial r} - \lambda_1 n_r n_x \frac{\partial T}{\partial x}, \\ q_\varphi &= -\lambda_1 n_\varphi \left( n_r \frac{\partial T}{\partial r} + n_x \frac{\partial T}{\partial x} \right), \\ q_x &= -\lambda_1 n_x n_r \frac{\partial T}{\partial r} - (\lambda_0 + \lambda_1 n_x^2) \frac{\partial T}{\partial x}, \end{aligned} \quad (27)$$

где  $(q_r, q_\varphi, q_x)$  – поток тепла,  $\lambda_0$  и  $\lambda_1$  – коэффициенты модели, характеризующие турбулентную теплопроводность среды. При фиксированном режиме течения коэффициенты  $\lambda_0$  и  $\lambda_1$  считаем постоянными.

Если пренебречь теплопроводностью в направлении течения, то коэффициент турбулентной теплопроводности  $\lambda_T$  в пристеночном слое определяется формулой

$$\lambda_T = \lambda_0 + \lambda_1 n_r^2 = \lambda_0 + \lambda_1 \sin^2 \theta. \quad (28)$$

Пусть внутренние источники тепла отсутствуют:  $Q = 0$ . Тогда, сделав обычные в подобных задачах предположения [6], из уравнения (10) с учетом формул (27) получим уравнение распространения тепла

$$\begin{aligned} &(\lambda_0 + \lambda_1 \sin^2 \theta) \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \\ &+ \left( \frac{\lambda_0 + \lambda_1 \sin^2 \theta}{r} + \lambda_1 \sin 2\theta \theta' \right) \frac{\partial T}{\partial r} = \\ &= \rho c_p u(r) \frac{\partial T}{\partial x}, \end{aligned} \quad (29)$$

где  $c_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

В ядре течения коэффициент турбулентной теплопроводности  $\lambda_{T0}$ , как и турбулентную вязкость, будем считать постоянным и равным турбулентной теплопроводности  $\lambda_T$  на границе областей  $\xi = \xi_0$ :

$$\lambda_{T0} = \lambda_0 + \frac{\lambda_1}{2}. \quad (30)$$

Тогда уравнение распространения тепла в ядре течения имеет вид

$$\lambda_{T0} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho c_p u(r) \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (31)$$

Пусть  $T_0 = \text{const}$  – температура во входном сечении  $x = 0$ . Введем безразмерные переменные

$$\Theta = \frac{T - T_w}{T_0 - T_w}, \quad \xi = \frac{r}{R}, \quad X = \frac{x}{R}. \quad (32)$$

Уравнения (29) и (31) можно рассматривать как одно уравнение во всей области течения, которое после подстановки в него соответствующих профилей скоростей (19) и (24) в безразмерных переменных (32) имеет вид

$$\begin{aligned} &\frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} + \Psi_1(\xi) \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} = \Psi_2(\xi) \frac{\partial \Theta}{\partial X}, \\ &\Psi_2(\xi) = \begin{cases} \frac{\rho c_p u(\xi) R}{\lambda_{T0}}, & 0 < \xi < \xi_0, \\ \frac{\rho c_p u_* AR (\Phi(\xi) - \Phi(1))}{\lambda_0 + \lambda_1 (1 - t^2(\xi))}, & \xi_0 < \xi < 1. \end{cases} \end{aligned} \quad (33)$$

Уравнение (33) должно удовлетворять граничным условиям

$$\Theta(\xi, 0) = 1, \quad \Theta(1, X) = 0, \quad \frac{\partial \Theta(0, X)}{\partial \xi} = 0 \quad (34)$$

и условиям срачивания решений на границе областей  $\xi = \xi_0$

$$\begin{aligned} &\Theta(\xi_0 - 0, X) = \Theta(\xi_0 + 0, X), \\ &\frac{\partial \Theta(\xi_0 - 0, X)}{\partial \xi} = \frac{\partial \Theta(\xi_0 + 0, X)}{\partial \xi}. \end{aligned} \quad (35)$$

Равенства (35) выражают равенство температур и потоков тепла при переходе через границу  $\xi = \xi_0$ .

Функции  $\Psi_1(\xi)$  и  $\Psi_2(\xi)$  в уравнении (33) на границе  $\xi = \xi_0$ , очевидно, разрывные. Однако вследствие первого условия (35) на границе слов решение  $\Theta(\xi, X)$  должно быть непрерывно.

Как и в [3], решение уравнения (33) будем искать приближенно, методом Галеркина, в виде

$$\Theta(\xi, X) = \sum_{k=1}^n g_k(X) \varphi_k(\xi), \quad (36)$$

взяв здесь в качестве базисных непрерывные функции  $\varphi_k(\xi)$ , удовлетворяющие второму и третьему граничным условиям (34) и первому условию непрерывности (35):

$$\begin{aligned} \varphi_k(\xi) &= \Phi_0(\xi) \cos((k-1)\pi\xi), \\ k &= 1, 2, \dots, n, \\ \Phi_0(\xi) &= \begin{cases} F_0(\xi) - F_0(1), & \xi_0 \leq \xi \leq 1 \\ \frac{\Phi_0(\xi_0)}{u(\xi_0)} \left[ u(\xi_0) + \frac{1}{2N_0} (\xi_0^2 - \xi^2) \right], & 0 \leq \xi < \xi_0 \end{cases} \quad (37) \\ F_0(\xi) &= 2(3bR-1) \ln \frac{\gamma - t(\xi)}{\gamma + t(\xi)} + \\ &+ \ln \frac{\gamma^2 - t^2(\xi)}{t^2(\xi) + \gamma^2 - 1} + \ln |t^4(\xi) - t^2(\xi) - \varepsilon| + 2t^2(\xi). \end{aligned}$$

где  $t(\xi)$  – функция, определенная третьей формулой (19). Функции  $g_k(X)$ , удовлетворяющие первому граничному условию (34), определяются стандартной процедурой метода Галеркина [7].

Формула (36) дает приближенное решение задачи. Местное число Нуссельта  $Nu = \alpha d/\lambda$  можно вычислить затем по формуле [9], [10]

$$\begin{aligned} Nu &= -\frac{2\lambda_0}{\lambda \bar{\Theta}} \left( \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} \right)_{\xi=1}, \quad (38) \\ \bar{\Theta}(X) &= \frac{2}{w_0} \int_0^1 \Theta(\xi, X) u(\xi) \xi d\xi, \end{aligned}$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности газа,  $\bar{\Theta}$  – средняя массовая температура по сечению и  $w$  – средняя скорость в трубе.

Для сравнения с опытными данными решение (36) было реализовано при конкретных условиях. Жидкость – воздух:  $\rho = 1,205 \text{ кг/м}^3$ ,  $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\lambda = 2,57 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $c_p = 1002 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , число Прандтля  $Pr = 0,705$ . Коэффициенты модели те же, что были найдены из сравнения с опытными данными для труб малого диаметра [3]:  $\lambda_0 = 0,28R \text{ и}^* \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $\lambda_1 = 46,5 \text{ и}^* \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Расчеты проведены при  $n = 25$ .

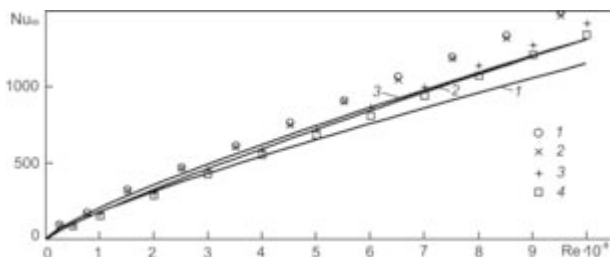


Рис. 4

В результате расчета получены значения предельного числа Нуссельта  $Nu_\infty = Nu|_{X=200}$  при числах Рейнольдса вплоть до  $Re = 10^6$  в трубах диаметров  $d = 100; 200; 300; 400 \text{ мм}$  (точки на рис. 4). Для сравнения на рисунке приведены также графики эмпирических формул: кривая 1 [9]

$$Nu_\infty = \frac{f Re Pr / 8}{1 + \frac{900}{Re} + 12,7 \sqrt{\frac{f}{8}} (Pr^{2/3} - 1)}; \quad (39)$$

кривая 2 [10]

$$Nu_\infty = 7,6 - \frac{3,6}{\lg Re} + 0,0096 Re^{0,87} Pr^{0,605}; \quad (40)$$

кривая 3 [12]

$$Nu_\infty = \frac{Re Pr \sqrt{f/2}}{4,24 \ln(Re \sqrt{f/16}) + 25,0 Pr^{2/3} + 4,24 \ln Pr - 20,2}, \quad (41)$$

где  $f = (1,821 \lg(Re/8))^{-2}$ .

Графики на рис. 4 позволяют отметить следующее. Во-первых, эмпирические формулы (39)–(41) не вполне эквивалентны друг другу. Если формулы (40) и (41) дают близкие значения практически во всем диапазоне чисел Рейнольдса, то формула (39) близка к ним примерно до  $Re = 3 \cdot 10^5$ . Во-вторых, расчетные значения зависимости  $Nu_\infty(Re)$  зависят от диаметра трубы. Однако разность значений  $Nu_\infty$  для труб диаметра 100–400 мм при одном и том же числе Рейнольдса невелика (не более 6–7 % от среднего значения), так что в экспериментах такая разность может рассматриваться как ошибка эксперимента, а сами значения зависимости  $Nu_\infty(Re)$  как независимые от диаметра.

## ВЫВОДЫ

Модель анизотропной турбулентности является базой для рассматриваемой двухслойной модели турбулентного течения и теплообмена в трубе. С использованием ее характерного параметра – директора – вводятся определяющие уравнения пристеночной турбулентности и теплопроводности, коэффициенты турбулентной вязкости и теплопроводности в ядре течения, а также граница между пристеночной областью и ядром течения. При решении задач и последующем сравнении результатов решений с опытными данными были использованы устойчивые зависимости для коэффициентов модели, которые были найдены ранее при решении других задач и которые можно рассматривать как характерные для среды.

В заключение автор выражает искреннюю благодарность В. Н. Николаевскому за внимание к работе и ценные замечания.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабкин В. А. Анизотропная турбулентность при течении несжимаемой жидкости между параллельными плоскими стеками // Прикладная математика и механика. 1985. Т. 49. Вып. 3. С. 401–405.
2. Бабкин В. А. Турбулентный поток в пристеночной области как течение анизотропной жидкости // Инженерно-физический журнал. 2002. Т. 75. № 5. С. 69–73.
3. Бабкин В. А. Теплообмен в круглой трубе при моделировании турбулентного течения воздуха течением ориентированной жидкости // Инженерно-физический журнал. 2006. Т. 79. № 1. С. 155–161.
4. Козлов В. В., Левченко В. Я., Сарик В. С. Образование трехмерных структур при переходе к турбулентности в пограничном слое // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1984. № 6. С. 42–50.
5. Лапин Ю. В., Нехамкина О. А., Стрелец М. Х. Полуэмпирические модели турбулентности для пристенных течений. Установившееся течение в круглой трубе с гладкими стенками // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1990. № 2. С. 31–36.
6. Лыков А. В. Теплообмен: Справочник. М.: Энергия, 1978. 479 с.
7. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1977. 455 с.
8. Николаевский В. Н. Пространственное осреднение и теория турбулентности // Вихри и волны. М.: Мир, 1984. С. 266–335.
9. Петухов Б. С., Поляков А. Ф. Теплообмен при смешанной турбулентной конвекции. М.: Наука, 1986. 192 с.
10. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах. М.: Атомиздат, 1978. 296 с.
11. Ericksen J. L. Conservation laws for liquid crystals // Trans. Soc. Rheol. 1961. Vol. 5. № 1. P. 23–34.
12. Kader B. A., Yaglom A. M. Heat and mass transfer laws for fully turbulent wall flows // Int. J. Heat Mass Transfer. 1972. Vol. 15. № 12. P. 2329–2351.
13. Labraga L., Lagraa B., Mazouz A., Keirsbulck L. Propagation of shear-layer structures in near-wall region of a turbulent boundary layer // Experiments in Fluids. 2002. Vol. 33. № 5. P. 670–676.
14. Laufer J. The structure of turbulence in fully developed pipe flow. NACA. 1954. Rep. № 1174.
15. Leslie F. M. Some constitutive equations for liquid crystals // Arch. Ration. Mech. and Analysis. 1968. Vol. 28. № 4. P. 265–283.
16. Perry A. E., Henbest S. and Chong M. S. A theoretical and experimental study of wall turbulence // J. Fluid Mech. 1986. Vol. 165. P. 163–199.
17. Poje A. C., Lumley J. L. A model for large-scale structures in turbulent shear flows // J. Fluid Mech. 1995. Vol. 285. P. 349–369.
18. Reichardt H. Vollständige Darstellung der turbulenten Geschwindigkeitsverteilung in glatten Leitungen // Z. Angew. Math. Mech. 1951. Bd. 31. S. 208–219.
19. Travis J. R., Buhr H. O., Sesonske A. A model for velocity and eddy diffusivity distributions in fully turbulent pipe flow // The Canadian Journal of Chemical Engineering. 1971. Vol. 49. № 1. P. 14–18.

УДК 662.63

**СЕРГЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ БЕЛЯЕВ**

кандидат технических наук, доцент кафедры тяговых машин лесоинженерного факультета ПетрГУ  
*sergbel@psu.karelia.ru*

**ЖАННА СЕРГЕЕВНА КАРПОВА**

преподаватель кафедры промышленного транспорта и геодезии лесоинженерного факультета ПетрГУ  
*jan@psu.karelia.ru*

### ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЭТАНОЛА ИЗ ЦЕЛЛЮЛОЗНОЙ БИОМАССЫ

В статье рассмотрены основные источники получения биотоплив, проанализированы характеристики разных видов биотоплив, уделено внимание экологическим свойствам. Сделан вывод о том, что этанол имеет потенциал для замещения существенного количества нефти при использовании относительно дешевых ресурсов целлюлозы с применением новых передовых технологий.

Ключевые слова: биотоплива, этанол, целлюлозная биомасса

Характерной для ведущих компаний мира является опережающая научно-исследовательская и конструкторско-экспериментальная работа по созданию автомобилей будущего и поиску новых экологически чистых топлив. Особое внимание в последние годы во многих странах, в том числе и России, уделяется производству и применению биотоплив, которые в XXI веке могут оказать существенное влияние на развитие энергетики, систем устойчивого энергообеспечения разных регионов и внести свой вклад в диверсификацию используемых видов топлива. В будущем ожидается также существенное увеличение доли выработки электроэнергии и тепла из нетрадиционных и возобновляемых энергоресурсов. Экономический и неиспользуемый потенциал этих ресурсов в России велик – около 270 млн т условного топлива в год, то есть более 20 % общего энергопотребления [1].

Биотоплива для транспорта, включая этанол, биодизель и некоторые другие жидкие и газообразные топлива, имеют перспективы для замещения существенного количества нефти во многих

регионах мира [1], [2], [7]. Лидерами по производству этанола в мире являются США и Бразилия. Однако даже в США этанол используется менее чем на 2 % транспорта (в Бразилии – до 30 %) [7].

В настоящее время многие страны начинают проявлять повышенный интерес к биотопливам. Можно ожидать, что в недалекой перспективе применение биотоплив будет значительно возрастать во многих регионах мира, в том числе и в России [6]. Очевидно, что среди значимых преимуществ биотоплив – повышение энергетической безопасности, уменьшение выбросов парниковых газов и токсичных веществ, улучшение эксплуатационных характеристик автомобилей, развитие экономики, а в некоторых случаях – защита экосистемы и т. д.

Положительные свойства биотоплив не просто оценить в единицах стоимости. В связи с этим можно предположить, что рыночные цены на биотоплива не совсем адекватно отражают их значение. Известно, что стоимость производства жидких биотоплив остается высокой. Однако перечисленные достоинства биотоплив могут в недалеком

будущем проявиться в большей степени благодаря ужесточению экологических требований как к самим топливам, так и к транспортным средствам. Правда, уже сегодня в некоторых странах, например в Бразилии, цена на биотопливо (этанол) ниже, чем в Европе, США, и приближается к стоимости нефтяных топлив. Следует ожидать, что в ближайшее десятилетие стоимость производства и в других странах будет постепенно снижаться. Одной из причин этого, вероятно, будет внедрение в будущем передовых технологий при производстве биотоплив с очень низкими выбросами парниковых газов. Новые технологии позволят в большей степени использовать запасы лигноцеллюлозы, получаемой как из отходов производства, так и из различных лесных и аграрных ресурсов, предназначенных для этой цели. В настоящее время большинство существующих технологий нацелено на получение сахара, крахмала или растительных масел из нескольких типов культур, при этом они используют энергию ископаемых топлив для производства биотоплива. В результате этого выбросы парниковых газов в процессе получения биотоплив меньше от 20 до 50 % по сравнению с нефтяными топливами [6], [7].

На рис. 1 представлена общая схема преобразования биомассы и других отходов в спирты.



Рис. 1. Общая схема получения спиртовых топлив

Передовые технологии, над которыми уже сегодня работают во многих научно-исследовательских центрах США, Европы, Японии, могут радикально улучшить экологические характеристики и открыть путь к утилизации огромных запасов лесных и других ресурсов для получения целлюлозного этанола. Вероятно, Канада может быть одной из первых стран, где в недалеком будущем будут внедрены новые технологии по конверсии целлюлозы в этанол в промышленных масштабах [5]. Во многих странах инициативы, предпринимаемые в области применения биотоплив, связанные с признанием нерыночных преимуществ биотоплив, и довольно часто это приводит к увеличению применения биотоплив в транспорте.

Биотоплива уже сегодня могут заменить нефтяные топлива, применяемые в современных автомобилях. Этанол и его смеси с бензином легко могут использоваться на обычных автомобилях. С повышением содержания этанола (более 10 %) требуется некоторая модификация

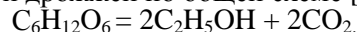
систем питания. Биотоплива могут улучшить состояние воздуха при их использовании как в чистом виде, так и в смесях с нефтяными топливами. Прежде всего, это касается выбросов  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$  и сажистых частиц. Биотоплива менее токсичны, чем нефтяные топлива, и в некоторых случаях могут утилизировать отходы отдельных производств. Однако иногда применение биотоплив (этанол) может привести к увеличению выбросов углеводородов и альдегидов.

В настоящее время спирты заняли твердую позицию в системе топливообеспечения мирового автомобильного парка. В странах Южной, Центральной Америки и США первенство завоевал этанол, что объясняется значительными ресурсами в этих регионах растительного природного сырья для его производства (биомасса, солома, древесные, кукурузные отходы и т. п.). В России для производства топливных спиртов имеется достаточно серьезная сырьевая, технологическая и промышленная база. На рис. 2 представлены основные технологии переработки биомассы в моторные топлива.



Рис. 2. Технологии переработки биомассы в моторные топлива

В последние годы среди биотоплив особое внимание уделяется этанолу (этиловому спирту). Биоэтанол считается одним из самых многообещающих альтернативных топлив. Традиционный этиловый спирт получают брожением сахаристых веществ, чаще всего глюкозы, под влиянием энзимов и дрожжей по общей схеме [3]:



Нужная для этого производства глюкоза содержится в готовом виде в исходных продуктах, например в соке винограда, при брожении которого получается виноградное вино с содержанием от 8 до 16 % спирта, или получается из так называемых полисахаридов – крахмала или клетчатки (целлюлоза). Общая формула полисахаридов  $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ . При полном гидролизе они образуют глюкозу. В качестве крахмалосодержащих веществ преимущественно используют хлебные злаки (пшеница, рожь, ячмень), рис, кукурузу и особенно картофель, то есть пищевые продукты. Два важных полисахарида – крахмал и клетчатка (целлюлоза) построены из остатков глюкозы. Элементарная ячейка клетчатки и крахмала  $[\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{OH})_3]$ . Крахмал нака-

пливается некоторыми растениями в качестве резервного материала. В промышленности его получают из картофеля. Это белый порошок. Восстановительными свойствами не обладает.

Целлюлоза широко распространена в природе: из нее построены ткани растений. Вата, фильтровальная бумага – наиболее чистые формы целлюлозы (до 96 %). Древесина в основном состоит из целлюлозы и лигнина. При гидролизе целлюлозы получают глюкозу, промежуточный продукт – целлюлоза. От крахмала целлюлоза отличается  $\beta$ -конфигурацией связи между циклами и линейным характером цепей. Стереохимия отдельных остатков глюкозы и наличие только  $\beta$ -связей между ними обуславливают расположение ОН-групп только на внешней стороне каждой очень длинной неразветвленной цепи, благодаря чему возникают идеальные условия для образования водородных связей. Получается жесткий нерастворимый волокнистый материал, идеальный для построения клеточных стенок.  $\beta$ -связь не разрушается пищеварительными ферментами человека, и поэтому целлюлоза не может служить ему пищей. Однако в сложных желудках некоторых животных, в частности жвачных, имеются соответствующие ферменты, поэтому они могут использовать клетчатку как компонент пищи.

Биотоплива могут быть получены из биомассы различного происхождения: обычные продукты сельскохозяйственных производств, такие как семена масличных культур и культур, богатых сахаром и крахмалом; лигноцеллюлозные продукты и отходы.

Целлюлоза более распространена в природе и дешевле, поэтому она более конкурентоспособна, чем сельскохозяйственные культуры, из которых получают продукты питания. В принципе, для многих специалистов уже сегодня очевидны существенные преимущества развития и повышения качества биотоплив, получаемых из целлюлозы:

- меньше влияния на рынок сельскохозяйственной продукции;
- повышение доходов фермеров за счет более полного использования своей продукции;
- повышение потенциала получения биотоплива с одного гектара земли;
- более полное и эффективное использование земельных угодий (в том числе с бедным почвенным слоем) для выращивания энергетических лесонасаждений (быстрорастущих видов деревьев – тополя, ивы и других);
- возможность использования городских твердых отходов.

Большая часть растений (особенно древесная биомасса) состоит из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Целлюлоза и гемицеллюлоза, в отличие от лигнина, могут быть преобразованы в этанол.

Содержание целлюлозы в древесной и травяной биомассе может меняться от 30 до 70 %. Остаток представляет органическую часть – лигнин, который можно использовать для выработки энергии или получения биосинтетического топлива.

Древесная биомасса включает в себя древесину и все отходы – остатки лесозаготовок, деревообработки и т. д. Она наиболее широко распространена в природе и является возобновляемой. Россия занимает первое место в мире по запасам древесной биомассы. Еще в середине прошлого столетия в СССР была создана гидролизная промышленность (более 40 гидролизных и биохимических заводов), где в качестве сырья использовались отходы деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности, сельскохозяйственные отходы, а также некоторые виды отходов пищевой продукции.

Целлюлозный этанол отвечает многим, если не всем требованиям, предъявляемым к транспортным топливам. Однако в связи со сложной структурой клетки растению целлюлозную биомассу значительно сложнее превратить в сахара, чем крахмал. В клетке растений обнаружены три основных полимера: целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин. Эти полимеры образуют сложную композитную наноструктуру, которая обеспечивает растениям высокую прочность и сопротивление внешним нагрузкам. Их жесткая структура и является основным препятствием для широкого производства топливного этанола.

Традиционные технологии по переработке целлюлозной биомассы в этанол достаточно сложны, имеют высокую стоимость и уменьшают общую эффективность процесса. Существующая стратегия производства этанола из биомассы в основном базируется на технологиях, открытых в 1930-е годы в Германии, а позже активно применяемых в России вплоть до последнего времени. Этот процесс включает три основные фазы: кислотная предварительная обработка биомассы; гидролиз; ферментация.

Последние исследования и новые технологии (рис. 3) позволили значительно уменьшить стоимость энзимов (ферментов) и повысить эффективность процесса за счет одновременно проходящей ферментации и сахарификации (SSF – simultaneous saccharification and fermentation) [8]. Таким образом, гидролиз целлюлозы и ферментация глюкозы объединены в одну фазу.



Рис. 3. Современные технологии получения целлюлозного этанола

Создание нового поколения лигноцеллюлозных культур для получения энергии требует решения трех основных задач [3], [4], [6], [8]:

- максимальное производство биомассы с единицы площади за один год;
- выход на устойчивое развитие с минимальными затратами;
- получение максимального количества топлива из единицы биомассы.

Перспективным направлением можно считать и создание специальных лесонасаждений, предназначенных для нужд энергетики. Энергетические леса (плантации) выращиваются с целью получения энергии. Стоимость их производства остается достаточно высокой, однако возможно ее уменьшение с созданием плантаций различных культур с высокой урожайностью и применением эффективных методов лесозаготовок. В настоящее время энергоплантации создаются, например, в Бразилии, где эвкалиптовые леса обеспечивают сталелитейную промышленность древесным углем. Энергетические леса могут быть выращены на земельных угодьях относительно низкого качества. Они не требуют применения большого количества удобрений и пестицидов. Однако особое внимание должно быть уделено селекционным видам и большим монокультурам.

В отдаленной перспективе наилучшие результаты могут быть получены при использовании местных и смешанных видов с сохранением некоторого биоразнообразия. Очень важно также найти приемлемый баланс между высокой продуктивностью таких плантаций и сохранением питательных свойств лесных земель. Инновационные энергоресурсы и растения, специально созданные для промышленного производства биотоплив, могут быть созданы на основе новых биотехнологий и технологических процессов.

Последние научные достижения в лабораториях США и Европы показывают, что существуют пути для дальнейшего повышения эффективности технологий получения этанола из целлюлозной биомассы. С этой целью в США разработана стратегия развития биотопливной промышленности на основе широкого использования целлюлозной биомассы. В рамках данной стратегии к 2030 году планируется довести применение на транспорте биотоплив до 30 % и тем самым значительно уменьшить потребление нефтяных топлив.

Следует отметить, что уровень потребления и производства этанола значительно вырос

в последние 20 лет. Многие страны принимают меры по стимулированию расширения его производства и сфер потребления. По мнению ряда экспертов и по данным проведенных исследований [6], [8], с целью снижения затрат на производство этанола из целлюлозной биомассы следует больше внимания уделить совершенствованию технологии предварительной обработки биомассы и объединению основных биопроцессов (гидролиз целлюлозы, ферментация гемицеллюлозы и сахаров) в одном технологическом цикле, на одном реакторе с использованием одних ферментов.

Россия – одна из немногих стран, которая обладает богатым опытом получения этанола по гидролизным технологиям. Однако для широкого применения этанола в качестве моторного топлива или добавок в топлива, очевидно, требуются дополнительные усилия для повышения эффективности существующих технологий, уменьшения стоимости целлюлозного этанола [5], [6], [7], [8]. России, США и другим странам без специальной программы правительств, объединяющей усилия научно-исследовательских центров по биотехнологиям, химии и технологии топлив, энергетики и энергосбережения и т. д., добиться значимых результатов будет непросто. Биотоплива, полученные из зерна и других культур по традиционным технологическим процессам, будут конкурировать с нефтяными топливами до тех пор, пока цены на нефть будут оставаться высокими. Только использование относительно дешевых ресурсов целлюлозы с применением новых передовых технологий позволяет открыть широкие возможности коммерциализации этанола.

Более благоприятные условия для повышения потенциала биотоплив будут складываться в том случае, если расширять ресурсную базу для их производства (лесную биомассу, отходы целлюлозных культур и другие виды биомассы) с применением новых технологий. Технологии производства топливного этанола быстро развиваются. Предполагается, что через 10 лет этанол уже сможет конкурировать с нефтяным топливом. Новые технологии на базе биотехнологий позволят сократить издержки и ослабить зависимость от традиционного сырья. Широкое применение биомассы в качестве топлива для транспорта может также сдерживаться и конкуренцией со стороны других потребителей, связанных с производством тепла и электроэнергии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробей Н. И. Глобальные тенденции в энергетике на рубеже столетий // Энергия: экономика, техника, экология. 2000. № 12. С. 38–31.
2. О проблемах производства биотоплива в мире // БИКИ № 8118872, 21.07.2005. С. 12–14.
3. Петров А. А., Бальян Х. В., Трошенко А. Т. Органическая химия: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1981. 592 с.
4. Biofuels Joint Roadmap, June 2006, U. S. Department of Energy. Fueling mobility 21st century transportation fuels: <http://www.Shell.com>.
5. Biofuels for Sustainable Transportation: <http://www.IEA.org>.
6. Biofuels for transport: <http://www.IEA.org/books>.
7. Bioethanol and the Ethanol Industry today. US. DOE. Biomass Program: <http://www.DOE.BiomassPublications.htm>.
8. Cario N., Hamelinck Geertje van Hooijdonk. Prospects for ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance as development. Report NWS-E-2003-55. Utrecht University: <http://www.DOE.htm>.

УДК 676.051/.054

**ИРИНА ВИТАЛЬЕВНА СИМОНОВА**

кандидат технических наук, доцент кафедры начертательной геометрии и инженерной графики строительного факультета ПетрГУ  
*isim@psu.karelia.ru*

**СЕРГЕЙ БОРИСОВИЧ ВАСИЛЬЕВ**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой целлюлозно-бумажных и деревообрабатывающих производств лесоинженерного факультета ПетрГУ  
*servas@psu.karelia.ru*

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ С РАБОЧИМ ОРГАНОМ ДИСКОВОЙ РУБИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ**

Рассмотрено взаимодействие древесного сырья с ножевым диском рубительной машины. Выявлены причины снижения качества вырабатываемой щепы и ухудшения ее фракционного состава. Обосновано влияние формы рабочей поверхности ножевого диска и формы задней грани ножей на качество вырабатываемой щепы для различных типоразмеров дисковых рубительных машин.

Ключевые слова: щепка, машина рубительная дисковая, форма рабочей поверхности

Одним из важнейших видов продукции первичной переработки древесины является технологическая щепка, служащая важнейшим сырьем для целлюлозно-бумажной промышленности [9]. От качества производимой щепы значительно зависит качество конечной продукции – бумаги и картона.

Для производства щепы используются различные рубительные машины, в первую очередь – дисковые [2], [8]. Они характеризуются относительной простотой устройства, надежностью и стабильностью работы, высокой производительностью. Важнейшими направлениями модернизации таких машин являются обеспечение снижения потерь древесины при производстве щепы и улучшение ее фракционного состава. В контексте данных направлений важнейшую роль на качество щепы оказывают конструктивные параметры рубительных машин и в первую очередь – конструкции дисков и самих ножей. Конструктивные особенности дисков и ножей в первую очередь различаются геометрией их формы. В настоящее время наибольшее распростране-

ние получили плоские диски с обычными прямыми ножами. В процессе работы машины древесина через загрузочный патрон, сориентированный определенным образом относительно вращающегося от электродвигателя диска, вступает во взаимодействие с передней и задней гранью режущих ножей, закрепляемых на диске. При этом происходит отруб (срезание) слоя древесины с одновременным самозатягиванием бревна. Затем во взаимодействие с бревном вступает следующий нож. Процесс повторяется до полного измельчения исходного древесного материала в щепу. Щепка при этом удаляется из кожуха рубительного диска либо вверх, либо в сторону.

Проведенные нами наблюдения за работой дисковых рубительных машин, эксплуатируемых на ОАО «Кондопога» и ОАО «Петрозаводский ДОК», с последующим анализом полученного фракционного состава щепы показали, что при использовании обычных плоских дисков с ножами прямой заточки количество щепы крупной и мелкой фракций было достаточно велико

[4]. На наш взгляд, причиной этого являются неравномерности и срывы подачи бревна самозатягиванием к рубительному диску. При падении бревен с подающего транспортера в загрузочный патрон машины происходят значительные биения бревна с ударами о стенки патрона. Эти биения особенно характерны для случая измельчения бревен малого размера (в сравнении с размерами загрузочного патрона) и реек – отходов лесопиления. Такой материал при биениях разворачивается в патроне, вследствие чего на выходе из машины получается щепка некондиционных размеров и формы.

В случаях падения в загрузочный патрон бревен большого диаметра разворота и биения практически не происходит. Однако в этом случае часто наблюдаются срывы подачи, которые приводят к срывам процесса самозатягивания (подачи) и снижению качества фракционного

состава щепы. С целью выявления причин этих явлений нами были проведены теоретические исследования процесса взаимодействия бревен с рабочей поверхностью диска рубительной машины.

Основываясь на теоретических предпосылках взаимодействия режущих ножей с древесиной, изложенных в работах [1], [3], [6], [7], рассмотрим случай поступления в загрузочный патрон бревна малого диаметра (не более 10 % от размера поперечного сечения загрузочного патрона). При контакте с телом диска бревно неизбежно вступает во взаимодействие с закрепленным на диске ножом. Полагаем, что в этот момент ось бревна  $AB$  (рис. 1) сориентирована по загрузочному патрону, положение которого относительно плоскости диска характеризуется углами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Таким образом, ось бревна  $AB$  образует с осями координат углы  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$  и  $\alpha_z$ .

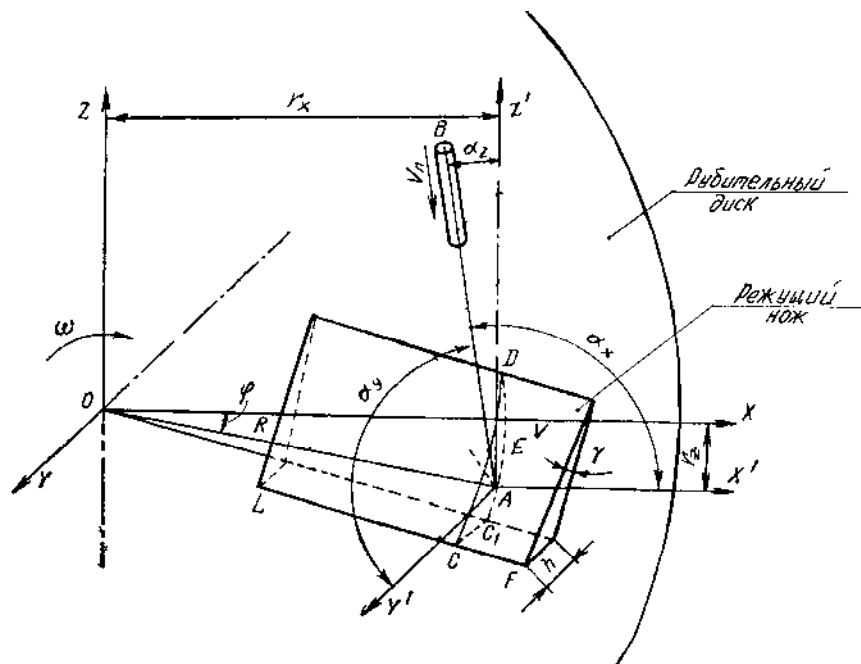


Рис. 1. Схема взаимодействия ножа с бревном малого диаметра

Лезвие ножа  $LF$  направлено по радиусу диска, вращающегося относительно оси  $OY$  с постоянной угловой скоростью  $\omega$ , что соответствует установившемуся режиму работы рубительной машины. Задняя грань ножа  $v$  наклонена к плоскости самого диска под углом  $\gamma$ , обеспечивающим процесс затягивания бревна. Лезвие выпущено за плоскость диска на величину  $h$ . При повороте ножа с диском ось бревна будет находиться в контакте с задней гранью. При этом на грани она описывает дугу  $CED$ . Спроецировав эту дугу на плоскость  $ZOX$ , получим дугу окружности радиуса резания  $R$ . При этих условиях изменение координат центра бревен, а следова-

тельно, и скорости подачи будет происходить не прямо пропорционально изменению угла затягивания  $\gamma$ , как, например, в механизмах, осуществляющих строгание древесины.

Определим скорость подачи (затягивания)  $v_n$  оси бревна. Для этого опишем текущие координаты точки  $E(x, y, z)$ , принадлежащей дуге  $CED$ . Дуга  $CED$  образована пересечением с плоскостью  $v$  линий, проведенных из соответствующих точек дуги  $C_1AD$  и параллельных  $AB$ . Координаты точки  $A$ , расположенной на диске,  $(r_x, r_z)$  считаем заданными и соответствующими ориентации расположения загрузочного патрона.

В принятой системе координат уравнения линии  $LF$  (лезвия) имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} y = h; & & y - h = 0; \\ z = -x \operatorname{tg} \varphi; & & z + x \operatorname{tg} \varphi = 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Уравнение плоскости задней грани ножа  $\nu$ , проходящей через линию  $LF$  и плоскость диска, можно записать в следующей форме:

$$\left. \begin{aligned} (y - h) + \lambda(z + x \operatorname{tg} \varphi) &= x; \\ \lambda \operatorname{tg} \varphi + y + \lambda; & \\ z - h = 0. & \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Значение параметра  $\lambda$ , введенного Вальцовым [1], определяется по формуле

$$\lambda = \operatorname{tg} \gamma \cos \varphi. \quad (3)$$

Подставив значение  $\lambda$  в уравнение (2), получим уравнение плоскости задней грани ножа в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} x \operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \varphi \cos \varphi + y + z \operatorname{tg} \gamma \cos \varphi - h &= \\ = x \operatorname{tg} \gamma \sin \varphi + y + z \operatorname{tg} \gamma \cos \varphi - h &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Зная уравнение прямой  $AB$ , пересекающей плоскость в точке  $E$ ,

$$\frac{x - r_x}{\cos \alpha_x} = \frac{y - 0}{\cos \alpha_y} = \frac{z + r_z}{\cos \alpha_z} = C, \quad (5)$$

определим координаты самой точки  $E(x, y, z)$

$$\left. \begin{aligned} x &= C \cos \alpha_x + r_x; \\ y &= C \cos \alpha_y; \\ z &= C \cos \alpha_z - r_z. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Подставляя полученные значения координат в уравнение (4), получим:

$$\begin{aligned} &(C \cos \alpha_x + r_x) \operatorname{tg} \gamma \sin \varphi + C \cos \alpha_y + \\ &+ (C \cos \alpha_z - r_z) \operatorname{tg} \gamma \cos \varphi - h = 0 \\ C &= \frac{-r_x \operatorname{tg} \gamma \sin \varphi + r_z \operatorname{tg} \gamma \cos \varphi + h}{\cos \alpha_x \operatorname{tg} \gamma \sin \varphi + \cos \alpha_y + \cos \alpha_z \operatorname{tg} \gamma \cos \varphi}. \end{aligned} \quad (7)$$

Взяв производные от координат  $x, y, z$  по времени, получим значение составляющих скорости подачи (затягивания) оси бревна

$$v_x = \omega \Phi \cos \alpha_x, v_y = \omega \Phi \cos \alpha_y, v_z = \omega \Phi \cos \alpha_z; \quad (8)$$

где

$$\Phi = \frac{(-r_x \operatorname{tg} \gamma \cos \varphi - r_z \operatorname{tg} \gamma \sin \varphi) N_1 + (r_x \operatorname{tg} \gamma \sin \varphi + r_z \operatorname{tg} \gamma \cos \varphi + h) N_2}{Q^2}$$

$$\left. \begin{aligned} Q &= \cos \alpha_x \operatorname{tg} \gamma \sin \varphi + \cos \alpha_y + \cos \alpha_z \operatorname{tg} \gamma \cos \varphi. \\ N &= \cos \alpha_x \operatorname{tg} \gamma \cos \varphi - \cos \alpha_z \operatorname{tg} \gamma \sin \varphi. \end{aligned} \right\}$$

Зная по координатным составляющим скорости подачи оси бревна, полное ее значение  $v_n$  в момент отруба при радиальном положении ножей определим по известному кинематическому соотношению

$$v_n = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}. \quad (9)$$

Очевидно, что бревно или рейка, вступая в контакт с ножом и имея свободу разворота в загрузочном патроне (особенно при небольших продольных размерах), приобретают значительные величины скоростей точки пересечения своей оси с плоскостью ножа в направлении осей  $X$  и  $Y$  (см. уравнения 8). Эти составляющие общей скорости подачи (самозатягивания) и приводят к развороту бревна в загрузочном патроне, вызывая его рубку под углом с образованием относительно длинных частиц щепы некондиционной фракции.

Несомненно, что какое-либо изменение геометрии формы диска и формы заточки ножей не позволит устранить этот недостаток.

В случае падения в загрузочный патрон бревна больших размеров, а тем более бревна, размеры которого сопоставимы с размерами горловины загрузочного патрона (рис. 2), разворот его относительно оси подачи, обусловленный биением, невозможен, и бревно практически прямо движется на диск в соответствии с углами ориентировки загрузочного патрона.

Согласно ориентации загрузочного патрона ( $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ), кривые отруба будут проектироваться на плоскость диска в форме эллипсов, имеющих оси

$$2a = \frac{d}{\cos \alpha_1} \quad \text{и} \quad 2b = \frac{d}{\cos \alpha_2}. \quad (10)$$

При непрерывном контакте древесины с задними плоскостями ножей (установившийся режим работы) линии отруба также будут иметь вид эллипсов (с точками  $E_1, E_2$ ), полученных путем пересечения прямыми линиями, образующими цилиндр (бревно), плоскости  $\nu$ .

Уравнения линии лезвия  $LF$ , как и в предыдущем случае, имеют вид (1).

Уравнение эллипса резания в системе координат  $Z'AX'$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{x^2}{b^2} + \frac{z^2}{a^2} &= 1; \\ y &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (11)$$



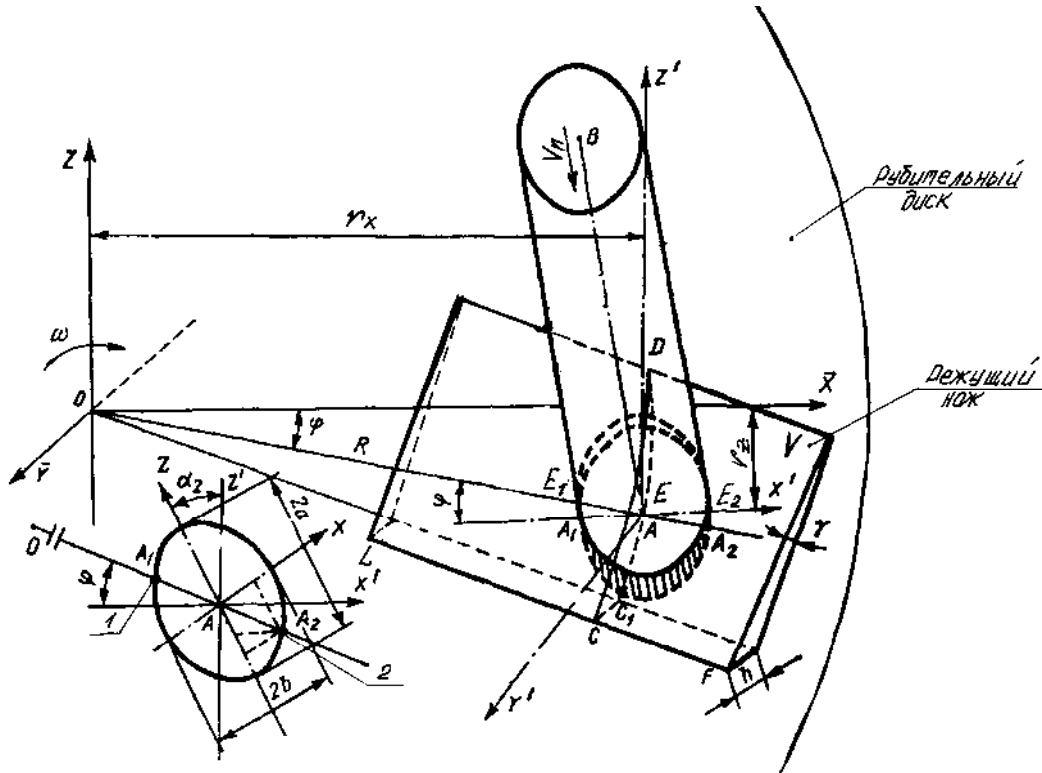


Рис. 2. Схема взаимодействия ножа с бревном максимального диаметра

или

$$v_{n_{1,2}} = \sqrt{v_{x_{1,2}}^2 + v_{y_{1,2}}^2 + v_{z_{1,2}}^2}. \quad (13)$$

$$a^2 x^2 + b^2 z^2 - a^2 b^2 = 0.$$

Совместным решением уравнений эллипсов резания и линии лезвия режущих ножей определяются координаты точек  $E_1$  и  $E_2$ .

Дифференцируя их по времени, получим выражения для координатных составляющих скоростей подачи (затягивания):

$$\left. \begin{aligned} v_{x_{1,2}} &= \Phi_{\phi} \cos \alpha_x - x_{1,2}; \\ v_{y_{1,2}} &= \Phi_{\phi} \cos \alpha_y; \\ v_{z_{1,2}} &= \Phi_{\phi} \cos \alpha_z - z_{1,2}; \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

где

$$\Phi_{\phi} = \frac{-x_{1,2} E + z_{1,2} D - \operatorname{tg} \gamma (m \sin \varphi + n \cos \varphi)}{F};$$

$$E = \operatorname{tg} \gamma \sin(\varphi - \alpha_2);$$

$$D = \operatorname{tg} \gamma \cos(\varphi - \alpha_2);$$

$$F = \cos \alpha_x \sin(\varphi - \alpha_2) \operatorname{tg} \gamma + \cos \alpha_y + \cos \alpha_z \cos(\varphi - \alpha_2) \operatorname{tg} \gamma.$$

Зная по координатным составляющим скорости подачи (12), полное ее значение  $v_{n_{1,2}}$  в диаметрально расположенных точках  $E_1$ ,  $E_2$  в момент отруба определим по известному кинематическому соотношению

Расчеты скоростей, проведенные по формуле (13) для различных параметров рубительных машин, показывают, что при рубке бревен значительных размеров между скоростями диаметрально противоположных точек бревна при его контакте с задней гранью ножа наблюдается явное кинематическое несоответствие. Данное несоответствие скоростей подачи приводит к нестабильности процесса резания, появлению срывов в подаче и ухудшению фракционного состава щепы.

Проведенные расчеты позволили установить, что с увеличением угла поворота диска с  $10^\circ$  до  $30^\circ$  ( $0^\circ$  – момент начала вхождения лезвия в бревно), то есть по мере заглупления ножа в рез, средняя скорость затягивания уменьшается на 20–25 %, что является причиной нестабильности и дальнейшего срыва подачи.

Увеличение радиуса резания вызывает увеличение скорости подачи (затягивания). При этом кинематическое несоответствие перемещений диаметрально противоположных точек бревна сильнее сказывается на машинах с диаметрами дисков до 1500 мм. Так, при рубке бревна диаметром 20 см диском диаметром 1270 мм значения скоростей подачи по крайним точкам составили 2,6 и 1,82 м/с, то есть разница равна 30 %. При использовании диска диаметром 2000 мм для измельчения бревна того же диаметра значения ско-

ростей составили 5,4 и 4,6 м/с соответственно, то есть в этом случае разница равна только 15 %.

Для устранения выявленного кинематического несоответствия и создания условий для равномерной подачи бревна самозатягиванием необходимо обеспечить одинаковую скорость подачи на любом радиусе резания и при любом угле поворота диска. Данные условия могут быть выполнены при применении геликоидальной поверхности диска и геликоидальной формы заточки рубительных ножей [5].

Геликоидальная (винтовая) поверхность получается в результате сложного равномерного движения некоторой точки, которая перемещается вдоль образующей поверхности цилиндра, в то время как сама образующая равномерно вращается вокруг оси цилиндра.

Фронтальная проекция цилиндрической геликоиды представляет собой синусоиду с длиной волны, равной шагу, и амплитудой, равной радиусу окружности основания образующего цилиндра.

Развертка части цилиндрической поверхности, ограниченной геликоидой на длине одного витка, представляет собой прямоугольный треугольник. Из прямоугольного треугольника можно легко найти зависимость шага от угла

подъема геликоиды для практического расчета ее параметров при проектировании формы диска и формы заточки ножей.

Выполнение геометрической формы диска в виде геликоидальной поверхности и применение геликоидальной формы заточки ножей позволяют устранить кинематическое несоответствие скоростей подачи диаметрально противоположных точек бревна практически на любых диаметрах рубительных дисков. Применение геликоидальной формы заточки ножей позволяет также стабилизировать подачу (процесс самозатягивания) независимо от угла поворота диска и избежать эффекта снижения скорости затягивания. Однако следует учитывать, что данный эффект наступает только со второго-третьего отруба.

При использовании рубительных машин с дисками диаметром более 2000 мм и прямыми ножами выявленное кинематическое несоответствие скоростей подачи диаметрально противоположных точек бревна, согласно выполненным расчетам, оказывается незначительным. При этом использование геликоидальной формы заточки ножа становится невозможным из-за уменьшения заднего угла резания ниже допустимого предела ( $2^\circ$ ).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вальщиков Н. М. Рубительные машины. Л.: Машиностроение, 1970. 328 с.
2. Вальщиков Н. М., Добровольский П. П. Анализ конструкций и работы рубительных машин разных типов. М.: Машиностроение, 1963. 69 с.
3. Вальщиков Н. М., Лицман Э. П. Рубительные машины. М.: Лесная промышленность, 1980. 96 с.
4. Васильев С. Б., Симонова И. В. Экспериментальная проверка методов классификации щепы по толщине // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. Вып. 5. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2005. С. 15–16.
5. Васильев С. Б., Симонова И. В. Обоснование формообразующих параметров диска рубительной машины // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. Вып. 179. 2007. С. 130–135.
6. Лаутнер Э. М. Основы теории получения технологической щепы и разработка нового поколения дисковых рубительных машин: Науч. доклад на соискание уч. степени д-ра техн. наук. СПб.: СПбЛТА, 1996. 52 с.
7. Резник Н. Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов. М.: Машиностроение, 1975. 311 с.
8. Рушнов Н. П., Лицман Э. П., Пряхин Е. А. Рубительные машины. М.: Лесная промышленность, 1985. 208 с.
9. Шегельман И. Р., Васильев С. Б. Технологическая щепка: классификация, приемка и испытания. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1999. 31 с.

## 61-я НАУЧНАЯ СТУДЕНЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

20–24 апреля 2009 года  
в Петрозаводском государственном университете  
состоится 61-я научная студенческая конференция.

Ректорат, Совет по НИРС, общественные организации Петрозаводского государственного университета приглашают принять участие в работе 61-й студенческой научной конференции, которая аккредитована как мероприятие для проведения II этапа Программы «УМНИК».

Подробное описание программы конференции по адресу:

[http://www.fasie.ru/fund\\_programms/umnik/](http://www.fasie.ru/fund_programms/umnik/).

Работа конференции пройдет по 80 секциям на 13 факультетах университета.

### СЕКЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ:

#### Агротехнический факультет:

1. Зоотехния, товароведение и экспертиза продовольственных товаров

#### Исторический факультет:

2. История Карелии
3. История и культуры стран северной Европы
4. Архивоведение и вспомогательные исторические дисциплины
5. Музееведение и историко-культурный туризм
6. Отечественная история
7. Всеобщая история
8. Локальные и микроисторические исследования

#### Лесонинженерный факультет:

9. Технологии и оборудование лесного комплекса

#### Математический факультет:

10. Теория вероятностей и анализ данных
11. Геометрия и топология
12. Математический анализ
13. Прикладная математика
14. Информационные системы и технологии

#### Медицинский факультет:

15. Акушерство и гинекология
16. Гигиена
17. Экология и санитарная микробиология
18. Фармакология
19. Теоретическая медицина
20. Невропатология и психиатрия
21. Педиатрия
22. Современные проблемы медицины (на иностранных языках)
23. Терапия №1
24. Терапия №2
25. Хирургия №1
26. Хирургия №2
27. Общественное здоровье и здравоохранение

#### Факультет политических и социальных наук:

28. Contemporary IR: actors, problems, practices
29. Международные процессы и мировая политика в начале XXI века
30. Recherches sur la langue et la gestuelle des hommes politiques français de la Vème république
31. История и теория политической науки
32. Прикладная политология
33. Теория и практика социальной работы
34. Технология социальной работы
35. Отраслевая и прикладная социология

#### Факультет прибалтийско-финской филологии и культуры:

36. Прибалто-финская филология и культура

#### Строительный факультет:

37. Системы автоматизированного проектирования
38. Водоснабжение и водоотведение
39. Реконструкция и реставрация зданий и сооружений
40. Механика
41. Начертательная геометрия и инженерная графика
42. Строительные конструкции

#### Физико-технический факультет:

43. Геология и геофизика
44. Энергетики и электроника
45. Горное дело
46. Информационно-измерительные системы и физическая электроника
47. Физика твердого тела
48. Электронные и ионные приборы

#### Филологический факультет:

49. Германская филология
50. Классическая филология
51. Скандинавская филология и культура
52. Русский язык
53. Русская литература
54. Переводоведение

#### Эколого-биологический факультет:

55. Ботаника
56. Зоология и экология
57. Физиология растений
58. Гидробиология и ихтиология
59. Молекулярная биология, биологическая и органическая химия
60. Экология растений

#### Экономический факультет:

61. Проблемы современного управления
62. Теория и социально-экономическая статистика
63. Основные проблемы денежно-кредитных отношений в современных условиях
64. Экономическая теория
65. Экономический анализ и статистика
66. Деньги и кредит
67. Аудит
68. Проблемы теории и практики современного менеджмента

#### Юридический факультет:

69. Теория, история государства и права
70. Международное и конституционное право
71. Гражданско-правовые дисциплины
72. Уголовно-правовые дисциплины
73. Право на английском языке

#### Кафедра культурологии

74. История культуры
75. Философия культуры

#### Кафедра педагогики и психологии

76. Педагогика и психология

#### Кафедра философии

77. Философия

#### Кафедра туризма

78. Туризм
79. Гостиничный сервис
80. Ресторанный сервис

### Куратор НИРС:

*Варламова Татьяна Валентиновна*  
доцент кафедры педиатрии

Тел.: 8 (8142) 75-05-90  
E-mail: varlamova@sampo.ru



6 апреля 2009 года отмечает свой юбилей проректор по информатизации ПетрГУ, доцент, лауреат премии Правительства РФ в области образования, внештатный советник Главы Республики Карелия по информатизации *Наталья Сократовна Рузанова*.

## НАТАЛЬЯ СОКРАТОВНА РУЗАНОВА

Наталья Сократовна родилась в творческой семье: отец – актер театра, мать – директор Дома народного творчества. В 1961 году окончила физико-математический факультет Петрозаводского университета по специальности «Математика». На пятом курсе была направлена в Ленинградский госуниверситет для написания дипломной работы по программированию на ЭВМ, после чего была распределена в ПетрГУ для работы на первом в Карелии вычислительном центре. Начав работу в качестве инженера-программиста, Наталья Сократовна в 1970 году стала руководителем этого центра.

С 1985 по 1989 год ежегодно организует на базе университета всероссийские научно-практические конференции по использованию компьютерных технологий в управлении вузом. В эти годы программное обеспечение, разработанное ВЦ ПетрГУ для целей управления, было внедрено более чем в 100 вузах страны. В 1985 году, в связи с введением в школе предмета информатики, при полном отсутствии в школах учебников и компьютеров, организовала переподготовку учителей для всех школ Карелии. С начала 90-х годов, став директором Регионального центра новых информационных технологий Северного региона (РЦНИТ), руководит работами по переходу на микропроцессорную технику, созданию систем и средств реализации информационных технологий. С 1992 года активно занимается созданием телекоммуникационной сети университета.

С 1995 года Н. С. Рузанова, как проректор по информатизации, постоянно занимается вопросами внедрения ИТ на всех факультетах и кафедрах ПетрГУ, организует работы по формированию и развитию информационного пространства РК. Под ее руководством в 1995 году был создан первый региональный сервер «Карелия», Портал органов власти РК, Региональный образовательный портал.

Наталья Сократовна автор более 90 научных публикаций, инициатор и один из основных разработчиков программ информатизации республики на 2004–2007 и 2008–2012 годы. Преподавая на кафедре информатики и математического обеспечения ПетрГУ, она руководит курсовыми и дипломными работами, направленными на внедрение информационных технологий в различные сферы деятельности РК.

За большие заслуги в сфере развития информационных технологий Н. С. Рузановой присвоены звания «Заслуженный работник народного образования РК», «Заслуженный работник Высшей Школы РФ». Она отмечена многими наградами, в том числе нагрудным знаком «Почетный работник высшего профессионального образования РФ» и Орденом дружбы.

**Поздравляем Наталью Сократовну с юбилеем, желаем ей здоровья, счастья и новых профессиональных успехов!**



14 января 2009 года исполнилось 80 лет доктору биологических наук, профессору, академику МАНЭБ, заслуженному деятелю науки Республики Карелия и Российской Федерации *Леониду Павловичу Рыжкову*.

## ЛЕОНИД ПАВЛОВИЧ РЫЖКОВ К 80-летию со дня рождения

Леонид Павлович родился в д. Николаевское Вытегорского района Вологодской области. В 1953 году окончил с отличием Карело-Финский госуниверситет. После окончания аспирантуры работал на Севанской гидробиологической станции в качестве научного сотрудника, заведующего лабораторией и ученого секретаря. В 1965 году стал заведующим лабораторией Карельского отделения ГосНИОРХ, а с 1966 года – директором этого отделения. Благодаря его активной деятельности в 1969 году на базе этого отделения был создан Северный научно-исследовательский институт озерного и речного рыбного хозяйства (СевНИОРХ), в дальнейшем преобразованный в Северный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт рыбного хозяйства (СеврыбНИ-Ипроект), который он и возглавил. Леонид Павлович всегда большое внимание уделял научной работе. Он руководил научно-исследовательскими работами, выполняемыми в Карелии, Коми, Архангельской, Вологодской и Мурманской областях. Сотрудничал с зарубежными специалистами, участвуя в работах «Международной биологической программы», «Большие озера мира», «Ладога», «Лосось», «Внутренние водоемы Прибалтики». Л. П. Рыжковым был установлен ряд морфофизиологических закономерностей в онтогенезе пресноводных организмов, разработаны теоретические основы пресноводной аквакультуры северного региона, решены многие научные и практические задачи интенсификации рыбного хозяйства, ряд экологических проблем использования и сохранения водной среды.

С 1967 года Л. П. Рыжков работает на кафедре зоологии и экологии Петрозаводского государственного университета. За это время им было разработано множество лекционных курсов, а под его руководством выполнено более 200 курсовых и дипломных работ, защищены 22 кандидатские и 3 докторские диссертации. Многочисленные ученики Леонида Павловича трудятся во многих регионах нашего государства и успешно развивают его научные идеи.

В настоящее время Леонид Павлович возглавляет лабораторию экологических проблем Севера. Под его руководством продолжают научные исследования и развивается сотрудничество с многими научными и учебными организациями России и зарубежья. Результаты многогранной исследовательской деятельности Леонида Павловича опубликованы более чем в 350 научных статьях и 8 монографиях.

**Поздравляем Леонида Павловича с юбилеем и желаем ему здоровья и дальнейших успехов в его научной, образовательной и организаторской деятельности!**



5 марта 1999 года исполнилось 70 лет профессору кафедры лесного хозяйства лесоинженерного факультета Петрозаводского государственного университета *Анатолию Петровичу Царёву*.

## **АНАТОЛИЙ ПЕТРОВИЧ ЦАРЁВ К 70-летию со дня рождения**

Анатолий Петрович родился в пгт Покровское Днепропетровской области. После окончания семилетней школы обучался в Велико-Анадольском лесном техникуме, который окончил в 1957 году, и сразу поступил на лесохозяйственный факультет Воронежского лесотехнического института, который окончил с отличием в 1962 году. По завершении учебы был направлен на работу в распоряжение комбината «Омсклес», где был назначен на должность лесничего в Черлакский лесхоз.

В декабре 1964 года Анатолий Петрович поступил в аспирантуру при кафедре лесоводства Воронежского лесотехнического института. После ее окончания был направлен на работу в Астраханскую лесную опытную станцию ВНИИЛМА, а затем работал в Центральном НИИ лесной генетики и селекции, занимая должности от заведующего лабораторией до заместителя директора по науке. С сентября 1990 года по совместительству работал профессором кафедры лесоводства Воронежской ЛТА. В 1968 году А. П. Царёв защитил кандидатскую диссертацию, а в 1986 году стал доктором наук. С 1995 года его судьба связана с работой на кафедре лесного хозяйства ПетрГУ.

Имя А. П. Царёва широко известно в России и за рубежом. Результаты его научной деятельности отражены более чем в 200 работах, опубликованных как в нашей стране, так и в зарубежных изданиях (около 40). Под его руководством подготовлено 5 кандидатов наук.

Научные интересы А. П. Царёва связаны с исследованиями генетической ценности плюсовых деревьев сосны обыкновенной по их семенному потомству на испытательных культурах в Петрозаводском лесхозе, селекции и технологии создания плантаций тополя и ивы в России, экологии произрастания и продуктивности осины в России, экономической эффективности полезащитных лесных полос, сортоведения и сортоиспытания лесных древесных пород, плодоношения клонов плюсовых деревьев сосны и многих других проблем.

Анатолий Петрович – очень разносторонний человек: он поет в украинском народном хоре и знает 8 иностранных языков.

А. П. Царёв награжден Памятной медалью Н. И. Вавилова, бронзовой медалью ВДНХ СССР, медалью «Ветеран труда», нагрудным знаком «Участник ликвидации последствий аварии ЧАЭС» и юбилейным нагрудным знаком «Участник ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС».

**Поздравляем Анатолия Петровича с юбилеем. Желаем ему крепкого здоровья, счастья, новых творческих успехов в научной и педагогической деятельности, связанной с подготовкой специалистов лесного хозяйства.**

## ЕДИНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К РУКОПИСЯМ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ В ЖУРНАЛ

Публикации в журнале подлежат статьи, ранее не печатавшиеся в других изданиях.

Статья предоставляется в распечатанном виде на бумаге формата А4 (в двух экземплярах) и в электронном виде, на носителе или вложением в электронное письмо на адрес редакции журнала. Печатная версия статьи подписывается всеми авторами.

Статья набирается в текстовом редакторе Microsoft Word и сохраняется с расширением .doc. Объем оригинальной и обзорной статьи не должен превышать 1 печатный лист, кратких сообщений – 5–6 страниц, отчетов о конференциях и рецензий на книги – 3 страницы. Поля: верхнее и нижнее – 2 см, правое и левое – 3 см. Абзацный отступ – 0,5 см. Шрифт: Times New Roman, размер – 14 пунктов, аннотация, список литературы – 12 пт, межстрочный интервал – полуторный. Нумерация страниц – справа внизу страницы.

Статья должна состоять из следующих элементов: названию статьи должен предшествовать индекс универсальной десятичной классификации (УДК) в левом верхнем углу. Далее через 1 интервал – название статьи жирным шрифтом заглавными буквами, название должно быть по возможности кратким, точно отражающим содержание статьи. Точка в конце названия статьи не ставится. Сведения об авторе (имя, отчество, фамилия автора (-ов) полностью; ученая степень и звание; место работы: вуз, факультет, кафедра; должность; электронный адрес и контактные телефоны). Аннотация (объемом не более 6 строк) на русском и английском языках, перед ней – название статьи и фамилия (-ии) автора (-ов) также на 2 языках; ключевые слова от 3 до 8 слов (или словосочетаний, несущих в тексте основную смысловую нагрузку) также на двух языках. Все перечисленные элементы статьи отделяются друг от друга пустой строкой и печатаются без абзацного отступа через 1 интервал.

Основной материал статьи и цитат, приводимых в статье, должен быть тщательно выверен автором. Сокращения слов не допускается, кроме общепринятых сокращений химических и математических величин и терминов. Размерность всех физических величин следует указывать в системе единиц СИ.

Список литературы, примечания, комментарии и пояснения по тексту статьи даются в виде конечных сносок. Список литературы должен быть напечатан через одинарный интервал, на отдельном листе. Цитируемая в статье литература (автор, название, место, издательство, год издания и страницы (от и до или количество)) приводится

в алфавитном порядке в виде списка в конце статьи (сначала отечественные, затем зарубежные. Фамилии иностранных авторов приводятся в оригинальной транскрипции). В тексте статьи ссылка на источник делается путем указания в квадратных скобках порядкового номера цитируемой книги или статьи, через точку с запятой – цитируемых страниц, если это необходимо. В книгах иностранных авторов, изданных на русском языке, после заглавия книги через двоеточие указывают, с какого языка сделан перевод. Выходные данные по статьям из журналов и сборников указывают в следующем порядке: фамилия (-ии) автора (-ов) с инициалами, название статьи, через две косые черты – название журнала (год, том, номер, страницы (от и до) или сборника (место издания, год, страницы (от и до))). По авторефератам – фамилия, инициалы, полное название автореферата, после которого ставят двоеточие и указывают, на соискание какой степени и в какой области науки защищена диссертация, место издания, год, страницы.

Таблицы – каждая печатается на отдельной странице, нумеруется соответственно первому упоминанию ее в тексте и снабжается заголовком. Таблицы должны быть предоставлены в текстовом редакторе Microsoft Word (формат .doc). В тексте следует указать место таблицы и ее порядковый номер.

Иллюстрации (рисунки, фотографии, схемы, диаграммы) нумеруются, снабжаются подписями и представляются в виде отдельных растровых файлов (в формате .tif, .jpeg), а в тексте рукописи указывается место, где они должны быть размещены. Для оригиналов (бумажная версия) на обороте каждой иллюстрации ставится номер рисунка, фамилия автора и пометка «верх», «низ». Каждый рисунок (их не должно быть более 5–6) должен иметь название и объяснение всех кривых, цифр, букв и прочих условных обозначений, размещенных под ним. В тексте статьи должна быть ссылка на конкретный рисунок, например (рис. 1).

Статьи, поступившие в редакцию, обязательно рецензируются. Если у рецензентов возникают вопросы, статья возвращается на доработку. Редакция оставляет за собой право внесения редакторских изменений в текст, не искажающих смысла статьи.

Материалы, не соответствующие предъявленным требованиям, к рассмотрению не принимаются.

Решение о публикации принимается редакционной коллегией журнала.

## CONTENTS

### ARCHTECTURE AND CONSTRUCTION

*Grishina I. E.*

#### ETHNO-ARCHITECTURE: RESEARCH PRINCIPLES (in honor of V. P. Orphinsky jubilation)

*Summary:* In the article the issues and methodology of ethno-architecture – scientific field, where historical-architectural and ethnographic approaches to traditional wooden architecture are combined and aimed at revealing ethnic specifics and the pattern of folk architecture development. The fundamental work by V. P. Orphinsky is being viewed. The work was devoted to wooden architecture of Karelia and its development in the works of the Petrozavodsk ethno-architectural school in 1980–2000.

*Key words:* The Russian North, folk wooden architecture, methods of ethno-architectural research, ethnic peculiarities, laws of architectural form-building, typology ..... 7

*Ajukaev R. R., Grafova E. O., Ajukaev R. I., Venitsianov E. V.*

#### MATHEMATICAL MODELING IN WATER PURIFICATION RESEARCH

*Summary:* The application of slow filters holds much promise in water supply of the out-of town buildings. The results of mathematical modeling of regeneration process of slow filters loading are presented. The explanation of the concentration effect of the washed pollution in the centre of the cylindrical filter at the expense of a twisting under filter water volume is given.

*Key words:* Slow filtering, regeneration, mathematical modeling, water supply of country objects ..... 14

*Krilova O. I.*

#### TO THE QUESTION OF PEDESTRIAN TRAFFIC

*Summary:* The article focuses on the issues of pedestrian traffic arrangement in cities. The social transformations are connected with the necessity of the new approaches to the town-planning decisions. To make a choice of pedestrian traffic multi-factorial estimation should be carried out, for which a number of investigations will be required.

*Key words:* Pedestrian traffic, organization of transportation engineering flow, criterion, multi-factorial estimation ..... 21

### BIOLOGY

*Antipina G. S., Shuiskaya E. A.*

#### SEED PRODUCTION OF INVASIVE SPECIES *SOSNOWSKYI*' COW-PARSNIP (*Heracleum sosnowskyi* manden)

*Summary:* *Heracleum sosnowskyi* Manden is an invasive species of synanthropic ecotopes of Southern Karelia. Under the republic conditions it preserves classic “aggressor arsenal”: high seed production (3.6 thousand seeds per one generative shoot), vigorous herbage (4 generative shoots about two meter high per square meter) and explerent (forming mono-dominant brushes).

*Key words:* Invasive species, inflorescence, compound umbel, seed, fruit, seed production ..... 23

*Dzyubuk I. M., Ryzhkov L. P.*

#### DYNAMICS OF ICHTHYO-FAUNA CONDITION OF LAKE ONEGO IN XX CENTURY

*Summary:* The article estimates the ichthyo-fauna dynamic condition of Lake Onego in the XX century. The list of the species, subspecies and the forms of fish and fish-shaped in Onego lake is presented. The changes of industrial fish-take based on official data and also on the expert score approach (offered by L. A. Kudersky) are found. The results have shown some deterioration of the fish community condition at the end of XX century, in spite of applied efforts on maintenance fish stock, regulation of trade catch and protective actions. However, the current ichthyo-fauna condition is comparatively successful.

*Key words:* Lake Onego, ichthyofauna, species diversity, dynamics, fish-catch, peer review, score, current state of ichthyo-fauna ..... 26



*Hokhlova T. Y., Yakovleva M. V., Artemiev A. V.*

### BIRDS OF THE KENOZERO NATIONAL PARK (non-passerine)

*Summary:* The data collected on the territory of the Kenozero National Park (Archangelsk region) in 1995–2003 are generalized. The character of stay, number, and terms of the phenology phenomena for 108 non passerine birds' species is presented. The detailed data on nesting of rare and not numerous species are summarized. The special attention is given to species found on the borderlines of their natural habitat.

*Key words:* Avi-fauna, breeding area, border of distribution (area bordering), rare birds, the Kenozero National Park, the Archangelsk region ..... 32

## GEOLOGY

*Kondrashova N. I.*

### CRUST-MANTLE DERIVED MAGMATISM OF THE YALONVARA STRUCTURE (Baltic shield)

*Summary:* The data on geochemistry of volcanites and granites from the Yalonvara geological structure are presented. The fact that only granites of the first phase of magmatism are probably sanukitoids is proved. The composition of the second and third phases of granites can be explained as a result of intracrustal reworking.

*Key words:* Yalonvara geological structure, granites, sanukitoides, mantle-crust interplay ..... 48

*Medvedev P. V.*

### PETRIFIED OIL, ORGANIC MATTER AND FOSSILS IN THE PALAEOPROTEROSOIC ONEGO SEDIMENTARY BASIN

*Summary:* The data on bioproductivity in the Palaeoproterozoic Onego sedimentary basin are presented. Microorganisms are suggested as the main source for organic carbon in the sediments.

*Key words:* Organic matter, shungite, fossils, Palaeoproterozoic, Onego basin, Fennoscandinavian Shield ..... 54

## MEDICINE

*Meigal A. Yu., Lupandin Yu. V.*

### “THERMOREGULATORY COMPONENT” OF MOTOR DEFICITS IN PARKINSON'S DISEASE

*Summary:* This article reviews the neurophysiological mechanisms, which are responsible for motor disorders in Parkinson's disease (PD) patients. It has been proposed that classic motor deficits (tremor, rigidity and akinesia) may originate from activation of basic spinal motor programs and are modulated by various sensory signals, including the thermal ones. The effect of cooling and heating on muscular performance, tremor and rigidity in the PD patients is also reviewed.

*Key words:* Parkinsonism, muscle tone, tremor, posture, motor deficit, motor unit, spinal cord, thermoregulation ..... 61

*Ioffe Y. G., Marusenko I. M.*

### MODERN CONDITION AND PROBLEMS OF CREATION OF THE RUSSIAN NATIONAL REGISTER OF UNRELATED HAEMATOPOIETIC STEM CELLS DONORS

*Summary:* The problem of selection of the compatible donor for performance an allogeneic hematopoietic stem cell transplantation and creation of registers of potential donors is discussed. The situation on creation of registers as in our country, and foreign countries is analyzed, the data on activity of the Karelian register are given. The problem of cooperation of Russian transplantation clinics with domestic registers and ways of its decision is also discussed.

*Key words:* Allogeneic hematopoietic stem cell transplantation, hematopoietic stem cell donor, phenotype, register ..... 69

## AGRICULTURE AND FORESTRY

*Bolgov A. E., Karmanova E. P., Muravja L. N., Makarova V. E., Shterkele S. G., Grishina N. V.*

### MASTITIS RESISTANCE OF DAIRY COWS

*Summary:* More than 28 thousand cows with regard to the frequency of mastitis were investigated. The following factors such as the influence of investigation year, age and level of productivity of the cows, the season of the year, qualification of the personnel, udder properties and hereditary factors on mastitis disease are submitted. The necessity and opportunity of selection of dairy cattle on increase resistance to mastitis simultaneously with selection for milk productivity is proved.

*Key words:* Mastitis, heredity, genetic resistance, selection, cattle ..... 73

## PHYSICS

*Luizova L. A., Khakhaev A. D.*

### NOT DISTURBING METHODS OF LOCAL PLASMA SPECTROSCOPY

*Summary:* For determination of inhomogeneous plasma local parameters, such as ground state and excited atom and electron densities, atomic and electronic temperatures, the great array of experimental data has to be collected and

processed by rational algorithms which allows to decrease the noise influence to results. In this paper some methods of data acquisition in spatial resolved plasma spectroscopy which were developed in Petrozavodsk State University are described.

*Key words:* Atoms, inhomogeneous plasma diagnostics, methods of data acquisition, spectroscopy, electrons ..... 82

## ENGINEERING

*Babkin V. A.*

### VELOCITY PROFILES AND HEAT EXCHANGE IN TURBULENT FLOW OF AN INCOMPRESSIBLE FLUID IN A SMOOTH LARGE-DIAMETER PIPE

*Summary:* A model of vortex anisotropic turbulence is applied to find velocity and temperature fields in steady turbulent flow of an incompressible fluid in a straight pipe. The flow region is divided into a wall layer and a flow core. In the wall layer the turbulent flow is considered as a flow of oriented fluid which local anisotropy is set with so called director (a guiding vector of vertical type). Turbulent viscosity and heat conductivity in the flow core are considered to be constants. The heat exchange problem is solved at constant temperature of a wall by the Galerkin's method.

*Key words:* Vertical structures, anisotropic turbulence, director, turbulent viscosity, turbulent heat conductivity ..... 91

*Belyayev S. V., Karpova Zh. S.*

### PROSPECTS OF ETHANOL PRODUCTION FROM CELLULOSE BIOMASS

*Summary:* Short and long term prospects of ethanol production from cellulose biomass have been evaluated. State of the art technology and technology under current development was reviewed. Development of more efficient pretreatment technology, integration of several conversions into fewer reactors, and increasing ethanol production capacity may decrease specific investments for ethanol producing plants.

*Key words:* Bio-fuel, ethanol, cellulose biomass ..... 98

*Simonova I. V., Vasilyev S. B.*

### PULPWOOD AND CHIPPER DISK INTERACTION PROCESS THEORETICAL RESEARCH

*Summary:* The process of pulpwood and chipper disk interaction is considered. The reasons for poor quality of produced chips and worsening of its fractional structure are revealed. The impact of the shape of working disk surface and the shape of the disk rear edge on the quality of produced chips for different types of chippers is founded.

*Key words:* Chips, disk chipper, working surface profile ..... 102

SCIENTIFIC INFORMATION ..... 107

## JUBILATIONS

Jubilation of N. S. Ruzanova ..... 108

To the 80<sup>th</sup> birthday anniversary of L. P. Rizhkov ..... 109

To the 70<sup>th</sup> birthday anniversary of A. P. Tsarev ..... 110

INFO FOR THE AUTHORS ..... 112