

---

Министерство образования и науки  
Российской Федерации

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

№ 6 (119). Сентябрь, 2011

---

**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. К. Зильбер*, доктор медицинских наук, профессор

*Э. В. Ивантер*, доктор биологических наук, профессор,

член-корреспондент РАН

Ответственный секретарь журнала

*Н. В. Ровенко*, кандидат филологических наук

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

Статьи журнала рецензируются.

Адрес редакции журнала  
185910, Республика Карелия,  
г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 272.

Тел. (8142) 76-97-11

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

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

---

Редакционный совет

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

Редакционная коллегия серии  
«Естественные и технические науки»

- |  |   |
|--|---|
| <b>А. Е. БОЛГОВ</b><br>доктор сельскохозяйственных наук,<br>профессор (Петрозаводск)                     | <b>Е. И. РАТЬКОВА</b><br>ответственный секретарь серии (Петрозаводск)                   |
| <b>В. В. ВАПИРОВ</b><br>доктор химических наук, профессор (Петрозаводск)                                 | <b>А. А. РОГОВ</b><br>доктор технических наук, профессор (Петрозаводск)                 |
| <b>Е. Ф. МАРКОВСКАЯ</b><br>доктор биологических наук, профессор (Петрозаводск)                           | <b>В. И. СЫСУН</b><br>доктор физико-математических наук,<br>профессор (Петрозаводск)    |
| <b>Н. Н. НЕМОВА</b><br>доктор биологических наук,<br>профессор, член-корреспондент<br>РАН (Петрозаводск) | <b>В. С. СЮНЁВ</b><br>доктор технических наук,<br>профессор (Петрозаводск)              |
| <b>В. И. ПАТЯКИН</b><br>доктор технических наук, профессор (Санкт-Петербург)                             | <b>В. В. ЩИЩОВ</b><br>доктор геолого-минералогических наук,<br>профессор (Петрозаводск) |

---

Ministry of Education and Science  
of the Russian Federation

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

№ 6 (119). September, 2011

---

**Natural & Engineering Sciences**

---

Chief Editor

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

Chief Deputy Editor

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

*Elmira K. Zilber*, Doctor of Medical Sciences, Professor

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

Executive Secretary

*Nadezhda V. Rovenko*, Candidate of Philological Sciences

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

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

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

---

Editorial Council

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

Editorial Board of the Series  
“Natural & Engineering Sciences”

- A. BOLGOV**  
Doctor of Agricultural Sciences,  
Professor (Petrozavodsk)
- V. VAPIROV**  
Doctor of Chemistry, Professor (Petrozavodsk)
- E. MARKOVSKAYA**  
Doctor of Biological Sciences, Professor (Petrozavodsk)
- N. NEMOVA**  
Doctor of Biological Sciences,  
the RAS Corresponding Member,  
Professor (Petrozavodsk)
- V. PATYAKIN**  
Doctor of Technical Sciences, Professor (St. Petersburg)
- E. RAT'KOVA**  
Series Executive Secretary (Petrozavodsk)
- A. ROGOV**  
Doctor of Technical Sciences, Professor (Petrozavodsk)
- V. SISUN**  
Doctor of Physical-Mathematical Sciences,  
Professor (Petrozavodsk)
- V. SYUNEV**  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor (Petrozavodsk)
- V. SCHIPTSOV**  
Doctor of Geological-Mineralogical Sciences,  
Professor (Petrozavodsk)

## СОДЕРЖАНИЕ

## БИОЛОГИЯ

- Андреев В. П., Соболев П. С., Зайцев Д. О., Галибина Н. А.,  
Зыкина Н. С., Плясунова Л. Ю., Романова М. И.  
Взаимодействие цинк-тетрафенилпор-  
фина, бромистого пропаргила и перок-  
сидазы хрена с анилинами . . . . . 7
- Барышев И. А., Кухарев В. И.  
Влияние проточного озера на структуру  
зообентоса в реке с быстрым течением  
(на примере р. Лижма, бассейн Онеж-  
ского озера). . . . . 16
- Ерохина И. С., Елькина Н. А., Марковская Е. Ф.  
Палиноиндикация природной среды  
г. Костомукши. . . . . 20
- Мионов В. Л., Кузнецов О. Л.  
Травяные ассоциации приозерных бо-  
лот Южной Карелии . . . . . 24
- Рыжков Л. П., Артемьева Н. В., Канская М. А.  
Токсичность хрома трехвалентного для  
*Daphnia magna* Straus . . . . . 28
- Нужнова О. К.  
Особенности роста брюквенницы *Pieris  
pari* (Lepidoptera, Pieridae) в условиях  
неморальной зоны России. . . . . 32

## МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

- Аббакумова Л. Н., Варламова Т. В., Кузнецова Л. В.  
Недифференцированная дисплазия со-  
единительной ткани у детей с сахарным  
диабетом 1-го типа (проспективное на-  
блюдение) . . . . . 37
- Белюсова Г. П., Пашкова И. Г., Колупаева Т. А.,  
Кудряшова С. А.  
Характеристика компонентного состава  
тела у студенток с алекситимическим  
радикалом в условиях Севера. . . . . 41
- Гайдин И. В., Баранова Ю. П., Виноградова И. А.  
Влияние продолжительности светового  
дня в условиях Карелии на показатели  
эстральной функции у самок крыс. . . . . 45
- Ившин А. А., Гуменюк Е. Г., Шифман Е. М.,  
Яковлева Е. Н.  
Roll-over тест в диагностике тяжелой  
преэклампсии . . . . . 50
- Миронова Ж. А.  
Аллельные варианты R130Q гена ин-  
терлейкина 13, C590T гена интерлей-  
кина 4, C3435T гена множественной  
лекарственной устойчивости – маркеры  
развития риска и степени тяжести брон-  
хиальной астмы . . . . . 54

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Бурлаков П. С.  
Отражение тектонических структур  
Онежского грабена в ландшафтах Северо-  
родвинской низменности . . . . . 58

## СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

- Мошников С. А., Крутов В. И.  
О состоянии лесов заповедника «Пасвик» . . 61
- Раевский Б. В.  
Ход роста географических культур со-  
сны обыкновенной в Карелии. . . . . 65

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Афоничев Д. Н., Любавский Д. С., Белозоров В. В.  
Изменение расстояния между кониками  
лесовозного подвижного состава на по-  
вороте . . . . . 70
- Бабкин В. А.  
Теплообмен при турбулентном течении  
несжимаемой жидкости в плоском ка-  
нале с постоянной температурой стенок . . . 72
- Васильев А. С., Еришов А. В.  
Особенности патентного поиска в об-  
ласти создания транспортно-упако-  
вочного комплекта для отработавшего  
ядерного топлива . . . . . 78
- Аюкаев Р. И., Графова Е. О.  
Об особенностях водоснабжения и во-  
доотведения баз отдыха загородного  
размещения (на примере Республики  
Карелии) . . . . . 81
- Шлей М. Д., Борисов А. Ю.  
Разработка математической модели для  
расчета продолжительности инсоляции  
построек и ее компьютерная реализация . . 87

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Пойколайнен В. В., Сиговцев Г. С.  
Детализированная модель динамики  
структурированной популяции. . . . . 91
- Караваев А. М.  
Подсчет предгамильтоновых циклов  
на семействах решеточных графов. . . . . 97
- Гоголев А. Е., [Хахаев А. Д.], Штыков А. С.  
Эффекты модуляции тока в комплекс-  
ной плазме тлеющего разряда с упоря-  
доченными структурами . . . . . 103
- Данилов С. В., Фофанов А. Д.  
Построение моделей однослойных уг-  
леродных нанотрубок и расчет коорди-  
нат атомов в них. . . . . 109

Всероссийская школа-семинар для молодых ученых  
России по теме «Проблемы и приложения электрораз-  
рядной обработки в индустрии наносистем и наномате-  
риалов»

- Усов А. Ф.  
Опыт разработки техники и технологии  
электроимпульсного разрушения мате-  
риалов . . . . . 115

## Юбилей

- К 60-летию И. Е. Бахлаева . . . . . 121
- Contents . . . . . 122

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

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

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

Учредитель: ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет»

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

Подписано в печать 19.09.2011. Формат 60x90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
10 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. (1-й завод – 155 экз.) Изд. №190.

Индекс 66093. Цена свободная.

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

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

**ВЛАДИМИР ПЕТРОВИЧ АНДРЕЕВ**

доктор химических наук, профессор кафедры молекулярной биологии, биологической и органической химии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*andreev@psu.karelia.ru*

**ПАВЕЛ СЕРГЕЕВИЧ СОБОЛЕВ**

аспирант кафедры молекулярной биологии, биологической и органической химии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*andreev@psu.karelia.ru*

**ДМИТРИЙ ОЛЕГОВИЧ ЗАЙЦЕВ**

кандидат химических наук, доцент кафедры химии, Карельская государственная педагогическая академия  
*dzaicev78@mail.ru*

**НАТАЛЬЯ АЛЕКСЕЕВНА ГАЛИБИНА**

кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории физиологии и цитологии древесных растений Института леса, Карельский научный центр РАН  
*ngalibina@sampo.ru*

**НАТАЛЬЯ СЕРГЕЕВНА ЗЫКИНА**

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

**ЛЮБОВЬ ЮРЬЕВНА ПЛЯСУНОВА**

аспирант лаборатории физиологии и биохимии растений Института леса, Карельский научный центр РАН  
*lubov-kosta@yandex.ru*

**МАРИНА ИГОРЕВНА РОМАНОВА**

студентка 5-го курса кафедры молекулярной биологии, биологической и органической химии эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*andreev@psu.karelia.ru*

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЦИНК-ТЕТРАФЕНИЛПОРФИНА, БРОМИСТОГО ПРОПАРГИЛА И ПЕРОКСИДАЗЫ ХРЕНА С АНИЛИНАМИ**

В настоящей работе показано, что между кинетическими параметрами процесса координации Zn-тетрафенилпорфина в хлороформе (константы устойчивости) и реакций нуклеофильного замещения как в водных, так и в органических растворителях с участием анилинов, а также окисления анилинов пероксидазой хрена в водных средах (константы скоростей) выполняются линейные корреляции. Описаны реакции ферментативного взаимодействия стирильных производных N-оксидов пиридинов и хинолинов с пероксидазой хрена.

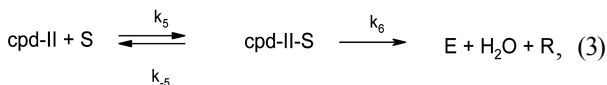
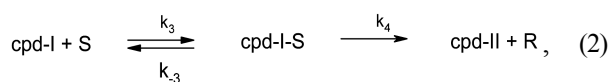
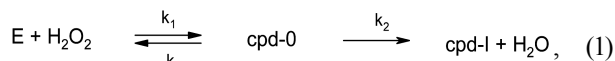
Ключевые слова: порфирины, координация, нуклеофильное замещение, пероксидаза хрена, гетероароматические N-оксиды

В конце XIX – начале XX века работы одного из основателей российской биохимии академика А. Н. Баха (в частности, формулировка и экспериментальное доказательство совместно с Р. Шодой перекисной теории биологического окисления) получили всемирное признание. В 1903 году ими были выделены частично очищенные препараты пероксидазы из корней хрена, содержащие две активные фракции. Первая фракция получила название оксигеназы, а вторая – пероксидазы [8]. Гомогенный же препарат был получен несколько десятилетий спустя Вильшаттером и Теореллом [9].

Различные схемы протекания пероксидазной реакции предполагают взаимодействие прото-

нов субстрата с дистальным остатком Arg, присутствующим во всех пероксидазах, последовательности которых определены к настоящему времени. Однако проблема субстратной специфичности классических пероксидаз растений до сих пор не решена. Каждый фермент имеет свой собственный профиль субстратной специфичности, и пока, к сожалению, нельзя заранее предсказать, какова будет его активность по отношению к выбранному донору электронов [9].

В настоящее время для описания взаимодействия пероксидазы хрена (HRPC) с субстратами, подобными фенолам и анилинам, широко используется механизм, предложенный Родригес-Лопес [28]:



где cpd-0 – комплекс HRPC-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; S – восстанавливающий субстрат; cpd-I-S – комплекс HRPC-S; cpd-II-S – комплекс HRPC-II-S; R – генерируемый свободный радикал.

Ввиду того что способность к окислению анилинов и фенолов должна быть напрямую связана с электронодонорными и акцепторными свойствами заместителей в ароматическом кольце, ряд авторов для количественного описания реакционной способности пероксидазы хрена и ее окисленных форм по отношению к этим субстратам использовали уравнение Гаммета и его модификации [10]:

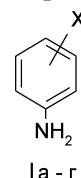
$$\lg(k_x/k_H) = \rho\sigma,$$

где  $k_x$  и  $k_H$  обозначают константы скоростей реакции замещенного и незамещенного соединений соответственно,  $\sigma$  – определяемая природой и положением заместителя в бензольном кольце константа, характеризующая его способность изменять электронную плотность,  $\rho$  – параметр, отражающий чувствительность процесса к смене заместителя.

В случае окисления фенолов и анилинов посредством cpd-I и cpd-II обнаружены, с одной стороны, линейные зависимости между логарифмами констант скорости этой реакции, с другой – с  $\sigma$ -значениями Гаммета заместителей в бензольном кольце [22], [25], а также потенциалами ионизации высшей занятой молекулярной орбитали [16], [29] некоторых фенолов и анилинов, причем скорость окисления фенолов посредством cpd-II является на 1–3 порядка более высокой, чем для анилинов с близкими потенциалами ионизации [16], [29], [30]. Л. Фенолл и соавторы [23] проанализировали механизм взаимодействия этих субстратов с cpd-II, включающий перенос электрона (окисление) субстрата и его дальнейшее депротонирование. Авторы делают вывод, что скорость реакции главным образом контролируется потенциалом полуволны электрохимического окисления ( $E_{1/2}$ ) субстрата в пределах одного класса соединений, но субстраты различных классов с близкими  $E_{1/2}$  могут окисляться с очень сильно различающимися скоростями (как, например, 4-метилфенол и 4-метиланилин, имеющие одно и то же значение  $E_{1/2}$  – 0,87 вольт). Тот же самый эффект наблюдается при окислении серии фенолов посредством cpd-I или cpd-II [21], [24]. Следует отметить, что константы скорости реакции анилинов с соединением II пероксидазы примерно на порядок ниже, чем для реакции с соединением I.

Нами обнаружено, что, как и в случае гетероароматических N-оксидов, а также 3- и 4-замещенных пиридинов [1], [3], [4] (при отсутствии стерических факторов), в электронных спектрах поглощения (ЭСП) смещения максимумов полос ( $\Delta\lambda$ ) Zn-ТФП в хлороформе при взаимодействии с анилинами (Ia-г) линейно коррелируют с логарифмами констант устойчивости (K) комплексов, с  $pK_a$  лигандов в воде и  $\sigma$ -константами заместителей в бензольном кольце (табл. 1).

Мы полагаем, что полученные нами константы устойчивости анилинов с Zn-ТФП относятся к молекулярным комплексам  $\pi$ ,  $\nu$ -типа состава 1:1 с донорно-акцепторной связью N – Zn.



X = H (а); 4-Me (б); 4-OMe (в); 3-Me (г);

В частности, линейная корреляция между  $pK_a$  в воде и  $\lg K$  в хлороформе (табл. 1) подтверждает, что протонирование и координация лигандов (Ia-г) с металлопорфирином осуществляется с участием одного и того же центра – атома азота аминогруппы. На рис. 1 представлены данные рентгеноструктурного анализа (РСА) относительно структуры продуктов взаимодействия 2-хлор- и 3-нитроанилина с Zn-ТФП состава 1:1.

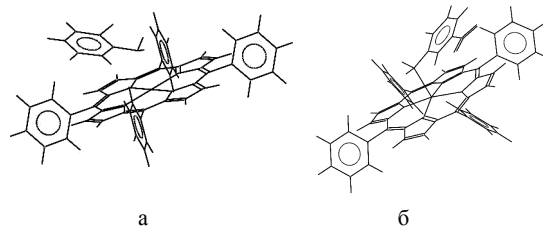


Рис. 1. Строение комплексов Zn-ТФП состава 1:1 с 3-нитроанилином (HAMLA1) (а) и с 2-Cl-анилином (JIVNIL) (б) согласно данным РСА (аббревиатура в скобках соответствует ссылке (CSD refcode), используемой в Cambridge Structural Database [20])

Таблица 1

Константы устойчивости (K) молекулярных комплексов Zn-ТФП с анилинами в хлороформе при 25 °С, смещение максимума полосы поглощения II ( $\Delta\lambda_{II}$ ) в спектре Zn-ТФП при комплексообразовании, константы скорости (k) реакции окисления анилинов соединением II пероксидазы хрена (схема, уравнение (3)) в фосфатном буфере, pH 7,0 [29],  $\sigma^-$  и  $\sigma^+$ -константы Гаммета и Брауна и  $pK_a$  анилинов в воде при 25 °С [16]

№	Лиганд	K л/моль	k л/моль× сек.	$\sigma^-$	$\sigma^+$	$pK_a$ 25 °С	$\Delta\lambda_{II}$ нм
1	4-метоксианилин	343 ± 3	6670000	-0,268	-0,778	5,34	15,4
2	4-метиланилин	199 ± 2	610000	-0,170	-0,311	5,07	14,8
3	анилин	141 ± 2	85900	0	0	4,60	13,9
4	3-метиланилин	174 ± 3	179000	-0,069	-0,046	4,72	14,5



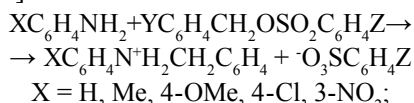
$$\begin{aligned} \lg K &= -1,35\sigma + 4,82 \quad r = 0,960 & \lg k &= -6,92\sigma + 4,82 \quad r = 0,980 \\ \lg K &= -0,45\sigma + 2,18 \quad r = 0,997 & \lg k &= 2,31\sigma + 5,04 \quad r = 0,994 \\ \Delta\lambda_{II} &= 3,66 \lg K + 6,21 \quad r = 0,966 & \lg k &= -1,28 \Delta\lambda_{II} - 13,05 \quad r = 0,965 \\ & & \lg k &= -4,99 \lg K - 5,80 \quad r = 0,994 \end{aligned}$$

Нами обнаружено, что, в отличие от пиридинов и гетероароматических N-оксидов [1], [4], поведение анилинов при координации с Zn-ТФП значительно лучше описывается с использованием  $\sigma^+$ -констант Брауна заместителей (табл. 1,  $r = 0,997$ ), а не  $\sigma$ -констант Гаммета ( $r = 0,960$ ). В монографии А. С. Днепровского указывается, «что необходимость применения  $\sigma^+$ -констант обусловлена наличием именно свободной орбитали на реакционном центре, а не положительного заряда» [10]. Подчеркнем, что в Zn-ТФП остаточный положительный заряд на атоме цинка слишком мал для того, чтобы сильно поляризовать молекулы анилинов за счет кулоновского взаимодействия.

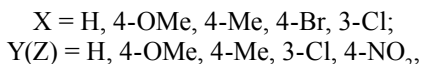
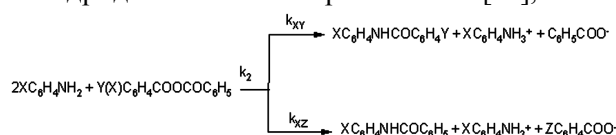
Между  $\Delta\lambda_{II}$  и  $\lg K$  также наблюдается хорошая линейная зависимость (табл. 1,  $r = 0,966$ ).

Ввиду подобия строения комплексов Zn-ТФП с лигандами и переходных состояний в реакциях  $S_N$  [5] с последними в роли нуклеофилов мы попытались найти количественные соотношения между физическими параметрами, характеризующими эти процессы.

Оказалось, что и константы скорости реакций нуклеофильного замещения  $k$  с анилинами в смесях метанол-ацетонитрил (50–100 %) при 35 °C [27]



и константы  $k_2$ ,  $k_{XY}$ ,  $k_{XZ}$  аминолита бензойных ангидридов в метаноле при 25–45 °C [26],



и константы скорости реакции транс-3-нитрофенил- $\beta$ -хлорвинилкетона с анилинами ( $X = 4-NH_2, 4-MeO, 4-Me, 4-Br, 3-Cl, 3-NO_2$ ) в изопропиловом спирте при 25 °C [12] также линейно коррелируют ( $r = 0,97-0,99$ ) с константами комплексообразования анилинов с Zn-ТФП в хлороформе при 25 °C и смещениями максимумов полос поглощения ( $\Delta\lambda$ ) МП.

Таким образом, между кинетическими параметрами комплексообразования Zn-ТФП и некоторых реакций нуклеофильного замещения (константы устойчивости комплексов ( $K$ ), величины смещения максимумов полос поглощения МП ( $\Delta\lambda$ ), основность лиганда / нуклеофила / субстрата ( $pK_a$ ), константы скоростей реакций,  $\sigma$ -

и  $\sigma^+$ -константы заместителей в бензольном кольце) с участием анилинов существуют линейные зависимости.

Мы решили проверить, будут ли выполняться подобные корреляции и с ферментативными процессами на примере взаимодействия анилинов с пероксидазой хрена, содержащей гем в качестве протетической группы. Оказалось, что для стадии взаимодействия соединения II пероксидазы хрена ( $k$  в табл. 1; схема, уравнение (3); [29]) с анилинами, содержащими заместители в положении 3 и 4 бензольного кольца, наблюдаются линейные зависимости между  $\lg K$ ,  $\lg k$ ,  $pK_a$ ,  $\sigma^+$  и  $\Delta\lambda$  (рис. 2 а, б), причем скорость этой ферментативной реакции, как и координация Zn-ТФП, лучше описывается с использованием  $\sigma^+$ -констант.

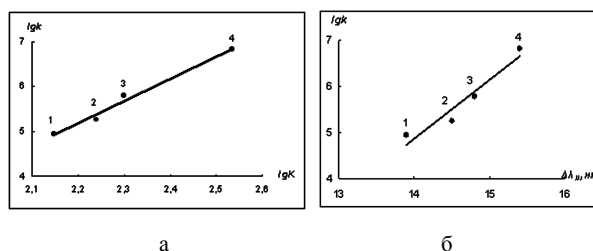


Рис. 2. Зависимость  $\lg k$  реакции окисления анилинов соединением II пероксидазы хрена от  $\lg K$  (а,  $r = 0,994$ ) и  $\Delta\lambda_{II}$  (б,  $r = 0,965$ ) процесса координации Zn-ТФП с анилинами; заместители: (1) 4-H; (2) 3-Me; (3) 4-CH<sub>3</sub>; (4) 4-OSCH<sub>3</sub>

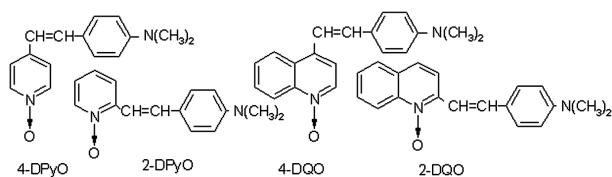
Следовательно, на основании численных значений  $K$  и  $\Delta\lambda$  (в соответствии с введенной нами шкалой нуклеофильности / основности [2]) для процесса координации Zn-ТФП с различными типами лигандов (координационная химия) можно предсказывать скорость как реакций нуклеофильного замещения (органическая химия), так и ферментативных реакций (биологическая химия) в различных органических и водных растворах, и наоборот.

В дальнейшем мы предполагаем детально разобраться в границах применимости предложенной нами новой шкалы.

Особое положение среди анилинов занимают диметиламиностирильные производные гетероароматических N-оксидов, которые в органических растворителях образуют молекулярные комплексы с  $\nu$ -акцепторами (Zn-ТФП,  $BF_3$ ,  $ZnCl_2$ ,  $H^+$ ) состава 1:1 с участием кислорода группы  $N \rightarrow O$ , но в воде первое протонирование этих соединений осуществляется по аминогруппе. Комплексы же состава 1:2 (взаимодействие с  $N \rightarrow O$  и  $N(CH_3)_2$  группами), образующиеся при избытке кислоты Льюиса, неустойчивы и легко теряют вторую молекулу акцептора [1], [2], [4], [5].

Ранее в ПетрГУ А. Г. Анисимовым было обнаружено, что пероксидаза хрена окисляет N-оксид 4-(4-диметиламиностирил) пиридина (4-DRyO, обладает апоптогенной активностью), но механизм и продукты реакции им не были изучены.

Мы решили исследовать данный ферментативный процесс, для чего были синтезированы следующие стирильные производные N-оксидов пиридина и хинолина:



Скорость и направление их превращения под действием пероксидазы хрена контролировали методом электронной спектроскопии. На рис. 3 приведены электронные спектры поглощения (ЭСП) пероксидазы хрена и стирильных производных гетероароматических N-оксидов (4-DPyO, 2-DPyO, 2-DQO и 4-DQO).

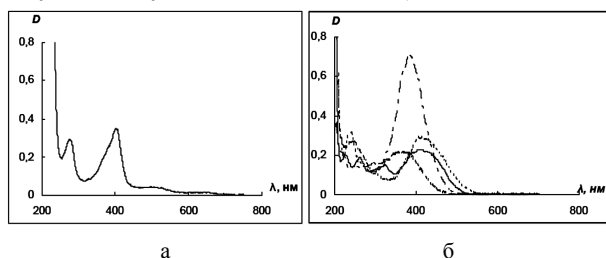


Рис. 3. Электронные спектры в фосфатном буферном растворе pH 7,3–7,4: а) пероксидазы хрена ( $C = 0,7$  мг/мл;  $RZ = D_{400}/D_{280} = 1,4$ ); б) 4-DPyO (----), 2-DPyO (---), 2-DQO (-) и 4-DQO (.....) ( $C = 1 \times 10^{-5}$  моль/л, для 4-DPyO  $C = 2 \times 10^{-5}$  моль/л)

В ЭСП во время взаимодействия 4-DPyO с пероксидазой хрена в присутствии перекиси водорода в фосфатном буфере (рис. 4а) оптическая плотность уменьшается при 384 нм и увеличивается при 263 нм, и в течение 1 ч. субстрат практически полностью превращается в продукт(ы) реакции. Однако затем интенсивность поглощения света при 263 нм начинает медленно уменьшаться (10 % за первую неделю), указывая на дальнейшую трансформацию субстрата.

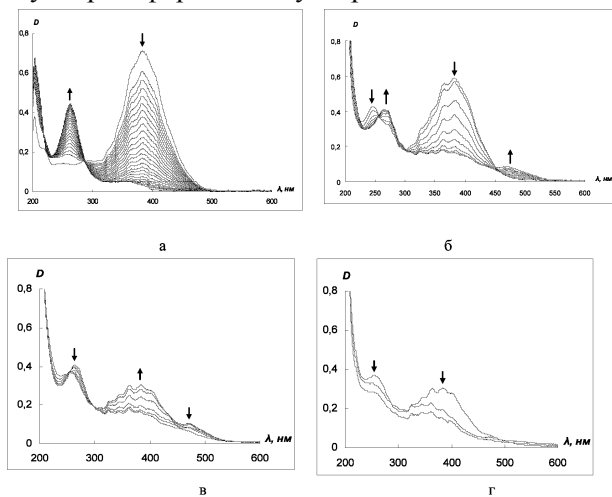


Рис. 4. Изменение ЭСП реакционной смеси, содержащей пероксидазу хрена, перекись водорода и 4-DPyO (в течение часа, (а)) или 2-DPyO (5–30 мин. (б), 30–60 мин. (в, г))

В отсутствие фермента происходят очень похожие, но значительно более медленные изменения ЭСП (за сутки интенсивность поглощения субстрата уменьшается на 70 %), то есть в данном случае пероксидаза лишь ускоряет процесс. Интересно, что фермент с 4-DPyO взаимодействует и без добавления перекиси водорода, но реакция протекает еще медленнее, вероятно, за счет проявления пероксидазой хрена оксидазной активности и/или присутствия  $H_2O_2$  в растворе в следовых количествах. Последнее утверждение не лишено смысла, поскольку субстрат содержится в реакционной среде в очень низкой концентрации ( $10^{-5}$  М).

В случае 2-DPyO (имеет максимумы полос поглощения при 245 и 380 нм) наблюдается несколько иная и более сложная картина. В течение первых 5 мин. происходит увеличение оптической плотности при 380 нм и уменьшение при 245 нм, затем в течение получаса интенсивность этих полос поглощения снижается, но увеличивается оптическая плотность при 263 и 473 нм (рис. 4б). В течение следующих 0,5 ч. интенсивность поглощения света при 263 и 473 нм сначала падает с повторным ее увеличением при 380 нм (рис. 4в), но затем оптическая плотность всех полос поглощения уменьшается (рис. 4г) и ЭСП сглаживается. Мы предполагаем, что в данном случае наряду с химической реакцией в ЭСП регистрируется образование донорно-акцепторных комплексов фермента с различным количеством молекул субстрата, обладающих суммарно большей интенсивностью (но близкими максимумами) полос поглощения, чем исходный стирильный N-оксид.

Подчеркнем, что при взаимодействии 4-DPyO (в течение 1 ч.) и 2-DPyO (в течение 0,5 ч.) с пероксидазой хрена в ЭСП реакционной смеси наблюдаются изобестические точки при 225 и 290 нм для первого и при 250 и 300 нм для второго субстрата. Обычно при комплексообразовании их наличие интерпретируют как равновесие между двумя состояниями (свободным и связанным).

В нашем случае наличие изобестических точек можно отнести к существованию равновесия между стирильным N-оксидом и по крайней мере двумя продуктами реакции с фермент-субстратным комплексом в процессе, который сначала быстро и количественно приводит к образованию соединения А (кинетический контроль), а затем медленно – к соединению (или эквимольной смеси) Б (термодинамический контроль).

При использовании в качестве субстрата 4-DQO изменения в ЭСП похожи на те, что происходят с 4-DPyO (изобестические точки при 270, 310 и 350 нм): в течение 1 ч. исчезают полосы поглощения субстрата (при 236 и 406 нм) и наблюдается появление максимума поглощения около 344 нм (рис. 5а), при этом происходит сме-

щение крайнего слева максимума поглощения в коротковолновую область.

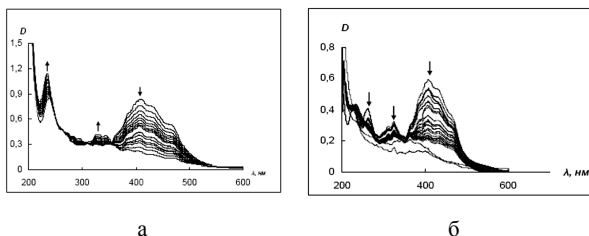


Рис. 5. Изменение ЭСП реакционной смеси, содержащей пероксидазу хрена, перекись водорода и а) 4-DQO или б) 2-DQO в течение 4 суток

Наконец, в случае 2-DQO реакция заканчивается за 1–2 дня (рис. 5б), но протекает несколько иначе, чем с 4-DPyO, 2-DPyO и 4-DQO. В ЭСП реакционной смеси (в течение первых 3 мин. происходит увеличение оптической плотности при 408 и 325 нм, но резкое ее уменьшение при 262 нм) при этом исчезают 4 из 5 полос поглощения, характерных для субстрата, но увеличивается интенсивность полосы при 204 нм. Изобестические точки в ЭСП при взаимодействии данного субстрата с пероксидазой хрена отсутствуют, по-видимому, вследствие того, что продукты типа А и Б образуются с сопоставимыми скоростями и присутствуют в растворе одновременно.

С незамещенными стирильными аналогами (N-оксиды 4-стирилпиридина, 2- и 4-стирилхинолина), а также содержащими метокси- или нитрогруппы (N-оксиды 4-(4-метоксистирил)пиридина, 2-(2,4-диметоксистирил)- и 4-(4-нитростирил)хинолина), согласно данным ЭСП, пероксидаза хрена реагирует очень медленно, либо реакция практически не идет. Отметим, что во всех указанных случаях перекись водорода добавляли только один раз для инициации реакции.

Обычно пероксидазную активность в растительных тканях определяют с помощью метода электронной спектроскопии (в области 400–800 нм) по накоплению окрашенных продуктов окисления орто-дианизидина, орто-фенилендиамина, 3,3',5,5'-тетраметилбензидина и других подобных соединений (используемые концентрации – порядка  $10^{-4}$  моль/л [11]). Мы изучили взаимодействие пероксидаз, выделенных из ксилемы карельской узорчатой березы, на экзогенное соединение 4-DPyO. Оказалось, что, согласно данным ЭСП, направление этой ферментативной реакции носит такой же характер, что и с пероксидазой хрена (рис. 4а), но в условиях эксперимента (50 мМ Hepes, pH 7,5) реакция идет медленнее: через 90 мин. оптическая плотность субстрата при 384 нм уменьшается на 30 % (от 1,3 до 0,9), а продукта реакции при 263 нм достигает 0,5 единицы.

Для сравнения, ферментативная активность пероксидазы в тканях ксилемы была изучена на примере окисления классических субстратов

гваякола (орто-метоксифенола) и бензидина (рис. 6 а, б). Как видно из представленных ЭСП, при окислении бензидина и гваякола требуются очень высокие концентрации субстрата для регистрации продуктов реакции области 400–800. Предложенная нами реакция окисления 4-DPyO является очень удобной для оценки ферментативной активности пероксидаз, поскольку позволяет одновременно оценивать концентрацию как субстрата, так и продукта реакции в экспериментах *in vitro* (рис 4а).

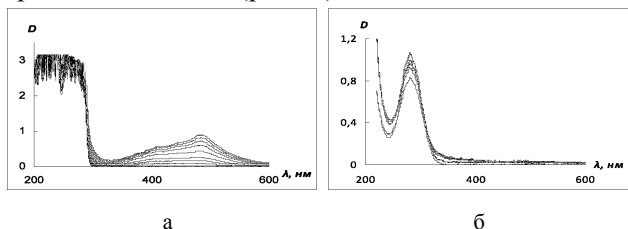
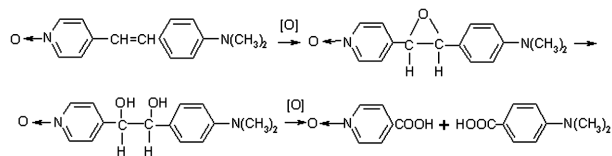


Рис. 6. Изменение ЭСП реакционной смеси, содержащей ферментативный препарат из тканей ксилемы карельской березы, перекись водорода и а) гваякол (21,5 мМ) б) бензидин (33,6 мкМ)

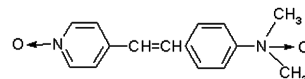
Ввиду того что пероксидазы способны катализировать реакции оксидазного, пероксидазного и оксигеназного окисления субстратов [7], [9], [13], [14], не исключено, что как взаимодействие с исходным субстратом, так и дальнейшая трансформация продуктов превращения стирильного N-оксида обусловлены реализацией всех трех типов активности фермента, причем по мере расходования перекиси водорода роль оксидазной и оксигеназной активности пероксидазы возрастает.

А priori можно предположить два основных направления окисления 4-DPyO (как и других стирильных N-оксидов).

1. По двойной связи стирильного фрагмента с образованием оксирана, гликоля и/или N-оксида изоникотиновой и 4-диметиламинобензойной (4-ДАБК) кислот, причем ДАБК может быть далее окислена до N-оксида 4-диметиламинобензойной кислоты



2. По атому азота диметиламиногруппы а) с образованием стирильного ди-N-оксида



б) или дальнейшим его окислением по двойной связи, как описано выше. Не исключено, что все эти процессы осуществляются параллельно.

Указанное направление реакции не противоречит ЭСП и временам удерживания (ВЭЖХ) предполагаемых продуктов превращений 4-DPyO

(N-оксида изоникотиновой кислоты и 4-ДАБК), использованных в качестве стандартов. Косвенным его подтверждением служит и то, что неферментативное окисление 4-DPyO перекисью водорода в кислой и щелочной среде дает аналогичные результаты.

С целью разработки метода, позволяющего облегчить количественное выделение продуктов реакции пероксидазы со стирильными производными N-оксидов пиридинов и хинолинов, мы исследовали взаимодействие фермента с 4-DPyO в водно-спиртовых безбуферных растворах (стирильные производные в спирте растворимы гораздо лучше, чем в воде). Оказалось, что в воде и 25 % (по объему) этаноле в результате реакции субстрат исчезает, как и в фосфатном буфере, в течение 1 ч., в 50 % этаноле – в течение суток, а в 75 и 96 % этаноле – за несколько суток расходуется наполовину; при этом, согласно ЭСП (возрастает интенсивность поглощения при 384 нм), с увеличением доли этанола время образования донорно-акцепторных комплексов фермента с молекулами субстрата возрастает от нескольких минут до нескольких часов.

Зная, что высокие концентрации  $H_2O_2$  могут приводить к быстрому разрушению пероксидазы хрена, мы проверили влияние различных концентраций перекиси водорода на устойчивость растворов фермента во времени.

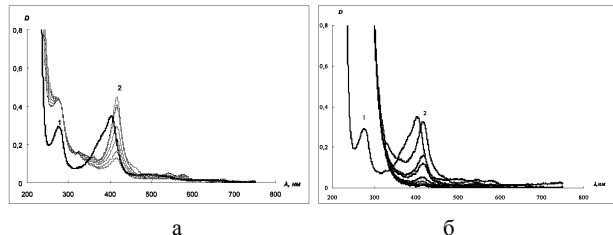


Рис. 7. Изменения ЭСП пероксидазы хрена во времени в зависимости от концентрации перекиси водорода (а – 0,002 %, б – 0,2 %) в течение 3 ч.: 1 – раствор пероксидазы ( $C = 0,7$  мг/мл), 2 – реакционная смесь, содержащая пероксидазу и перекись водорода

Как видно из рис. 7, даже обычно используемые в научных целях низкие концентрации  $H_2O_2$  (0,002 %) достаточно быстро разрушают фермент. Увеличение же концентрации перекиси водорода (0,2 %) резко ускоряет этот процесс (через 3 ч. в ЭСП реакционной смеси практически полностью исчезает полоса поглощения  $306$  нм, обусловленная наличием порфириновой системы). Однако в присутствии N-оксида 4-стирилпиридина – субстрата, способного к связыванию с ферментом, но с которым не происходит химическая реакция (рис. 8), – наблюдается совершенно иная картина. После добавления  $H_2O_2$  к смеси пероксидазы хрена с этим субстратом в ЭСП происходит, как и в предыдущих случаях, батохромный сдвиг полосы поглощения  $402$  нм  $\rightarrow$   $410$  нм. Затем постепенно уменьшается интенсивность поглощения при  $410$  нм, не полно-

стью исчезающая даже через несколько дней, свидетельствуя о том, что N-оксид 4-стирилпиридина (его спектр со временем практически не изменяется) ингибирует процесс разрушения фермента перекисью водорода. Исследование механизма подобной защиты пероксидаз гетероароматическими N-оксидами является предметом нашей дальнейшей работы.

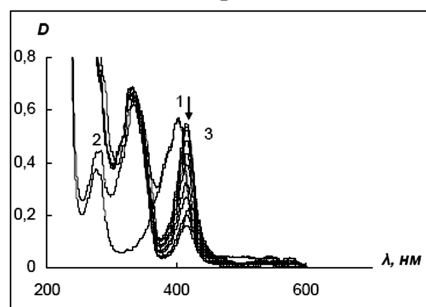


Рис. 8. Изменение ЭСП пероксидазы хрена ( $C = 0,7$  мг/мл) в фосфатном буферном растворе pH 7,3–7,4 в течение 3 ч. в присутствии N-оксида 4-стирилпиридина ( $C = 1,7 \times 10^{-5}$  моль/л) и перекиси водорода ( $C = 0,2$  %): 1 – раствор пероксидазы, 2 – раствор пероксидазы и N-оксида 4-стирилпиридина, 3 – реакционная смесь

В дальнейшем опыты по накоплению продуктов реакции между стирильными N-оксидами и пероксидазой хрена выполняли в 50 % этаноле, время от времени добавляя порциями 0,2 % перекись водорода. Контроль за ходом реакции осуществляли методами ТСХ и ВЭЖХ.

Реакции алкилирования и ацилирования N-оксида 4-(4-диметиламиностирилпиридина) осуществляются с участием атома кислорода N-оксидной группы [1], а реакции с ацетиленовыми галогенидами в литературе не описаны. В продолжение исследования нуклеофильных и основных свойств гетероароматических N-оксидов мы решили проверить, по какому центру (центрам) будет происходить реакция пропаргилирования 4-DPyO 1-бром-2-пропином (бромистым пропаргилом) в ацетонитриле.

Для определения порядка реакции изучаемого процесса по бромистому пропаргилу его концентрацию варьировали ( $C_{4-DPyO} = 2,17 \times 10^{-5}$  моль/л) в диапазоне соотношения концентраций от 1:50 000 до 1:20 000.

Таблица 2

Зависимость наблюдаемой константы скорости реакции ( $k_{набл.}, c^{-1}$ ) пропаргилирования 4-DPyO ( $C = 2,17 \times 10^{-5}$  моль/л) от концентрации бромистого пропаргила

№ п/п	$C(C_3H_5Br),$ моль/л	$k_{набл.}, c^{-1}$	$k_2,$ моль / л · с.
1	1,085	0,000154	0,000142
2	1,63	0,000231	0,000142
3	2,17	0,000292	0,000135
4	3,255	0,000322	
5	4,34	0,000362	

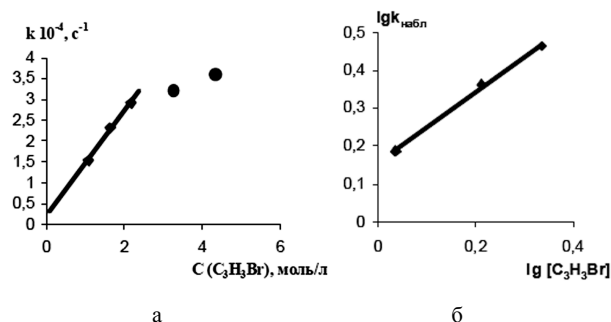
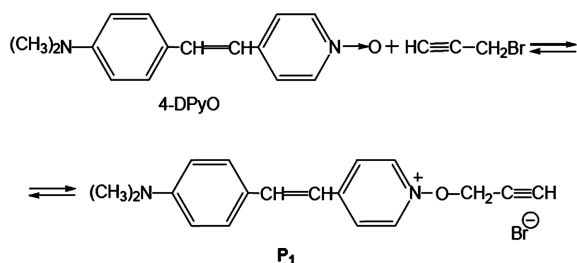


Рис. 9. Зависимость наблюдаемой константы скорости ( $k_{\text{набл}}$ ) реакции пропаргирования 4-DPyO ( $C = 2,17 \times 10^{-5}$  моль/л) от концентрации бромистого пропаргила в обычных (а) и логарифмических (б) координатах

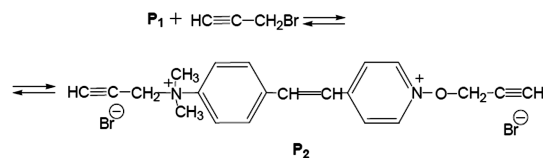
Зависимость наблюдаемой константы скорости реакции нуклеофильного замещения псевдопервого порядка от концентрации бромистого пропаргила (табл. 2, рис. 9а) имеет сложный характер, однако в диапазоне концентраций бромистого пропаргила 1,09–2,17 моль/л она является линейной, что свидетельствует о первом порядке реакции по бромистому пропаргилу. Это также подтверждается близкой к единице ( $0,91 \pm 0,1$ ) величиной тангенса угла наклона прямой в координатах  $\lg k_{\text{набл}} - \lg [C_2H_3Br]$  (рис. 9б). Среднее значение константы скорости второго порядка  $k_2$  из трех значений составляет 0,000140 моль/л · с.

При увеличении соотношения концентраций  $[C_2H_3Br]/[4\text{-DPyO}]$  линейный характер наблюдаемой константы от концентрации бромистого пропаргила не сохраняется, что указывает на изменение механизма реакции.

Анализ формальных кинетических данных позволяет предположить, что реакция осуществляется с участием двух реакционных центров стирильного N-оксида. Сначала происходит взаимодействие бромистого пропаргила с N-оксидной группой 4-DPyO, о чем свидетельствует сильный bathochromный сдвиг дальневолновой полосы поглощения реакционной смеси от 392 до 495 нм.



Затем образующийся продукт  $P_1$  медленно реагирует с избытком пропаргил бромида с участием второго нуклеофильного центра молекулы (атома азота группы  $\text{N}(\text{CH}_3)_2$ ), о чем свидетельствует коротковолновое смещение максимума поглощения дальневолновой полосы поглощения реакционной смеси (495 нм).



Таким образом, в ацетонитриле первым центром пропаргирования 4-DPyO является атом кислорода группы  $\text{N}\rightarrow\text{O}$ , а затем реакция идет по атому азота аминогруппы, что находится в соответствии с литературными данными о последовательности протонирования этих центров в органических растворителях [1], [2]. Ранее в работе [1] нами было показано, что на основании данных электронной спектроскопии можно делать вывод о центре координации 4-DPyO (и других диметиламиностирильных производных пиридинов и хинолинов) с сильными  $\nu$ -акцепторами в различных водных и органических растворителях. В данном случае взаимодействие нуклеофила осуществляется с образованием продукта реакции, в котором электронная плотность в молекуле смещается в сторону тройной связи, что в зависимости от направления реакции должно приводить к соответствующему смещению в ЭСП дальневолновой полосы поглощения 4-DPyO.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Анилин и его производные очищали, как описано в работе [16], стирильные производные N-оксидов пиридинов и хинолинов синтезировали, как описано в работах [2], [6], [15], [16], их физические константы совпали с литературными. Электронные спектры снимали на приборе СФ 2000-02. Константы устойчивости Zn-ТФП с пиридинами в хлороформе определяли, как описано в работе [3].

Активность препарата пероксидазы хрена фирмы «Диа-М» (удельная активность – 100 ед./мг) имела  $RZ = 1,4$  ( $RZ$  – отношение A403/A280, характеризующее процент включения гемина в апо-пероксидазу).

Конечные концентрации веществ в 2 мл пробы (фосфатный буфер, pH 7,2) составляли:  $10^{-5}$  М гетероароматического N-оксида, 0,002 %  $\text{H}_2\text{O}_2$  и 0,03 мкг/мл пероксидазы хрена.

Активность пероксидазы в тканях растений определяют спектрофотометрически (спектрофотометр СФ-2000, Россия). Основными объектами исследования являлись деревья карельской березы повислой (*Betula pendula* var. *carelica*) с узорчатой структурой древесины. Экспериментальные работы проводили в посадках деревьев, произрастающих в одинаковых почвенно-климатических условиях на Агробиологической станции Карельского научного центра РАН вблизи г. Петрозаводска. Отбор материала проводили в середине июня 2010 года. Из стволовой части отбирали ткани ксилемы, куда входили материнские клетки ксилемы и ксилема текуще-

го года. Весь растительный материал сразу замораживали в жидком азоте. Для получения ферментативного препарата ткани ксилемы гомогенизировали при 4 °С в буфере, содержащем 50 мМ Нерес (рН = 7,5), 1 мМ ЭДТА, 1 мМ ЭГТА, 3 мМ DTT, 5 мМ MgCl<sub>2</sub>, 0,5 мМ PMSF. После 20-минутной экстракции гомогенат центрифугировали при 10 000 g в течение 15 мин. (центрифуга К-24, Германия). Осадок трехкратно промывали буфером. Осадок и объединенный супернатант диализовали при 4 °С в течение 18–20 ч. против буфера для гомогенизации, разбавленного в 10 раз. Состав реакционной смеси для определения активности пероксидаз в реакции окисления гваякола был следующий: 50 мМ К, Na – фосфатный буфер (рН = 4,9), 4,8 мМ перекись водорода, 21,5 мМ гваякол. Для бензидина: 50 мМ К, Na – фосфатный буфер (рН = 7,8), 2,5 мМ перекись водорода, 33,6 мкМ бензидина. Ферментативную активность пероксидазы определяли: для бензидина по градуировочной кривой ( $\lambda = 282$  нм) выражали как: израсходовано мкмоль бензидина/г сырой ткани; для гваякола – по скорости образования продукта реакции тетрагваякола (с учетом коэффициента экстинкции  $\epsilon_{470 \text{ нм}} = 0,0266 \text{ мкМ}^{-1}\text{см}^{-1}$ ), выражали как: образовалось тетрагваякола/г сырой ткани.

Качественный анализ, а также подтверждение индивидуальности соединений осуществляли методом ВЭЖХ: хроматограф Laboratorni pristroje Praha; колонки Separon SGX C<sub>18</sub> (3 x 150 мм); подвижная фаза – ацетонитрил; скорость подачи элюента – 0,4 мл/мин.; детектор ультрафиолетовый LCD 2040;  $\lambda = 392$  нм (4-DPyO) или

268 нм (4-НООС-PyO, продукт реакции 4-DPyO с пероксидазой хрена, 4-ДМАБК).

### *Синтез 1-бром-2-пропина (бромистого пропаргила)*

В трехгорлую колбу, снабженную мешалкой, капельной воронкой, обратным холодильником и охлажденную до –5 °С льдом с солью, вносили 36,5 г (0,65 моль) перегнанного пропаргилового спирта и 6 мл пиридина. К этой смеси при перемешивании по каплям прибавляли 61,6 г (0,23 моль) PBr<sub>3</sub> в 2 мл пиридина. Температуру реакционной смеси постепенно в течение 1 ч. доводили до комнатной, и смесь кипятили 1 ч. на водяной бане. Затем обратный холодильник заменяли на нисходящий и отгоняли бромистый пропаргил в приемник на сухой поташ. Через некоторый промежуток времени бромистый пропаргил перегоняли еще раз. Выход – 43,3 г (56 %),  $T_{\text{кип}} = 84$  °С / 760 мм рт. ст.,  $n_D^{20} = 1,4920$  [1].

Контроль за ходом реакции пропаргилирования 4-DPyO в ацетонитриле осуществляли по изменению оптической плотности 4-DPyO (392 нм) и продукта (495 нм).

Значения наблюдаемых констант реакции псевдопервого порядка при исследовании кинетики реакции 4-DPyO с 1-бром-2-пропином рассчитывали по формуле:

$$k_{\text{набл}} = \frac{1}{t} \ln \frac{D_0 - D_{\infty}}{D_t - D_{\infty}}$$

где  $D_0$ ,  $D_t$ ,  $D_{\infty}$  – соответственно оптические плотности растворов в начальный момент времени, в момент времени  $t$  и по окончании реакции.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев В. П. Молекулярные комплексы гетероароматических N-оксидов и ацетиленовых аминов с v-акцепторами как модель исследования нуклеофильности и основности соединений с пространственно доступными реакционными центрами: Дис. ... д-ра хим. наук. Петрозаводск, 2007.
- Андреев В. П., Батоцыренова Е. Г., Рыжаков А. В., Родина Л. Л. Процессы внутримолекулярного переноса заряда в ряду стирильных производных N-оксидов пиридина и хинолина // ХГС. 1998. № 8. С. 1093–1102.
- Андреев В. П., Вапиров В. В., Нижник Я. П., Тунина С. Г., Соболев П. С. Комплексообразование цинк (II)тетрафенилпорфина и реакции нуклеофильного замещения с участием пиридинов и N-оксидов пиридинов // ЖОрХ. 2010. Т. 46. Вып. 10. С. 1556–1563.
- Андреев В. П., Нижник Я. П., Безручко Д. Г., Морозов А. К. Экстраординация Zn-тетрафенилпорфина с N-оксидами ряда пиридина, хинолина и акридина // ЖОХ. 2005. Т. 75. Вып. 8. С. 1379–1387.
- Андреев В. П., Нижник Я. П., Лебедева Н. Ш. Новая шкала основности / нуклеофильности, основывающаяся на параметрах, характеризующих образование аксиальных (n, v-типа) комплексов Zn-ТФП с лигандами (основаниями / нуклеофилами) // ЖОрХ. 2008. Т. 44. № 6. С. 914–922.
- Андреев В. П., Рыжаков А. В., Теканова С. Г. Стирильные производные N-оксида хинолина // ХГС. 1995. № 4. С. 518–521.
- Андреева В. А. Фермент пероксидаза: участие в защитном механизме растений. М.: Наука, 1988. 128 с.
- Бах А. Н. Труды по химии и биохимии. М.: Изд-во АН СССР, 1950. 648 с.
- Газарян Г. Особенности структуры и механизма действия пероксидаз растений // Успехи биологической химии. 2006. Т. 46. С. 303–322.
- Днепровский А. С., Темникова Т. И. Теоретические основы органической химии: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. Л.: Химия, 1991. 560 с.
- Кирейко А. В., Веселова И. А., Шеховцева Т. Н. Механизм реакций пероксидазного окисления о-дианизидина, 3,3',5,5'-тетраметилбензидина и о-фенилендиамин в присутствии додецилсульфата натрия // Биоорганическая химия. 2006. Т. 32. № 1. С. 80–86.
- Литвиненко Л. М., Попов А. Ф., Костенко Л. И., Носовская Т. Д. Влияние структуры транс-арил-β-хлорвинилкетон на скорость реакции с ариламинами // ЖОрХ. 1973. Т. 9. Вып. 3. С. 552–557.
- Николс П. Оксигеназно-пероксидазная теория Баха и Шоуда и ее современные эквиваленты: изменение и постоянство в научном мышлении на примере нашего понимания роли воды, перекиси и кислорода в функционировании редокс-ферментов // Биохимия. 2007. Т. 72. Вып. 10. С. 1278–1288.

14. Рогожин В. В. Пероксидаза как компонент антиоксидантной системы живых организмов. СПб.: ГИОРД, 2004. 240 с.
15. Тицкий Г. Д., Туровская М. К. АС № 1599366. СССР. 1990.
16. Biggs A. I. The heat of ionization of some substituted anilines // *J. Chem. Soc.* 1961. P. 2572–2574.
17. Boulton P. D., Hall F. M. Substituent effects on the thermodynamic functions of proton dissociation of para-substituted anilinium ions // *J. Chem. Soc. (B)*. 1969. P. 259–263.
18. Brewster M. E., Doerge D. R., Huang M. J., Kaminski J. J., Pop E., Bodor N. Application of semiempirical molecular orbital techniques to the study of peroxidase-mediated oxidation of phenols, anilines, sulfides and thiobenzamides // *Tetrahedron*. 1991. Vol. 47. P. 7525–7536.
19. Brink C. v. d. M., Jager P. I. N-oksiede van die metielpiridien. I. Die Daarstelling van Stirielpiridien wet behulp van N-oksialkielpiridinium-Derivate // *Tydskr. Natuurwer.* 1963. Vol. 3. P. 74.
20. Cambridge Structural Database, 2010 [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.ccdc.cam.ac.uk>
21. Candeias L. P., Folkes L. K., Wardman P. Factors controlling the substrate specificity of peroxidases: kinetics and thermodynamics of the reaction of horseradish peroxidase compound I with phenols and indole-3-acetic acids // *Biochemistry*. 1997. Vol. 36. P. 7081–7085.
22. Dunford H. B., Aderian A. J. Hammett  $\rho\sigma$  correlation for reactions of horseradish peroxidase compound II with phenols // *Arch. Biochem. Biophys.* 1986. Vol. 251. P. 536–542.
23. Fenoll L. G., Garcia-Molina F., Gilabert M. A., Varon R., Garcia-Ruiz P. A., Tudela J., Garcia-Canovas F., Rodriguez-Lopez J. N. Interpretation of the reactivity of peroxidase compound II with phenols and anilines using the Marcus equation // *Biol. Chem.* 2005. Vol. 386. P. 351–360.
24. Folkes L. K., Candeias L. P. Interpretation of the reactivity of peroxidase compounds I and II with phenols by the Marcus equation // *FEBS Lett.* 1997. Vol. 421. P. 305–308.
25. Job D., Dunford H. B. Substituent effect on the oxidation of phenols and aromatic amines by horseradish peroxidase compound I // *Eur. J. Biochem.* 1976. Vol. 66. P. 607–614.
26. Lee B. C., Yoon J. H., Lee C. G., Lee I. Kinetics and mechanism of aminolysis of benzoic anhydrides // *J. Phys. Org. Chem.* 1994. Vol. 7. P. 273–279.
27. Lee I., Sohn S. C., Kang C. H., Oh Y. J. Nucleophilic substitution of benzyl benzenesulphonates with anilines in methanol-acetonitrile mixtures. Part 2. Variation in transition-state structure // *Chem. Soc. Perkin. Trans. II*. 1986. № 10. P. 1631–1634.
28. Rodriguez-Lopez J. N., Gilabert M. A., Tudela J., Thorneley R. N. F., Garcia-Canovas F. Reactivity of horseradish peroxidase compound II toward for a two-step mechanism // *Biochem.* 2000. Vol. 39. P. 13201–13209.
29. Sakurada J., Sekiguchi R., Sato K., Hosoya T. Kinetic and molecular orbital studies on the rate of oxidation of monosubstituted phenols and anilines by horseradish peroxidase compound II // *Biochem.* 1990. Vol. 29. P. 4093–4098.
30. Van Haandel M. J. H., Claassens M. M., Van der Hout N., Boersma M. G., Vervoort J., Rietjens I. M. Differential substrate behaviour of phenol and aniline derivatives during conversion by horseradish peroxidase // *Biochim. Biophys. Acta*. 1999. Vol. 1435. P. 22–29.

**ИГОРЬ АЛЕКСАНДРОВИЧ БАРЫШЕВ**

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологии рыб и водных беспозвоночных Института биологии, Карельский научный центр РАН  
baryshev@bio.krc.karelia.ru

**ВЯЧЕСЛАВ ИВАНОВИЧ КУХАРЕВ**

кандидат биологических наук, заместитель директора по научной работе Института водных проблем Севера, Карельский научный центр РАН  
kuharev@nwpi.krc.karelia.ru

## ВЛИЯНИЕ ПРОТОЧНОГО ОЗЕРА НА СТРУКТУРУ ЗООБЕНТОСА В РЕКЕ С БЫСТРЫМ ТЕЧЕНИЕМ (на примере р. Лижма, бассейн Онежского озера)

Ниже проточного озера формируются сообщества речного зообентоса с большой биомассой и высокой долей организмов-фильтраторов, характерные для потамали. По мере удаления от озера происходит закономерная смена структуры зообентоса – снижается биомасса, возрастает доля собирателей и соскребателей, что характерно для сообществ ритралаи.

Ключевые слова: зообентос, проточное озеро, донные сообщества, биомасса

**ВВЕДЕНИЕ**

На территории Фенноскандии водоемы и водотоки образуют протяженные озерно-речные системы с чередованием участков со стоячей и текущей водой. Экосистему внутренних вод (гидробиом) при исследовании традиционно разделяют на речные (реобиом) и озерные (лимнобиом) экосистемы. Это деление вполне оправданно, однако на практике оно приводит к тому, что работы часто проводятся либо только на озерах, либо только на реках. Такая разобщенность исследований вызывает определенные сложности при создании единой концепции функционирования гидробиома.

Известно, что лимнический планктон может в массе поступать в реки, вытекающие из озер [3], [18]. Эта ценная в кормовом отношении органика потребляется организмами бентоса (перифитона), и на подобных участках формируются особые сообщества с большой биомассой и преобладанием фильтрующих форм [13], [17], [19]. Вместе с тем для понимания роли вносимого из озера вещества в функционировании речных экосистем необходимо определить, какое влияние оказывает проточное озеро на процессы континуального изменения речных донных сообществ от истока реки к устью, что явилось целью настоящей работы.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Исследование зообентоса проводили на р. Лижма (бассейн Онежского озера) в период летней межени (конец июля – начало августа) с 1998 по 2007 год по отработанной методике [4]. Кроме этого использованы данные В. В. Хренникова за 1978–1991 годы (лаборатория экологии рыб и водных беспозвоночных Института биологии КарНЦ РАН). Всего задействованы результаты © Барышев И. А., Кухарев В. И., 2011

обработки 49 проб с 9 станций: контрольные участки (ст. 8, 9), участки в истоке из озера и ниже по течению (ст. 1–7) (рис. 1). Летняя межень выбрана для исследования как время наиболее стабильного водного режима.

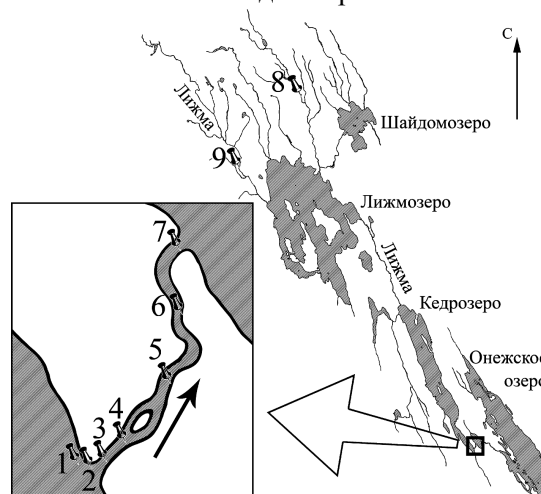


Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб (1–9)

Бассейн р. Лижма отличается высоким коэффициентом озерности – 14,8%. Озеро Кедрозеро, в истоке которого расположен исследуемый участок, имеет площадь 25,7 км<sup>2</sup>, показатель условного водообмена составляет 1,2 [2], [12]. Характеристики станций приведены в табл. 1.

Известно, что для бентосных организмов наиболее характерно отрицательное биномиальное или логнормальное распределение численности и биомассы [1], [15], поэтому использовались непараметрические методы оценки. Средние приведены с указанием максимального и минимального значений, расчет U-критерия Манна – Уитни и кластерный анализ проведены в пакете Statistica 8.



Таблица 1  
Характеристика станций отбора проб

Параметр	Станция							
	1	2	3	4	5	6	7	8, 9
Расстояние от озера, м	0	25	66	103	270	556	732	–
Время «добегания» воды от озера, с	0	95	153	189	410	728	890	–
Скорость течения, м/с	0,05	0,15	0,70	0,45	0,55	0,60	0,55	0,50
Грунт, %	валун	10	10	10	0	0	0	80
	галька	80	80	80	70	70	60	15
	песок	10	10	10	30	30	40	5

Индексы биологического разнообразия рассчитаны по опубликованным формулам [6]. Определение организмов зообентоса проводили по определителю пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий [8], [9], [10] и определителю пресноводных беспозвоночных европейской части СССР [7].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В составе зообентоса выявлено 38 видов и форм надвидового ранга, принадлежащих к 14 таксономическим группам беспозвоночных: Hydrozoa, Nematoda, Oligochaeta, Hirudinea, Bivalvia (*Pisidium* sp., *Sphaerium* sp.), Gastropoda (*Ancylus fluviatilis* Müller, *Planorbis* sp., *Limnea* sp., *Physa fontinalis* L., *Armiger* sp., *Anisus* sp.), Crustacea (*Asellus aquaticus* L., Ostracoda), Heteroptera (*Aphelocheirus aestivalis* F.), Ephemeroptera (*Baetis tracheatus* Keffermüller & Machel, *Baetis rhodani* Pictet, *Baetis fuscatus* L., *B. (Nigrobaetis) digitatus* Bengtsson, *Centroptilum luteolum* Müller, *Serratella ignita* (Poda 1761), *Paraleptophlebia submarginata* Stephens, *Heptagenia sulphurea* Müller), Plecoptera (*Leuctra fusca* L., *Isoperla difformis* Klapálek, *Isogenus nubecula* Newman), Megaloptera (*Sialis* sp.), Trichoptera (*Hydropsyche pellucidula* Curtis, *Hydropsyche siltalai* Döhler, *Cheumatopsyche lepida* Pictet, *Rhyacophila nubila* Zetterstedt, *Neureclipsis bimaculata* L., *Polycentropus flavomaculatus* Pictet, *Limnephilus* sp., *Ceraclaea nigronevosa* Retzius, *Stenophylax* sp., *Wormaldia subnigra* McLachlan), Simuliidae (*Wilhelmia equina* L., *Odagmia (Simulia) ornata* Meigen), Coleoptera (*Limnius* sp., *Oulimnius* sp.), Odonata (*Cordulia aeneaturfosa* Förster), Dip-tera (Ceratopogonidae, Chironomidae).

Для выявления количества и состава бентоса в отсутствие влияния озера нами были обследованы пороги в верхнем течении (ст. 8, 9). Данные участки реки отличаются отсутствием озер на территории водосбора. Численность и биомасса зообентоса здесь относительно невелики (табл. 2).

На начальном этапе перехода озеро – река, в литоральной зоне озера (ст. 1) и при небольшом (до 0,05 м/с) течении (ст. 2) численность организмов в бентосе сопоставима с таковой в реке выше озера, однако биомасса в два раза больше за счет личинок ручейников (U-критерий Манна –

Уитни,  $p < 0,05$ ). Резкое увеличение обилия донных сообществ отмечено при существенном возрастании скорости течения – максимальных значений биомасса бентоса достигает на первых порогах ниже озера (ст. 3 и 4). Как численность, так и биомасса зообентоса на этом участке достоверно выше, чем на прочих ( $p < 0,05$ ). На ниже лежащих станциях происходит постепенное снижение биомассы зооценоза. На расстоянии 550–700 м от истока (ст. 6, 7) биомасса бентоса сопоставима с таковой на контрольных участках (ст. 8, 9), достоверных различий не выявлено.

Таблица 2  
Количественные характеристики зообентоса (приведены средние, максимальные и минимальные значения)

Станция	Расположение	Численность, экз./м <sup>2</sup>	Биомасса, г/м <sup>2</sup>
1, 2	Озеро и начало перехода в реку	14506 (525–52075)*	9795 (3572–16072)
3, 4	Первый порог ниже озера	52633 (7100–205450)*	66036 (29996–134312)
5	Ниже первого порога	14918 (3875–37650)	28280 (13096–55317)
6, 7	На удалении от озера	5886 (975–18200)	8900 (3985–16970)
8, 9	Верховье, без озер на территории водосбора	2242 (1071–3100)	2372 (960–3920)

\* Большой разброс значений вызван локальными скоплениями мелких представителей Hydrozoa.

Для выявления динамики структуры донных сообществ по мере удаления от озера выделены преобладающие виды с указанием их спектра и способа питания [5], [14], [16] (табл. 3). В составе бентоса контрольных участков, не подверженных влиянию озер (ст. 8, 9), преобладают собиратели, соскребатели и размельчители. В литоральной зоне озера (ст. 1) доминируют собиратели и соскребатели.

Таблица 3  
Спектр и способ питания преобладающих организмов

Станция	Виды	Спектр питания	Способ питания
1	<i>Baetis tracheatus</i> , <i>Leuctra fusca</i> , <i>Limnephilus</i> sp.	Ф, Ф-Д	сс-сб, сб, сс-сб
2	<i>Neureclipsis bimaculata</i> , Hydrozoa	3-С, 3-С	ф, ф
3	<i>Hydropsyche pellucidula</i> , <i>Wilhelmia equina</i>	3-С, С	ф, ф
4	Hydrozoa, <i>Neureclipsis bimaculata</i> , <i>Leuctra fusca</i>	3-С, 3-С, Ф-Д	ф, ф, сб
5	<i>Hydropsyche siltalai</i> , <i>Hydropsyche pellucidula</i> , <i>Baetis rhodani</i> , <i>Ephemerella ignita</i> , <i>Elmis maugetti</i> , <i>Pisidium</i> sp.	3-С, 3-С, Ф, Ф-Д, Д, С	ф, ф, сс-сб, сб, сс-сб, ф
6	<i>Pisidium</i> sp., <i>Baetis rhodani</i> , <i>Oligochaeta</i> , <i>Limnius</i> sp., <i>Wilhelmia equina</i> , <i>Leuctra fusca</i>	С, Д, Д, Д, С, Ф-Д	ф, сс-сб, сб, сб, ф, сб

Окончание табл. 3

7	<i>Pisidium sp., Planorbis sp., Anisus sp., Aphelocheirus aestivalis, Leuctra fusca, Baetis rhodani, Ephemerella ignita, Oulimnius sp., Limnius sp.</i>	С, Ф-Д, Ф-Д, З, Ф-Д, Ф, Ф-Д, Д, Д	<i>ф, сс-сб, сс-сб, х, сб, сс-сб, сб, сб, сб, сб,</i>
8, 9	<i>Baetis rhodani, Leuctra fusca, Stenophylax sp., Wormaldia subnigra</i>	Ф, Ф-Д, Д, С *	<i>сс-сб, сб, р, ф</i>

\* Примечание. Ф – фитофаг, Ф-Д – фитофаг-детритофаг, Д – детритофаг, С – сестонофаг, З – зоофаг, З-С – зоофаг-сестонофаг; сс – соскребатель, сб – собиратель, сс-сб – соскребатель-собиратель, р – размельчитель, ф – фильтратор, х – хищник.

На участке перехода озера в реку (ст. 2) по мере увеличения скорости течения закономерно возрастает численность организмов-фильтраторов, способных улавливать сносимый планктон. Уже при скорости 0,05 м/с появляются ловчие сети *Neureclipsis bimaculata* как на грунте, так и на макрофитах. Их численность невысока, 10–15 экз./м<sup>2</sup>. Ближе к реке при скорости 0,15 м/с численность *N. bimaculata* увеличивается до 800–850 экз./м<sup>2</sup>, появляются Hydrozoa – до 50 тыс. экз./м<sup>2</sup>. Дальнейшее увеличение скорости потока (до 0,5–0,7 м/с) приводит к доминированию сетеплетущих личинок ручейников (*Hydropsyche pellucidula, H. siltalai*) и мошек (*Wilhelmia equina*). На следующих станциях по мере удаления от озера наблюдается постепенное уменьшение доли потребителей планктона и возрастание доли собирателей и соскребателей (рис. 2).

Зообентос контрольных участков (ст. 8, 9) по соотношению форм (собиратели-соскребатели, хищники, фильтраторы) наиболее близок к ст. 7 (рис. 3). Это говорит о том, что по мере удаления от озера происходит восстановление структуры донных сообществ. На дендрограмме прослеживается обособленность станций в истоке из озера (ст. 2–5) от участков выше озера (ст. 8, 9) и на удалении от озера (ст. 6, 7).

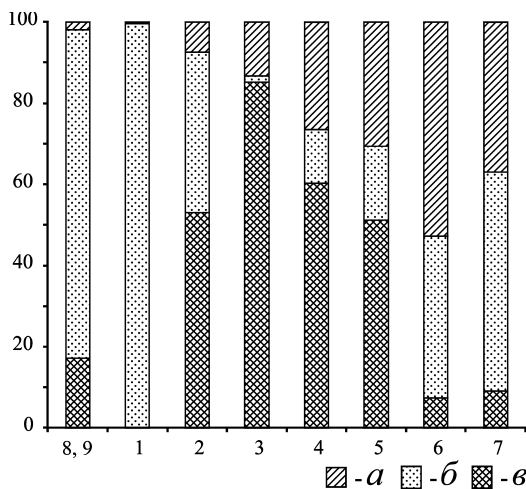


Рис. 2. Доля собирателей и соскребателей, фильтраторов в сообществах по биомассе: а – хищники, б – собиратели и соскребатели, в – фильтраторы; по оси ординат – доля, %, по оси абсцисс – номера станций

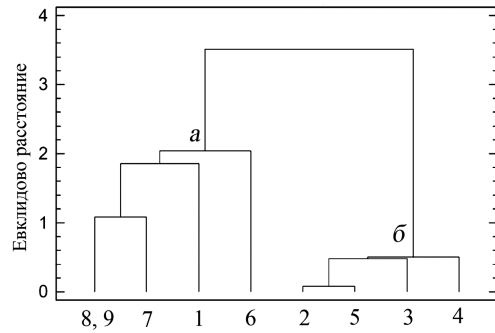


Рис. 3. Близость исследованных участков по соотношению жизненных форм зообентоса по биомассе: а – станции вне влияния озера, б – станции на истоке из озера

Согласно концепции речного континуума, биологическое разнообразие в реке от истока к устью закономерно изменяется, максимальные значения наблюдаются в зоне среднего течения – ритрала [20]. Значения индексов этой характеристики донных сообществ представлены в табл. 4.

Таблица 4  
Биологическое разнообразие зообентоса

Индекс	Станция							
	1	2	3	4	5	6	7	8, 9
Индекс Шеннона	2,11	1,63	1,58	2,42	2,43	2,40	2,77	1,66
Выровненность	0,74	0,63	0,55	0,75	0,78	0,76	0,81	0,69
Индекс доминирования Симпсона	0,19	0,27	0,33	0,13	0,11	0,15	0,09	0,29

Минимальное значение индекса разнообразия Шеннона отмечено на ст. 3, где скорость течения составила 0,7 м/с. Здесь же отмечена наименьшая выровненность и наибольшее доминирование. Максимальные значения показателей биологического разнообразия и минимальное доминирование отмечены в конце протоки.

**ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Ниже озера состав и количественные характеристики донных сообществ существенно изменены. Для оценки влияния проточного озера на структуру зообентоса реки в табл. 5 полученные характеристики сопоставлены с зонами реки, выделенными в концепции речного континуума [20].

Ниже проточного озера река обладает свойствами нижнего течения – потамали, а по мере удаления от озера водоток восстанавливает свойства среднего течения – ритрала. Таким образом, ниже озера происходит обращение классического речного континуума.

Концепция речного континуума создана как описание трансформации речных экосистем и ландшафта от верховьев к устью среднестатистической реки без проточных озер [20]. Вместе с тем в связи с геологической молодостью долин большинство рек Карелии характеризуются ступенчатым профилем, в котором пороговые участ

тки, имеющие величину наибольшего падения, чередуются с плесами, озеровидными расширениями или озерами [11].

Таблица 5

Классификация участков водотока в соответствии с концепцией речного континуума

Признак	Станции		
	8, 9	2, 3, 4	5, 6, 7
Доминирующие формы зообентоса	Собиратели, соскребаатели, размельчители	Фильтраторы	Соскребаатели, собиратели, фильтраторы
Биоразнообразие	Низкое	Низкое	Высокое
Источник органического вещества	Листовой опад (аллохтонное)	Планктон-сестон (поступающее из озера)	Макрофиты (автохтонное) и сестон (аллохтонное)
Статус участка по концепции речного континуума	Креналь – верхнее течение	Потамаль – нижнее течение	Ритраль – среднее течение

Примечание. Ст. 1 (озерная литораль) в таблицу не включена.

Очевидно, роль проточных озер в формировании донных сообществ рек весьма велика. В условиях каменистого порожистого русла рек от истока до устья потамаль – зона спокойного

нижнего течения – часто не формируется вообще. Однако, как показывают полученные данные, даже в таких реках на участках ниже проточных озер могут существовать сообщества потамали.

## ВЫВОДЫ

Проточное озеро оказывает большое влияние на зообентос расположенного ниже участка реки. В зоне поступления планктона многократно увеличена биомасса зообентоса, что оказывает существенное влияние на продуктивность водотока в целом. В истоке из озера доминируют фильтрующие формы, структура донных сообществ характерна для потамали – нижнего течения рек. Ниже по течению на удалении от озера зообентос приобретает свойства сообществ ритрона, что можно считать обратным речным континуумом. Проточные озера, таким образом, обуславливают возможность существования сообществ потамали в порожистых реках.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых ученых МК-1020.2010.4.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баканов А. И. Использование зообентоса для мониторинга пресноводных водоемов // Биологические внутренние воды. 2000. № 1. С. 68–82.
2. Григорьев С. В., Грицевская Г. Л. Каталог озер Карелии. М.; Л.: Наука, 1959. 240 с.
3. Круглова А. Н., Барышев И. А. Элиминация лимнического зоопланктона в порожистой реке (на примере оз. Кедрозеро и р. Лижма, басс. Онежского озера) // Гидробиологический журнал. Т. 46. № 6. 2010. С. 15–23.
4. Методические рекомендации по изучению гидробиологического режима малых рек. Петрозаводск, 1989. 42 с.
5. Монаков А. В. Питание пресноводных беспозвоночных. М.: ИПЭЭ РАН, 1998. 319 с.
6. Мэгарран Э. Экологическое разнообразие и его измерение. М.: Мир, 1992. 184 с.
7. Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР. Л.: Гидрометиздат, 1977. 511 с.
8. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 3. Паукообразные и низшие насекомые. СПб.: Зоологический институт РАН, 1997. 440 с.
9. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 4. Высшие насекомые. Двукрылые. СПб.: Зоологический институт РАН, 1999. 1000 с.
10. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 5. Высшие насекомые (ручейники, чешуекрылые, жесткокрылые, сетчатокрылые, большескрылые, перепончатокрылые). СПб.: Наука, 2001. 836 с.
11. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 2. Карелия и Северо-Запад. Ч. 1. Л.: Гидрометиздат, 1972. 528 с.
12. Фрейндлинг В. А. Гидрография водоемов бассейна р. Лижмы // Вопросы гидрологии, озероведения и водного хозяйства Карелии. Петрозаводск: Карельское книжное изд-во, 1969. С. 236–245.
13. Хренников В. В. Бентос притоков Онежского озера // Лососевые нерестовые реки Онежского озера. Л., 1978. С. 41–50.
14. Чертопруд М. В. Анализ жизненных форм реофильного макробентоса: новый подход к классификации сообществ // Журнал общей биологии. 2006. Т. 67. № 3. С. 190–197.
15. Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.
16. Graf W., Murphy J., Dahl J., Zamora-Munoz C., Lopez-Rodriguez M. J. Distribution and ecological preferences of European freshwater organisms. Vol. 1. Trichoptera. Sofia; Moscow: Pensoft Publishing, 2008. 388 p.
17. Hoffsten P. Distribution of filter-feeding caddisflies (Trichoptera) and plankton drift in a Swedish lake-outlet stream // Aquatic Ecology. 1999. Vol. 33. № 4. P. 377–386.
18. Illies J. Seeausfluss-Biozönosen lappländischer Waldbäche // Entomol Tidskr. 1956. Vol. 77. P. 138–153.
19. Oswald M. W. Abundance patterns of filter-feeding Caddisflies (Trichoptera: Hydropsychidae) and seston in a Montana (U. S. A.) lake outlet // Hydrobiologia. 1979. Vol. 63. № 2. P. 177–183.
20. Vannote R. L., Minshall G. W., Cummins K. W., Sedell I. R., Cushing C. E. The river continuum concept // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1980. Vol. 37. № 1. P. 130–137.

**ИРИНА СЕРГЕЕВНА ЕРОХИНА**

аспирант кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*irinabikera@yandex.ru*

**НАДЕЖДА АЛЕКСАНДРОВНА ЕЛЬКИНА**

кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*z\_nat2003@mail.ru*

**ЕВГЕНИЯ ФЕДОРОВНА МАРКОВСКАЯ**

доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет  
*volev@sampo.ru*

**ПАЛИНОИНДИКАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ Г. КОСТОМУКШИ**

В статье дана оценка уровня загрязнения г. Костомукши методом палиноиндикации. По результатам анализа в радиусе 20 км от города были выделены 4 зоны по степени загрязнения: условно чистая, умеренного загрязнения, сильного загрязнения и критического загрязнения.

Ключевые слова: палиноиндикация, сосна обыкновенная, Костомукшский ГОК, г. Костомукша, Карелия

Для оценки состояния природной среды территорий, подверженных выбросам промышленных предприятий, часто используют биоиндикационные методы, основанные на определении внешних морфологических изменений листового аппарата и кроны деревьев [5], [15], [25], стабильности развития организма [1], [2], [11], нарушений в формировании генеративных органов [12], [17]. Состояние репродуктивной системы – чувствительный показатель адаптации растительного организма к среде обитания. Наиболее сильное влияние антропогенного стресса испытывают мужские генеративные органы, что проявляется в их аномальном развитии и низком качестве формируемой пыльцы [12], [17]. В условиях дестабилизации среды растения продуцируют много тератоморфных (уродливых, дефектных) пыльцевых зерен [8], [9], [16], [18], [19].

Город Костомукша построен в 1983 году по принципу «город в лесу» с максимальным сохранением участков естественного леса [14]. Возникновение города связано со строительством Костомукшского горно-обогатительного комбината (ГОКа), промышленная площадка которого расположена в 10 км к северо-востоку от города с учетом розы ветров. ГОК является одним из основных источников загрязняющих веществ в Карелии. Так, за 2009 год Костомукшским городским округом было выброшено в атмосферу 45,6 тыс. т загрязняющих веществ, что составляет 41 % всех выбросов в Карелии. В состав основных выбросов комбината входят твердые вещества – 11 %, диоксид серы – 82 %, оксид углерода – 3,1 % и оксиды азота – 3,3 %. При этом © Ерохина И. С., Елькина Н. А., Марковская Е. Ф., 2011

вклад автотранспорта в суммарные выбросы города составляет 9,6 %, из них оксида углерода – 69,2 %, оксидов азота – 41,5 % [6]. Однако факт влияния деятельности Костомукшского горно-обогатительного комбината на экологию города остается дискуссионным [15], [20], [23], [24], [26]. Из литературы известно, что сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*) особенно чувствительна к действию диоксида серы. В условиях сильного загрязнения у нее наблюдается угнетение ростовых и генеративных процессов [3], [7], [21].

Цель работы – оценка состояния природной среды на территории г. Костомукши с использованием палинологического анализа.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Работа выполнена на растениях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Материал собирали в 2009–2011 годах. Для проведения исследований были заложены 22 пробных площади, из них 8 в разных частях города, 10 – на различном удалении от комбината (пробы 1'–5' в юго-западном направлении от комбината, 6'–10' – в северо-восточном направлении), 1 пробная площадь в условно чистом районе (на расстоянии 20 км от города в восточном направлении) и 3 контрольные пробные площади в юго-западном направлении (рис. 1). На каждой пробной площади была взята общая проба микростробил *P. sylvestris* с 5 деревьев.

Микростробилы с уже созревшей пылью фиксировали в 70 % этилового спирте и хранили в холодильнике. Для цитологического анализа использовали микроспорифиллы из средней

части микростробила, материал окрашивали в 1 % растворе ацетокармина [16], [22]. Исследование проводили с помощью светового микроскопа при увеличении 10 x 40. В каждом образце подсчитывали количество тератоморфных пыльцевых зерен и анализировали морфологические особенности. Изучали не менее 2500 пыльцевых зерен из каждого образца.

Статистическую обработку данных проводили с использованием программы «Microsoft Excel 2010». Для оценки достоверности изменений использовали однофакторные дисперсионный и регрессионный анализы [13].

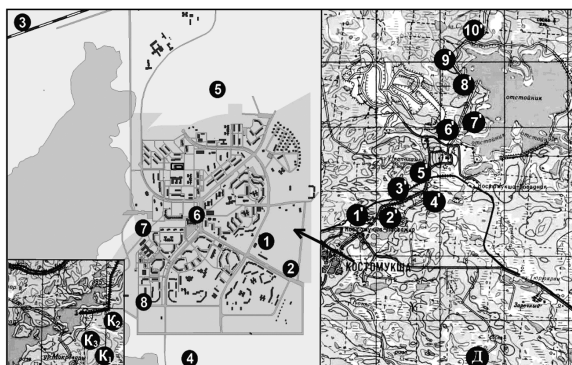


Рис. 1. Расположение пробных площадей: 1–8 – пробные площади на территории города; 1'–10' – трансекта по направлению преобладающих ветров; К1–К3 – контрольные пробные площади; Д – дачные участки (20 км на восток от города)

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о большом разнообразии вариантов нарушения морфологического строения пыльцы *P. sylvestris* на территории г. Костомукши и на разном удалении от ГОКа. Всего было выявлено 11 типов нарушений (рис. 2, таблица).

Основная масса пыльцы для каждой пробной площади является нормально развитой, однако количество тератоморфных пыльцевых зерен и типы морфологических нарушений различны для всех территорий. Так, на территории города содержание аномальной пыльцы в среднем составляет 43 %. Наиболее часто встречающаяся аномалия развития – пыльцевые зерна (п. з.) без содержимого (24,6 %), нарушенное развитие пыльцевых мешков (п. м.) (13,1 %), отмечаются отклонения в строении экзины (4,9 %). На условно чистой территории (Д) содержание тератоморфных пыльцевых зерен в два раза меньше – 20,4 %.

Основные нарушения в развитии касаются пыльцевых мешков (14,3 %), имеются пыльцевые зерна без содержимого (3,6 %) и нарушения экзины (2,6 %). Средние значения содержания тератоморфных пыльцевых зерен в образцах, отобранных по направлению от ГОКа к городу (ЮЗ), составляют 11,1 %, по направлению действия преобладающих ветров (СВ) – 13,0 %.

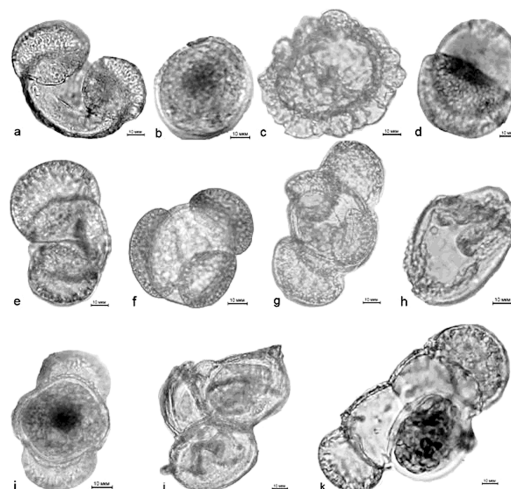


Рис. 2. Типы пыльцевых зерен *Pinus sylvestris* L. на территории г. Костомукши:

- а – нормально развитое п. з.; б – без п. м.;  
с – недоразвитые п. м.; d – одномешковое п. з.;  
е – двухразномешковое п. з.; f – трехмешковое п. з.;  
g – четырехмешковое п. з.; h – п. з. без содержимого;  
i – нарушение экзины; j – полиады; k – сросшиеся п. з.

Пыльцевые зерна *Pinus sylvestris* с разными типами нарушений морфологического строения (среднее число, %)

Типы п. з.	Места взятия проб				
	Город	Д	ГОК_ЮЗ	ГОК_СВ	К
Норма	57,00 ± 4,41	79,55	88,88 ± 1,44	86,97 ± 1,36	94,45 ± 0,57
Тератоморфные п. з.	43,00 ± 4,41	20,45	11,12 ± 1,44	13,03 ± 1,36	5,55 ± 0,57
Из них: без п. м.	10,95 ± 1,39	7,19	3,56 ± 0,75	3,35 ± 0,69	1,57 ± 0,67
одномешковое п. з.	1,30 ± 0,15	6,51	2,17 ± 0,31	3,75 ± 0,64	0,55 ± 0,15
двухразномешковое п. з.	0,10 ± 0,03	0,00	0,44 ± 0,16	0,28 ± 0,09	0,35 ± 0,23
трехмешковое п. з.	0,73 ± 0,21	0,56	0,39 ± 0,11	0,62 ± 0,26	0,00
четыремешковое п. з.	0,01 ± 0,01	0,00	0,03 ± 0,03	0,03 ± 0,03	0,00
без содержимого	24,62 ± 3,36	3,63	2,46 ± 0,35	3,40 ± 0,75	1,25 ± 0,05
нарушения экзины	4,86 ± 1,22	2,56	1,45 ± 0,44	1,08 ± 0,23	0,74 ± 0,07
полиады	0,11 ± 0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
сросшиеся п. з.	0,004 ± 0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
маленькие	0,14 ± 0,04	0,00	0,58 ± 0,15	0,49 ± 0,23	0,74 ± 0,07
большие	0,16 ± 0,05	0,00	0,03 ± 0,03	0,03 ± 0,00	0,36 ± 0,04

Примечание. ГОК\_ЮЗ – пробные площади по направлению от ГОКа к городу; ГОК\_СВ – пробные площади по направлению действия преобладающих ветров; К – контрольные пробные площади; Д – дачные участки (20 км на восток от города).

Для данной территории характерны следующие нарушения: изменения в структуре пыльцевых мешков – 6,6 % (ЮЗ) и 8,0 % (СВ), зерна без

содержимого – 2,5 % (ЮЗ) и 3,4 % (СВ), нарушения экзины – 1,4 % (ЮЗ) и 1,0 % (СВ). В контрольных пробах отклонения в развитии пыльцевых зерен минимальны – 5,6 %, из них 2,5 % – пыльца с нарушениями строения пыльцевых мешков, 1,2 % – без содержимого, отклонения в развитии экзины составляют 0,7 %. Анализ данных по трансекте до ГОКа показал, что процент нарушений в зависимости от расстояния до комбината изменяется нелинейно. Так, количество аномальной пыльцы на расстоянии 0,5–4,5 км в СВ направлении от ГОКа в среднем составило 15 %, в 6–8 км от ГОКа количество дефектных пыльцевых зерен снижается (9,6 %), но снова возрастает начиная с 10 км (10,4 %) (рис. 3). Выявленные закономерности подтверждаются литературными данными о нелинейном распространении поллютантов ГОКа [4], [26].



Рис. 3. Зависимость количества тератоморфных пыльцевых зерен (%) от расстояния до комбината (1'–10' – номера проб)

В ЮЗ направлении количество нарушений несколько ниже около комбината, но увеличивается по мере приближения к городу. Это подтвердил и статистический анализ: количество аномальных пыльцевых зерен значительно увеличивается ( $R^2 = 0,934^{**}$ , ОРА). Однако содержание тератоморфной пыльцы на территории города в 4 раза больше, чем в окрестностях ГОКа. Между выборками с территории города и на разном удалении от комбината наблюдаются достоверные различия ( $F = 57,8^{***}$ , ОДА). Эти данные свидетельствуют о слабом влиянии ГОКа на состояние природной среды города, при этом сочетание аэровыбросов комбината и инфраструктуры города сильнее воздействует на мужские генеративные органы сосны. Довольно высокое содержание дефектных пыльцевых зерен получено для пробной площадки на расстоянии 20 км от комбината в условии чистом в отношении промышленных выбросов районе. Анализ этой территории показал, что вблизи от места отбора проб располагаются дачные участки, где весной интенсивно сжигается мусор, что, как показано в [8], [12], оказывает негативное воздействие на процессы формирования пыльцы.

На территории города распространение аномальной пыльцы неравномерное. Наибольшее количество тератоморфной пыльцы на пробных

площадях 1, 6 и 8 значительно отличается ( $F = 14,8^{**}$ , ОДА) от остальных проб. Особенностью данных пробных площадей является использование их под стоянки для автотранспорта и как свалки, что также может увеличивать количество аномально развитой пыльцы [12]. Остальные пробные площадки расположены ближе к лесу и испытывают меньшую антропогенную нагрузку, что проявляется в увеличении процента нормально развитых пыльцевых зерен в пробах.

В результате анализа полученных данных было выявлено всего 11 типов нарушений, описанных в литературе [8], [18]. Все они были зафиксированы в пробах, отобранных с территории города, 9 типов нарушений – в пробах на разном удалении от комбината (по трансекте), 5 типов – в 20 км от города в восточном направлении и 7 типов – на контрольных пробных площадях. Большинство нарушений пыльцы связано со строением пыльцевых мешков, экзины и отсутствием внутреннего содержимого. Данные типы нарушений присутствуют во всех пробах. Отклонения в размерах пыльцы, которые считаются самым нестабильным признаком пыльцевых зерен представителей рода *Pinus* L. [10], в данном исследовании были встречены в незначительных количествах (менее 1 %).

Исследование показало, что выбросы комбината, которые ориентированы в северо-восточном направлении в соответствии с розой ветров, оказывают существенное влияние на развитие пыльцы, и на расстоянии 2–4 км выявляются максимальные значения нарушений (рис. 3), что связано с особенностями аэротехногенных выбросов ГОКа. Этот факт свидетельствует о негативном действии ГОКа на лесные экосистемы вблизи комбината. В юго-западном направлении количество тератоморфной пыльцы остается низким около комбината и начинает увеличиваться только по мере приближения к городу, где и достигает максимальных значений. Эти наблюдения свидетельствуют о том, что действие ГОКа на состояние природной среды города минимально. Больше число нарушений в развитии пыльцы на территории города может свидетельствовать о других ведущих факторах загрязнения, которые связаны с жизнедеятельностью города.

Н. А. Калашник с соавторами [16] предложено районирование территорий по результатам палинологического анализа (по количеству нормально развитых пыльцевых зерен). Согласно данной классификации, пробы пыльцы условно чистых территорий содержат более 90,0 % нормально развитой пыльцы, умеренно загрязненных – 89,4–82,9 %, сильно загрязненных – 82,3–75,2 %, критически загрязненных – 68,6–62,0 % и менее нормально развитой пыльцы. В соответствии с этой классификацией территорию города Костомукши можно отнести к зоне критического загрязнения (нормально развитой пыльцы около 57 %), окрес-

тности комбината – к умеренно загрязненной территории (нормально развитой пыльцы до 88 %), территорию на удалении 20 км – к сильно загрязненной территории (нормально развитой пыльцы 79,6 %), а территорию контроля – к условно чистой (около 95 % нормально сформированной пыльцы).

Таким образом, в радиусе 20 км от города по степени загрязнения можно выделить 4 зоны в зависимости от действия ведущих факторов. Так, на территорию города в основном влияют выбросы автотранспорта и деятельность челове-

ка. На территории дачных участков наибольший вред приносит сжигание мусора, которое интенсивно ведется как раз в период формирования пыльцы. Выбросы ГОКа также оказывают негативное воздействие, которое наиболее сильно проявляется в направлении преобладающих ветров. Наименее нарушенной оказалась зона контроля, вдали от источников загрязнения, рядом с территорией заповедника, где содержание тератоморфных пыльцевых зерен в пробах не превышает уровня естественной полиморфности пыльцы *P. sylvestris*.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование / Под ред. О. П. Мелеховой, Е. И. Егоровой. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 288 с.
2. Василевская Н. В., Тумарова Ю. М. Оценка стабильности развития популяций *Pinus Sylvestris* L. в условиях аэротехногенного загрязнения (Мурманская область) // Труды Карельского научного центра РАН. Биогеография Карелии. Вып. 7. Петрозаводск, 2005. С. 19–23.
3. Владимирова О. С., Муратова Е. Н., Седаева М. И. Пыльца ели сибирской, произрастающей в различных экологических условиях // Хвойные бореальной зоны. 2008. № 1–2. С. 98–102.
4. Влияние аэротехногенного загрязнения на состояние сосновых лесов Северной Карелии / Сост.: И. П. Лазарева и др. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1992. 51 с.
5. Волкова М. В. Влияние промышленного загрязнения воздуха на морфометрические и анатомические показатели вегетативных органов древесных растений // Экология и защита леса: Межвуз. сб. науч. тр. СПб.: ЛТА, 1992. С. 19–24.
6. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2009 г. / Министерство сельского, рыбного хозяйства и экологии РК. Петрозаводск, 2010. 296 с.
7. Горшков М. В. Экологический мониторинг: Учеб. пособие. Владивосток: Изд-во ТГЭУ, 2010. 313 с.
8. Дзюба О. Ф. Палиноиндикация качества окружающей среды. СПб.: Недра, 2006. 197 с.
9. Дзюба О. Ф. Тератоморфные пыльцевые зерна в современных и палеопалинологических пыльцевых спектрах и некоторые проблемы палиностратиграфии // Нефтегазовая геология: Теория и практика. 2007. № 2. С. 1–22.
10. Дзюба О. Ф., Куликова Н. К., Токарев П. И. О естественном полиморфизме пыльцы *Pinus sylvestris* L. в связи с некоторыми проблемами палеопалинологии // Палинология: теория и практика: Материалы конф. (27 сентября – 1 октября, 2005 г.). М., 2005. С. 65–68.
11. Захаров В. М. Онтогенез и популяция (стабильность развития и популяционная изменчивость) // Экология. 2001. № 3. С. 164–168.
12. Ибрагимова Э. Э. Индикация загрязнения окружающей среды в урбанизированных экосистемах с использованием пыльцы *Pinus sylvestris* L. // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Сер. «Биология, химия». 2009. Т. 22(61). № 4. С. 54–65.
13. Ивантер Э. В., Коросов А. В. Элементарная биометрия: Учеб. пособие. Петрозаводск, 2005. 104 с.
14. Илюха О. П. История Костомукши: Документы и материалы. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1994. 367 с.
15. Кайбияйнен Л. К., Болондинский В. К., Софронова Г. И., Ялынская Е. Е. Мониторинг физиологического состояния древесных растений в зонах техногенных воздействий // Биоэкологические аспекты мониторинга лесных экосистем Северо-Запада России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. С. 100–114.
16. Калашник Н. А., Ясовиева С. М., Преснухина Л. П. Аномалии пыльцы хвойных видов деревьев при промышленном загрязнении на Южном Урале // Лесоведение. 2008. № 2. С. 33–40.
17. Крутских Н. В., Лаврова Н. Б. Загрязнение почв г. Петрозаводска тяжелыми металлами и некоторые аспекты палиноиндикации // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 13. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. С. 153–157.
18. Мельникова Т. А. Аномальная пыльца рода *Pinus* L. как индикатор палеоклиматических флюктуаций в позднем голоцене // Вестник ДВО РАН. 2004. № 3. С. 178–182.
19. Мельникова Т. А. Морфологические аномалии ископаемой пыльцы сосен // Палинология: теория и практика: Материалы конф. (27 сентября – 1 октября, 2005 г.). М., 2005. С. 158–159.
20. Новицкая Л. Л., Бумагина З. Д., Веселкова Л. Л., Житкова Е. А. Структурные особенности клеток мезофилла хвои сосны обыкновенной, произрастающей в районе Костомукшского ГОКа // Проблемы антропогенной трансформации лесных биогеоценозов Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1996. С. 51–63.
21. Носкова Н. Е., Третьякова И. Н., Носков Е. А. Особенности формирования мужской генеративной сферы сосны обыкновенной в условиях техногенеза // Хвойные бореальной зоны. 2006. Т. XXIII. № 2. С. 211–214.
22. Паушева З. П. Практикум по цитологии растений. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1988. 271 с.
23. Сазонова Т. А., Терехова Е. Н., Галибина Н. А., Таланова Т. Ю., Шредерс С. М., Чиненова Л. А., Канючкова Г. К. Оценка функционального состояния *Pinus sylvestris* L. в условиях слабого загрязнения // Биоэкологические аспекты мониторинга лесных экосистем Северо-Запада России. Петрозаводск, 2001. С. 157–174.
24. Синькевич С. М. Динамика древесного прироста в зонах техногенных эмиссий // Биоэкологические аспекты мониторинга лесных экосистем Северо-Запада России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. С. 130–143.
25. Токарев Т. Г. О некоторых показателях для оценки реакций хвойных пород на воздействие промышленных эмиссий // Экология и защита леса: Межвуз. сб. науч. тр. СПб.: ЛТА, 1992. С. 15–19.
26. Фуксман И. Л., Ивонис И. Ю., Габукова В. В., Новицкая Л. Л., Шуляковская Т. А. Основные физиолого-биохимические показатели ранней диагностики состояния соснового древостоя в условиях техногенного загрязнения // Проблемы антропогенной трансформации лесных биогеоценозов Карелии. Петрозаводск, 1996. С. 40–52.

**ВИКТОР ЛЕОНИДОВИЧ МИРОНОВ**

аспирант Института биологии, Карельский научный центр РАН

*vict.mironoff@mail.yandex.ru***ОЛЕГ ЛЕОНИДОВИЧ КУЗНЕЦОВ**

доктор биологических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией болотных экосистем Института биологии, Карельский научный центр РАН

*kuznetsov@krc.karelia.ru***ТРАВЯНЫЕ АССОЦИАЦИИ ПРИОЗЕРНЫХ БОЛОТ ЮЖНОЙ КАРЕЛИИ**

В статье приводятся результаты исследования растительности мезо- и эвтрофных приозерных болот Южной Карелии. На основании обработки 130 геоботанических описаний с помощью эколого-фитоценотического метода и с применением эколого-ценотических групп видов выделены 9 ассоциаций.

Ключевые слова: ассоциация, эколого-ценотическая группа, приозерные болота, мезотрофный, эвтрофный

Приозерные болота, находящиеся в низинной или переходной стадиях развития, имеют специфический режим увлажнения, тесно связанный с сезонными колебаниями уровня воды в озере. Это накладывает отпечаток как на состав флоры, так и на структуру растительных сообществ. Специальные работы, посвященные растительному покрову данного типа болот в Карелии, отсутствуют. Имеются данные по прибрежно-водной растительности озер [1], [6], [7] и по растительности заболоченных лугов, слабо связанных с водоемами [5].

**ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Объектом исследований является растительный покров приозерных болот, находящихся на мезотрофной и эвтрофной стадиях развития. Поскольку они сильно обводнены и уровень болотно-грунтовых вод в ряде случаев доходит до отметки +60 см, господствующее положение занимают травяные сообщества. Для их описания закладывалась временная пробная площадь (100 м<sup>2</sup>), внутри которой отмечалось проективное покрытие встреченных видов в % [2]. В тех случаях, когда сообщества представляли собой небольшой естественный контур, описание осуществлялось в его пределах. Всего выполнено 130 геоботанических описаний на болотах у озер Верхнее и Нижнее Падозеро, Логозеро, Габозеро. Определение видов мхов проведено М. А. Бойчук, старшим научным сотрудником лаборатории болотных экосистем Института биологии КарНЦ РАН. При классификации геоботанических описаний применялся эколого-фитоценотический метод с применением эколого-ценотических групп (ЭЦГ) видов флоры болот [3], [4], дополненных группой гидрофитов.

© Миронов В. Л., Кузнецов О. Л., 2011

При выделении ассоциаций мы старались использовать значимые признаки, характеризующие растительный покров: доминирование, частоту встречаемости, наличие диагностических видов, представленность ЭЦГ флоры болот. Названия ассоциаций в силу сложной структуры описываемых сообществ даны в основном по двум ценотически наиболее значимым видам. Уточнение принадлежности описаний к той или иной ассоциации проводилось с помощью коэффициента Жаккара. Для наглядного отображения размещения описаний в экологическом пространстве был использован метод бестрендового анализа соответствия (DCA) [8]. Данная обработка выполнена в программе PC-ORD.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

В результате обработки описаний травяных сообществ болот были выделены растительные группировки, рассматриваемые нами в ранге ассоциаций. Приводим их вместе с номерами соответствующих кластеров ординационной диаграммы (см. рисунок): *Menyanthes trifoliata* + *Carex chordorhiza* (3,7 – две субассоциации), *Equisetum fluviatile* + *Naumburgia thyrsoflora* (4), *Carex lasiocarpa* + *Equisetum fluviatile* (5), *Carex acuta* + *Comarum palustre* (1,2 – две субассоциации), *Comarum palustre* + *Carex diandra* (6), *Phragmites australis* – *Carex rostrata* (10), *Carex aquatilis* – *Warnstorfia fluitans* (8), *Carex rostrata* + *Equisetum fluviatile* (9), *Nymphaea candida* – *Carex lasiocarpa* (11). Формат данной статьи не позволяет представить их видовой состав полностью, поэтому мы приводим наиболее часто встречаемые виды с классами константности III–V (см. таблицу).

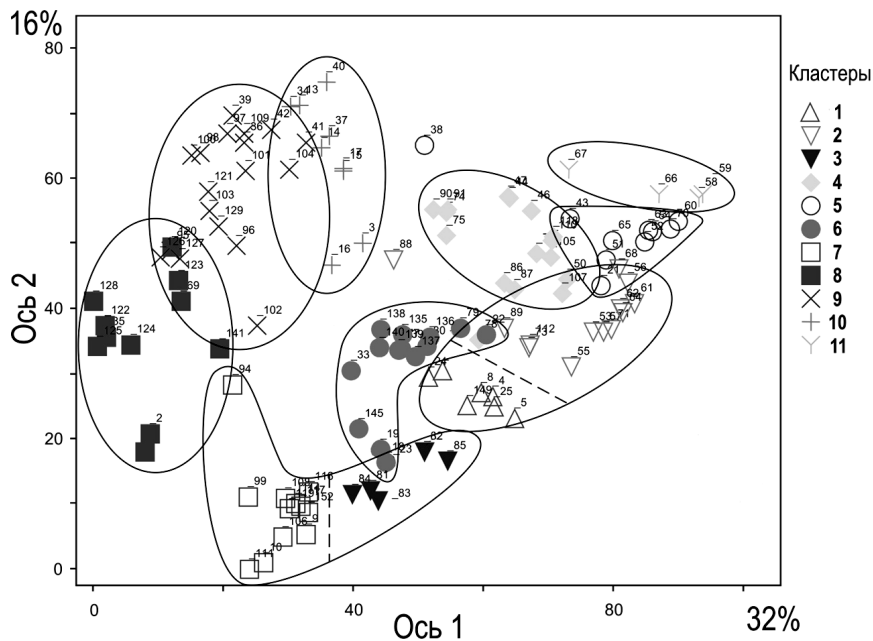


## Ассоциации травяных сообществ приозерных болот Южной Карелии

ЭЦГ	Ассоциация	<i>Menyanthes trifoliata</i> + <i>Carex chordorrhiza</i>	<i>Equisetum fluviatile</i> + <i>Naumburgia thyrsiflora</i>	<i>Carex lasiocarpa</i> + <i>Equisetum fluviatile</i>	<i>Carex acuta</i> + <i>Comarum palustre</i>	<i>Comarum palustre</i> + <i>Carex diandra</i>	<i>Phragmites australis</i> + <i>Carex rostrata</i>	<i>Carex aquatilis</i> + <i>Warnstorfia fluitans</i>	<i>Carex rostrata</i> + <i>Equisetum fluviatile</i>	<i>Nymphaea candida</i> + <i>Carex lasiocarpa</i>
	Число описаний	20	17	10	17	14	9	11	18	4
	Видовое богатство	55	41	30	34	45	43	46	38	14
	Видовая насыщенность	13	8	8	8	13	14	14	10	8
	Количество видов с III–V классами константности	7	5	5	6	11	11	15	8	8
4	<i>Warnstorfia fluitans</i>	r		r <sup>+</sup>		r <sup>+</sup>		III <sup>2</sup>	r <sup>+</sup>	
5	<i>Carex lasiocarpa</i>	IV <sup>1</sup>	I <sup>+</sup>	V <sup>4</sup>	II <sup>+</sup>	II <sup>1</sup>	III <sup>+</sup>	r <sup>+</sup>	r <sup>+</sup>	V <sup>2</sup>
5	<i>Carex rostrata</i>	III <sup>1</sup>	II <sup>1</sup>	II <sup>1</sup>	II <sup>+</sup>	V <sup>1</sup>	V <sup>1</sup>	III <sup>2</sup>	V <sup>4</sup>	III <sup>1</sup>
7	<i>Warnstorfia exannulata</i>				r			r <sup>1</sup>	III <sup>1</sup>	
8	<i>Carex chordorrhiza</i>	IV <sup>1</sup>	r <sup>+</sup>	III <sup>1</sup>	I <sup>+</sup>	IV <sup>+</sup>	I <sup>+</sup>	II <sup>+</sup>		III <sup>+</sup>
8	<i>Equisetum fluviatile</i>	V <sup>1</sup>	V <sup>4</sup>	V <sup>2</sup>	V <sup>1</sup>	V <sup>1</sup>	II <sup>+</sup>	V <sup>+</sup>	V <sup>1</sup>	V <sup>1</sup>
8	<i>Menyanthes trifoliata</i>	V <sup>4</sup>	III <sup>1</sup>	III <sup>1</sup>	III <sup>1</sup>	V <sup>2</sup>	II <sup>1</sup>	r <sup>+</sup>		II <sup>1</sup>
8	<i>Utricularia intermedia</i>	III <sup>1</sup>	II <sup>1</sup>	IV <sup>1</sup>	r	I <sup>+</sup>	II <sup>+</sup>		I <sup>+</sup>	V <sup>1</sup>
9	<i>Caltha palustris</i>	II <sup>+</sup>	I <sup>+</sup>		I <sup>+</sup>	r <sup>+</sup>	I <sup>+</sup>	IV <sup>+</sup>	II <sup>+</sup>	
9	<i>Phragmites australis</i>	r	II <sup>1</sup>	I <sup>1</sup>			V <sup>5</sup>	r <sup>+</sup>	II <sup>1</sup>	
9	<i>Calliergon cordifolium</i>	II <sup>+</sup>	r <sup>2</sup>		II <sup>+</sup>	r <sup>+</sup>	II <sup>+</sup>	III <sup>1</sup>	II <sup>+</sup>	
10	<i>Salix cinerea</i>	I <sup>+</sup>				I <sup>+</sup>	III <sup>+</sup>	r <sup>+</sup>		
10	<i>Salix lapponum</i>	I <sup>+</sup>		r <sup>+</sup>	r	I <sup>1</sup>	I <sup>+</sup>	III <sup>+</sup>	I <sup>+</sup>	
10	<i>Salix phylicifolia</i>					I <sup>+</sup>	II <sup>+</sup>	III <sup>+</sup>	I <sup>+</sup>	
10	<i>Calamagrostis neglecta</i>	II <sup>+</sup>	r <sup>1</sup>		II <sup>+</sup>	IV <sup>1</sup>	III <sup>+</sup>	II <sup>+</sup>	II <sup>+</sup>	
10	<i>Carex acuta</i>	II <sup>+</sup>	r <sup>+</sup>	II <sup>+</sup>	V <sup>4</sup>	II <sup>1</sup>	IV <sup>1</sup>	III <sup>1</sup>	IV <sup>1</sup>	II <sup>+</sup>
10	<i>Carex aquatilis</i>	I <sup>+</sup>		r <sup>+</sup>	I <sup>+</sup>	r <sup>+</sup>	II <sup>+</sup>	V <sup>4</sup>	IV <sup>1</sup>	III <sup>1</sup>
10	<i>Carex diandra</i>		I <sup>+</sup>		II <sup>1</sup>	IV <sup>1</sup>	II <sup>+</sup>			
10	<i>Carex vesicaria</i>				II <sup>+</sup>	r <sup>+</sup>		IV <sup>1</sup>	II <sup>+</sup>	
10	<i>Juncus filiformis</i>				r	I <sup>+</sup>		III <sup>+</sup>	II <sup>+</sup>	
10	<i>Comarum palustre</i>	IV <sup>1</sup>	IV <sup>1</sup>	II <sup>+</sup>	V <sup>2</sup>	V <sup>4</sup>	V <sup>3</sup>	IV <sup>1</sup>	IV <sup>1</sup>	
10	<i>Galium palustre</i>	II <sup>+</sup>	III <sup>+</sup>		IV <sup>+</sup>	III <sup>+</sup>	III <sup>+</sup>	IV <sup>1</sup>	II <sup>+</sup>	
10	<i>Naumburgia thyrsiflora</i>	II <sup>1</sup>	IV <sup>1</sup>	I <sup>+</sup>	III <sup>1</sup>	V <sup>+</sup>	V <sup>+</sup>	V <sup>+</sup>	IV <sup>+</sup>	
10	<i>Thyselium palustre</i>	II <sup>+</sup>	II <sup>+</sup>		II <sup>+</sup>	III <sup>+</sup>	II <sup>+</sup>			
11	<i>Epilobium palustre</i>	r				II <sup>+</sup>	III <sup>+</sup>	r <sup>+</sup>		
14	<i>Cicuta virosa</i>	I <sup>+</sup>	II <sup>+</sup>		I <sup>+</sup>	III <sup>+</sup>	II <sup>+</sup>			
14	<i>Eleocharis palustris</i>				r			III <sup>+</sup>	IV <sup>+</sup>	
14	<i>Lemna trisulca</i>						III <sup>2</sup>			
14	<i>Nymphaea candida</i>		r <sup>+</sup>	II <sup>+</sup>				r <sup>+</sup>		V <sup>4</sup>
14	<i>Potamogeton nitens</i>	II <sup>+</sup>		r <sup>+</sup>						V <sup>1</sup>

Примечание. Представленность вида в ассоциации описывается двумя характеристиками: римскими цифрами обозначается класс встречаемости (константности) вида, арабскими – класс его среднего обилия. Очень редкую встречаемость принято обозначать буквой г, очень малое обилие – знаком +.

Размещение растительных группировок в экологическом пространстве представлено на ординационной диаграмме. Ассоциации выделены замкнутыми линиями. Наряду с этим намечено деление отдельных ассоциаций на субассоциации. Последние отграничиваются друг от друга прямой прерывистой линией. Ось 1, по-видимому, соответствует экологическому фактору «проточность» (нагрузка по Сьеренсену – 32 %), а ось 2 – фактору «влажность» (нагрузка по Сьеренсену – 16 %). Невысокая суммарная нагрузка на две оси является отражением того, что травяные сообщества в совокупности образуют незначительный градиент вдоль экологических факторов.



Ординационная диаграмма распределения описаний в экологическом пространстве

Ассоциация *Equisetum fluviatile* + *Naumburgia thyrsoiflora* (синоним – *Equisetum fluviatilis* [4]) выделена на основе 17 описаний. Предпочитает сильно обводненные участки болот с УБГВ от +15 до +50 см. В целом доминирует хвощ, также часто представлены *Comarum palustre* и *Naumburgia thyrsoiflora*. Остальные виды встречаются единично и не играют значимой роли в сообществе. Они скорее являются приспособленцами, способными переносить экстремальные условия обводнения. Представлена на болотах у Габозера.

Ассоциация *Carex lasiocarpa* + *Equisetum fluviatile* (синоним – *Caricetum lasiocarpae* [4]) выделена на основе обработки 10 описаний. Обводненность незначительная, УБГВ – от 0 до +10 см. Сильным доминантом является *C. lasiocarpa*, содоминирует *E. fluviatile*. Остальные виды играют слабую ценотическую роль. Представлена на болотах Нижнего Падозера, Логмозера и Габозера.

Ассоциация *Carex acuta* + *Comarum palustre* (синоним – *Carex acuta* – *Comarum palustre* [3])

Приведем краткую характеристику выделенных синтаксонов.

Ассоциация *Menyanthes trifoliata* + *Carex chordorhiza* выделена на основе 20 описаний. Она поддерживает среднюю обводненность, связанную с сезонными колебаниями водоемов. УБГВ варьирует от 0 до +25 см. Для ассоциации в целом характерно доминирование видов 8 ЭЦГ, что и отражено в ее названии. Внутри нее намечено деление на две субассоциации, занимающие различные экологические ниши, что довольно четко выражено на ординационной диаграмме. Ассоциация выделена на основе описаний, выполненных на болотах у Нижнего Падозера, Логмозера и Габозера.

выделена на основе 17 описаний. Обводненность незначительная, УБГВ – от 0 до +5 см. Сильный доминант – *C. acuta*. Содоминантами являются *C. palustre*, *E. fluviatile*. Предварительно намечено деление на две субассоциации, однако для обоснования этого необходим дальнейший сбор материала. Широко представлена на болотах у озер Верхнего и Нижнего Падозера, Логмозера и Габозера.

Ассоциация *Comarum palustre* + *Carex diandra* выделена на основе 14 описаний. УБГВ – от 0 до 5 см. В целом видно значительное сходство с ассоциацией *Menyanthes trifoliata* + *Carex chordorhiza*. Так же широко представлены виды 8 ЭЦГ, однако к этому добавляется широкая представленность 10 ЭЦГ и наличие индикаторного вида *Carex diandra*. Представлена на болотах у озер Верхнего и Нижнего Падозера, Логмозера.

Ассоциация *Phragmites australis* – *Carex rostrata* выделена на основе 9 описаний. УБГВ варьирует от +5 до +60 см. Сильным доминантом явля-

ется *P. australis*, субдоминантами – *C. ostrata* и *Comarum palustre*. Высокое проективное покрытие дает *Lemna trisulca*, но она не выполняет ценозообразующей роли, и поэтому скорее должна быть отнесена к видам-приспособленцам. Широко представлена на болоте у Логмозера.

Ассоциация *Carex aquatilis* – *Warnstorfia fluitans* выделена на основе 11 описаний. УБГВ варьирует от +10 до +30 см. Доминантом является *C. aquatilis*, которая «тянет» за собой блок видов сходной экологии (10 ЭЦГ). Диагностическим видом является представитель гипновых мхов *W. fluitans*. Представлена главным образом на болотах Габозера, однако часть описаний выполнена на болотах у Логмозера и Нижнего Падозера.

Ассоциация *Carex rostrata* + *Equisetum fluviatile* выделена на основе 18 описаний. УБГВ колеблется от 10 до 35 см. Доминируют *C. rostrata* и *E. fluviatile*. В субдоминантном положении находится ряд высококонстантных, но малообильных видов различной экологии. Ассоциация представлена на болотах у Габозера и Логмозера.

Ассоциация *Nymphaea candida* – *Carex lasiocarpa* предварительно выделена по 4 описаниям. В отличие от описанных ассоциаций, в ней представлены гидрофитные диагностические виды, поэтому ее положение в кластерной диаграмме отличается. По видовому составу данный синтаксон занимает промежуточное положение между водной и болотной растительностью. Ассоциация представлена на болоте у Габозера.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клюкина Е. А. Геоботаническая характеристика озер Восточного побережья Онежского озера // Водные ресурсы Карелии и их использование. Петрозаводск, 1970. С. 173–184.
2. Корчагин А. А. Видовой состав растительных сообществ и методы его изучения // Полевая геоботаника. Т. 3. Л.: Изд-во АН СССР, 1964. С. 39–62.
3. Кузнецов О. Л. Тополого-экологическая классификация растительности болот Карелии: (Омбротрофные и олиготрофные сообщества) // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2005. Вып. 8. С. 15–46.
4. Кузнецов О. Л., Дьячкова Т. Ю., Грабовик С. И. Болота // Инвентаризация и изучение биологического разнообразия на территории Заонежского полуострова и Северного Приладожья. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 71–83.
5. Раменская М. Л. Луговая растительность Карелии. Петрозаводск: Гос. изд-во КАССР, 1958. 400 с.
6. Распопов И. М. Высшая водная растительность больших озер Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1985. 197 с.
7. Фрейндлинг А. В. Высшая водная растительность // Инвентаризация и изучение биологического разнообразия на территории Заонежского полуострова и Северного Приладожья. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 165–166.
8. Hill M. O., Gauch N. G. Detrended correspondence analysis: an improved ordination technique // Vegetatio. 1980. Vol. 42. P. 47–58.

**ЛЕОНИД ПАВЛОВИЧ РЫЖКОВ**доктор биологических наук, профессор кафедры зоологии и экологии, Петрозаводский государственный университет  
*rlp@petsu.ru***НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА АРТЕМЬЕВА**младший научный сотрудник лаборатории экологических проблем Севера, Петрозаводский государственный университет  
*artem@karelia.ru***МАРИНА АНАТОЛЬЕВНА КАНСКАЯ**лаборант лаборатории экологических проблем Севера, Петрозаводский государственный университет  
*rlp@petsu.ru*

### ТОКСИЧНОСТЬ ХРОМА ТРЕХВАЛЕНТНОГО ДЛЯ *DAPHNIA MAGNA* STRAUS

В статье приведены данные о влиянии трехвалентного хрома на *Daphnia magna*, которые являются индикатором загрязнения среды тяжелыми металлами. Установлено, что хром воздействует на плодовитость, рост и другие функции ракообразных. Определены максимально допустимые концентрации хрома для дафний.

Ключевые слова: тяжелые металлы, трехвалентный хром, концентрация, токсичность, плодовитость, функциональная нагрузка

Металлы являются одним из главных факторов современного производства. Извлечение металлов из земных недр и использование во всех сферах деятельности сопровождается их искусственным рассеиванием в биосфере.

Особенностью данных веществ как загрязнителей является устойчивость в водной среде. Они не подвергаются химической деградации, а перераспределяются между абиотическими и биотическими компонентами, увеличивая свою концентрацию при переходе по трофическим цепям [7]. Поэтому проблема изучения устойчивости гидробионтов к действию возрастающих концентраций тяжелых металлов в условиях прогрессирующего антропогенного воздействия на гидросферу сохраняет свою актуальность.

Соединения многих металлов являются неотъемлемой частью растительных и животных организмов, регулируя биохимические процессы и физиологические функции [2], [9]. Однако при избыточном поступлении металлы проявляют токсичность, выступая в качестве ингибиторов ферментативных реакций. То есть, с одной стороны, тяжелые металлы и их соединения могут выступать как биоэссенциальные, а с другой – как токсичные загрязняющие вещества.

Основными источниками поступления хрома в окружающую среду являются горнодобывающие комплексы и предприятия энергетики. При сжигании топлива, эксплуатации месторождений полиметаллических руд происходит техногенное рассеивание металла с атмосферным переносом, поверхностным гидрохимическим стоком, в результате чего хром загрязняет верхние гумусовые горизонты почвы, накапливается в донных отложениях бессточных водоемов.

© Рыжков Л. П., Артемьева Н. В., Канская М. А., 2011

Большая часть Карелии относится к биогеохимической провинции с пониженным содержанием хрома, однако его количество в различных породах колеблется в очень широких пределах – от 30 до 2850 мг/кг, в почвах – от 30–40 до 150–200 мг/кг [10], [13].

В настоящее время концентрации хрома в среде не вызывают опасений. Однако постепенно происходит увеличение его поступления в биосферу и добавление к естественному фону. Только за 1 год в сбросах петрозаводской ТЭЦ масса хрома возросла в 2 раза (с 1,6 кг в 2005 году до 3,5 кг в 2006 году) [4]. Отмечается увеличение содержания хрома в донных отложениях Онежского и Ладожского озер, в карьерных водах Костомукшского ГОКа [11]. Согласно литературным данным, эмиссия хрома из естественных источников превышает антропогенную [14], поэтому потенциально опасным очагом накопления хрома может стать территория месторождения и разработки хромитов в Пудожском районе [10]. Извлеченный из недр, хром будет постепенно распространяться из импактной зоны и, включаясь в природные циклы, нарушать естественные процессы в экосистемах. Таким образом, возникла необходимость в проведении исследований по оценке токсичности хрома на примере экспериментального отравления планктонного ветвистоусого рачка *Daphnia magna* Straus, обладающего высокой чувствительностью к воздействию тяжелых металлов.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты по изучению токсичности хрома проводили в соответствии с общепринятой методикой воднотоксикологических иссле-

дований [6], [12]. Токсичность трехвалентного хрома в виде кристаллогидрата  $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  исследовали при острой (96 часов) и хронической экспозиции (60 суток) на серии поколений лабораторной культуры *Daphnia magna* Straus (исходное – третье поколение). Продолжительность опытов с каждой генерацией – 25 суток. Плотность посадки рачков в острых опытах – 10 экз. на 100 мл, в хронических – 7 экз. на 300 мл среды при трехкратной повторности. Кормом для дафний служили одноклеточные зеленые водоросли р. *Scenedesmus*, выращенные по стандартной методике. Опыты проводились в лабораторных условиях при температуре 18–22 °С. В качестве контрольной и разбавляющей использовали дехлорированную водопроводную воду. Рабочие растворы (концентрации) готовили путем добавления к воде в возрастающих количествах концентрированного «маточного» раствора вещества. Замену опытных сред на свежеприготовленные проводили с учетом стабильности вещества, но не реже 2 раз в неделю.

При оценке токсичности препарата для дафний учитывали выживаемость, параметры воспроизводства, линейный рост, физиологическое состояние ракообразных по системе Л. А. Лесникова [5]. Кроме того, использовали метод функциональной нагрузки [3], для чего опытных и интактных самок 1, 2 и 3-й генераций в конце хронической экспозиции помещали в кислую среду (рН = 4,5) и регистрировали сроки элиминации.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Влияние хлорида трехвалентного хрома на дафний изучали в диапазоне концентраций 0,01–100 мг/л. При 25 мг/л и более токсикант был остро токсичен для ракообразных, расчетная медианная летальная концентрация  $\text{LC}_{50}$  составила ~19 мг/л. Зависимость времени реагирования подопытных от концентрации хлорида хрома с высоким уровнем значимости ( $p < 0,01$ ) описывалась уравнением регрессии  $y = (-2,0) + 4,9/x$ .

При хроническом воздействии толерантность рачков к хлориду хрома на протяжении 4 последовательных поколений постепенно снижалась. Самки исходного поколения ( $F_0$ ) были относительно устойчивы к присутствию вещества в среде в количествах 0,01–0,32 мг/л; при более высоких концентрациях к концу экспозиции выживаемость рачков заметно снижалась и при максимальной исследованной концентрации 10,24 мг/л составила 24 % (в контроле – 91 %). Рачки первого поколения ( $F_1$ ), как и исходного ( $F_0$ ), сохраняли высокую устойчивость к реагенту в градиенте концентраций 0,01–0,32 мг/л, однако при увеличении концентрации от 0,64 до 10,24 мг/л они полностью элиминировали в период между 7-ми и 20-ми сутками опыта. Дафнии второго поколения ( $F_2$ ) полностью выживали

при концентрации 0,16 мг/л и менее, а в третьем поколении ( $F_3$ ) их жизнеспособность соответствовала контрольному уровню только при 0,01–0,08 мг/л токсиканта в среде.

Репродукция является наиболее зависимой от неблагоприятных воздействий функцией организма. У дафнийд полость выводковой сумки открыта, эмбрионы не защищены от влияния среды, что является причиной возникновения различных нарушений в развитии яиц и зародышей.

Повреждающее воздействие хлорида хрома на размножение дафний отмечалось нами на протяжении всего эксперимента. В максимальной исследованной концентрации 10,24 мг/л в исходном поколении наступление половозрелости у самок и вымет первой молодежи задерживались по сравнению с контролем на 4 и 6 суток соответственно. Рождение мертвой молодежи и абортывание яиц в возрастающих количествах регистрировали во всех 4 поколениях при превышении в среде концентрации 0,16 мг/л. Результатом описанных нарушений репродукции явилось прогрессирующее в поколениях ( $F_0 \rightarrow F_3$ ) снижение реальной плодовитости. Устойчивое статистически достоверное ( $p = 0,05$ ,  $T_{\text{крит.}} = 2,78$ ) уменьшение среднесуточной плодовитости в исходном поколении отмечали при 1,28 мг/л хлорида хрома, в 1-м поколении – при 0,64 мг/л, во 2-м – при 0,32 мг/л, в 3-м – при 0,16 мг/л (рис. 1). В целом угнетающее воздействие хрома на фактическую плодовитость дафний было велико, достоверно и варьировало в поколениях от 92 до 94 % ( $\eta$ ).

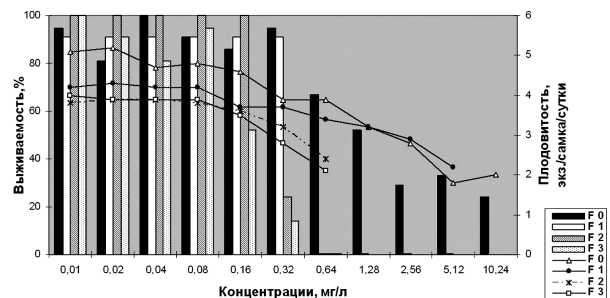


Рис. 1. Влияние различных концентраций хлорида хрома  $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  на выживаемость (гистограммы) и плодовитость (графики) дафний четырех поколений  $F_0 \rightarrow F_3$

Отрицательное влияние токсиканта на метаболизм планктонов отчетливо проявилось в концентрациях 0,16 мг/л и более. У подопытных снижалась активность питания, нарушался процесс переваривания пищи, окраска содержимого кишечника приобретала неестественный охристый цвет. В результате в этих средах у дафний исходного → третьего поколений сокращалось количество депонированного жира, а у самок 2-го и 3-го поколений при 0,32 мг/л и более жир практически отсутствовал.

При воздействии на организм неблагоприятных факторов в первую очередь нарушается

пластический обмен, что приводит к морфологическим изменениям в виде уменьшения размеров [14]. Устойчивая тенденция к сокращению линейных размеров дафний прослеживалась нами в широком диапазоне концентраций  $\text{CrCl}_3$  (см. таблицу). Причем если в исходном поколении значимое уменьшение длины тела рачков регистрировали при минимальном содержании хлорида хрома 1,28 мг/л, то в третьем поколении эта концентрация была в 8 раз меньше и составляла 0,16 мг/л. Корреляционная связь между концентрацией токсиканта и длиной рачков возрастала в поколениях: коэффициенты корреляции ( $r$ ) составляли соответственно -0,74 в исходном, -0,93 – в 1-м, -0,99 – во 2-м и 3-м поколениях.

Влияние различных концентраций хлорида хрома  $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  на линейные размеры (мм) *Daphnia magna*

Концентрация, мг/л	Поколение							
	исходное ( $F_0$ )		первое ( $F_1$ )		второе ( $F_2$ )		третье ( $F_3$ )	
	$M \pm m$	t	$M \pm m$	t	$M \pm m$	t	$M \pm m$	t
Контроль	4,04 ± 0,03	–	3,74 ± 0,04	–	3,73 ± 0,03	–	3,55 ± 0,04	–
0,01	4,05 ± 0,03	0,2	3,76 ± 0,04	0,4	3,74 ± 0,03	0,2	3,56 ± 0,04	0,2
0,02	4,06 ± 0,03	0,5	3,76 ± 0,04	0,4	3,72 ± 0,03	0,2	3,56 ± 0,04	0,2
0,04	4,02 ± 0,03	0,5	3,75 ± 0,04	0,2	3,74 ± 0,03	0,2	3,53 ± 0,04	0,4
0,08	4,05 ± 0,03	0,2	3,74 ± 0,04	0,0	3,75 ± 0,03	0,5	3,55 ± 0,04	0,0
0,16	4,03 ± 0,03	0,2	3,75 ± 0,04	0,2	3,70 ± 0,04	0,6	3,45 ± 0,03	2,0*
0,32	4,02 ± 0,03	0,5	3,73 ± 0,04	0,2	3,57 ± 0,04	3,8*	3,41 ± 0,04	2,5*
0,64	4,00 ± 0,03	0,9	–	–	–	–	–	–
1,28	3,87 ± 0,04	3,4*	–	–	–	–	–	–
2,56	3,85 ± 0,04	3,8*	–	–	–	–	–	–
5,12	3,75 ± 0,03	6,8*	–	–	–	–	–	–
10,24	3,70 ± 0,05	5,7*	–	–	–	–	–	–

Примечание. \* – статистически достоверное отклонение от контроля при  $p < 0,05$ ,  $t_{\text{крит.}} = 1,96$ .

Возрастание токсического эффекта отражает накопление функциональных повреждений. При длительном воздействии микроконцентраций отравляющих веществ снижается адаптационная способность организма при стрессовых ситуациях, например при резком изменении условий среды проявляются скрытые последствия интоксикации.

Рачков 1, 2 и 3-го поколений по завершении хронического эксперимента с хлоридом хрома помещали в кислые среды с  $\text{pH} = 4,5$ . Реакция дафний из концентраций 0,01–0,08 мг/л была сравнима с контролем: во всех трех поколениях рачки проявили равную устойчивость, выживая в кислой среде в течение 5 суток (рис. 2). Подопытные из концентраций 0,16 и 0,32 мг/л оказались менее устойчивыми к закислению: время жизни в поколениях ( $F_1 \rightarrow F_3$ ) сокращалось с 4 суток в первом до 3 и 2 суток соответственно во втором и третьем поколении, что является признаком накопления токсического эффекта (функциональной кумуляции). Расчет ха-

рактеристик развивающегося токсического эффекта по отношению вероятностных смертельных концентраций хрома ( $\text{ЛК}_{50}$  и  $\text{ЛК}_{100}$ ) в острых и хронических экспериментах позволил определить величину коэффициента кумуляции – 52,2, которая указывает на умеренную степень кумуляции трехвалентного хрома у дафний [8].

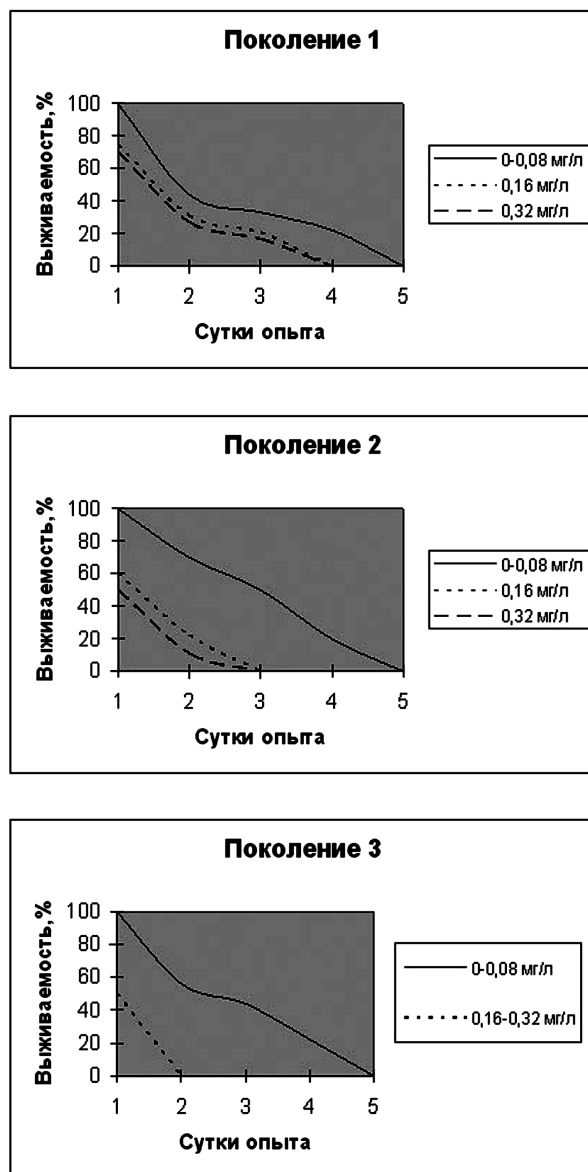


Рис. 2. Влияние физиологической нагрузки ( $\text{pH} = 4,5$ ) на *Daphnia magna* при интоксикации различными концентрациями хлорида хрома

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют заключить, что порогом токсичности хлорида трехвалентного хрома для дафний является концентрация 0,16 мг/л, а максимально допустимой концентрацией – 0,08 мг/л (в пересчете на ион  $\text{Cr}^{3+}$  – 0,03 и 0,015 мг/л соответственно). Экспериментально показано, что хром способен

к функциональной кумуляции, поэтому в поколениях дафний регистрировали снижение устойчивости к повреждающему воздействию хрома – отклонения в уровне основных биологических процессов (рост, размножение) у потомства не только сохранялись, но и выявлялись по сравнению с исходными особями в менее концентрированных растворах.

В зоопланктонных сообществах одними из первых поглощают и максимально накапливают

потоки поллютантов фильтраторы – ветвистое усье ракообразные, быстро при этом отмирая [1]. Поэтому поступление в водоем соединений хрома в экологически значимых количествах будет не только изменять структуру ценозов, но и нарушать процессы самоочищения, что весьма опасно в условиях северных олигогумозных водоемов, обладающих минимальной буферной емкостью по отношению к металлам и не способных к эффективной природной детоксикации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брагинский Л. П. Принципы классификации и некоторые механизмы структурно-функциональных перестроек пресноводных экосистем в условиях антропогенного пресса // Гидробиологический журнал. 1998. Т. 34. № 6. С. 72–94.
2. Будников Г. К. Тяжелые металлы в экологическом мониторинге водных систем // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 5. С. 23–29.
3. Волков И. В. Биотическая функциональная нагрузка как тест в водной токсикологии // Проблемы водной токсикологии. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1988. С. 7–13.
4. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2006 году // Министерство сельского, рыбного хозяйства и экологии Республики Карелия. Петрозаводск, 2007. 308 с.
5. Лесников Л. А. Методика оценки влияния воды из природных водоемов на *Daphnia magna* // Методики биологических исследований по водной токсикологии. М.: Наука, 1971. С. 157–162.
6. Лесников Л. А. Разработка нормативов допустимого содержания вредных веществ в воде рыбохозяйственных водоемов // Сборник научных трудов ГосНИОРХ. Л., 1979. Вып. 144. С. 3–41.
7. Линник П. Н., Набиванец Б. И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 270 с.
8. Методические рекомендации по установлению эколого-рыбохозяйственных нормативов (ПДК и ОБУВ) загрязняющих веществ для воды и водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М.: ВНИРО, 1998. 145 с.
9. Никаноров А. М., Жулидов А. В. Биомониторинг металлов в пресноводных экосистемах. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 312 с.
10. Синькевич Е. И. Некоторые особенности геохимической обстановки в Фенноскандии и опасность загрязнения хромом почвенного покрова Карелии // Биологические основы изучения, освоения и охраны животного и растительного мира, почвенного покрова Восточной Фенноскандии: Тез. докл. междунар. конф. 6–10 сентября 1999 г. Петрозаводск, 1999. С. 222.
11. Современное состояние водных объектов Республики Карелия. Петрозаводск, 1998. 188 с.
12. Строганов Н. С. Методика определения токсичности водной среды // Методики биологических исследований по водной токсикологии. М.: Наука, 1971. С. 14–60.
13. Тойкка М. А. Микроэлементы в биосфере // Пути адаптации организмов в условиях Севера. Петрозаводск, 1978. С. 62–68.
14. Филенко О. Ф. Водная токсикология. М.: Изд-во МГУ, 1988. 154 с.

ОЛЬГА КАМИЛЬЕВНА НУЖНОВА

аспирант кафедры биологии и химии факультета естественного, физической культуры и безопасности жизнедеятельности, Мурманский государственный гуманитарный университет  
nujnovaolga84@mail.ru

## ОСОБЕННОСТИ РОСТА БРЮКВЕННИЦЫ *PIERIS NAPI* (LEPIDOPTERA, PIERIDAE) В УСЛОВИЯХ НЕМОРАЛЬНОЙ ЗОНЫ РОССИИ

Рассматриваются особенности личиночного роста брюквенницы *Pieris napi* (Linnaeus, 1758) в условиях неморальной зоны России. Получены уравнения регрессии, описывающие динамику роста гусениц самцов и самок. Выявлены различия в скорости роста личинок обоих полов. Показано, что масса самцов превышает массу самок на разных стадиях жизненного цикла. В ходе метаморфоза происходит уменьшение массы тела особей.

Ключевые слова: брюквенница, преимагинальные стадии, рост, неморальная зона

Брюквенница (*Pieris napi* Linnaeus, 1758) – полиморфный вид, представлен достаточно сложным комплексом форм, таксономический статус которых окончательно не определен [8]. Ряд авторов, точку зрения которых мы разделяем, рассматривают *P. napi* в широком смысле – как надвид, ареал распространения которого на территории России охватывает европейскую часть, Кавказ, Урал, Сибирь, Дальний Восток [2], [6], [7]. В зависимости от физико-географических условий обитания брюквенница имеет моновольгинный, бивольгинный или поливольгинный жизненный цикл с зимовкой на стадии куколки. Самка откладывает яйца по одному на нижнюю сторону листа или стебель растений из семейств крестоцветные (Brassicaceae Burnett) или резедовые (Resedaceae S. F. Gray); фактическая плодовитость составляет до 450 яиц. Гусеницы появляются через 4–6 дней и развиваются 2–3 недели, в течение которых линяют 4 раза и проходят 5 личиночных стадий. В условиях неморальной зоны жизненный цикл брюквенницы поливольгинный, лёт имаго наблюдается с марта по октябрь, зимовка куколок длится 4–5 месяцев [2], [7], [13].

Современные исследования, посвященные различным аспектам биологии брюквенницы, проводятся по нескольким направлениям. Одно из них связано с изучением особенностей роста гусениц брюквенницы на разных видах кормовых растений, при этом определяется эффективность питания, темпы роста, продолжительность периода линьки и уровень смертности личинок [2], [13], [17]. В последние годы появились многочисленные публикации по адаптивной значимости монандрии и полиандрии самок брюквенницы в различных климатических условиях, влиянию размеров особей обоих полов на репродуктивный успех популяции [9], [10], [15]. Изучается морфологическая изменчивость имаго данного вида, при этом рассматривается ва-

риабельность размеров и формы крыльев, меланиновых элементов крылового рисунка [8]. Несмотря на достаточно большое число работ по вопросам биологии и экологии брюквенницы, обширность ареала вида обуславливает неравномерную изученность отдельных популяций и недостаток данных о ходе роста и развития в различных экологических условиях.

Цель исследования – анализ особенностей роста брюквенницы летней генерации в условиях неморальной зоны России.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в полевой сезон 2010 года в неморальной зоне России (Карачаево-Черкесская Республика, с. Курджиново, 43°59' с. ш., 40°56' в. д.) – зоне смешанных и широколиственных лесов с умеренно-теплым климатом. В рассматриваемом районе Карачаево-Черкесии среднегодовая температура воздуха составляет +6,5 °С, осадков выпадает 700–800 мм в год [1], средняя температура июня в 2010 году составила +19,6 °С, июля – +21,4 °С.

Объектом исследования явились особи брюквенницы на разных стадиях жизненного цикла: гусеницы, куколки и имаго. Эксперимент проводился в полевых условиях, особи на всех стадиях развития содержались на разнотравно-злаковом лугу, под кроной дерева при небольшом затенении, на высоте 900 м над уровнем моря. Для проведения исследований были собраны побеги гулявника Лёзеля (*Sisymbrium loeselii* L.) – одного из кормовых растений гусениц брюквенницы. Данный вид является широко распространенным представителем семейства крестоцветные на территории Европейской России и встречается повсеместно на Кавказе [4]. Побеги поместили в прозрачные пластиковые сосуды объемом 0,5 л с отверстиями в крышке для поступления воздуха. В утренние часы 13.06.2010 провели отлов самок брюквенницы (N = 40) и каждую особь



поместили в отдельный сосуд с побегами гулявника. Вечером того же дня бабочек выпустили, а листья с отложенными яйцами собрали. Близкие по габитусу растения гулявника Лёзеля ( $N = 40$ ) с разнотравно-злакового луга пересадили в прозрачные пластиковые контейнеры с почвой объемом 1 л. На каждое растение перенесли яйца, отложенные одной самкой за день.

В первые четверо суток после появления гусениц их не взвешивали и не пересаживали, поскольку при этом можно повредить личинок. На 5-й день каждую гусеницу переместили в индивидуальный прозрачный пластиковый сосуд объемом 0,5 л с отверстиями в крышке для поступления воздуха и с указанием порядкового номера. Сосуды содержали свежие побеги гулявника Лёзеля, основание которых было обернуто во влажную марлю. По мере того как листья высыхали или использовались гусеницами в пищу, растения меняли на свежие, причем корм предлагали в избытке, чтобы исключить возможность влияния недостатка пищи на рост личинок [2]. На 5, 7, 9 и 11-е сутки с начала личиночной стадии в 12 ч. дня гусениц взвешивали на лабораторных весах VM 313 II класса точности.

Сформировавшихся куколок переместили из сосудов в пронумерованные прозрачные пластиковые контейнеры объемом 0,04 л, заполненные мелким гравием. Взвешивание куколок проводили в первые и четвертые сутки после окукливания [13]. Имаго, вышедших из куколок, взвешивали и определяли их пол. Пол гусениц и куколок определен по имаго благодаря использованию непрерывной маркировки сосудов, в которых выращивались особи на всех стадиях жизненного цикла.

Результаты представлены в виде средних величин и стандартных отклонений ( $M \pm S$ ). Смертность особей на разных стадиях жизненного цикла рассчитывали по формуле:

$$q_x = \frac{d_x}{n_x},$$

где  $q_x$  – смертность особей,  $n_x$  – число живых особей в момент учета ( $x$ ),  $d_x$  – число особей, погибших в период между двумя последовательными учетами (в интервале от  $x$  до  $x + 1$ ) [3].

Статистическую значимость различий массы тела особей брюквенницы сравнивали с помощью  $t$ -критерия Стьюдента после проверки данных на нормальность распределения частот [4]. Зависимость массы гусениц от времени их развития аппроксимировали степенным уравнением регрессии, которое оптимально для описания роста личинок бабочек [14]:

$$y = bx^a,$$

где  $y$  – масса тела,  $x$  – день развития гусеницы, а  $b$  и  $a$  – коэффициенты. Для оценки статистической значимости полученных уравнений исполь-

зован дисперсионный анализ линейной регрессии. Сравнение аллометрических коэффициентов – показателей степени в уравнениях регрессии для личинок самцов и самок проведено с помощью  $t$ -критерия Стьюдента [5].

Для гусениц обоих полов рассчитывали скорость роста по формуле:

$$GR = \frac{m_p}{t},$$

где  $GR$  – скорость роста,  $m_p$  – масса особи при окукливании ( $t$ ),  $t$  – продолжительность развития личинки от момента выхода из яйца до окукливания (сутки) [15]. Средние скорости роста гусениц самцов и самок сравнивали с использованием  $t$ -критерия Стьюдента. Корреляционный анализ между показателями массы тела особей брюквенницы на разных стадиях жизненного цикла проводили с использованием коэффициента линейной корреляции Пирсона. Количество самцов и самок, вылетевших в определенный день наблюдения, сравнивали по  $\chi^2$ -критерию [5].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперимент с момента отлова самок брюквенницы до вылета имаго следующей генерации продолжался в течение месяца с 13.06 по 13.07.2010. В первый день эксперимента самками брюквенницы ( $N = 40$ ) отложено 362 яйца (табл. 1). Каждая особь откладывала от 5 до 12 яиц, в среднем  $9 \pm 2$  яйца. Через 6 дней (19.06.2010) из отложенных яиц появились гусеницы, которые развивались 11 суток, за этот период они 4 раза линяли и прошли 5 стадий. При первом подсчете личинок, на 5-е сутки с момента появления, их количество составило 345. Смертность гусениц с 5-х по 7-е сутки достигла 0,041 и к концу личиночной стадии (на 11-е сутки) сократилась до 0,019.

Таблица 1

Изменение количества особей брюквенницы в ходе жизненного цикла в условиях неморальной зоны в 2010 году

Стадия и возраст, x	$n_x$	$d_x$	$q_x$
Гусеницы (5-й день)	345	14	0,041
Гусеницы (7-й день)	331	11	0,033
Гусеницы (9-й день)	320	9	0,028
Гусеницы (11-й день)	311	6	0,019
Куколки (1-й день)	305	3	0,010
Куколки (4-й день)	302	1	0,003
Имаго (1-й день)	301	0	0

Примечание.  $n_x$  – число живых особей в момент учета ( $x$ );  $d_x$  – число особей, погибших в период между двумя последовательными учетами (в интервале от  $x$  до  $x + 1$ );  $q_x$  – смертность особей.

Окукливание гусениц произошло 01.07.2010, всего окуклилось 305 личинок брюквенницы ( $q_x = 0,010$ ), до окончания стадии дожили 302 куколки ( $q_x = 0,003$ ). Стадия куколки у особей обо-

их полов продолжалась 8–12 суток. Вылет имаго происходил ежедневно в течение 5 суток (09.07–13.07.2010) в утренние часы. Появилась 301 бабочка: 156 особей составили самцы, 145 – самки.

Смертность особей была наиболее высокой в начале личиночной стадии, к стадии куколки она значительно уменьшилась. Минимальная смертность выявлена с момента учета куколок на 4-е сутки их развития до стадии имаго (табл. 1). Причинами гибели особей могли быть бактериальные или вирусные заболевания.

Исследование динамики роста гусениц брюквенницы началось на 5-е сутки с момента их появления. В этот день масса личинок самцов и самок составила  $0,005 \pm 0,001$  г (табл. 2). На 11-е сутки, к окончанию личиночной стадии, масса гусениц самцов превосходила их массу при первичном взвешивании в 36 раз, самок – в 33 раза. Показатели массы личинок брюквенницы в динамике аппроксимировали при помощи уравнения степенной функции. Полученные уравнения регрессии для гусениц обоих полов статистически значимы (табл. 3). Кривые роста личинок самцов и самок (рис. 1, 2) свидетельствуют о том, что для гусениц брюквенницы в условиях неморальной зоны характерен быстрый рост. Сравнение аллометрических коэффициентов в уравнениях выявило, что коэффициент *a* больше у личинок самцов, чем у самок, при этом различия степенных коэффициентов статистически значимы ( $t = 2,416$ ;  $\alpha = 0,016$ ). Таким образом, темпы роста самцов выше, чем самок.

Таблица 2

Динамика массы тела самцов (N = 156) и самок (N = 145) брюквенницы на разных стадиях жизненного цикла в 2010 году

Стадия развития	Пол	Показатель					t	α
		M	S	x <sub>min</sub>	x <sub>max</sub>	CV		
Гусеницы (5-е сутки)	самцы	0,005	0,001	0,003	0,007	14,96	1,210	0,227
	самки	0,005	0,001	0,003	0,007	14,14		
Гусеницы (7-е сутки)	самцы	0,026	0,004	0,016	0,035	13,89	16,461	< 0,001
	самки	0,021	0,002	0,013	0,027	11,75		
Гусеницы (9-е сутки)	самцы	0,072	0,008	0,048	0,088	11,56	10,487	< 0,001
	самки	0,063	0,006	0,045	0,075	9,33		
Гусеницы (11-е сутки)	самцы	0,178	0,011	0,149	0,207	6,13	13,520	< 0,001
	самки	0,163	0,009	0,140	0,191	5,29		
Куколки (1-е сутки)	самцы	0,157	0,011	0,128	0,188	6,94	11,689	< 0,001
	самки	0,143	0,009	0,122	0,174	6,23		
Куколки (4-е сутки)	самцы	0,154	0,011	0,125	0,184	7,06	11,823	< 0,001
	самки	0,140	0,009	0,119	0,165	6,26		
Имаго	самцы	0,068	0,006	0,053	0,082	9,21	3,531	< 0,001
	самки	0,066	0,006	0,051	0,080	8,93		

Примечание. M – средняя арифметическая; S – стандартное отклонение; x<sub>min</sub> – минимальное значение массы тела, г; x<sub>max</sub> – максимальное значение массы тела, г; CV – коэффициент вариации, %; t – значения t-критерия Стьюдента; α – уровень значимости.

Таблица 3

Коэффициенты и оценка значимости регрессионных уравнений зависимости массы гусениц от дня их развития в условиях неморальной зоны в 2010 году

Пол особей	a	b	R <sup>2</sup>	F	α
Самцы	4,4868	$3,8376 \cdot 10^{-6}$	0,9899	61129,5	< 0,001
Самки	4,4272	$3,8304 \cdot 10^{-6}$	0,9920	71785,5	< 0,001

Примечание. a и b – коэффициенты в степенном уравнении регрессии; R<sup>2</sup> – коэффициент детерминации; F – значения критерия Фишера; α – уровень значимости.

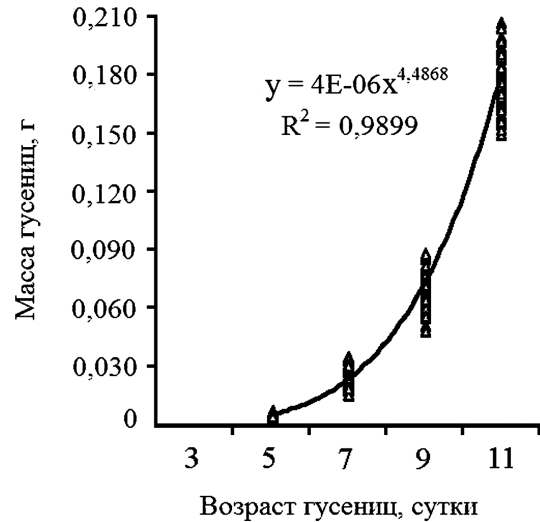


Рис. 1. Динамика массы гусениц самцов брюквенницы в условиях неморальной зоны России в 2010 году

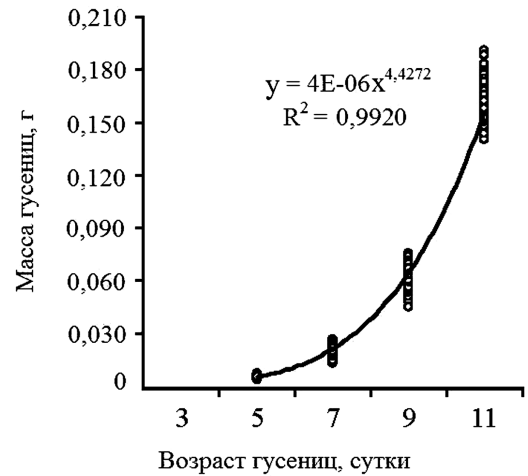


Рис. 2. Динамика массы гусениц самок брюквенницы в условиях неморальной зоны России в 2010 году

Расчет средней скорости роста брюквенницы на личиночной стадии показал, что она достигала  $0,014 \pm 0,001$  г в сутки у гусениц самцов и  $0,013 \pm 0,001$  г в сутки у гусениц самок, данные различия в скорости роста являются статистически значимыми ( $t = 11,689$ ;  $\alpha < 0,001$ ).

Масса куколок также различалась у особей обоих полов (табл. 2). Куколки самцов брюквенницы весили на 0,014 г больше, чем куколки самок как в первые, так и на четвертые сутки. Эти различия аналогичны значениям, полученным для конечной массы гусениц, согласно которым личинки самцов весили больше самок на 0,015 г (табл. 2).

Вылет имаго наблюдался в течение 5 дней. Наибольшее количество особей появилось в первые 3 суток, при этом 09.07–10.07.2010 преобладал вылет самцов, в последующие 3 дня – вылет самок, статистическая значимость этих различий подтверждена с использованием  $\chi^2$ -критерия (рис. 3). Как и на предыдущих стадиях жизненного цикла, у имаго обоих полов выявлены различия массы тела, при этом самцы весили больше самок (табл. 2).

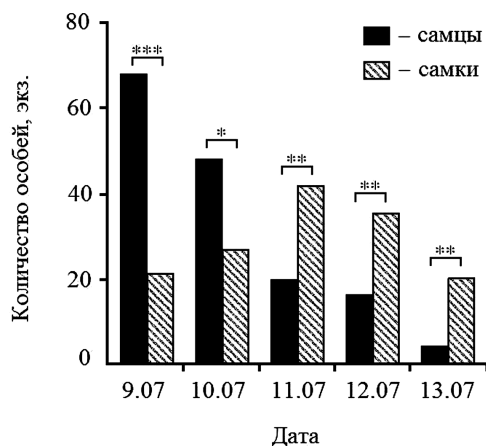


Рис. 3. Динамика появления имаго брюквенницы из куколок в 2010 году: \*\*\* –  $\alpha < 0,001$ ; \*\* –  $\alpha < 0,01$ ; \* –  $\alpha < 0,05$  ( $\chi^2$ -критерий)

При проведении корреляционного анализа выявлена положительная корреляция массы гусениц 5-го возраста и куколок ( $r = 0,986$ ;  $\alpha < 0,001$ ), а также массы куколок и имаго ( $r = 0,900$ ;  $\alpha < 0,001$ ). Полученные данные о взаимосвязи веса особей брюквенницы на разных стадиях жизненного цикла согласуются с результатами исследований Ш. Биссундат и К. Виллунд [10], которые также обнаружили корреляцию между массой куколок и имаго.

Таким образом, в ходе эксперимента выявлено, что в условиях неморальной зоны продолжительность развития гусениц самцов и самок летней генерации брюквенницы не различалась и составила 11 суток; стадия куколки у особей обоих полов длилась от 8 до 12 суток; имаго появлялись ежедневно в течение 5 дней. Согласно литературным данным, в бореальной зоне (окрестности г. Стокгольма, Швеция) различия в продолжительности личиночной стадии у самцов и самок брюквенницы варьировали в зависимости от среднесуточной температуры воздуха и составляли менее 12 ч. (при 20 и 23 °C) или более суток (при 17 °C) [17]. Исследователи полага-

ют, что продолжительность преимагинальных стадий у данного вида в целом и особей каждого пола в частности в значительной степени определяется температурой и фотопериодом. Выявлено, что для летних генераций брюквенницы, развивающихся без диапаузы, характерны незначительные различия в продолжительности личиночной стадии у особей обоих полов, при этом более раннего вылета самцов по сравнению с самками не наблюдается. Напротив, в случае диапаузы у гусениц самок в осенний период развитие менее длительное, чем у гусениц самцов, однако весной на стадии куколки самцы развиваются быстрее и вылетают на 1,5 дня раньше самок [12], [17].

Проведенные исследования позволили установить, что в условиях неморальной зоны средняя скорость роста личинок самцов брюквенницы выше, чем самок, на 8 %. По данным Й. Бергстрёма, в условиях бореальной зоны скорость роста гусениц обоих полов данного вида различалась на 5 % и при этом также была выше у самцов [9]. Ряд исследователей придерживаются мнения, что именно различия в темпах роста личинок разных полов при одинаковой продолжительности их развития объясняют существование полового диморфизма размеров тела у брюквенницы, а также репницы *Pieris rapae* (Linnaeus, 1758) и желтушки луговой *Colias hyale* (Linnaeus, 1758) [11], [12], [16], [17]. Нами выявлено, что в неморальной зоне самцы брюквенницы имеют большую массу тела на стадиях гусеницы, куколки и имаго, чем самки. Рядом авторов получены аналогичные результаты для данного вида на стадии куколки в арктической и бореальной зонах (Финляндия, Швеция) и имаго в бореальной зоне (Швеция) [9], [16], [17]. Брюквенница – один из относительно немногих видов, у которого самцы, как правило, крупнее самок. Исследователи считают, что это явление обусловлено полиандрией самок, и объясняют его исходя из теории конкуренции спермы, указывая на связь репродуктивного успеха с размерами самцов брюквенницы [8], [9], [17]. Предполагается, что отбор благоприятствует появлению у данного вида более крупных самцов, поскольку это связано с целым рядом их преимуществ. Так, более крупные самцы при спаривании передают самке больше спермы и питательных веществ, которые используются для развития оплодотворенных яиц, повышают плодовитость и продолжительность жизни самок, увеличивают временной интервал перед повторным спариванием самок и уменьшают количество их спариваний в течение жизни [10], [16].

Исследования динамики массы тела особей на разных стадиях жизненного цикла выявили ее уменьшение в ходе развития «гусеница – куколка – имаго». Потери от конечной массы гусениц составили у куколок 12 % для особей обоих полов, у имаго – 62 % для самцов и 59 % для самок. На стадии имаго самцы весили на 56 %, самки – на 54 % меньше, чем куколки. Потери

массы тела у особей обоих полов брюквенницы на разных стадиях жизненного цикла различались не более чем на 3 %. У чешуекрылых потери массы тела в процессе метаморфоза неодинаковы и достигают, например, 46 % при окукливании личинок бражника каролинского *Manduca sexta* (Linnaeus, 1763) [11]. Вес тела чешуекрылых при метаморфозе уменьшается, поскольку процессы дифференцировки в ходе формирования новых органов и их систем требуют больших энергетических затрат.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные в условиях неморальной зоны России, показали, что длитель-

ность стадий развития самцов и самок летней генерации брюквенницы не различается. Наиболее высокая смертность отмечена у гусениц, уменьшается к стадии куколки и снижается до минимальных значений к моменту вылета имаго. Самцы брюквенницы имеют более высокую скорость личиночного роста и большую массу тела на всех изученных стадиях жизненного цикла, чем самки. При метаморфозе происходят потери массы тела, различающиеся у особей обоих полов не более чем на 3 %. Масса и размеры тела – важные факторы репродуктивного успеха самцов из различных популяций брюквенницы, позволяющие оплодотворить большее число яиц у большего количества самок [10].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроклиматический справочник по Ставропольскому краю. Ставрополь, 1958. 234 с.
2. Богачева И. А. Факторы, ограничивающие распространение насекомых-филлофагов на Север: случай с брюквенницей и капустницей // Экология. 1997. № 4. С. 293–296.
3. Гиляров А. М. Популяционная экология: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1990. 191 с.
4. Дорофеев В. И. Крестоцветные (Cruciferae Juss.) Российского Кавказа // Turczaninowia. 2003. Т. 6. № 3. С. 5–137.
5. Ивантер Э. В., Коросов А. В. Введение в количественную биологию. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003. 304 с.
6. Львовский А. Л., Моргун Д. В. Булавоусые чешуекрылые Восточной Европы. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2007. 443 с.
7. Некрутенко Ю. П. Дневные бабочки Кавказа: Определитель. Семейства Papilionidae, Pieridae, Satyridae, Danaidae. Киев: Наукова думка, 1990. 216 с.
8. Шкурихин А. О., Ослина Т. С., Захарова Е. Ю. Анализ изменчивости размеров и формы крыльев *Pieris napi* L. и *P. rapae* L. (Lepidoptera: Pieridae) на Среднем и Южном Урале // Экология: от Арктики до Антарктиды: Материалы конф. молодых ученых, 16–20 апреля 2007 г. Екатеринбург: Академкнига, 2007. С. 368–372.
9. Bergström J. The evolution of mating rates in *Pieris napi*. Stockholm: Jannes Snabbtryck Kuvertproffset HB, 2004. 36 p.
10. Bissoondath C. J., Wiklund C. Effect of male body size on sperm precedence in the polyandrous butterfly *Pieris napi* L. (Lepidoptera: Pieridae) // Behavioral Ecology. 1997. Vol. 8. № 5. P. 518–523.
11. Davidowitz G., Nijhout H. F. The physiological basis of reaction norms: the interaction among growth rate, the duration of growth and body size // Integrative and Comparative Biology. 2004. Vol. 44. № 6. P. 443–449.
12. Nylin S., Gotthard K. Plasticity in life-history traits // Annual Review of Entomology. 1998. Vol. 43. № 1. P. 63–83.
13. Ohata M., Furumoto A., Ohsaki N. Local adaptations of larvae of the butterfly *Pieris napi* to physical and physiological traits of two *Arabis* plants (Cruciferae) // Ecological Research. 2010. Vol. 25. № 1. P. 33–39.
14. Tammaru T., Esperk T. Growth allometry of immature insects: larvae do not grow exponentially // Functional Ecology. 2007. Vol. 21. № 6. P. 1099–1105.
15. Välimäki P. Reproductive tactics in butterflies – the adaptive significance of monandry versus polyandry in *Pieris napi*. Oulu: Oulun yliopisto, 2007. 66 p.
16. Wiklund C., Forsberg J. Sexual size dimorphism in relation to female polygamy and protandry in butterflies: A comparative study of Swedish Pieridae and Satyridae // Oikos. 1991. Vol. 60. № 3. P. 373–381.
17. Wiklund C., Nylin S., Forsberg J. Sex-related variation in growth rate as a result of selection for large size and protandry in a bivoltine butterfly (*Pieris napi* L.) // Oikos. 1991. Vol. 60. № 2. P. 241–250.

**ЛАРИСА НИКОЛАЕВНА АББАКУМОВА**  
кандидат медицинских наук, доцент кафедры педиатрии им. проф. И. М. Воронцова, Санкт-Петербургская государственная педиатрическая медицинская академия  
*v-abbakoumov@yandex.ru*

**ТАТЬЯНА ВАЛЕНТИНОВНА ВАРЛАМОВА**  
кандидат медицинских наук, доцент кафедры педиатрии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*varlamova@karelia.ru*

**ЛАРИСА ВЛАДИМИРОВНА КУЗНЕЦОВА**  
кандидат медицинских наук, доцент кафедры педиатрии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*kuznetsov@onego.ru*

### НЕДИФФЕРЕНЦИРОВАННАЯ ДИСПЛАЗИЯ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ У ДЕТЕЙ С САХАРНЫМ ДИАБЕТОМ 1-го ТИПА (проспективное наблюдение)

Наблюдение за 33 детьми с сахарным диабетом 1-го типа проводилось на протяжении 12 лет. Умеренно выраженная дисплазия соединительной ткани выявлена у 54,4 % детей с диабетом, выраженная – у 39,4 %. Коллагенопатия является предрасполагающим фактором в развитии диабета. Однако достоверных различий по тяжести течения диабета в зависимости от степени выраженности дисплазии соединительной ткани не получено.

Ключевые слова: дисплазия соединительной ткани, сахарный диабет 1-го типа, гипермобильность суставов

Многообразие и сложность структуры и функций соединительной ткани предполагает активное участие основных ее элементов в развитии многих заболеваний. В настоящее время пристальное внимание исследователей привлекают недифференцированные формы дисплазии соединительной ткани (ДСТ) у детей, что связано с высокой частотой их распространения, клиническим полиморфизмом и полиорганностью поражений. Установлено, что фоновую ДСТ и ассоциированную патологию необходимо рассматривать как единый процесс, требующий диагностики, лечения и реабилитации пациентов [2], [3], [4], [5], [9], [10], [13]. В своей практической деятельности врачи чаще сталкиваются именно с недифференцированными формами ДСТ [8].

В последнее время в литературе появляются данные о роли экзогенных влияний на дезорганизацию соединительной ткани. Разнообразие клинических проявлений дисплазий можно объяснить как мутацией различных генов, так и действием средовых факторов [12], [17]. Увеличение числа случаев ДСТ, наблюдающееся в настоящее время в общероссийской популяции, связано с патологическими воздействиями, имевшими место в онтогенезе из-за ухудшения экологической обстановки, неадекватного питания, стрессов, а в условиях Севера еще из-за постоянного воздействия холода, гипоксии, измененного фотопериодизма, геомагнитных аномалий [12], [15].

© Аббакумова Л. Н., Варламова Т. В., Кузнецова Л. В., 2011

ДСТ является фоном развития соматических заболеваний и может усугубить течение уже имеющихся. Одним из актуальных заболеваний детского возраста является сахарный диабет 1-го типа (СД 1). Актуальность данной патологии обусловлена высокой заболеваемостью, ранней инвалидизацией и смертностью лиц в молодом возрасте [6], [7], [16]. В литературе практически отсутствуют данные о влиянии ДСТ на течение СД 1.

Целью нашего исследования было изучение возможного влияния дисплазии соединительной ткани на характер течения сахарного диабета у детей.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Группу исследования составили 33 ребенка с СД 1, среди них 25 девочек (75,8 %), 8 мальчиков (24,2 %). Средний стаж заболевания СД 1 был равен  $7,55 \pm 0,55$  года. Срок наблюдения за детьми составил от 10 до 12 лет. В катамнезе течения сахарного диабета было расценено у 5 детей как легкое (15,2 %), у 17 – как среднетяжелое (51,5 %), у 11 – как тяжелое (33,4 %), причем среди лиц с тяжелым течением было 2 летальных исхода во взрослом состоянии.

В исследовании использовался клинико-анамнестический метод с анализом медицинской документации, физикальный метод, инструментально-лабораторное обследование больных. Степень тяжести ДСТ оценивали по критериям Т. Милковска-Димитровой, А. Каркашева в модификации Л. Н. Фоминой [1].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведен анализ анамнеза жизни ребенка до развития сахарного диабета. Результаты изучения семейного анамнеза показали, что у 30,3 % детей наследственность была отягощена по сахарному диабету, у 25 % – по бронхиальной астме, варикозной болезни и артрозам, у ближайших родственников 21 % детей выявлена артериальная гипертония, у 15 % – миопия, артериальная гипотония, ВСД, в 9 % случаев – инфаркт миокарда. При статистическом анализе данных не было выявлено достоверных различий в течении СД 1 в зависимости от семейного анамнеза.

При изучении анамнеза жизни детей с СД 1 нам также не удалось найти каких-либо показателей, достоверно влияющих на течение сахарного диабета. Течение беременности в 32,1 % случаев было нормальное, в 9,1 % случаев отмечалась нефропатия, анемия, токсикоз, угроза выкидыша, в 6,1 % – роды путем кесарева сечения, артериальная гипертония. Среди заболеваний, перенесенных в детстве, в 27 % случаев – частые ОРЗ, в 24 % – атопический дерматит, в 9 % – инфекция мочевыводящих путей, пролапс митрального клапана, скарлатина. При осмотре специалистами детей в дебюте заболевания СД 1 у 21,2 % была выявлена миопия; у 6,1 % – дальнозоркость, ангиопатия сетчатки; у 12,1 % выявлены аденоиды и гиперплазия миндалин; у 12,1 % детей – астеноневротическое состояние; у одного ребенка диагностирована эпилепсия. В 18,2 % случаев у детей (по результатам ФГДС) выявлен хронический гастроэзофагеальный рефлюкс. При УЗИ органов брюшной полости у четверти детей было выявлено диффузное увеличение поджелудочной железы, уплотнение паренхимы, у 9,1 % – признаки ДЖВП, аномалии развития желчного пузыря, диффузные изменения печени, у 6 % – расширение ЧЛС почек. В 18,2 % случаев выявлена гиперплазия щитовидной железы. Лабораторные показатели (биохимические, иммунологические) в дебюте заболевания СД 1 практически не отличались от нормы. В группах детей с различной степенью выраженности ДСТ по всем этим показателям достоверных различий получено не было.

Степень ДСТ оценивали в дебюте заболевания, так как метаболические нарушения при СД 1 влияют на обмен коллагена, а следовательно, и на внешние проявления дисплазии соединительной ткани. Наиболее характерными фенотипическими признаками ДСТ у детей в дебюте СД 1 были следующие (в убывающей последовательности):

- гиперэластичность кожи;
- выраженная венозная сеть на коже;
- гипермобильность суставов;
- деформация позвоночника в виде сколиоза;
- гипотония (слабость) мышц живота;
- плоскостопие;

- небольшое вдавление на груди;
- высокое небо;
- патология зрения;
- искривление или асимметрия носовой перегородки;
- голубые склеры;
- «натоптыши» в области суставов;
- неправильный рост зубов или сверхкомплектные зубы.

В дебюте заболевания легкая степень ДСТ (вариант нормы) была выявлена у 2 детей (6,1 %), умеренно выраженная – у 18 (54,4 %), выраженная – у 13 детей (39,4 %). Полученные данные свидетельствуют о том, что сахарный диабет 1-го типа сопряжен со степенью выраженности ДСТ ( $p < 0,05$ ), то есть чаще возникает у детей на фоне ДСТ.

Мы проанализировали в анамнезе характер течения СД 1 в зависимости от степени выраженности ДСТ. Характеристика тяжести течения СД 1 у детей с различной степенью выраженности ДСТ представлена в табл. 1. Как видно из таблицы, нам не удалось выявить достоверных различий по тяжести течения СД 1 в зависимости от степени выраженности ДСТ. По некоторым литературным данным, дисплазия соединительной ткани у больных СД 2-го типа приводит к быстрому прогрессированию осложнений, таких как ангиопатия и синдром диабетической стопы [11]. Возможно, что при более длительном анамнезе мы подтвердим эти наблюдения, но в настоящее время можно констатировать, что тяжесть течения СД 1 зависит в первую очередь от образа жизни и характера питания больного, инсулинотерапии, а также от соблюдения им всех рекомендаций. Можно полагать, что коллагенопатия, которая была отмечена у большинства детей, являлась предрасполагающим фактором в развитии СД 1.

Таблица 1

Характеристика течения СД 1 у детей с различной степенью выраженности ДСТ

Течение сахарного диабета	Степень выраженности дисплазии соединительной ткани			Достоверность различий
	легкая (n = 2)	умеренная (n = 18)	выраженная (n = 13)	
Легкое	0	3 (16,7 %)	2 (15,4 %)	$p > 0,05$
Средне-тяжелое	2 (100 %)	8 (44,4 %)	7 (53,8 %)	$p > 0,05$
Тяжелое	0	6 (33,3 %)	3 (23,1 %)	$p > 0,05$
Летальный исход	0	1 (5,6 %)	1 (7,7 %)	$p > 0,05$

Характеристика обследованных детей по степени тяжести СД 1 представлена в табл. 2.

Наше исследование показало, что при тяжелых формах СД 1 достоверно чаще встречались специфические осложнения СД 1 (нейропатия, ретинопатия, хайропатия) и инфекции респираторного тракта. Наличие сопутствующей патологии не зависело от тяжести СД 1.

**Таблица 2**  
Характеристика обследованных детей по степени тяжести СД I

Признаки	Течение сахарного диабета				Достоверность различий
	легкое (n = 5)	средне-тяжелое (n = 17)	тяжелое (n = 9)	летальный исход (n = 2)	
Осложнения СД множественные	0	8 (47,1 %)	9 (100 %)	2 (100 %)	p < 0,05
Кетоацидоз в анамнезе	0	1 (6,2 %)	7 (77,8 %)	2 (100 %)	p < 0,05
Кома в анамнезе	0	3 (18,8 %)	6 (66,7 %)	2 (100 %)	p < 0,05
Хайропатия	1 (20 %)	7 (43,8 %)	9 (100 %)	2 (100 %)	p < 0,05
Сенсорная нейропатия	0	7 (43,8 %)	5 (55,6 %)	2 (100 %)	p < 0,05
Катаракта	2 (40 %)	3 (17,6 %)	4 (44,4 %)	2 (100 %)	p < 0,05
Автономная нейропатия	0	0	4 (44,4 %)	2 (100 %)	p < 0,05
Ретинопатия	0	5 (29,4 %)	5 (55,6 %)	2 (100 %)	p < 0,05
Выраженная гипермобильность суставов	5 (100 %)	10 (58,8 %)	5 (55,6 %)	0	p < 0,05
Липодистрофии	4 (80 %)	15 (93,8 %)	9 (100 %)	2 (100 %)	p > 0,05
Полинейропатия	1 (25 %)	13 (81,2 %)	7 (77,8 %)	2 (100 %)	p > 0,05
Инфекция редко	5 (100 %)	15 (88,2 %)	8 (88,9 %)	1 (50 %)	p > 0,05
Инфекция часто	0	0	1 (11,1 %)	1 (50 %)	p > 0,05
Аденоиды в анамнезе	2 (40 %)	1 (5,9 %)	0	0	p < 0,05
Частые ОРВИ	2 (40 %)	0	0	0	p < 0,05
Патология стопы	0	2 (11,8 %)	0	1 (50 %)	p > 0,05
Нефропатия	1 (20 %)	9 (56,2 %)	5 (55,6 %)	1 (50 %)	p > 0,05
Миокардиодистрофия	0	2 (11,8 %)	3 (33,3 %)	1 (50 %)	p > 0,05
Вегетососудистая дистония	2 (40 %)	8 (47,1 %)	4 (44,4 %)	1 (50 %)	p > 0,05
Хронический гастроуденит	1 (20 %)	7 (41,2 %)	4 (44,4 %)	2 (100 %)	p > 0,05
МАС	0	6 (35,3 %)	4 (44,4 %)	1 (50 %)	p > 0,05
Пропалс митрального клапана	2 (40 %)	2 (11,8 %)	1 (11,1 %)	0	p > 0,05
Дискинезия желчевыводящих путей	0	3 (17,6 %)	3 (33,3 %)	1 (50 %)	p > 0,05
Миопия	1 (20 %)	1 (5,9 %)	2 (22,2 %)	0	p > 0,05
Сколиоз	4 (80 %)	0	1 (11,1 %)	1 (50 %)	p > 0,05
Аутоиммунный тиреоидит	0	2 (11,8 %)	0	0	p > 0,05
Острое нарушение мозгового кровообращения	0	0	1 (11,1 %)	0	p > 0,05

Клинические особенности течения СД I в зависимости от степени выраженности ДСТ представлены в табл. 3. Из представленных в таблице данных можно сделать заключение, что тяжесть течения и характер осложнений при СД I у де-

тей встречаются практически с одинаковой частотой в группах с различной степенью выраженности ДСТ. Но отдельные проявления ДСТ, такие как гипермобильность суставов, достоверно реже встречалась в группе больных, имеющих осложнение в виде хайропатии (табл. 4). По-видимому, пациенты с гипермобильностью суставов развивают хайропатию в более поздние сроки. Таким образом, ДСТ служит в данном случае защитным механизмом. Напротив, нефропатия достоверно чаще встречалась в группе детей с повышенной эластичностью кожи – у 14 детей (60,9 %), в группе детей, не имеющих этого признака, – у 2 человек (22,2 %) (p < 0,05). Дальнейшее наблюдение за этими пациентами позволит выявить и другие клинические особенности течения сахарного диабета 1-го типа у детей с различной степенью выраженности ДСТ.

**Таблица 3**  
Клинические особенности течения СД I в зависимости от степени выраженности ДСТ

Признаки	Степень выраженности ДСТ			Достоверность различий
	легкая (n = 2)	умеренная (n = 18)	выраженная (n = 13)	
Осложнения СД множественные	1 (50,0 %)	11 (61,1 %)	7 (53,8 %)	p > 0,05
Кетоацидоз в анамнезе	0	6 (33,3 %)	4 (33,3 %)	p > 0,05
Кома в анамнезе	0	8 (44,4 %)	3 (25,0 %)	p > 0,05
Хайропатия	2 (100 %)	11 (61,1 %)	6 (50,0 %)	p > 0,05
Сенсорная нейропатия	1 (50,0 %)	9 (50,0 %)	4 (33,3 %)	p > 0,05
Катаракта	1 (50,0 %)	6 (33,3 %)	4 (30,8 %)	p > 0,05
Автономная нейропатия	0	4 (22,2 %)	2 (15,4 %)	p > 0,05
Ретинопатия	0	7 (38,9 %)	5 (38,5 %)	p > 0,05
Липодистрофии	2 (100 %)	16 (88,9 %)	12 (100 %)	p > 0,05
Полинейропатия	2 (100 %)	13 (76,5 %)	8 (66,7 %)	p > 0,05
Инфекция редко	2 (100 %)	15 (83,3 %)	12 (92,3 %)	p > 0,05
Инфекция часто	0	2 (11,1 %)	0	p > 0,05
Патология стопы	0	2 (11,1 %)	1 (7,7 %)	p > 0,05
Нефропатия	2 (100 %)	7 (38,9 %)	7 (58,3 %)	p > 0,05
Миокардиодистрофия	0	6 (33,3 %)	0	p < 0,05
Вегетососудистая дистония	1 (50,0 %)	8 (44,4 %)	6 (46,2 %)	p > 0,05
Хронический гастроуденит	0	8 (44,4 %)	6 (46,2 %)	p > 0,05
МАС	2 (100 %)	6 (33,3 %)	3 (23,1 %)	p > 0,05
Пропалс митрального клапана	1 (50,0 %)	1 (5,6 %)	3 (23,1 %)	p > 0,05
Дискинезия желчевыводящих путей	1 (50,0 %)	3 (16,7 %)	3 (23,1 %)	p > 0,05
Миопия	0	2 (11,1 %)	2 (15,4 %)	p > 0,05
Сколиоз	0	5 (27,8 %)	1 (7,7 %)	p > 0,05

Таблица 4

Частота встречаемости хайропатии у детей с СД в зависимости от выраженности гипермобильности суставов

	Хайропатия		Достоверность различий
	нет (n = 13)	есть (n = 19)	
Гипермобильность выраженная	11 (84,6 %)	9 (47,4 %)	p < 0,05

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аббакумова Л. Н. Клинические формы дисплазии соединительной ткани у детей: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГПМА, 2006. 47 с.
2. Акатова Е. В., Николин О. П., Мартынов А. И. Клиническая эффективность оротата магния у пациентов с нарушениями ритма и артериальной гипертонией при пролапсе митрального клапана // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2009. № 8. С. 9–12.
3. Арсентьев В. Г., Пшеничная К. И., Суворова А. В., Шабалов Н. П. Клинические и патогенетические аспекты нарушений в системе гемостаза при дисплазиях соединительной ткани у детей // Педиатрия. 2009. № 4. С. 134–140.
4. Баклунов В. В. Системная дисплазия соединительной ткани – один из важных факторов формирования рецидивирующего бронхита у детей // Современная педиатрия. 2006. № 4. С. 193–196.
5. Гладких Н. Н., Ягода А. В. Состояние эндотелия и агрегация тромбоцитов у больных с впервые выявленным сахарным диабетом 1-го типа и недифференцированной дисплазией соединительной ткани // Клиническая медицина. 2009. № 5. С. 52–55.
6. Дедов И. И., Кураева Т. Л., Петеркова В. А. Сахарный диабет у детей и подростков. М.: Гэотар-Медиа, 2008. 160 с.
7. Дедов И. И., Петеркова В. А. Руководство по детской эндокринологии. М.: Универсум Паблишинг, 2006. 600 с.
8. Кадурин Т. И., Горбунова В. Н. Современные представления о дисплазии соединительной ткани // Казанский медицинский журнал. 2007. Т. 88. № 5, приложение. С. 2–5.
9. Клеменов А. В. Недифференцированные дисплазии соединительной ткани. М., 2005. 136 с.
10. Маколкин В. И., Подзолков В. И., Родионов А. В., Шеянов М. В., Самойленко В. В., Напалков Д. А. Разнообразие клинических симптомов дисплазии соединительной ткани // Терапевтический архив. 2004. № 76(11). С. 77–80.
11. Маслова И. С., Курникова И. А. Особенности течения сахарного диабета типа 2 в сочетании с патологией соединительной ткани // Фундаментальные исследования. 2010. № 8. С. 41–45.
12. Семячкина А. Н. Клинический полиморфизм наследственных болезней соединительной ткани у детей: Автореф. дис. ... д-ра мед. наук. М., 1995. 23 с.
13. Филипенко П. С., Малоокая Ю. С. Роль дисплазии соединительной ткани в формировании пролапса митрального клапана // Клиническая медицина. 2006. № 84(12). С. 13–19.
14. Шмырев В. И., Степура О. Б., Курильченко Д. С. и др. Клинико-неврологическая симптоматика при синдроме дисплазии соединительной ткани сердца // Российский медицинский журнал. 1998. № 3. С. 55–58.
15. Cole W. G. Collagen genes: mutations affecting collagen structure and expression // Prog. Nucleic Acid Res. Mol. Biol. 1994. № 47. P. 29–80.
16. Liese A. D., Lawson A., Song H. R., Hibbert J. D., Porter D. E., Nichols M., Lamichhane A. P., Dabelea D., Mayer-Davis E. J., Standiford D., Liu L., Hamman R. F., D'Agostino R. B. Jr. Evaluating geographic variation in type 1 and type 2 diabetes mellitus incidence in youth in four US regions // Health Place. 2010. Vol. 16. № 3. P. 547–556.
17. Steinmann B., Royce P. M., Superti-Furga A. Connective Tissue and its Heritable Disorders: Molecular, Genetic, and Medical Aspects / Eds. P. M. Royce, B. Steinmann. N. Y., 1993. P. 351–407.



**ГАЛИНА ПАВЛОВНА БЕЛОУСОВА**

кандидат биологических наук, доцент кафедры физиологии человека и животных медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*gerda51@mail.ru*

**ИНГА ГЕННАДЬЕВНА ПАШКОВА**

кандидат медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой анатомии человека медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*pashk@onego.ru*

**ТАТЬЯНА АЛЕКСАНДРОВНА КОЛУПАЕВА**

кандидат медицинских наук, доцент кафедры анатомии человека медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*kotaal@mail.ru*

**СВЕТЛАНА АЛЕКСАНДРОВНА КУДРЯШОВА**

кандидат медицинских наук, доцент кафедры анатомии человека медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*s\_kudr@psu.karelia.ru*

## ХАРАКТЕРИСТИКА КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ТЕЛА У СТУДЕНТОК С АЛЕКСИТИМИЧЕСКИМ РАДИКАЛОМ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

Работа посвящена сравнительному изучению физического статуса и особенностей развития костного, мышечного и жирового анатомических компонентов тела у студенток с алекситимическим радикалом в структуре личности в условиях Севера.

Ключевые слова: алекситимия, антропометрия, физический статус организма, северный регион

Изучение физического статуса и психологических свойств личности в высоких широтах является особенно актуальным в плане оценки состояния здоровья молодежи и разработки критериев диагностики нормы и патологии [2], [4], [10], [11]. Однако связь психологических особенностей личности с конституциональными соматометрическими характеристиками индивида до сих пор остается наиболее дискуссионной и малоисследованной проблемой в антропологической литературе [6], [8]. Так, практически неизученной с позиции морфофункционального подхода, выявляющего особенности фенотипической реализации наследственной программы, остается и такая психологическая характеристика личности, как алекситимия. Феномен алекситимии связывается со снижением у индивида способности вербализации аффекта, трудностью дифференциации телесных ощущений и эмоциональных состояний, а главное, подверженностью психосоматической патологии [15], [17]. В проведенных нами исследованиях с изучением габаритных размеров тела у алекситимных студенток в условиях Севера [1] была выявлена неблагоприятная тенденция сдвига индекса массы тела (ИМТ) в сторону избыточности и ожирения. Учитывая, что масса тела человека состоит из различных анатомических компонентов сомы, нам представлялось важным изучение вопроса изменчивости компонентного состава

тела у северян в зависимости от алекситимичности личности. Поэтому мы посчитали актуальным изучить особенности жирового, мышечного и костного анатомических компонентов тела у студенток с алекситимическим радикалом в условиях Севера, где климатоэкологические факторы оказывают специфическое влияние на протекание жизнедеятельности организма.

### МЕТОДИКА

Исследование проводилось в период 2008–2010 учебных годов с участием 250 девушек в возрасте  $18,5 \pm 0,1$  года, студенток 1–2-го курсов медицинского факультета Петрозаводского университета, не предъявлявших жалоб на состояние здоровья. Представительность выборки обеспечивалась случайным отбором испытуемых с рандомизацией по социальному статусу, возрасту, полу. Методом психометрического исследования по русифицированной версии Торонтской алекситимической шкалы (TAS) с соблюдением общепринятых этических норм у респонденток выявляли наличие личностного алекситимического радикала [5]. Случаи алекситимического радикала регистрировались общепринятым способом по количеству баллов шкалы TAS: 63 балла и выше оценивалось как наличие алекситимического радикала; число баллов, равное 62 и ниже, – как отсутствие алекситимии [5]. С учетом числа баллов шкалы TAS

формировались группы обследования студенток: опытная ( $n = 107$ ) с алекситимическим радикалом и контрольная ( $n = 143$ ) с отсутствием алекситимии. Антропометрирование студенток осуществляли в утренние часы с использованием стандартного антропометрического инструментария (медицинских весов, металлического штангового антропометра Мартина, скользящего циркуля, калипер-циркуля, пластиковой мерной ленты) с точностью до 0,1 см и 0,05 кг и с учетом известных методических рекомендаций [7], [12]. У студенток проводили 21 измерение, в том числе: массы тела, длины тела, 8 обхватных размеров, 4 диаметров эпифизов конечностей, толщины 7 кожно-жировых складок (с точностью до 0,1–0,2 мм). Определяли площадь поверхности тела ( $S$ , м<sup>2</sup>) по формуле Исаксона, рекомендованной для лиц, у которых сумма веса и длины тела больше 160 единиц:  $S = 100 + W + (H - 160) / 100$ , где  $W$  – вес тела, кг;  $H$  – длина тела, м [7]. Для определения компонентного состава тела использовали аналитический метод определения по формулам J. Matiegka абсолютного количества жировой, мышечной и костной ткани [16]. Формула J. Matiegka [16] для определения абсолютного количества жирового компонента ( $D$ , кг) в массе тела:  $D = d \times S \times k$ , где  $d$  – средняя толщина слоя подкожного жира вместе с кожей, мм;  $S$  – поверхность тела, см<sup>2</sup>;  $k$  – константа, равная 0,13 (полученная на основе экспериментального анатомического материала);  $d = (d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 + d_6 + d_7) / 14$ , где  $d_1 \dots d_7$  – толщина кожно-жировых складок, мм: на плече (спереди и сзади), предплечье, спине, животе, бедре, голени (схема Н. Ю. Лутовиновой, М. И. Уткиной, В. П. Чтецова, 1970). Процентное содержание жира в массе тела проводили по формуле: % жира =  $D$  (кг)  $\times 100 / W$ , где  $D$  – весь жир, кг;  $W$  – вес тела, кг. Определение массы подкожного жира ( $D$ , кг) проводили по формуле J. Matiegka [16]:  $D = S \times d_1 \times 0,9$ , где  $d_1$  – средняя толщина подкожно-жирового слоя без кожи, мм;  $S$  – поверхность тела, см<sup>2</sup>;  $d_1 = (\sum 8 \text{ кожных складок} / 16; \text{кожная складка на тыльной стороне кисти} / 2); 0,9$  – константа для удельного веса жира. Определение абсолютной массы мышечной ткани ( $M$ , кг) проводили по формуле J. Matiegka [16]:  $M = L \times r^2 \times k$ , где  $L$  – длина тела, см;  $r$  – среднее значение радиуса плеча;  $k$  – константа, равная 6,5. Процентное содержание массы мышечной ткани проводили по формуле: % мышечной ткани =  $M$  (кг)  $\times 100 / W$ , где  $M$  – вся мышечная масса, кг;  $W$  – вес тела, кг. Определение абсолютной массы костной ткани ( $O$ , кг) проводили по формуле J. Matiegka [16]:  $O = L \times o^2 \times k$ , где  $L$  – длина тела, см;  $o^2$  – квадрат средней величины диаметров дистальных частей плеча, предплечья, бедра и голени;  $k$  – константа, равная 1,2. Процентное содержание массы костной ткани проводили по формуле: % костной ткани

=  $O$  (кг)  $\times 100 / W$ , где  $O$  – вся костная масса, кг;  $W$  – вес тела, кг. Для оценки физического развития анатомических компонентов тела составляли развернутые центильные таблицы, предусматривающие выделение 6 границ: 3, 10, 25, 50, 75 и 90 центилей распределения (то есть частотных долей) варьирования признака, вне зависимости от типа математического распределения. Значения в диапазоне до 3-го центиля (очень низкие величины) и выше 97-го центиля (очень высокие величины) расценивали как патологические. Диапазоны от 3-го до 10-го центиля и от 90-го до 97-го расценивали как пограничные состояния. За норму принимали величины от 10-го до 90-го центиля. Статистический анализ результатов проводился с использованием программного пакета «Microsoft Excel» и с привлечением следующих инструментов: описательная статистика, гистограмма, ранг и перцентиль. Для проверки нормальности распределения исследовались коэффициенты асимметрии и эксцесса. Результаты представляли в виде: среднего арифметического значения со стандартной ошибкой среднего; медианы ( $Me$ ); выборочной доли со стандартной ошибкой; центильных таблиц распределения величин признаков. Оценка гипотез при сравнении двух выборок проводилась с привлечением критериев Стьюдента, Манна – Уитни, Хи-квадрат, с использованием программы для IBM PC «Биостат» [3]. 95 % доверительные интервалы (95 % ДИ) изменчивости признаков определяли на основе «фи»-преобразования Фишера [3]. Статистически значимыми считали различия при 95 % пороге вероятности ( $p \leq 0,05$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Распространенность алекситимического радикала в исследуемой популяции студенток составляла  $42,8 \pm 0,2$  % (95 % ДИ: 36,6–49 %). При этом уровень алекситимического радикала по шкале TAS составлял в среднем  $71 \pm 1$  балл (95 % ДИ: 69–73). У  $57,2 \pm 4,1$  % девушек алекситимия отсутствовала, число баллов по шкале TAS в среднем было  $54 \pm 1$  балл (95 % ДИ: 52–56). Распределение величин длины тела у студенток в обеих группах исследования приближалось к нормальному типу, при этом длина тела у студенток опытной группы в среднем составляла  $164,5 \pm 0,55$  см, а в контрольной –  $163,9 \pm 0,47$  см ( $p = 0,424$ ).

Величины массы тела у студенток как в контроле, так и в опыте характеризовались асимметричным распределением, отличающимся от нормального типа. Размах колебаний значений массы тела в контрольной группе составлял от 38 до 80 кг, медиана соответствовала 57 кг. В опытной группе значения массы тела варьировали от 44 до 89 кг с медианой, равной 58 кг. Учитывая асимметричность распределения величин массы тела, дальнейший анализ массы и компонентно-

го состава тела студенток проводился по таблицам центильного типа (табл. 1–3). Центильная оценка массы тела в абсолютных величинах показала наличие характерного сдвига массы тела в сторону увеличения в зависимости от алекситимического радикала. Так, 75 % всех значений массы тела в контрольной группе входили в интервал от 52,1 до 62,1 кг, а в опытной – в интервал от 54,0 до 63,0 кг. Определение количества жирового компонента массы тела (табл. 1) показало, что в 75 % всех значений абсолютных величин жировой массы тела в контроле входили в интервал от 10,351 до 18,804 кг, а в опыте – от 11,81 до 20,11 кг (в относительных величинах жировой массы соответственно 75 % всех значений в контроле входили в интервал от 19,8 до 32,1 %, а в опыте – от 20,5 до 32,3 %). При определении мышечной массы тела (табл. 2) было выявлено, что 75 % всех значений абсолютных величин мышечной массы тела в контроле входили в интервал от 27,15 до 33,98 кг, а в опыте – от 28,69 до 34,30 кг (в относительных величинах мышечной массы соответственно 75 % значений в контроле входили в интервал от 51,6 до 56,4 %, а в опыте – от 51,8 до 55,7 %). Количественное определение костной массы тела в контрольной и опытной группах представлено в табл. 3. Было выявлено, что 75 % всех значений абсолютных величин костной массы тела в контроле входили в интервал от 7,83 до 9,62 кг, а в опыте – от 7,83 до 9,62 кг (в относительных величинах костной массы соответственно 75 % значений в контроле входили в интервал от 13,5 до 16,3 %, а в опыте – от 13,5 до 16,0 %).

Таблица 1

Центильная оценка массы и жирового компонента тела у студенток контрольной и опытной групп

Показатель	Центиль						
	3	10	25	50	75	90	97
	Зона						
	1	2	3	4	5	6	7
Контроль							
Масса тела, кг	44,5	48,0	52,1	57,0	62,1	67,5	76,5
Жировая масса абсолютная, кг	4,778	4,70	10,351	15,16	18,804	22,520	26,419
Жировая масса относительная, %	10,2	13,7	19,8	25,9	32,1	36,4	38,4
Опыт							
Масса тела, кг	46,0	50,0	54,0	58,0	63,0	69,0	79,9
Жировая масса абсолютная, кг	5,43	6,91	11,81	15,24	20,11	23,92	26,85
Жировая масса относительная, %	9,8	12,7	20,5	26,5	32,3	38,6	40,9

Таблица 2  
Центильная оценка массы и мышечного компонента тела у студенток контрольной и опытной групп

Показатель	Центиль						
	3	10	25	50	75	90	97
	Зона						
	1	2	3	4	5	6	7
Контроль							
Масса тела, кг	44,5	48,0	52,1	57,0	62,1	67,5	76,5
Мышечная масса абсолютная, кг	21,74	24,75	27,15	30,80	33,98	37,99	41,88
Мышечная относительная, %	41,8	48,6	51,6	54,1	56,4	57,9	60,3
Опыт							
Масса тела, кг	46,0	50,0	54,0	58,0	63,0	69,0	79,9
Мышечная масса абсолютная, кг	22,63	25,84	28,69	30,90	34,30	37,66	42,47
Мышечная масса относительная, %	43,2	48,8	51,8	53,8	55,7	59	60,7

Таблица 3

Центильная оценка массы и костного компонента тела у студенток контрольной и опытной групп

Показатель	Центиль						
	3	10	25	50	75	90	97
	Зона						
	1	2	3	4	5	6	7
Контроль							
Масса тела, кг	44,5	48,0	52,1	57,0	62,1	67,5	76,5
Костная масса абсолютная, кг	7,04	7,28	7,83	8,44	9,62	10,26	10,90
Костная масса относительная, %	11,9	12,7	13,5	14,9	16,3	17,3	18,2
Опыт							
Масса тела, кг	46,0	50,0	54,0	58,0	63,0	69,0	79,9
Костная масса абсолютная, кг	7,04	7,28	7,83	8,49	9,62	10,26	10,90
Костная масса относительная, %	11,6	12,2	13,5	14,7	16,0	16,7	17,7

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В условиях северного региона в популяции студенток было выявлено 42,8 % случаев с алекситимическим радикалом. В средней полосе России, по данным литературы, распространенность алекситимии среди студентов составляла от 25 до 30 % [13]. Данные проведенного центильного анализа варьирования массы тела у студенток в группах исследования в интервале от 25-го до 75-го центилей соответствовали нормативным значениям для этой возрастной группы [9], [14]. Вместе с тем изучение физического

статуса у студенток в зависимости от алекситимического радикала выявило фенотипические особенности протекания юношеского онтогенеза, связанные с периодом завершения роста скелета, формирования дефинитивного состояния мышечной системы и подкожного жираотложения. У студенток с алекситимическим радикалом по сравнению с контролем во всех диапазонах от 3-го до 97-го центиля в величинах массы тела наблюдался характерный сдвиг в сторону увеличения. Проведенный детальный анализ компонентного состава тела показал, что масса костного компонента у студенток с алекситимическим радикалом существенно не отличалась от контрольной, что свидетельствует о стабильности этого соматического компонента [11]. Основные изменения в зависимости от алекситимии были выявлены со стороны наиболее лабильных соматических компонентов. Так, у алекситимных студенток по сравнению с контролем наблюдалось увеличение абсолютных величин массы мышечного компонента сомы. Более высокими как абсолютными, так и относительными величинами характеризовалась жировая масса. В этой связи следует отметить, что хотя степень различий в величинах жирового компонента у алекситимных студенток была относительно невелика, выявленное изменение может играть важную роль в вопросах первичной профилактики возможного риска сердечно-

сосудистых расстройств [2], [15]. Таким образом, в результате сравнительного исследования физического развития основных компонентов тела у алекситимных студенток была установлена изменчивость лабильных компонентов сомы, жировой и мышечной ткани тела, при этом жировой компонент, по-видимому, в большей степени оказывает влияние на массу тела по сравнению с другими.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение физического статуса у студенток с личностным алекситимическим радикалом на заключительной стадии юношеского онтогенеза показало, что в условиях северного региона специфическому влиянию подвергается наиболее лабильный компонент сомы – жировая ткань, в результате чего жировой компонент более выражено влияет на формирование тела. Полагаем, что выявленная особенность в физическом статусе организма алекситимных студенток может иметь большое практическое значение для первичной профилактики прогнозируемой патологии, поскольку избыточная жировая масса тела может выступать фактором риска сердечно-сосудистой патологии.

Работа выполнена при поддержке РГНФ в рамках научно-исследовательского проекта «РГНФ № 09-06-42605 а/с ГОУ ВПО ПетрГУ».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусова Г. П., Пашкова И. Г., Кудряшова С. А., Колупаева Т. А. Характеристика габаритных размеров тела у студенток с алекситимическим радикалом // *Фундаментальные исследования*. 2010. № 7. С. 17–23.
2. Бутова О. А. Морфотип конституции как критерий экологической пластичности организма: (Сообщение первое) // *Российские морфологические ведомости*. 1998. № 1–2. С. 186–192.
3. Гланц С. Медико-биологическая статистика: Пер. с англ. М.: Практика, 1998. 459 с.
4. Доршакова Н. В. Качество окружающей среды и здоровье человека в условиях Карелии. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1997. 204 с.
5. Ерьсько Д. Б., Исурина Г. Л., Кайдановская Е. В., Карвасарский Б. Д. и др. Алекситимия и методы ее определения при пограничных психосоматических расстройствах: Методическое пособие. СПб.: Изд-во Психоневрологического ин-та им. В. М. Бехтерева, 1994. 17 с.
6. Клиорин А. И., Чтецов В. П. Биологические проблемы учения о конституции человека. Л.: Наука, 1979. 164 с.
7. Мартиросов Э. Г. Методы исследования в спортивной антропологии. М.: ФиС, 1982. 200 с.
8. Негашева М. А. Системный подход при изучении взаимосвязей соматических, дерматоглифических и психологических признаков в структуре общей конституции человека // *Морфология*. 2008. Т. 133. № 1. С. 73–77.
9. Негашева М. А., Мишкова Т. А. Антропометрические параметры и адаптационные возможности студенческой молодежи к началу XXI века // *Российский педиатрический журнал*. 2005. № 5. С. 12–16.
10. Никитюк Б. А. Интегративные подходы в возрастной и спортивной антропологии. М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 1999. 224 с.
11. Николаев В. Г., Гребенникова В. В., Ефремова В. П., Сапожников В. А., Шарайкина Е. П. Онтогенетическая динамика индивидуально-типологических особенностей организма человека. Красноярск, 2001. 172 с.
12. Николаев В. Г., Николаева Н. Н., Синдеева Л. В., Николаева Л. В. Антропологическое обследование в клинической практике. Красноярск: Версо, 2007. 173 с.
13. Хватова М. В., Юрьева Т. В. Состояние когнитивно-эмоциональной сферы как фактор психосоматического здоровья студентов // *Валеология*. 2003. № 2. С. 39–43.
14. Щербо А. П., Масюк В. С. Экология и здоровье детей и подростков Республики Карелия. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. 260 с.
15. Kauhanen J., Kaplan G. A., Cohen R. D., Salonen R., Salonen J. T. Alexithymia May Influence the Diagnosis of Coronary Heart Disease // *Psychosomatic Medicine*. 1994. № 56. P. 237–244.
16. Matiegka J. The testing of physical efficiency // *Amer. J. Phys. Antropol.* 1921. Vol. 4. P. 223–230.
17. Sifneos P. E. The prevalence of alexithymic characteristics in psychosomatic patients // *Psychother Psychosom.* 1973. № 22. P. 255–262.

**ИГОРЬ ВАЛЕРЬЕВИЧ ГАЙДИН**

клинический интерн кафедры фармакологии, организации и экономики фармации медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*ghauz@yandex.ru*

**ЮЛИЯ ПАВЛОВНА БАРАНОВА**

преподаватель кафедры фармакологии, организации и экономики фармации медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*piwitepisma@list.ru*

**ИРИНА АНАТОЛЬЕВНА ВИНОГРАДОВА**

доктор медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой фармакологии, организации и экономики фармации медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*irinav@petrsu.ru*

**ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СВЕТОВОГО ДНЯ  
В УСЛОВИЯХ КАРЕЛИИ НА ПОКАЗАТЕЛИ ЭСТРАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ У САМОК КРЫС**

В условиях естественного освещения Карелии в течение двух лет исследовали влияние продолжительности светового дня на возрастную динамику показателей эстральной функции. Отмечено, что изменение продолжительности светового дня вне зависимости от сезона рождения крыс-самок приводит к нарушению полового созревания и более ранним возрастным изменениям эстрального цикла по сравнению с аналогичными показателями у животных в стандартном световом режиме.

Ключевые слова: естественное освещение, половое созревание, эстральный цикл, крысы, онтогенез, сезонная динамика

Изменение продолжительности светового дня – важный регулятор физиологических ритмов организма, особенно процессов, протекающих циклически [15], [16], [18]. Репродуктивная функция женского организма находится под контролем циркадианной системы, представленной супрахиазматическими ядрами гипоталамуса, сосудистым органом концевой пластинки и шишковидной железой [14], [17], [19]. Клиническими наблюдениями установлено, что нарушения репродуктивной функции у женщин, вызванные воздействием неблагоприятных факторов внешней среды, обусловлены дисфункцией гипоталамо-гипофизарно-гонадных отношений [1]. Обследование женщин с бесплодием установило важное клиническое значение эпифиза и его гормона мелатонина (ингибитора оси гипоталамус – гипофиз – гонады) в развитии нарушений центральных механизмов регуляции репродуктивной функции [9].

Грызуны являются адекватной моделью для изучения влияния сезонного десинхрониза Северо-Запада России на женскую репродуктивную функцию [6].

Целью исследования явилось изучение влияния продолжительности светового дня на Северо-Западе России в течение годового цикла на динамику полового созревания, возрастные изменения эстральной функции и базальную температуру тела у самок крыс в зависимости от сезона рождения.

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ**

В эксперименте были использованы 142 самки крыс собственной разводки. Животных содержали в стандартных пластмассовых клетках при температуре 21–23 °С. Они получали сбалансированный гранулированный корм [12] и питьевую воду без ограничения. Работа с лабораторными животными выполнена с соблюдением принципов Хельсинкской декларации о гуманном отношении к животным, принципов гуманности, изложенных в директиве Европейского сообщества (86/609/ЕС), «Правил проведения работ с использованием экспериментальных животных» и «Биоэтических правил проведения исследований на человеке и животных» [10].

Для опыта были сформированы 3 экспериментальные группы. Первая (дата рождения – конец апреля – NL-Spring) и вторая (дата рождения – конец октября – NL-Autumn) группы животных находились в условиях естественного освещения Карелии. При анализе полученных данных учитывали особенности годовой фотопериодичности Северо-Запада России. В данном режиме освещенность определялась сезоном года: зимой минимальная продолжительность дня составляла 4,5 ч., а летом продолжительность светового дня достигала 24 ч. (белые ночи). Освещенность в помещении менялась в течение суток (на уровне клеток в утренние часы – 50–200 лк, днем – до 1000 лк в ясный день и 500 лк

в пасмурный день, к вечеру – от 150 до 500 лк). Третья группа являлась контрольной: крысы находились в условиях стандартного чередующегося режима освещения (12 ч. Т:12 ч. С; LD). Люминесцентные лампы (освещенность 750 лк на уровне клеток) освещали помещение в течение 12 дневных часов, на ночь (12 ч.) свет отключали.

Половое созревание регистрировали по времени раскрытия влагалища. Начиная с 3-месячного возраста у самок крыс один раз в 3 месяца ежедневно в течение 2 недель брали влагалищные мазки для изучения эстральной функции. Оценивали следующие параметры: длительность эстрального цикла, соотношение фаз овуляторного цикла; рассчитывали относительное число коротких, средних и длинных циклов, относительное число животных с иррегулярными циклами. В эти же сроки измеряли ректальную температуру, определяя при этом среднюю температуру без учета фаз эстрального цикла, а также среднюю ректальную температуру в фазы эструса и диэструса. Исследование проводили в течение 24 месяцев.

Обработку результатов выполняли с использованием пакетов статистических программ STATGRAPH, STADIA.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Модифицирующее действие постоянного освещения на эстральную функцию изучено многими учеными [2], [8], [17], [19]. Однако влияние сезонных колебаний освещенности как естественного нарушения циркадианного ритма исследовано недостаточно [20]. Проблема нарушенных циркадиантных ритмов наиболее актуальна для жителей Северо-Запада России, а также для всех стран Европейского Севера, учитывая своеобразную фотопериодичность в этих регионах. На Северо-Западе России – короткий световой день в осенне-зимний период (до 4 ч.), при этом большая часть населения подвергается избыточному искусственному освещению, в весенне-летний период – длинный световой день (особенно с середины мая до середины июля – 24 ч.). Следует отметить, что одновременно с воздействием сезонных колебаний светового режима на функционирование репродуктивной системы оказывают влияние окологосударственные ритмы.

Характерные различия между группами были выявлены при анализе времени открытия влагалища у самок крыс, которое является показателем полового созревания. В наших исследованиях у самок группы LD оно наступало в среднем на 42-й день жизни, что соответствует физиологическим нормам [4]. У крыс группы NL-Spring период полового созревания совпал с периодом белых ночей, когда продолжительность светового дня достигала 24 ч. В этой груп-

пе половое созревание наступало раньше, в среднем на 37-й день жизни. Причем у некоторых самок открытие влагалища наблюдалось уже на 35-й день жизни. Половое созревание у самок группы NL-Autumn, когда продолжительность светового дня наименьшая, наступало в среднем на 48-й день жизни (рис. 1).

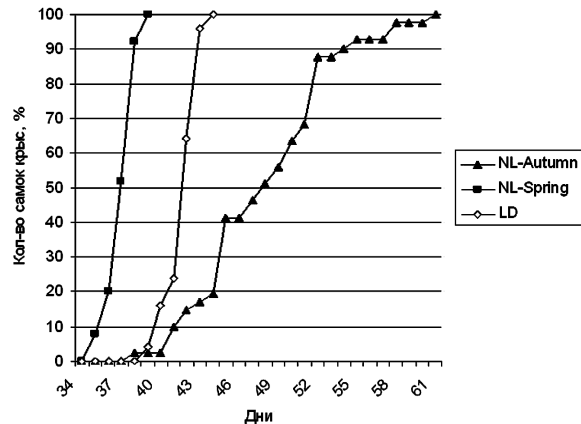


Рис. 1. Динамика полового созревания самок крыс в различных световых режимах: LD – стандартное освещение; NL-Spring – естественное освещение (весна); NL-Autumn – естественное освещение (осень)

Таким образом, в весенний период в условиях Карелии происходило ускоренное половое созревание самок крыс, а в осенний период – запаздывание по сравнению с животными в стандартном режиме освещения. Удлинение фотопериода, подавляющее выработку мелатонина, способствует преждевременному половому созреванию, напротив, уменьшение продолжительности светового дня повышает выработку мелатонина и оказывает антигонадотропное действие [13].

У животных группы LD достоверное увеличение средней продолжительности эстрального цикла наблюдалось в 14 месяцев (с  $5,2 \pm 0,3$  до  $7,9 \pm 0,9$  дня,  $p < 0,05$ ) (рис. 2). Короткие эстральные циклы сохранялись на протяжении 11 месяцев и исчезали в 14 месяцев, а длинные – появлялись в возрасте 8 месяцев, их число составляло 13 % от общего количества исследованных циклов. К 14 месяцам это значение поднялось до 33 %, а к 23 месяцам увеличилось до 75 %. Иррегулярные циклы в количестве 18 % появились в 11 месяцев и к 23 месяцам выросли до 33 % (рис. 3). Существенных возрастных изменений в соотношении фаз овуляторного цикла в течение первого и второго годов жизни в этой группе зафиксировано не было. Соотношение эструс / диэструс изменялось от 1:1,6 в 3-месячном до 1:1,4 в 14-месячном возрасте в сторону увеличения числа эструсов. К 23 месяцам соотношение эструс / диэструс составляло 1:1,2.

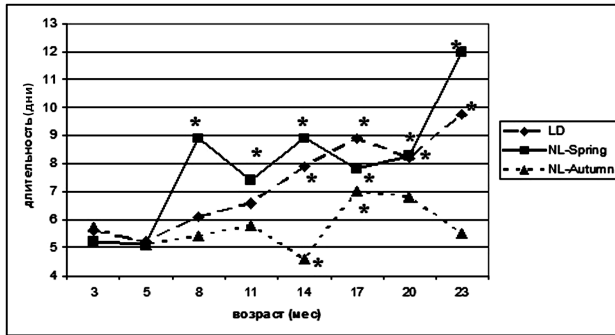


Рис. 2. Динамика средней продолжительности эстрального цикла у самок крыс в различных режимах освещения:  
\*  $p < 0,05$  – различие в группе с соответствующим параметром в 3-месячном возрасте достоверно (критерий Стьюдента)

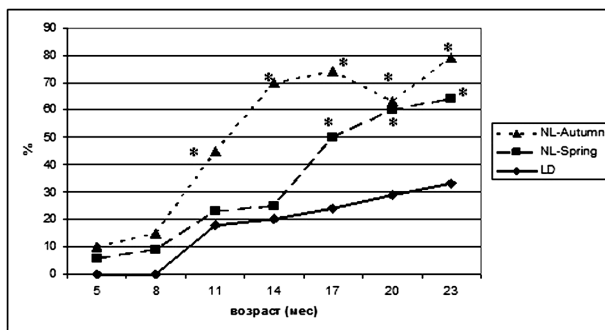


Рис. 3. Динамика возникновения иррегулярных эстральных циклов у крыс в различных режимах освещения:  
\*  $p < 0,05$  – различие с показателем в группе LD в соответствующем месяце достоверно (критерий Стьюдента)

У крыс группы NL-Spring с 8 месяцев отмечалось достоверное увеличение средней продолжительности эстрального цикла (с  $5,2 \pm 0,1$  до  $8,9 \pm 0,5$  дня,  $p < 0,05$ ) (рис. 2). К 14 месяцам эти значения оставались на том же уровне, а в 23 месяца средняя продолжительность эстрального цикла увеличилась до  $12,0 \pm 2,2$  дня ( $p < 0,05$ ). У животных этой группы в 3-месячном возрасте наблюдались только короткие и средние циклы, в возрасте 5 месяцев появлялись длинные (7%), в 8 месяцев исчезали короткие эстральные циклы и в 23 месяца количество длинных циклов составило 100%. В 5-месячном возрасте в этой группе появились иррегулярные циклы (6%), и к 23 месяцам они достигли 64% от общего количества (рис. 3). Соотношение эструс / диэструс у самок крыс достоверно изменялось от 1:1,4 в 3-месячном возрасте (лето, продолжительность светового дня до 24 ч.) до 1:2,7 к 8 месяцам (зима, продолжительность дня до 4,5 ч.) в сторону увеличения числа диэструсов. В летний период в возрасте 14 месяцев эти показатели стали составлять 1:1,3, а к 23 месяцам – 1:1,8. Изучение соотношения фаз эстрального цикла в этой группе крыс показало зависимость от сезона: в зимний период оно составляло 1:2,0–2,7, в летний – 1:1,3–1,4.

У крыс группы NL-Autumn достоверное изменение средней длительности овуляторного цикла в сторону уменьшения наблюдалось в 14 месяцев (с  $5,75 \pm 0,86$  до  $4,0 \pm 1,93$  дня,  $p < 0,05$ ), что соответствует зимнему периоду времени. В 17 и 20 месяцев (весенне-летний период) средняя продолжительность эстрального цикла увеличилась и составляла  $7,0 \pm 1,4$  ( $p < 0,05$ ) и  $6,8 \pm 0,6$  дня соответственно. К 23 месяцам (зимний период) средняя продолжительность цикла вновь уменьшилась до  $5,5 \pm 0,63$  дня (рис. 2). Длинные эстральные циклы у самок этой группы появились в возрасте 5 месяцев (7%), к 14 месяцам наблюдались только короткие и средние. К 17 месяцам количество длинных эстральных циклов составляло 40%, а к 23 месяцам за счет увеличения иррегулярных циклов количество длинных циклов уменьшилось до 17%. Иррегулярные циклы, так же как в режиме NL-Spring, появились в 5-месячном возрасте (10%), и к 23 месяцам они достигли 79% (рис. 3). Соотношение эструс / диэструс в зимний период изменялось от 1:4,3 в 3-месячном возрасте до 1:15,6 к 23 месяцам. Изучение соотношения фаз эстрального цикла в этой группе также показало зависимость от сезона: в зимний период оно составляло от 1:4,0 у молодых крыс до 1:8,0 у старых, в летний период 1:3,5 и 1:6,7 у молодых и старых самок соответственно.

Эндокринная система является важнейшим регуляторным звеном, поддерживающим гомеостаз [5]. Установлено, что постоянное освещение приводит к увеличению порога чувствительности гипоталамуса к ингибирующему действию эстрогенов. Этот механизм является ключевым в старении репродуктивной системы как у самок крыс, так и у женщин [11]. Исследование эстральной функции у самок крыс указывает на более ранние возрастные изменения, возникающие в условиях естественного освещения Карелии у крыс, рожденных весной и осенью. Известно, что у человека, проживающего в высоких (северных) широтах, функционирование желез внутренней секреции в контрастные периоды года достигает значимых различий [5].

В наших исследованиях у «весенних» крыс удлинение эстрального цикла стало происходить раньше, это связано с тем, что их рождение, половое созревание и фаза прогрессивного роста совпали с периодом белых ночей, когда продолжительность светового дня максимальна (май, июнь, июль – 24 ч.). У «осенних» крыс максимальный световой период пришелся на возраст 7 месяцев, и с этого момента различные нарушения эстральной функции в данной группе стали происходить интенсивнее. Если в группе LD иррегулярные циклы появились только в возрасте 11 месяцев (18%), что соответствует физиологическим изменениям, и к 23 месяцам составили 33%, то в экспериментальных груп-

пах вне зависимости от сезона рождения иррегулярные циклы появились у молодых 5-месячных крыс, что уже указывает на патологические изменения репродуктивной функции у части самок. К возрасту 23 месяцев у животных этих групп количество иррегулярных циклов было в 2,4 раза (NL-Autumn) и в 1,9 раза (NL-Spring) больше, чем у самок контрольной группы. При сравнении экспериментальных групп можно отметить, что у «весенних» самок увеличение длительности эстрального цикла происходило более интенсивно и значимо, в то время как число иррегулярных циклов у «осенних» самок практически всегда превышало таковое у «весенних».

Базальная температура тела является важным показателем уровня обмена в организме и его изменений при старении [7]. При анализе данных температуры тела в исследуемых группах отмечено ее достоверное снижение с возрастом, что характерно для стареющего организма (рис. 4).

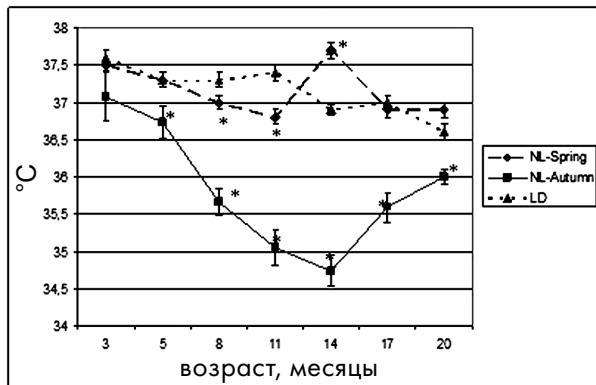


Рис. 4. Возрастная динамика средней ректальной температуры у самок крыс в различных световых режимах

Достоверное снижение средней ректальной температуры наблюдалось в группе NL-Autumn с 5-месячного возраста, в группе NL-Spring – с 8-месячного, а в группе LD – с 14-месячного. В группе NL-Spring было отмечено повышение средней температуры в 14 месяцев, в группе NL-Autumn – в 17 месяцев, что, вероятно, связано с сезонным удлинением освещенности в этот период. Как видно из рис. 4, базальная температура у самок в режиме NL-Autumn была достоверно ниже на протяжении всего исследования, чем таковая в режиме LD. В возрасте 14 месяцев у крыс группы NL-Spring наблюдалась максимальная базальная температура, что соответствует летнему сезону, а у самок группы NL-Autumn – минимальная (зимний сезон). Начиная с этого же возраста в группе NL-Spring происходило снижение температуры, а в группе NL-Autumn – увеличение по сравнению с предыдущими параметрами (рис. 4).

Достоверное снижение температуры в фазы эструса и диэструса в экспериментальных группах наблюдалось в группе NL-Spring с 5 меся-

цев, в группе NL-Autumn с 8 месяцев, тогда как подобные изменения появились в группе LD только к 14-месячному возрасту, что соответствует физиологическим нормам (рис. 5).

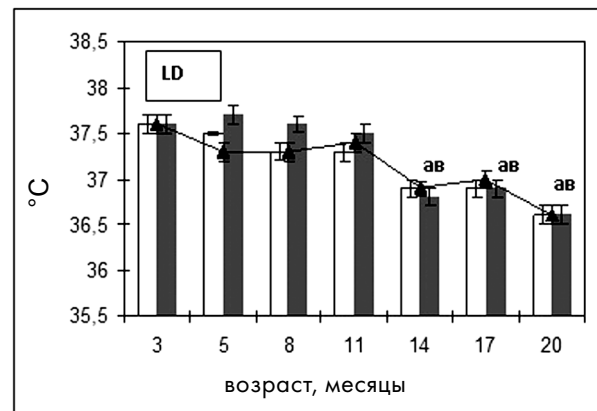
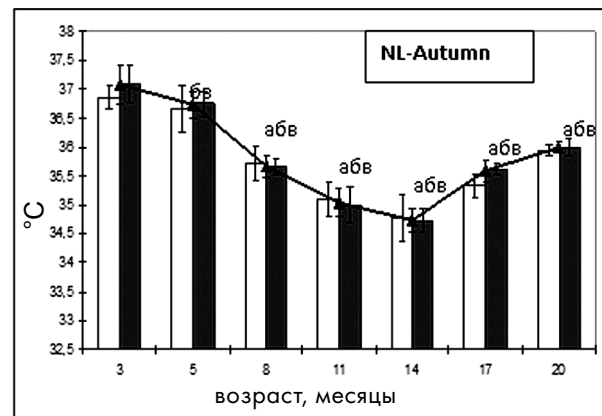
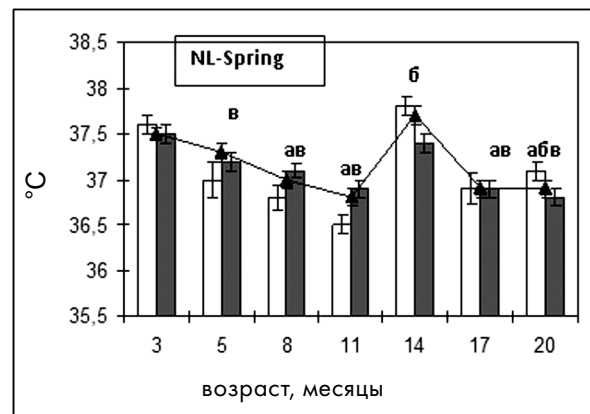


Рис. 5. Возрастная динамика средней ректальной температуры у крыс в зависимости от фаз эстрального цикла:  
 ■ – температура тела в фазу эструса;  
 □ – температура тела в фазу диэструса;  
 ▲ – температура тела без учета фазы цикла;  
 а – различие достоверно по сравнению с базальной температурой у 3-месячных крыс;  
 б – различие достоверно по сравнению с базальной температурой у крыс соответствующего месяца в стандартном режиме освещения;  
 в – различие достоверно по сравнению с температурой в фазу эструса и диэструса у 3-месячных крыс ( $p < 0,05$ ; критерий Стьюдента)



В физиологических условиях температура тела в фазу диэструса выше, чем в фазу эструса, что обусловлено функционирующими желтыми телами в яичниках в диэструсе [3]. У молодых и зрелых крыс, находящихся в условиях NL-Spring и LD, такая тенденция имела место. Физиологическая разница температур между фазами цикла в этих группах сохранялась до 11-месячного возраста. В 14 месяцев наблюдалось повышение температуры в фазу эструса, что указывает на появление возрастных изменений овуляторного цикла. В группе NL-Spring улавливалась тенденция к сезонному повышению температуры в фазу эструса по сравнению с фазой диэструса в 3- и 14-месячном возрасте, что, возможно, указывает на неблагоприятное влияние белых ночей на вторую фазу цикла и нарушение функции желтого тела (рис. 5). Еще одно повышение температуры во время эструса наблюдалось у самок в возрасте 20 месяцев, что подтверждает нарушение терморегуляции и соответствует изменениям овуляторного цикла в этом возрасте.

У крыс группы NL-Autumn тенденция к физиологической разнице между температурами в фазу эструса и диэструса имела место в 3- и 5-месячном возрасте. В дальнейшем разница меж-

фазовых температур практически отсутствовала, что говорит о снижении функционирования желтых тел в фазу диэструса, причиной которого может являться избыток освещения (рис. 5).

Следует отметить, что в экспериментальных группах изменение фотопериода в течение годового цикла вызывало достоверно более раннее снижение базальной температуры тела, что является одним из показателей преждевременного старения организма. В режимах NL-Autumn и NL-Spring раньше, чем в режиме LD, нарушалась физиологическая разница температур, измеряемая в различные фазы эстрального цикла.

Таким образом, происходящие изменения полового созревания, эстральной функции и базальной температуры тела в режимах естественного освещения Карелии зависели от сезона года и продолжительности светового дня. Особенно демонстративны в этом отношении периоды белых ночей (весна – лето) и зимняя фотопериодичность, когда отмечались максимальные различия светового режима [5]. В результате этого развивался целый комплекс последствий: нарушение полового созревания, сокращение продолжительности репродуктивного периода и раннее старение организма.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айламазян Э. К. Репродуктивное здоровье женщины как критерий биоэкологической диагностики и контроля окружающей среды // Журнал акушерства и женских болезней. 1997. Т. XLVI. № 1. С. 6.
2. Анисимов В. Н., Батулин Д. А., Айламазян Э. К. Эпифиз, свет и рак молочной железы // Вопросы онкологии. 2002. Т. 48. С. 524–535.
3. Анисимов В. Н., Хавинсон В. Х., Заварзина Н. Ю. и др. Влияние пептида эпифиза на показатели биологического возраста и продолжительность жизни мышей // Российский физиологический журнал. 2001. Т. 87. № 1. С. 125–135.
4. Гладкова А. И., Алесина М. Ю., Карпенко Н. А. и др. Влияние грофоллона на индукцию половозрелости у крыс-самок // Журнал фармакологии и токсикологии. 1992. Т. 55. № 3. С. 26–29.
5. Кубасов Р. В. Цирканнуальная биоритмика гормональных показателей щитовидной и половых желез // Экология человека. 2008. № 2. С. 26–29.
6. Лазарев Н. И., Ирд Е. А., Смирнова И. О. Экспериментальные модели эндокринных гинекологических заболеваний. М.: Медицина, 1976. 175 с.
7. Попович И. Г., Забежинский М. А., Егормин П. А. и др. Влияние антидиабетического препарата диабенон на показатели биологического возраста, продолжительность жизни и развитие новообразований у мышей NMRI и HER-2/NEU // Успехи геронтологии. 2004. Вып. 15. С. 80–90.
8. Савченко О. Н., Стрельцова Н. А., Данилова О. А. Влияние 5,6-окситриптамина и разных световых режимов на гипоталамо-гипофизарно-гонадную систему самок крыс // Физиологический журнал им. И. М. Сеченова. 1987. Т. 78. № 4. С. 480–482.
9. Фаттахова Ф. А., Гилязутдинова З. Ш., Михайлов М. К. Клиническое значение мелатонина в развитии нарушений центральных механизмов регуляции репродуктивной функции // Казанский медицинский журнал. 1998. № 6. С. 430–433.
10. Этическая экспертиза биомедицинских исследований / Под ред. Ю. Б. Белоусова. М., 2005. 156 с.
11. Anisimov V. N. Light pollution, reproductive function and cancer risk // Neuroendocrinol. Lett. 2006. Vol. 27. P. 35–52.
12. Anisimov V. N., Khavinson V. Kh., Popovich I. G. et al. Inhibitory effect of the peptide epitalon on the development of spontaneous mammary tumors in HER-2/neu transgenic mice // Int. J. Cancer. 2002. Vol. 101. № 1. P. 7–10.
13. Arendt J. Melatonin and the Mammalian Pineal Gland. London: Chapman & Hall, 1995. 331 p.
14. Barbacka-Surowiak G., Surowiak J., Stoklosowa S. The involvement of the suprachiasmatic nuclei in the regulation of estrous cycles in rodents // Reproduct. Biol. 2003. Vol. 3. P. 99–129.
15. Bell-Pedersen D., Cassone V. M., Earnest D. J. et al. Circadian rhythms from multiple oscillators: lessons from diverse organisms // Nat. Rev. Genet. 2005. Vol. 6. P. 544–556.
16. Froy O., Miskin R. Effect of feeding regimens on circadian rhythms: Implications for aging and longevity // Aging. 2010. Vol. 2. № 1. P. 7–27.
17. Prata Lima M. F., Baracat E. C., Simones M. J. Effects of melatonin on the ovarian response to pinealectomy or continuous light in female rats: similarity with polycystic ovary syndrome // Brazil. J. Med. Biol. Res. 2004. Vol. 37. P. 987–995.
18. Reppert S. M., Weaver D. R. Coordination of circadian timing in mammals // Nature. 2002. Vol. 418. P. 935–941.
19. Van der Beek E. M. Circadian control of reproduction in the female rat // Prog. Brain Res. 1996. Vol. 111. P. 295–320.
20. Vinogradova I. A., Anisimov V. N. et al. Circadian disruption induced by light-at-night accelerates aging and promotes tumorigenesis in rats // Aging. 2009. Vol. 1. № 10. P. 855–865.

**АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ ИВШИН**

кандидат медицинских наук, ассистент кафедры акушерства и гинекологии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*ivchine\_al@mail.ru*

**ЕЛЕНА ГЕОРГИЕВНА ГУМЕНЮК**

доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой акушерства и гинекологии медицинского факультета, Петрозаводский государственный университет  
*elenagum@karelia.ru*

**ЕФИМ МУНЕВИЧ ШИФМАН**

доктор медицинских наук, профессор, заместитель директора по лечебной работе Научного центра акушерства, гинекологии и перинатологии им. академика В. И. Кулакова (г. Москва)  
*eshifman@mail.ru*

**ЕЛЕНА НИКОЛАЕВНА ЯКОВЛЕВА**

врач Республиканского перинатального центра (г. Петрозаводск)  
*rpz@onego.ru*

**ROLL-OVER ТЕСТ В ДИАГНОСТИКЕ ТЯЖЕЛОЙ ПРЕЭКЛАМПСИИ**

Статья посвящена оценке ауторегуляторных сосудистых реакций мозгового кровотока во время постурального теста у беременных с тяжелой преэклампсией. Обследованы 73 женщины. Выявлено снижение линейных показателей доплеровского спектра и изменение ряда величин, отражающих церебральное перфузионное и внутричерепное давление, гидродинамическое сопротивление и цереброваскулярную реактивность. Данные свидетельствуют о нарушении перфузии мозга у беременных с тяжелой преэклампсией во время постурального теста.

Ключевые слова: постуральный тест, гестоз, преэклампсия, эклампсия, мозговой кровоток, транскраниальная доплерография

Преэклампсию отличает крайняя вариабельность форм клинических проявлений [2], [4]. Даже известная классическая триада симптомов не является достоверным прогностическим критерием [6]. Таким образом, продолжает оставаться актуальным поиск неинвазивных методов диагностики, обладающих достаточной воспроизводимостью для их выполнения в условиях скрининговых исследований и позволяющих установить критерии тяжести преэклампсии [1], [5]. Определенное диагностическое значение для доклинической диагностики преэклампсии имеет постуральный тест: повышение диастолического АД более чем на 20 мм рт. ст. при повороте женщины с левого бока на спину указывает на риск развития преэклампсии («roll-over test» или «тест с поворотом») [3], [6].

В предыдущих работах, основанных на результатах транскраниальной доплерографии (ТДГ), нами показано, что у беременных с преэклампсией изменяется мозговой кровоток, и нарушения носят характер ишемически-реперфузионного повреждения вследствие несостоятельности системы цереброваскулярной ауторегуляции [7], [8].

Цель исследования: сравнить ауторегуляторные сосудистые реакции мозгового кровотока во время постурального теста с поворотом у здоровых беременных и беременных с тяжелой преэклампсией.

**МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ**

Исследование проводилось на базе МУЗ «Родильный дом им. К. А. Гуткина» г. Петрозаводска Республики Карелии. Под наблюдением находились 73 женщины в возрасте от 17 до 35 лет (средний возраст –  $25,5 \pm 4,3$  года) с диагнозом тяжелой преэклампсии. Группу сравнения составили 90 условно здоровых беременных женщин в возрасте от 19 до 34 лет (средний возраст –  $25,9 \pm 4,2$  года) в III триместре беременности, состоявших на диспансерном учете в женской консультации № 1 г. Петрозаводска. Алгоритм распределения в исследуемых группах представлен на рисунке. Средний гестационный возраст в обеих группах –  $34 \pm 3$  недели. В клинически тяжелых случаях детальное обследование осуществлялось после начала терапии.

Методика проведения постурального теста: пациентка спокойно лежит на левом боку в течение 5 минут. Доступным способом измеряется артериальное давление на правом плече, результат измерения фиксируется. Манжету манометра оставляют на правой руке. Пациентка переворачивается на спину, и артериальное давление немедленно измеряют снова. Если диастолическое артериальное давление при повторном измерении увеличено более чем на 20 мм рт. ст. по сравнению с исходным, это указывает на высокий риск развития преэклампсии.



Распределение пациенток в исследуемых группах:

\* – протокол информированного согласия пациентки на обследование; \*\* – критерием включения в группу был диагноз преэклампсии, верифицированный на основании международной статистической классификации болезней и проблем, связанных со здоровьем, 10-го пересмотра. Степень тяжести преэклампсии оценивалась по шкале Goecke в модификации Г. М. Савельевой; \*\*\* – из наблюдения были исключены пациентки, имеющие пороки сердца, нарушения сердечного ритма, ишемическую болезнь сердца, хроническую артериальную гипертензию, кардиомиопатию, грубые нарушения гемореологических показателей, сахарный диабет, нейрореинфекции, черепно-мозговые травмы и эпизоды синкопальных состояний в анамнезе

Артериальное давление измерено автоматическим сфигмоманометром монитора «Cardioscar II» («DATEX», Япония) с обычной манжетой на правой руке. Церебральная гемодинамика изучена с помощью метода транскраниальной доплерографии. Исследование выполнялось на ультразвуковом сканере SSD-4000 («Aloka», Япония). С целью исключения патологии, оказывающей потенциальное воздействие на фоновые показатели церебрального кровотока, проведено цветное дуплексное сканирование брахиоцефальных артерий и артерий вертебробазилярного бассейна.

При ТДГ транстемпоральным доступом с обеих сторон измерены количественные параметры кровотока в М1 сегменте средней мозговой артерии: пиковая систолическая скорость кровотока (PSV), конечная диастолическая скорость (EDV), усредненная по времени средняя скорость (TAV), индекс стабильности потока (SFI), систолодиастолическое отношение (S/D), пульсационный индекс (PI) и индекс резистентности (RI). Перечисленные величины подсчитаны автоматически встроенной программой ультразвукового сканера.

Поскольку указанные выше линейные характеристики доплеровского спектра не позволили составить объективное представление об объеме перфузии мозга, был подсчитан ряд показателей, анализ которых помог уточнить состояние церебральной гемодинамики: индекс мозгового кровотока (ИМК), церебральное перфузионное давление (ЦПД), внутричерепное давление

(ВЧД), индекс гидродинамического сопротивления (ИГС), коэффициент овершута (КО).

Достоверность различий средних значений двух выборочных совокупностей с определенным t-критерия Стьюдента и уровня значимости (p) представляет собой оцененную меру уверенности в его «истинности», «репрезентативности выборки». Указанный показатель находится в убывающей зависимости от надежности результата. Более высокий p-уровень соответствует более низкому уровню доверия к найденной в выборке зависимости между переменными. Именно p-уровень представляет собой вероятность ошибки, связанной с распространением наблюдаемого результата на всю популяцию. В медицинских исследованиях p-уровень 0,05 рассматривается как «приемлемая граница» уровня ошибки. Выборка однородная, распределение нормальное, подтверждено тестом Колмогорова – Смирнова. Равенство дисперсий в группах проверено при помощи критерия Левена. Для определения меры зависимости между переменными применена простая линейная корреляция Пирсона (r). Необходимые вычисления реализованы в прикладном пакете программ «STATISTICA 7.0».

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Во время постурального теста нами определены показатели мозгового кровотока у пациенток с нормально протекающей беременностью и беременных с тяжелой преэклампсией, установлена достоверность различий средних значений в исследуемых группах. При анализе данных, полученных при ТДГ средней мозговой артерии, выявлено, что у беременных основной группы наблюдается достоверное, симметричное с обеих сторон, снижение линейных показателей доплеровского спектра по сравнению с аналогичными показателями у беременных группы сравнения (см. таблицу). У беременных с тяжелой преэклампсией нами отмечено снижение линейной скорости кровотока преимущественно за счет пиковой систолической скорости (73,76 см/с против 104,83 см/с в группе сравнения;  $p < 0,0001$ ). Выявлено статистически достоверное изменение уровня цереброваскулярного сопротивления на основании снижения индекса резистентности в группе пациенток с преэклампсией (0,51 против 0,54 в группе сравнения;  $p < 0,0001$ ) и пульсационного индекса (0,73 против 0,84 в группе сравнения;  $p < 0,0001$ ). Систолюдиастолическое отношение, отражающее состояние сосудистой стенки, снизилось у беременных с тяжелой преэклампсией (1,91 против 2,05 в группе сравнения;  $p < 0,0001$ ). Отмечено достоверное статистическое различие в ряде величин, отражающих церебральное перфузионное и внутричерепное давление, гидродинамическое

кое сопротивление и цереброваскулярную реактивность, в сравнении с аналогичными показателями у здоровых пациенток в III триместре беременности. На основании изменения КО (1,38 против 1,06 в группе сравнения;  $p < 0,05$ ) отмечено изменение цереброваскулярной реактивности за счет вазодилаторного резерва. Пост-туральный тест в группе обследуемых женщин привел к существенному повышению индекса гидродинамического сопротивления (2,34 мм рт. ст./см · с<sup>-1</sup> против 1,29 мм рт. ст./см · с<sup>-1</sup> в группе сравнения;  $p < 0,0001$ ). Внутрочерепное давление также значительно увеличилось (13,19 мм рт. ст. против 10,69 мм рт. ст. в группе сравнения;  $p < 0,0005$ ). Напротив, церебральное перфузионное давление (47,25 мм рт. ст. против 49,57 мм рт. ст. в группе сравнения;  $p < 0,01$ ), индекс мозгового кровотока (22,15 против 40,20 в группе сравнения;  $p < 0,0001$ ) и индекс стабильности потока (0,59 против 0,69 в группе сравнения;  $p < 0,0001$ ) оказались статистически достоверно ниже в группе беременных с тяжелой формой преэклампсии.

Показатели мозгового кровотока у беременных с преэклампсией и условно здоровых беременных группы сравнения

Показатель	Преэклампсия тяжелая (1) (n = 73)	Группа сравнения (2) (n = 90)	(p)*
PSV, см/с	73,76 ± 1,11	104,83 ± 1,75	< 0,0001
EDV, см/с	35,29 ± 0,39	48,73 ± 1,09	< 0,0001
TAV, см/с	49,92 ± 0,40	67,46 ± 1,38	< 0,0001
S/D	1,91 ± 0,02	2,05 ± 0,02	< 0,001
PI	0,73 ± 0,02	0,84 ± 0,02	< 0,001
RI	0,51 ± 0,01	0,54 ± 0,01	< 0,001
ЦПД, мм рт. ст.	47,25 ± 1,21	49,57 ± 0,99	< 0,01
ВЧД, мм рт. ст.	13,19 ± 1,68	10,69 ± 0,74	< 0,0005
ИГС, мм рт. ст./см · с <sup>-1</sup>	2,34 ± 0,02	1,29 ± 0,03	< 0,0001
ИМК, см/с	22,15 ± 0,57	40,20 ± 1,13	< 0,001
SFI	0,59 ± 0,01	0,69 ± 0,01	< 0,005
КО	1,38 ± 0,02	1,06 ± 0,04	< 0,05

Примечание. p – статистическая значимость (p-уровень).

Согласно цели настоящего исследования следующим этапом проведен корреляционный анализ между параметрами мозгового кровотока и показателями артериального давления. Обнаружена средняя обратная зависимость между показателями мозгового кровотока и средним артериальным давлением (PSV и САД:  $r = -0,41$ ; EDV и САД:  $r = -0,43$ ; TAV и САД:  $r = -0,44$ ), что, вероятно, объясняется наличием собственной системы ауторегуляции кровообращения в головном мозге, блокирующей колебания артериального давления в определенных рамках регуляции.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наблюдаемые изменения церебральной гемодинамики, выявленные в ходе исследования в группе пациенток с преэклампсией, весьма характерны для сосудистых сегментов, находящихся в состоянии вазодилатации. Нарушение перфузии мозга следует считать симметричным, поскольку не было выявлено достоверных различий между аналогичными величинами, измеренными с обеих сторон. Постуральный тест с поворотом вызывает изменения системного кровотока. Поворот с левого бока на спину приводит к увеличению артериального давления как у здоровых беременных, так и у беременных с преэклампсией, однако в последней группе степень повышения давления сравнительно выше. Подобное изменение гемодинамики во время постурального теста у беременных основной группы привело к ауторегуляторной вазодилатации претентотических сегментов артерий и вазоконстрикции сосудов сопротивления (артериол) для поддержания постоянства мозгового кровотока. Вероятно, изменение тока крови указывает на пассивное расширение в области M1 сегмента средней мозговой артерии, что может отмечаться в случае комбинации повышенного артериального давления и сбоя в системе ауторегуляции. Становится очевидным, что мозговая ауторегуляция у беременных, страдающих преэклампсией, оказывается несостоятельной, поскольку не соблюдается закономерность реакции мозговой гемодинамики, состоящая в повышении скорости кровотока по магистральным артериям мозга в ответ на увеличение среднего артериального давления. Повышение показателя коэффициента овершута подтверждает предположение о предельно напряженном резерве вазодилатации. Полученные результаты следует интерпретировать как сбой компенсаторного механизма регуляции тонуса интракраниальных сосудов у беременных с тяжелой преэклампсией.

По-видимому, нарушения мозгового кровотока при постуральном тесте связаны с аортокавальной компрессией. Нам представляется, что в указанный процесс включаются и механизмы ауторегуляции мозгового кровообращения, вызывая дилатацию мозговых артерий для поддержания адекватной перфузии мозга на фоне низкого сердечного выброса. Но вместе с тем предельно напряженный резерв вазодилатации, свидетельствующий о сбое системы ауторегуляции мозгового кровообращения у беременных с преэклампсией, не способен компенсировать указанные нарушения, что приводит к расстройству мозгового кровообращения.

По нашему мнению, при прогрессировании преэклампсии указанные процессы ведут к увеличению внутрочерепного давления, развитию вазогенного отека и формированию гипертонической энцефалопатии, что прямо и косвенно

подтверждается итогами настоящего наблюдения. Между тем пассивному расширению артериол сопутствует снижение церебрального перфузионного давления. На фоне очерченных патологических процессов формируется феномен Кохера – Кушинга, направленный на восстановление церебрального перфузионного давления, за которым, предположительно, должно последовать дальнейшее прогрессивное повышение среднего артериального давления, усугубление артериальной гипертензии и формирование порочного круга. В том случае когда внутричерепная гипертензия превышает компенсаторные возможности системы кровообращения, уровень мозгового кровотока и объем кровенаполнения головного мозга резко снижаются, развиваются гипоксия и ишемия головного мозга, ауторегуляция нарушается или полностью утрачивается.

Таким образом, у пациенток с преэклампсией для достижения компенсации мозгового кровотока необходимо более сильное напряжение ауторегуляторных реакций периферического кровообращения. По-видимому, это может служить одним из объяснений биологической целесообразности периферической вазоконстрикции у беременных с тяжелой формой преэклампсии, так как существующие объяснения роста обще-

го периферического сопротивления сосудов в зависимости только от волемиического статуса выглядят механистически.

#### ВЫВОДЫ

1. Данные проведенного исследования свидетельствуют о нарушении перфузии мозга у беременных с тяжелой преэклампсией во время послурального теста в отличие от здоровых беременных.

2. Полученные результаты следует интерпретировать как сбой компенсаторного механизма регуляции тонуса интракраниальных сосудов у беременных с тяжелой преэклампсией.

3. Выявленные статистически достоверные различия показателей мозгового кровотока у беременных с тяжелой преэклампсией и здоровых беременных при проведении roll-over теста, подчеркивают его исключительную ценность для диагностики преэклампсии.

Исследование выполнено в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, Государственный контракт № П1059 от 31.05.2010.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Венцковский Б. М. Гестозы. М.: МИА, 2005. 312 с.
2. Гестоз. Клинические рекомендации. Акушерство и гинекология / Под ред. В. И. Кулакова. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2005. 543 с.
3. Репина М. А. Преэклампсия и материнская смертность. СПб.: Изд-во СПбМАПО, 2005. 208 с.
4. Савельева Г. М., Кулаков В. И., Серов В. Н. и др. Профилактика и терапия гестоза // Российский вестник акушера-гинеколога. 2001. № 1(3). С. 66–72.
5. Серов В. Н., Шифман Е. М., Молчанов И. В. Эклампсия – диагностика, анестезия и интенсивная терапия // Материалы Всероссийской междисциплинарной конф. Стамбул, 2002. С. 71–84.
6. Шифман Е. М. Преэклампсия, эклампсия, HELLP-синдром. Петрозаводск: ИнтелТек, 2003. 432 с.
7. Шифман Е. М., Гуменюк Е. Г., Ившин А. А. Диагностика поражений головного мозга у беременных с преэклампсией и эклампсией // Акушерство и гинекология. 2004. № 6. С. 6–8.
8. Шифман Е. М., Гуменюк Е. Г., Ившин А. А. Диагностика нарушений церебральной артериальной гемодинамики у беременных с тяжелой преэклампсией // Российский вестник акушера-гинеколога. 2005. № 1. С. 4–8.

**ЖАННА АЛЕКСАНДРОВНА МИРОНОВА**  
кандидат медицинских наук, доцент кафедры госпитальной терапии им. академика М. В. Черноруцкого, Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. академика И. П. Павлова  
*zhanmir@mail.ru*

## АЛЛЕЛЬНЫЕ ВАРИАНТЫ R130Q ГЕНА ИНТЕРЛЕЙКИНА 13, C590T ГЕНА ИНТЕРЛЕЙКИНА 4, C3435T ГЕНА МНОЖЕСТВЕННОЙ ЛЕКАРСТВЕННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ – МАРКЕРЫ РАЗВИТИЯ РИСКА И СТЕПЕНИ ТЯЖЕСТИ БРОНХИАЛЬНОЙ АСТМЫ

В патогенез бронхиальной астмы вовлечены различные функционально взаимосвязанные гены. Комплексное тестирование генов интерлейкина 4 и 13, отвечающих за иммунный ответ, гена множественной лекарственной устойчивости, ассоциированного с транспортом лекарственных препаратов, позволяет выявить маркерные профили для оценки степени тяжести и диагностики различных фенотипов астмы.

Ключевые слова: бронхиальная астма, полиморфизм, ген, интерлейкин 4, интерлейкин 13

Согласно современным представлениям о генетической предрасположенности к бронхиальной астме (БА), для развития этого заболевания необходимо сочетание аллельных вариантов генов, формирующих неблагоприятный наследственный фон, реализующийся под действием факторов внешней среды. Генная сеть БА достаточно сложная и содержит много генов-кандидатов. На сегодняшний день известно более 150 генов, функция белковых продуктов которых тесно связана с развитием астмы и атопией (гены цитокинов и их рецепторы, гены главного комплекса гистосовместимости, гены медиаторов воспаления и их рецепторов, гены бета2-адренорецепторов, глюкокортикоидного рецептора, мускаринового рецептора, гены биотрансформации ксенобиотиков).

Генетический скрининг позволил обнаружить на 10 различных хромосомах 15 локусов, ассоциированных с БА. Подтверждено сцепление БА с локусами, в которых локализованы гены-кандидаты данного заболевания (5q31.1-33, 6p12-21.2, 11q12-13, 12q14-24.1, 13q12-22, 14q11-12, 16p12.1-11.2 и Xq28/Yq12 и другие). Несмотря на явные успехи в этой области, до полного понимания механизмов взаимодействия генетических и средовых факторов в детерминации астмы все еще далеко.

Большинство пациентов с астмой имеют специфический паттерн воспаления в дыхательных путях, который характеризуется дегрануляцией тучных клеток, инфильтрацией эозинофилов и увеличением количества активированных клеток Т-хелперов 2-го типа (Th2). Th2 синтезируют интерлейкин (IL) 4 и IL13, которые воздействуют на В-клетки, приводя к продукции иммуноглобулина Е (IgE), IL5 влияет на активность эозинофилов, IL9 регулирует пролиферацию и дифференцировку тучных клеток [20]. С точки

зрения генетики интересным фактом оказалось то, что гены наиболее важных в развитии астмы интерлейкинов IL4, -5, -9, -13 расположены тандемно в одном кластере на хромосоме 5q31-33. Поэтому гены IL, картированные в регионе 5q31-33, становятся привлекательным объектом по поиску наследственных факторов предрасположенности к астме. Полиморфизм генов IL4 и IL13 и их рецепторов вносит вклад в комплексную регуляцию атопии.

### ПОЛИМОРФНЫЕ ВАРИАНТЫ ГЕНА IL13 ПРИ АСТМЕ

Одним из кандидатов на роль главного индуктора аллергии является IL13, обладающий сходной биологической активностью с IL4.

Первые аллельные варианты были открыты в двух интронах (G543C в первом интроне и T1922C – в третьем), а также в кодирующей части (A2043G и A2579C в транслируемом и 3'-нетранслируемом регионе четвертого экзона соответственно) гена IL13 [17]. Позднее полиморфные варианты были определены в промоторном участке C1055T гена IL13 [15].

В японской и европейских популяциях была выявлена ассоциация полиморфизма A2043G (Arg130Gln) гена IL13 с атопической бронхиальной астмой и увеличенным уровнем сывороточного IgE [8]. В китайской популяции была выявлена ассоциация между аллельными вариантами Arg130Gln гена IL13 с уровнем общего IgE, но не с развитием и не с тяжестью БА [12]. В исследовании С. А. Мазуриной с соавторами [3] у больных атопической БА частота аллеля Arg130 гена IL13 составляла 51 и 21 % у здоровых неродственных русских жителей Москвы соответственно. Уровень IgE был повышен у больных гомозигот по аллелю Arg и гетерозигот гена IL13

[3]. В японской и британской популяциях была выявлена ассоциация между аллельными вариантами Gln110Arg гена IL13 и астмой, но при этом не было выявлено связи данного полиморфизма с уровнем общего IgE [10].

Функциональный полиморфизм гена IL13 связан с заменой аргинина (Arg) на глутамин (Gln) в положении 110 и ассоциирован со снижением аффинности связывания IL13 с рецепторной субъединицей IL13R $\alpha$ 2, выполняющей роль рецептора-ловушки, а также со снижением блокирования биологической активности IL13. Эта замена никак не влияла на связывание IL13 с субъединицей IL13R $\alpha$ 1 и на передачу сигнала от клеточного рецептора. Больные БА, гомозиготы по аллелю глутамина, имели повышенные уровни IL13 в плазме крови, видимо, вследствие нарушения связывания IL13 мембранными растворимыми IL13R $\alpha$ 2 рецепторами и его удаления из циркуляции.

Установлено, что в британской популяции полиморфизм A1398G IL13R $\alpha$ 1 на хромосоме Xq13 ассоциирован с высоким уровнем IgE. Эти данные сопоставимы с данными об аллельных вариантах гена рецептора IL4 (L4R $\alpha$ ) у японцев и немцев.

Таким образом, определенные аллельные варианты гена IL13 могут содействовать развитию атопии с высоким уровнем IgE и БА у различных представителей многих этнических групп [9].

#### ПОЛИМОРФИЗМ ГЕНА IL4

Интерлейкин 4 является важнейшим цитокином воспаления, в том числе обусловленного развитием аллергического IgE-ответа. Вследствие центральной роли IL4 в развитии и поддержании воспаления при БА анализ генетической регуляции активности этого цитокина имеет большое значение для понимания механизмов развития атопии и БА. На сегодняшний день данные о полиморфных вариантах гена IL4 противоречивы и не дают однозначного ответа на вопрос об их патогенетической роли. E. G. Burchard с соавторами обнаружили, что полиморфизм в промоторной области C589T гена IL4 усиливает его транскрипцию [6].

В американской и японской популяциях было выявлено, что функциональный полиморфизм C590T гена IL4, связанный с более высокой продукцией IL4, был ассоциирован с повышением сывороточного уровня IgE и с клиническими проявлениями БА. Однако французскими исследованиями подобной ассоциации не было выявлено. При исследовании австралийской популяции показана ассоциация данного полиморфизма с увеличением специфического IgE к клещам домашней пыли, но не с увеличением общего IgE [1].

Также исследовалась связь между вышеуказанным полиморфизмом гена IL4 и стероидорезистентной бронхиальной астмой (СРБА).

Показано, что повышенная экспрессия аллеля 590T гена IL4 была констатирована в группе больных СРБА по сравнению с пациентами с гормоночувствительной БА [18].

Полиморфизм в области 3'-UTR гена IL4, находящийся в сильном неравновесии по сцеплению с транзицией -589C/T, может иметь прогностическое значение в отношении степени тяжести атопической БА [7]. Установлено, что полиморфные варианты генов IL4, IL5, IL9, IL4R $\alpha$ , IL5 вносят небольшой (до 5–10 %), но статистически значимый вклад в изменчивость количественных, патогенетически и клинически значимых для БА признаков: показатели легочной функции, уровни иммуноглобулинов, бронхиальная гиперреактивность [7].

При обследовании 200 больных БА, проживающих в северо-западном регионе России, отмечено статистически недостоверное увеличение частоты T-аллеля IL4 по сравнению с контрольной группой (29,8 и 18,1 % соответственно). Вместе с тем распределение генотипов по гену IL4 у больных БА достоверно отличалось от такового в контрольной группе. Так, частота генотипа 590C/T гена IL4 была достоверно повышена у больных БА (51,1 %) по сравнению с контрольной группой (27,5 %) (OR = 2,74; CI: 1,27–5,92). Интересно, что распределение генотипов по гену IL4 у больных БА в зависимости от пола отличалось высокой достоверностью ( $p < 0,01$ ), тогда как в контрольной выборке такой зависимости не было отмечено. Установлено, что среди больных БА мужского пола достоверно чаще встречались гетерозиготы гена IL4 (81,8 %), чем среди женщин с БА (41,7 %) и мужчин контрольной группы (28,2 %). Согласно коэффициенту соотношения шансов, риск развития аллергической БА у мужчин при наличии генотипа -590C/T IL4 увеличивался более чем в 11 раз (OR = 11,5; CI: 2,57–5,87) [1]. Следует отметить, что сочетание двух редких аллельных вариантов генов IL4 (-590T) и IL4R $\alpha$  (-576R) достоверно чаще встречалось в группе больных БА по сравнению с контрольной группой здоровых людей. Риск развития атопической БА при этом возрастает более чем в 3 раза [2]. Другой полиморфизм гена IL4 3'-UTR 717 G/G ассоциирован с тяжелым течением БА у якутов [4].

#### ПОЛИМОРФНЫЕ ВАРИАНТЫ ГЕНА IL4R $\alpha$ ПРИ АСТМЕ

Свое действие IL13 и IL4 осуществляют посредством взаимодействия с рецепторами на поверхности клеток. Важным является тот факт, что рецепторы обоих цитокинов обладают общей  $\alpha$ -цепью (IL4R $\alpha$ ), которая участвует в передаче сигнала внутрь клетки, тем самым реализуя функции этих цитокинов.

Вариант Ile50Val гена рецептора  $\alpha$  IL4 (IL4R $\alpha$ ) ассоциирован с бронхиальной астмой и повы-

шенным уровнем общего IgE, а также со специфическим IgE к аллергенам клеща домашней пыли [14]. В японской популяции была отмечена тесная связь между полиморфизмом Pe50Val гена IL4Rα и уровнем IgE [5]. Вариант замены аминокислоты аргинина на глутамин в положении 551 гена IL4Rα был обнаружен в популяции британцев при изучении пациентов с экземой и гипер-IgE синдромом [13]. Противоположные данные были обнаружены в популяции немцев. Так, у носителей Arg551Gln гена IL4Rα был выявлен низкий уровень IgE [11].

### РОЛЬ ТРАНСПОРТНЫХ БЕЛКОВ

Транспортные белки играют важную роль в регуляции абсорбции, распределения и экскреции различных веществ, в том числе цитокинов. Одним из членов семейства транспортных белков Р-гликопротеин-170 (PGP-170) кодируется геном человека ABCB1, именуемый также MDR1 (ген множественной лекарственной устойчивости). Продукт гена PGP-170 – АТФ-зависимый транспортный белок – представляет собой специальную помпу для выведения из клетки различных липофильных соединений (стероидных гормонов, цитокинов, продуктов метаболизма клетки) против градиента концентрации [19]. Установлено, что полиморфизм в 26-й экзоне С3435Т гена MDR1 коррелирует с функционированием и уровнем экспрессии PGP-170. В ряде исследований показано, что высвобождение цитокинов – интерферона-гамма, IL2, IL4 – и фактор некроза опухоли альфа из мононуклеаров периферической крови достоверно меньше у носителей 3435ТТ, чем у лиц с генотипом СТ гена MDR1 [16].

На кафедре госпитальной терапии им. академика М. В. Черноруцкого (заведующий кафедрой – доктор медицинских наук, профессор В. И. Трофимов) совместно с отделом молекулярно-генетических технологий НИЦ ГО ВПО СПбГМУ им. академика И. П. Павлова (заведующий лабораторией – член-корреспондент РАН, профессор М. В. Дубина) проводится работа по изучению генетических аспектов терапевтической резистентности у больных БА.

Цель исследования – оценить частоту встречаемости вариантов С3435Т гена MDR1, R130Q гена IL13, С590Т гена IL4 у больных БА в зависимости от степени тяжести заболевания.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Клинико-лабораторное обследование больных осуществлялось на базе клиники госпитальной терапии ГОУ ВПО СПбГМУ им. академика И. П. Павлова Росздрава.

Обследовано 105 астматиков, из них 57 (54,29 %) пациентов с гормонозависимой БА и 48 (45,71 %) больных БА средней степени тяжести. Все пациенты не состояли в кровном родстве.

Обследованная популяция была представлена жителями Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Диагноз устанавливался согласно международной классификации болезней 10-го пересмотра с учетом рекомендаций Европейского респираторного общества и Российского руководства по диагностике, лечению и профилактике БА. Для постановки диагноза БА применялись общеклинические и лабораторные методы обследования, включая цитологическое исследование мокроты и исследование функции внешнего дыхания.

Группу контроля составили 103 человека. Критерии отбора в контрольную группу были следующие: 1) возраст от 20 до 75 лет, 2) отсутствие курения в анамнезе, 3) отсутствие хронической бронхолегочной и аутоиммунной патологии, а также онкопатологии, 4) отсутствие аллергических заболеваний в анамнезе, 5) неотягощенная наследственность в отношении аллергических заболеваний.

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

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

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нами было выявлено, что аллель 3435С гена MDR1 чаще встречался в группе больных тяжелой БА (0,57),  $\chi^2 = 21,34$  ( $p = 0,0001$ ) и БА средней степени тяжести (0,48),  $\chi^2 = 8,68$  ( $p = 0,003$ ) по сравнению с группой контроля (0,31). Частота встречаемости генотипа СС гена MDR1 была больше у больных БА средней (29,17 %) и тяжелой степени тяжести (29,82 %) по сравнению с группой контроля (8,74 %),  $\chi^2 = 11,99$  ( $p = 0,005$ ) и  $\chi^2 = 10,58$  ( $p = 0,001$ ) соответственно.

Генотип RR гена IL13 встречался у 42,86 % больных тяжелой БА, в группе контроля – 65,69 %,  $\chi^2 = 7,71$ ,  $p = 0,005$ . Вместе с тем в груп-



пе контроля агрессивный генотип QQ гена IL13 встречался реже (3,92 %), чем в группе больных тяжелой БА (8,93 %). При генотипировании было выявлено, что частота встречаемости гетерозигот гена IL13 была чаще среди больных тяжелой БА (48,21 %), чем в группе контроля (30,39 %). Важно отметить, что сочетание генотипов CC гена MDR1 и RQ гена IL13 встречалось у 14,29 % больных тяжелой БА, а в группе контроля у 1,96 %,  $\chi^2 = 9,26$  ( $p = 0,004$ ). Согласно коэффициенту соотношения шансов, носительство данных генотипов повышало в 8,3 раза риск развития тяжелой БА ( $OR = 8,33$ ;  $CI_{95} \% 2,39-28,99$ ). Мы не получили достоверного различия в распределении генотипов гена IL4. По данным литературы, аллель 590T гена IL4 и аллель QQ гена IL13 являются агрессивными и вносят свой вклад в вариабельность цитокинового профиля; соответственно, они ассоциированы с более тяжелым течением БА. Тем не менее, по нашим данным, благоприятное сочетание генотипов TT гена MDR1 + CC гена IL4 + RR гена IL13 реже встречалось у больных БА (1,92 %) по сравнению с группой контроля – 14,56 %,  $\chi^2 = 10,97$  ( $p = 0,001$ ).

В результате наших исследований выявлено, что в развитии такого сложного заболевания, как БА, большую роль играют не столько отдельные аллели генов, сколько их сочетание, или «генетические ансамбли». Нами впервые показано, что сочетание генотипа CC гена MDR1 и RQ гена IL13 повышает риск развития тяжелой БА. Наличие ассоциации генотипов TT гена MDR1 + CC гена IL4 + RR гена IL13 снижает риск развития тяжелой гормонозависимой БА и связано с более благоприятным течением заболевания. Частота встречаемости данных ассоциаций, вероятно, может быть неодинакова в популяциях, обуславливая тем самым различия у разных народов. Поэтому перспективным направлением исследований генетических основ БА является изучение вклада конкретных сочетаний аллелей в подверженность болезни.

Генетические маркеры в скором будущем позволят проводить скрининг для выявления различных фенотипов БА, включая неконтролируемую БА, что будет способствовать усовершенствованию и оптимизации подходов прогнозирования заболевания, степени его тяжести и разработке персонализированной терапии БА.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Генетический паспорт – основа индивидуальной и предрективной медицины / Под ред. В. С. Баранова. СПб., 2009. 528 с.
2. Келембет Н. А., Гембицкая Т. Е., Иващенко Т. Э., Лаврова О. В. Ассоциация полиморфизма генов IL4 и IL4Ra с развитием аллергической бронхиальной астмы // *Болезни органов дыхания*. 2008. № 1. С. 36–41.
3. Мазурина С. А., Казначеев В. А., Воронько О. А. Выявление полиморфизма Arg130Gln в гене IL13 и Ile50Val в гене  $\alpha$ -цепи рецептора IL 4 при atopической бронхиальной астме // *Медицинская иммунология*. 2007. Т. 8. № 2–3.
4. Соловьева Н. А., Максимова Н. Р., Николаева Л. Е. и др. Полиморфизм генов кандидатов atopической бронхиальной астмы в якутской популяции // *Генетика народонаселения и патология*. Вып. 8. Томск, 2007. С. 122–123.
5. Arima K. Upregulation of IL13 concentration in vivo by the IL13 variant associated with bronchial asthma // *J. Allergy Clin. Immunol.* 2002. Vol. 109. P. 980–987.
6. Burchard E. G., Silverman E. K., Rosenwasser L. J. et al. Association between a sequence variant in the IL-4 gene promoter and FEV(1) in asthma // *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 1999. Vol. 160. P. 919–922.
7. Freidin M. V., Kobyakova O. S., Ogorodova L. M., Puyrev V. P. Association of polymorphisms in the human IL4 and IL5 genes with atopical bronchial asthma and severity of the disease // *Comparative Func. Genom.* 2003. Vol. 4. P. 346–350.
8. Graves P. E., Kabesch M., Halonen M. et al. A cluster of seven tightly linked polymorphisms in the IL-13 gene is associated with total serum IgE levels in three populations of white children // *J. Allergy Clin. Immunol.* 2000. № 105. P. 506–513.
9. Heinzmann A., Mao X.-Q., Akaiwa M. Genetic variants of IL-13 signalling and human asthma and atop // *Hum. Mol. Genet.* 2000. Vol. 9(4). P. 549–559.
10. Kruse S., Forster J., Kuehr J., Deichmann K. A. Characterization of the membrane-bound and a soluble form of human IL-4 receptor  $\alpha$  produced by alternative splicing // *Int. Immunol.* 1999. Vol. 11. P. 1965–1970.
11. Leung T. F., Tang L. S., Chan I. H. et al. A polymorphism in the coding region of interleukin-13 gene is associated with atop but not asthma in Chinese children // *Clinical and Experimental Allergy*. 2001. Vol. 31. P. 1515–1521.
12. Mitsuyasu H., Izuhara K., Mao X.-Q. et al. Ile50Val variants or IL4Ra upregulates IgE synthesis and associates with atopical asthma // *Nature Genet.* 1998. Vol. 19. P. 119–120.
13. Mitsuyasu H., Yanagihara Y., Mao X.-Q. et al. Dominant effect of Ile50Val variant of the human IL-4 receptor  $\alpha$ -chain in IgE synthesis // *J. Immunol.* 1999. Vol. 162. P. 1227–1231.
14. Noguchi E., Shibasaki M., Arinami T. et al. Association of asthma and the interleukin-4 promoter gene in Japanese // *Clin. Exp. Allergy*. 1998. Vol. 28. P. 449–453.
15. Pawlik A., Baskiewicz-Masiuk M., Machalinski B. et al. Involvement of C3435T and G2677T multidrug resistance gene polymorphisms in release of cytokines from peripheral blood mononuclear cells treated with methotrexate and dexamethasone // *Eur. J. Pharmacol.* 2005. Dec. 28. № 528(1–3). P. 27–36.
16. Rosenwasser U., Klemm D. J., Dresback J. K. et al. Promoter polymorphisms in the chromosome 5 gene cluster in asthma and atop // *Clin. Exp. Allergy*. 1995. Vol. 25. P. 74–78.
17. Rosenwasser L., Klemm J. D., Klemm J. M. et al. Association of asthmatic steroid intensity with an IL-4 gene promoter polymorphism // *J. Allergy Clin. Immunol.* 2001. Vol. 107. P. 235.
18. Howard T. D., Whittaker P. A., Zaiman A. L. et al. Identification and association of polymorphisms in the interleukin-13 gene with asthma and atop in a Dutch population // *Am. J. Respir. Cell Mol. Biol.* 2001. Vol. 25 (3). P. 377–384.
19. Ueda K., Okamura N., Hirari M. et al. Human P-glycoprotein transports cortisol, aldosterone and dexamethasone, but not progesterone // *J. Biol. Chem.* 1992. Vol. 267(34). P. 24248–24252.
20. Wills-Karp M., Chiaramonte M. Interleukin-13 in asthma // *Curr. Opin. Pulm. Med.* 2003. Med. 9(1). P. 21–27.

ПАВЕЛ СЕРГЕЕВИЧ БУРЛАКОВ

младший научный сотрудник лаборатории глубинного геологического строения и динамики литосферы, Институт экологических проблем Севера Уральского отделения РАН (г. Архангельск)  
 asmat21@mail.ru

## ОТРАЖЕНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ СТРУКТУР ОНЕЖСКОГО ГРАБЕНА В ЛАНДШАФТАХ СЕВЕРОДВИНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

В работе рассмотрены особенности геоморфологических структур и гидросети Северодвинской низменности и их связь с тектоническим строением региона. Результаты морфоструктурного анализа позволяют судить о повышенной интенсивности склоновых и эрозийных процессов в зонах геодинамического влияния тектонических структур. Данные факты подтверждают наличие системной связи между глубинными и поверхностными компонентами геосфер.

Ключевые слова: структурная геоморфология, тектоника, Онежский грабен, Северодвинская низменность

При комплексных ландшафтных исследованиях на равнинах рельеф и особенности гидросети рассматриваются в контексте геоморфологических факторов, при этом происходит недооценка роли тектонических структур (в том числе древнего заложения) и неотектонических движений. Сложность выделения участков, которые могут отражать глубинное строение в геоморфологических структурах, связана прежде всего с низкой сейсмической активностью юго-восточной части Онежского грабена, отсутствием активизированных разломов, большой мощностью осадочного чехла, а также низменными ландшафтами без значительных перепадов рельефа. В то же время данные тектонические структуры не настолько пассивны, как это принято считать, на что указывает, например, миграция очагов землетрясений с Балтийского щита на север Русской плиты вдоль древних разломов северо-западного простирания [2].

В настоящей работе сделана попытка выявить сопряженность современных компонентов ландшафтов Северодвинской низменности с тектоническими структурами на основе морфометрических характеристик, линейных форм различных ориентировок и геометрии рисунка гидрографической сети и рельефа.

### РАЙОН, МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

*Район исследований.* Рассматриваемая территория (рис. 1) расположена в юго-восточной части Онежского грабена на севере Русской плиты и характеризуется типичным двухъярусным строением, которое включает докембрийский кристаллический фундамент и чехол осадочных (PZ-KZ) комплексов [6]. Глубина залегания фундамента колеблется от 2 до 9 км. В современном рельефе преобладают озерно-аллювиальные и ледниково-озерные равнины, осложненные конечно-моренными грядами с высотами над уровнем моря 20–50 м. В центральной части района

обособляется Моржегорский карстовый район. Здесь отмечено интенсивное развитие форм поверхностного карста: задернованный карст, провальные воронки, карстовые лога, карстовые цирки, провалы.

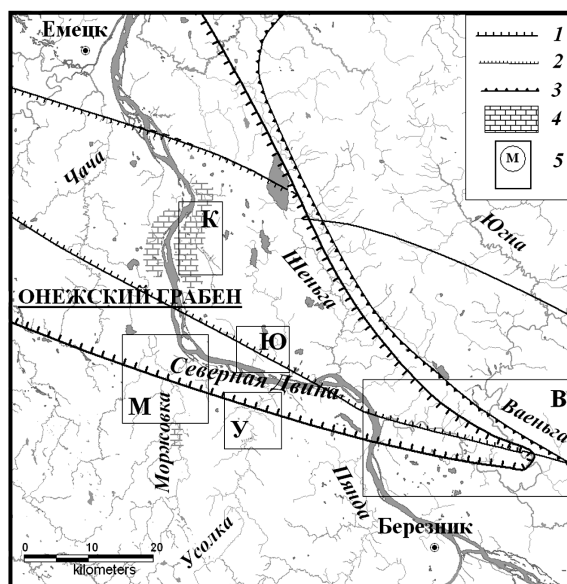


Рис. 1. Схема района исследований: 1 – граница Онежского грабена; 2 – тектонические разломы более низкого ранга; 3 – уступ Двинско-Мезенской возвышенности; 4 – Моржегорский карстовый район; 5 – ключевые участки исследований (К – Кирокса, Ю – Юмата, М – Моржовка, У – Усолка, В – Ваенга)

*Материал и методика исследований.* Для анализа геолого-геоморфологической обстановки использовались следующие материалы: топокарты масштаба 1:100 000, тектоническая карта Белого моря и прилегающих территорий (М 1:1 500 000) [5], карта генетических типов рельефа (автор Т. Ю. Затульская) [3].

В морфометрическом анализе использовались оцифрованные векторные слои элементов гидросети и рельефа с государственных топографических карт масштаба 1:100 000.

Параметры рельефа оценивали с помощью цифровой модели рельефа (ЦМР), построенной по векторным картам горизонталей (высота сечений рельефа – 10 м), отметок высот и урезов воды. Для построения ЦМР использовался метод интерполяции Natural Neighbor, реализованный в модуле Vertical Mapper 3.1.1. ГИС-пакета MapInfo 8.5. Расчет среднего наклона поверхности (градусы) выполнен с помощью функции Slope в модуле Vertical Mapper 3.1.1.

В качестве характеристик рельефа, отражающих связь с тектоническими структурами, были выбраны изменение высот рельефа, ориентация линейных форм рельефа и элементов гидросети. Согласно [4], существенными признаками тектонических структур следует считать изменение высоты на 1/10 от средней высоты местности, смену ориентации линейных элементов ландшафта на 30° и более в равнинных условиях.

На ключевых участках гидросети проведены расчеты среднего уклона водотоков. В случае недостаточного количества отметок урезов воды использовались значения горизонталей в точках пересечения ими русла. Средний уклон водотоков (в промилле) вычислялся по формуле (1):

$$I = (H_n - H_0) / L = \Delta H / L, \quad (1)$$

где  $H_n$  – отметка высоты уреза воды в начальном пункте, м;  $H_0$  – отметка высоты уреза воды в конечном пункте, м;  $L$  – длина водотока между этими пунктами, км.

Данные гидрографические характеристики вкуче с ориентацией линейных форм и высотами местности являются одними из наиболее информативных геоморфологических признаков разломов и разрывных нарушений, отражающих структуры древнего заложения, а также неотектонический режим [1], [4].

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

*Рельеф.* Геоморфологическими признаками тектонических структур Онежского грабена могут служить уступ Двинско-Мезенской возвышенности в юго-восточной части, маркирующий и наследующий направление грабена, а также вытянутый участок на левом берегу р. Северная Двина северо-западного простирания, маркирующий высотную ступень 30 м в нижнем течении бассейнов рек Моржовка и Усолка (рис. 2). На данных участках разломные структуры также маркируют резкое изменение глубины залегания фундамента от 8–9 до 2–3 км.

В условиях Северодвинской низменности слаборасчлененный рельеф с преобладанием плоских поверхностей приводит к формированию крупных по площади ландшафтных контуров. Эта монотонность нарушается на склоновых и приречных ландшафтных комплексах, где отмечается большее количество ландшафтных единиц при сравнительно малой их площади. Наибольшим разнообразием ландшафтных единиц низшего ранга (фаций и урочищ) отличаются

территории с размахом высот рельефа от 20 м и более и как следствие – с высокими значениями угла наклона поверхности, а также зоны контакта геоморфологических структур и районы с близким залеганием либо выходом на земную поверхность карстующихся пород.

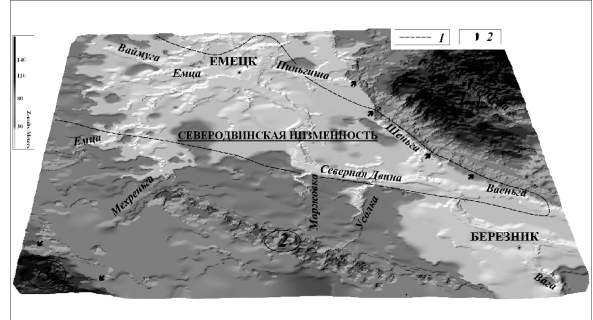


Рис. 2. Трехмерная модель рельефа Северодвинской низменности и прилегающих территорий (1 – Двинско-Мезенская возвышенность, 2 – холмисто-моренная гряда северо-западного простирания, 3 – Онего-Двинская возвышенность); 1 – граница Онежского грабена, 2 – стрелками показаны уступы

Северодвинская низменность характеризуется очень слабым наклоном поверхности, значения не превышают 0,5–0,8°. Наибольшие значения угла наклона поверхности (1,5–2,9°) отмечены для локальных участков, расположенных в бассейнах нижнего течения рек Моржовка, Усолка, Ваеньга, Юмата, Чача и приуроченных к тектоническим структурам Онежского грабена (рис. 3). Высокие значения уклона поверхности в бассейне р. Кирокса связаны с развитием здесь карстовых процессов.

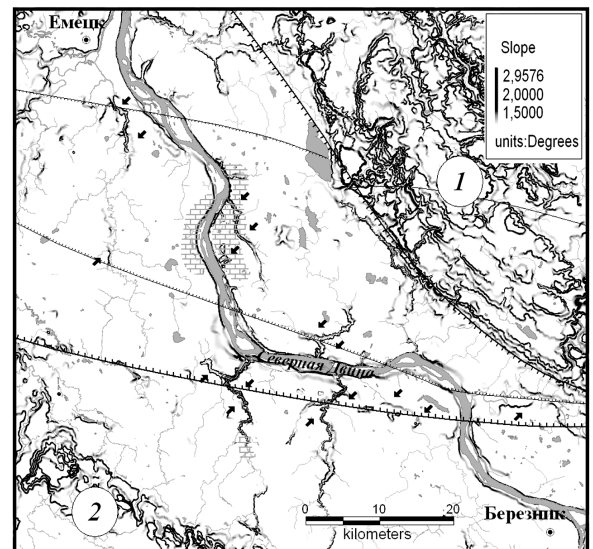


Рис. 3. Фрагмент модели распределения углов наклона поверхности: стрелками выделены участки с наибольшими значениями этого параметра. 1 – Двинско-Мезенская возвышенность; 2 – холмисто-моренная гряда

*Гидрографическая сеть.* Для низменных ландшафтов Среднего Подвинья характерны низкие значения среднего уклона водотоков, в среднем

0,1 промилле (10 см на 1 км). Аномально высокие значения среднего уклона водотоков отмечены для участков нижнего течения рек Моржовка (с притоками Березовка и Ракусора), Усолка, Кирокса, Ваеньга, а также для притоков р. Шеньга, берущих начало на Двинско-Мезенской возвышенности (см. таблицу).

Средние значения уклона рек Северодвинской низменности

Ключевые участки Северодвинской низменности	Реки	Среднее значение уклона реки, см/км
Равнинные ландшафты	Моржовка, Усолка, Пянда, Юмата Кирокса (верхнее течение)	10
Равнинные ландшафты, в местах пересечения долин рек тектоническими структурами Онежского грабена	Моржовка Усолка Ваеньга	41,2
Карстовые ландшафты	Кирокса (нижнее и среднее течение)	47,5

Высокие значения уклона (в среднем 0,41 промилле, или 41 см на 1 км) характерны для локальных участков, сопряженных с направлением разломов Онежского грабена и территории Моржегорского карстового района (47,5 см на 1 км) (рис. 4).

Для нижнего течения рек Ваеньга, Моржовка, Усолка и Юмата характерна смена общего направления течения реки в виде коленчатых пе-

реломов в местах пересечения этих долин тектоническими структурами северо-западного простирания (рис. 4). Ярким примером может служить излучина в нижнем течении р. Ваеньга, контур которой повторяет юго-восточную оконечность Онежского грабена. Для рассмотренных ключевых участков характерна общность рисунка гидросети: в местах пересечения разломных структур долины главной реки наблюдается впадение нескольких притоков второго порядка, а также резкое изменение направления течения водотоков в среднем на 70–90°.

Подобный гидрографический рисунок характерен для морфоструктурных узлов в центральной части Русской равнины [4]. Для данных участков создаются благоприятные условия для разгрузки вод на бортах долин и в руслах рек. Так, в нижнем течении рек Моржовка, Усолка и Пянда отмечены выходы соленых вод с минерализацией 25 г/л.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты морфоструктурного анализа территории Северодвинской низменности позволяют говорить о повышенной интенсивности склоновых и эрозионных процессов в зонах геодинамического влияния тектонических структур и в районах распространения карста. Данные факты подтверждают наличие системной связи между глубинными и поверхностными компонентами геосфер.

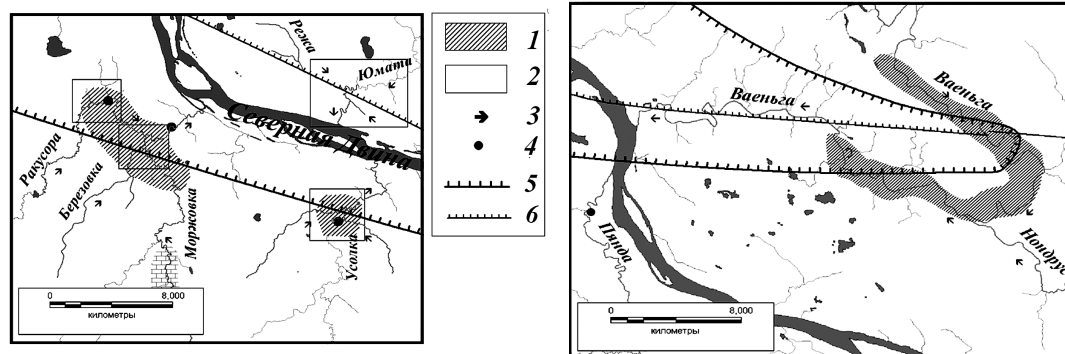


Рис. 4. Схема сопоставления материалов. Ключевые участки – Юмата, Усолка, Моржовка и Ваеньга: 1 – участки с высокими значениями уклона водотоков; 2 – участки с резким изменением общего направления течения; 3 – направление течения рек; 4 – выходы минерализованных вод; 5 – граница Онежского грабена; 6 – рифейские разломы более низкого ранга

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б. Иерархический ряд проявлений щелочно-ультраосновного магматизма Архангельской алмазоносной провинции. Их отражение в геолого-геофизических материалах. Архангельск, 2004. 281 с.
2. Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б. Геолого-геофизические характеристики Юго-Восточного Беломорья // Система Белого моря. Т. I. Природная среда водосбора Белого моря. М.: Научный мир, 2010. С. 94–118.
3. Поморская энциклопедия. Т. II. Природа Архангельского Севера. Архангельск, 2007. 603 с.
4. Ранцман Е. Я., Гласко М. П. Морфоструктурные узлы – места экстремальных природных явлений. М.: Медиа-Пресс, 2004. 224 с.
5. Тектоническая карта Белого моря и прилегающих территорий. Масштаб 1:1 500 000. М.: ГИН РАН, 2010.
6. Юдахин Ф. Н., Щукин Ю. К., Макаров В. И. Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. Екатеринбург: УРО РАН, 2003. 299 с.

**СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ МОШНИКОВ**

кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник  
лаборатории лесоведения и лесоводства Института леса,  
Карельский научный центр РАН  
moshniks@krc.karelia.ru

**ВИТАЛИЙ ИВАНОВИЧ КРУТОВ**

доктор биологических наук, старший научный сотрудник,  
руководитель лаборатории лесной микологии и энтомологии  
Института леса, Карельский научный центр РАН  
krutov@krc.karelia.ru

**О СОСТОЯНИИ ЛЕСОВ ЗАПОВЕДНИКА «ПАСВИК»**

Проведено рекогносцировочное лесоводственно-патологическое обследование лесов Государственного природного заповедника «Пасвик». Выявлены основные болезни древесных пород и оценено общее состояние насаждений на ключевых участках заповедника. Исследована динамика естественного лесовозобновительного процесса на гарях различной давности.

Ключевые слова: заповедник, леса, состояние, болезни, гарь

Государственный природный заповедник «Пасвик» организован в 1992 году в северо-западной части Мурманской области на территории бывшего Печенгского района. Территория заповедника представляет собой единый крупный массив площадью 14 727 га, вытянутый узкой полосой по правому берегу пограничной реки Паз. Основными задачами заповедника являются: сохранение и изучение северных сосновых лесов, водно-болотных угодий и фауны водоплавающих птиц, а также ведение комплексного мониторинга северных экосистем.

«Пасвик» расположен на границе северной тайги и лесотундры. Одним из уникальных объектов, заслуживающих пристального внимания, являются произрастающие здесь старовозрастные сосновые леса, самые северные в Европе. Они также весьма привлекательны для экологического туризма. В 2007–2009 годах по договору с заповедником учеными Института леса Карельского научного центра РАН были выполнены комплексные исследования на ключевых участках лесных экосистем. В данной статье с использованием материалов последнего лесостроительства [5] и по результатам рекогносцировочного лесоводственно-патологического обследования 2009 года рассмотрены особенности лесов заповедника: распределение по преобладающим породам, типологическая и возрастная структура; дан краткий анализ их состояния.

Анализ материалов лесостроительства показал следующее. Около 52 % территории заповедника относится к категории лесных земель. Нелесные земли представлены в основном болотами (23 %) и водами (20 %), оставшаяся площадь (менее 5 %) – горными тундрами, каменистыми россыпями, дорогами и пр. Лесные земли практически полностью покрыты лесной растительностью, непокрытые лесом земли занимают чуть более 0,1 % и представлены гарями разных лет.

© Мошников С. А., Крутов В. И., 2011

Суровые климатические условия региона предопределяют невысокое разнообразие лесобразующих пород, произрастающих в заповеднике. Около 90 % его территории занимают сосняки (*Pinus sylvestris* L. var. *lapponica* Fries ex C. Hartm.), 10 % – березняки (*Betula pubescens* Ehrh.), насаждения с преобладанием в составе осины произрастают на площади всего 4,5 га. Редкой породой для заповедника является также ель сибирская (*Picea obovata* Led.), в настоящее время здесь обнаружены три куртины численностью до 20 деревьев, которые считаются самыми северными местами ее естественного произрастания в Европе.

Сильная расчлененность рельефа и связанное с этим многообразие гидрологических и микроклиматических условий отразились на типологической структуре лесов. Согласно лесостроительным данным, в заповеднике наиболее распространены две группы типов леса: кустарничковая (вороничный, брусничный и черничный типы леса) и сфагновая (в основном багульниковый и сфагновый типы), занимающие более 60 и 28 % лесопокрытой площади соответственно. Более разнообразна типологическая структура лесов с учетом преобладающей древесной породы. В сосняках преобладают брусничный (37 % площади), вороничный (25 %) и багульниковый (20 %) типы, значительно реже встречаются сфагновый (9 %) и беломошный (5 %). В березняках картина иная. Почти 1/3 площади занимают леса травяной группы, в основном приречного типа (27 % занятой породой площади), 14 и 11 % – брусничные и вороничные типы леса соответственно.

Особенностью лесов заповедника является высокая представленность спелых и перестойных, преимущественно сосновых насаждений, доля участия которых составляет 47 %, при явном дефиците молодняков – 4 % (рис. 1). Соот-

ответственно, наибольшим средним возрастом отличаются сосняки (145 лет), наименьшим – осинники (45 лет), средний возраст березняков составляет 70 лет. При этом сосняки характеризуются наиболее сложной возрастной структурой (рис. 2). По материалам лесоустройства она описывается М-образной кривой с двумя максимумами (17 %) в III и IX классах возраста и явным провалом в IV–VII, с абсолютным минимумом (2 %) в V классе возраста. Это, на наш взгляд, можно объяснить двумя причинами: активной вырубкой лесов 80–120 лет назад и значительным количеством пожаров той же давности.

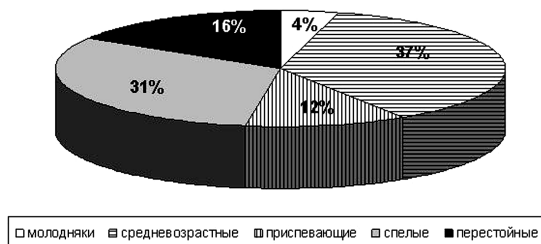


Рис. 1. Возрастная структура лесов Государственного природного заповедника «Пасвик»

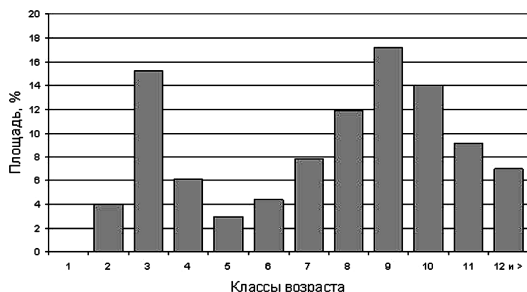


Рис. 2. Распределение основных насаждений Государственного природного заповедника «Пасвик» по классам возраста

Возрастная структура березняков также весьма своеобразна. Среди них практически полностью отсутствуют молодняки и перестойные насаждения, 56 % площади занимают средневозрастные, остальную – приспевающие и спелые насаждения (24 и 20 % соответственно).

Леса заповедника характеризуются невысокой производительностью. Средний класс бонитета насаждений равен V.8, что свойственно для данного района в целом [8]. Возможно, отчасти это объясняет высокий удельный вес старовозрастных насаждений, что приводит к закономерному снижению рассматриваемого показателя. Наиболее высокий класс бонитета в осинниках – IV, в сосняках и березняках он практически не отличается от среднего по заповеднику. Учитывая распределение березняков по типам леса, а именно значительную долю лесов травя-

ной группы и их возрастную структуру, класс бонитета представляется несколько заниженным.

Произрастающие в данном районе леса в целом характеризуются низкой полнотой (в среднем по заповеднику – 0,44). Доля высокополнотных (0,8 и более) насаждений составляет менее 1 %, среднеполнотных (0,5–0,7) – 39 %, низкополнотных (0,3–0,5) – более 59 %. Средний показатель полноты сосняков составляет 0,43, березняков – 0,49, осинников – 0,69.

#### МЕТОДИКА ОБСЛЕДОВАНИЯ

Обследование проводили в соответствии с общепринятыми методиками [2], [3]. С целью оценки таксационных показателей древостоя на ключевых участках заповедника закладывали 5–8 круговых площадок, на которых инструментально определялись сумма площадей сечений и средняя высота яруса. На основании этих данных высчитывали относительную полноту древостоя. На каждом участке возрастным буравом (Пресслера) отбирали 3–5 кернов для уточнения среднего возраста насаждения и возраста наиболее старых деревьев главной породы. Затем производили описание живого напочвенного покрова, подроста и подлеска. При характеристике подроста определяли его количество, среднюю высоту, характер распределения по площади (равномерность) и жизнеспособность.

Для оценки состояния деревьев при лесопатологическом обследовании использована шкала «Санитарных правил в лесах Российской Федерации» [6] с учетом рекомендаций В. А. Алексеева [1]. Жизненное состояние деревьев характеризовали по совокупности нескольких основных внешних признаков. Так, на всех участках определяли возраст хвои. Степень дехромации и дефолиации основных лесобразующих пород оценивали по шкале, приведенной в таблице. Ориентировочно определяли изреживание скелетной части кроны, долю отмерших и отмирающих ветвей. Дополнительно оценивали влияющие лесопатологические факторы (грибных заболеваний и насекомых-вредителей). При отборе кернов выявляли наличие гнили.

Определение категории состояния деревьев по характеристике кроны [4]

Порода	Категория состояния дерева	Дефолиация, %	Дехромация, %
Сосна	Здоровое	0–5	0
	Ослабленное	10–20	10
	Сильно ослабленное	21–40	20
	Усыхающее	50–70	30–50
	Сухостой свежий (текущего года)	до 100	100
	Сухостой старый (прошлых лет)	100	–

Береза	Здоровое	0–5	–
	Ослабленное	10–20	–
	Сильно ослабленное	30–60	–
	Усыхающее	70–85	–
	Сухостой свежий (текущего года)	100	–
	Сухостой старый (прошлых лет)	100	–

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами лесоводственно-патологического обследования были сосновые и березовые фитоценозы на о. Варлама, в долине р. Мениккайоки, в окрестностях «Глухой плотины» (м. Скугфосе), в районе озер Каскамаярви и Боссоярвре и на прилегающей к ним территории (гора Кораблекк), а также сосновые древостои, пройденные пожаром в 1992 и 2005 годах.

**Остров Варлама.** Березняк (*B. pubescens*) семенного и порослевого происхождения, сформировавшийся на землях сельхозпользования. Возраст колеблется от 40 до 70 лет. Тип леса в пределах острова значительно варьирует, от травяного до багульникового. Класс бонитета – от IV до Va. Кроны деревьев нормальной густоты, признаков снижения прироста по диаметру, как и явных проявлений ухудшения санитарного состояния деревьев в последние годы не отмечено. Зарегистрировано массовое поражение листьев березы ржавчинным грибом *Melampsorium betulae*, что связано, очевидно, с погодными условиями 2009 года (жаркое и сухое лето), благоприятными для развития возбудителя болезни.

**Западный берег р. Мениккайоки.** Березняк хвошево-разнотравный 40–60-летнего возраста. Насаждение на 80 % порослевого происхождения. Средний диаметр – 10 см, высота – 9–11 м, класс бонитета V–Va, относительная полнота насаждения варьирует от 0,5 до 1,0 (средняя – 0,7). Характерная особенность данного участка – значительное количество деревьев с признаками роста побегов из спящих почек по всему стволу. Состояние вполне удовлетворительное. На участке 10–15 лет назад проведена выборочная рубка наиболее крупных деревьев.

По территории данного района проходит самая северная граница распространения опенка (*Armillariella sp.*) – известного возбудителя гнили корней [7], а также трутовика скошенного (*Inonotus obliquus*), вызывающего желто-бурую ядровую гниль березы (чага), развитие которых было отмечено на отдельных отмерших и отмирающих деревьях в гнездах (до 5 %) изучаемого березняка.

**Сосняк в окрестностях «Глухой плотины».** Тип леса бруснично-вороничный. Состав  $8C_{(220)}2C_{(70)}+B$ , средний возраст сосны старшего поколения – 220 лет, отдельных деревьев – до 300 лет. Средний диаметр ствола на высоте груди – 36 см, средняя высота – 14 м, относительная полнота

0,3. Молодое поколение сосны характеризуется следующими таксационными показателями: диаметр ствола – 8 см, высота – 6 м. Имеется жизнеспособный подрост сосны в количестве 4 тыс. экз./га, средней высотой 4 м, расположенные куртинные.

На участке дважды проводились выборочные рубки: первый прием с выборкой до 200 деревьев с 1 га более 50 лет назад, второй, меньшей интенсивности и в основном вдоль дороги, – не более 25 лет назад. Кроме того, насаждение пройдено пожаром давностью свыше 50 лет. Явные признаки ухудшения состояния насаждения отсутствуют. Возраст хвои – 6–8 лет, состояние крон деревьев нормальное, признаков дехромации и резкого снижения прироста не наблюдается. На единичных старых деревьях отмечено развитие рака-серянки (возбудитель – ржавчинный гриб *Peridermium pini*) и пестрой ядровой гнили (возбудитель – сосновая губка *Phellinus pini*). На стволах старых сосен довольно часто встречается гиперплазия (сувель) – патологическое разрастание тканей неизвестного происхождения. Большая часть взрослых деревьев осины, представленных в виде куртин на соседнем участке, – с плодовыми телами ложного осинового трутовика (*Phellinus tremulae*) – возбудителя белой ядровой гнили ствола. На поросли осины довольно часто встречалась «парша» (увядание и почернение) листьев и молодых побегов (возбудитель – сумчатый гриб *Venturia tremulae*).

**В районе оз. Каскамаярви** обследованы две куртины ели (численностью до 20 деревьев), произрастающие в заболоченной пойме ручья. Возраст наиболее крупных экземпляров – 160 лет, высота достигает 19 м, диаметр – 30 см. В соответствии с методикой оценки состояния ели по строению кроны [1], большинство обнаруженных деревьев можно отнести к категории ослабленных. В то же время анализ хода роста наиболее крупных деревьев свидетельствует о довольно успешном их росте. Показатель бонитета – IV, достаточно высокий для условий Крайнего Севера. Прирост по диаметру, равный 1 см за последние 10 лет, вполне сопоставим с приростом сосны такого же возраста, что также подтверждает вышеприведенный вывод. Крупные экземпляры ели плодоносят, урожайность на год обследования оценена 1–2 баллами по шкале В. Г. Каппера. Однако, несмотря на наличие шишек, мелкий и средний подрост отсутствует.

**Гора Кораблекк.** У подножья и в нижней части склона произрастают низкополнотные сосняки с примесью березы и осины брусничного, вороничного типов леса с вкраплениями лишайниковых, выше – березовое криволесье. Возраст основной части сосны – до 300 лет. Особенностью насаждений данного объекта является отсутствие следов заготовки древесины. Можно предположить, что на протяжении последних 50–70 лет рубки здесь не проводились; возможно, их

никогда здесь не было. По-видимому, это определялось сложностью заготовки и особенно вывозки древесины. Кроме того, на склонах горы сохранились самые старые среди обследованных на территории заповедника экземпляры сосны, в том числе растущее дерево возрастом 470 лет. Довольно интересным оказывается высотное изменение растительности: леса – лесотундра – горная тундра.

Леса заповедника «Пасвик» практически не затронуты хозяйственной деятельностью, но подвергались воздействию пожаров. В 2009 году нами были обследованы два участка сосновых древостоев, пройденные пожаром в 1992 и 2005 годах. Оба пожара, вероятнее всего, антропогенного характера, поскольку участки расположены в непосредственной близости к автодороге сообщением г. Никель – п. Раякоски. Целью обследования являлось изучение динамики естественных лесовозобновительных процессов в сосняках, затронутых пожарами различной давности. Для этого были заложены 20 учетных лент общей площадью 400 м<sup>2</sup>, на которых проведен сплошной пересчет всего имеющегося подроста. Учет проводился раздельно по категориям высот и общему состоянию растений. Результаты обследования приведены ниже.

*Гарь 1992 года.* До пожара здесь предположительно произрастал сосняк брусничный возрастом 250 лет, полнотой 0,5. На участке имелся сосновый подрост средней высотой 4 м в количестве более 5 тыс. экз./га. При пожаре погибла часть деревьев верхнего полога и практически весь подрост. Спустя 17 лет после пожара это редкостойный (полнотой 0,2) сосняк со значительным количеством (от 6 до 40 тыс. экз./га, в среднем 16 тыс. экз./га) подроста сосны и березы последующего возобновления. Состав подроста – 9С1Б. Большая часть соснового подроста 2–3-летнего возраста, средняя высота – менее 0,5 м. Имеющегося количества подроста вполне достаточно для формирования в дальнейшем сосново-березового насаждения.

*Гарь 2005 года.* До пожара – предположительно низкополнотный сосняк брусничный возрастом более 200 лет. При пожаре погибли 2/3 деревьев верхнего полога, а также весь подрост и тонкомер главной породы. В период обследова-

ния количество сохранившихся деревьев главной породы составляло менее 100 экз./га. В живом напочвенном покрове преобладают черника, брусника, в меньшей степени представлены кипрей и злаки, до 20 % поверхности представляет собой обугленную подстилку без травяно-моховой растительности. Ввиду небольшого периода времени, прошедшего после пожара, количество подроста здесь заметно ниже, чем на предыдущем участке, – в среднем 5,0 тыс. экз./га, состав – 10С, возраст – 2–3 года. Молодое поколение березы практически отсутствует, по-видимому, ввиду удаленности источников обсеменения. Ход естественного возобновления на данном участке можно признать вполне удовлетворительным, что позволяет надеяться на успешное течение возобновительного процесса и в дальнейшем. В пользу этого свидетельствует отсутствие листовых пород и слабая степень зарастания травянистой растительностью, что может заглушить всходы и мелкий подрост сосны.

## ВЫВОДЫ

Сосновые древостои заповедника «Пасвик» являются уникальными природными объектами. Их состояние в настоящее время можно признать вполне удовлетворительным, они заслуживают детального изучения и мониторинга. Интересной особенностью заповедника является исключительно редкая представленность ели сибирской. При этом следует отметить успешный рост и состояние отдельных наиболее крупных деревьев, которые также должны быть объектом изучения.

Безусловный интерес с точки зрения лесоводственной науки и, возможно, экологического туризма представляет гора Кораблекк. На склонах данной горы возможна закладка экологического (высотного) ряда: леса – лесотундра – горная тундра для демонстрации высотных изменений в древостое, живом напочвенном покрове и т. д.

Обследование участков леса, пройденных пожаром, свидетельствует о том, что лесовосстановление в сосняках лишайниковых, брусничных и вороничных типов успешно проходит естественным путем при условии наличия деревьев-обсеменителей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В. А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 51–57.
2. Байтин А. А., Логвинов И. В., Столяров Д. П. Лесоустройство. М.: Лесн. пром-сть, 1974. 352 с.
3. Инструкция по проведению лесоустройства в едином государственном фонде СССР. Ч. 1. Организация лесоустройства и полевые работы. М.: Изд-во ЦБНТИ Гослесхоза СССР, 1986. 136 с.
4. Кобельков М. Е., Чуканов М. А., Хотин Д. В. Категории состояния основных лесообразующих пород Московской области. М., 2000. 40 с.
5. Отчет по лесоустройству Государственного природного заповедника «Пасвик» Федеральной службы по надзору в сфере природопользования МПР РФ. Пояснительная записка. СПб., 2007.
6. Санитарные правила в лесах Российской Федерации. М., 1998. 25 с.
7. Соколов Д. В. Корневая гниль от опенка и борьба с ней. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 182 с.
8. Цветков В. Ф. Сосняки Кольской лесорастительной области и ведение хозяйства в них. Архангельск: Изд-во Архангельского гос. техн. ун-та, 2002. 380 с.



**БОРИС ВЛАДИМИРОВИЧ РАЕВСКИЙ**

кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник Института леса, Карельский научный центр РАН

raevski@drevlanka.ru

**ХОД РОСТА ГЕОГРАФИЧЕСКИХ КУЛЬТУР СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В КАРЕЛИИ**

Обобщены и проанализированы данные по росту и развитию 45 происхождений сосны обыкновенной за 30-летний период. Выявлено, что происхождения сосны из северной подзоны тайги при перемещении в южном направлении сохраняются лучше, но растут медленнее местных вариантов и при этом имеют более высокую долю плодоносящих особей. Для более южных по отношению к месту испытаний происхождений характерна обратная закономерность. Сделан вывод, что для достижения большей продуктивности культур допустимо использовать семена более южного по отношению к месту закладки происхождения, но не более чем на  $1,3^\circ$  по широте.

Ключевые слова: географические культуры, сосна обыкновенная, происхождения, рост, сохранность

В 1960–70-е годы в развитых странах Европы при координирующей роли IUFRO осуществлялись масштабные международные программы по закладке географических культур важнейших лесных пород. Советский Союз в тех опытах не участвовал, но самостоятельно осуществлял ряд аналогичных. В частности, по сосне обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в 1974–1977 годах закладывалась серия географических культур с общим участием 113 происхождений на 33 участках, расположенных по всей территории страны [9]. В Карелии были созданы два участка географических культур сосны этой серии: в северной подзоне тайги (Амбарское лесничество Чупинского лесхоза, 12 га, 29 провениенций) и в средней подзоне (Кумсинское лесничество Медвежьегорского лесхоза). Однако северный участок географических культур в силу ряда причин утратил свою информативность. Только для участка № 5 указанной серии в районе г. Медвежьегорска ( $63^\circ 20'$  с. ш.,  $34^\circ 03'$  в. д., 100 м над уровнем моря) удалось провести ретроспективный анализ данных по сохранности и росту провениенций сосны обыкновенной за всю историю существования опыта. Далее в тексте термины «происхождение», «провениенция» и «вариант» употребляются как синонимы.

**ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ**

Культуры были созданы под научно-методическим руководством сотрудников Института леса в 1977 году на раскорчеванной вырубке из-под сосняка вересково-брусничного IV класса бонитета [6]. Обработка почвы не производилась, за исключением огневой очистки в 1976 году. Площадь культур – 15,2 га, в том числе полезная – 13,9 га. Двухлетние сеянцы из открытого грунта высаживались по вариантам в блоки 0,10 и 0,15 га с размещением 0,8 x 2,5 м, густотой около

до 5000 шт./га. Всего в трехкратной повторности были высажены 45 происхождений с диапазоном по широте от Мончегорска ( $67^\circ 51'$  с. ш.) до Смоленска ( $54^\circ 00'$  с. ш.) и от Эстонии ( $26^\circ 28'$  в. д.) до Якутии ( $130^\circ 00'$  в. д.) по долготе (рис. 1). В период наблюдений на участке осуществлялись почвенно-химические и лесопатологические обследования [1], [6]. Учет сохранности и замеры биометрических показателей до 1989 года проводились ежегодно, а затем через 5 лет [5]. Исследования в культурах велись в соответствии с методикой ВНИИЛМ [8].

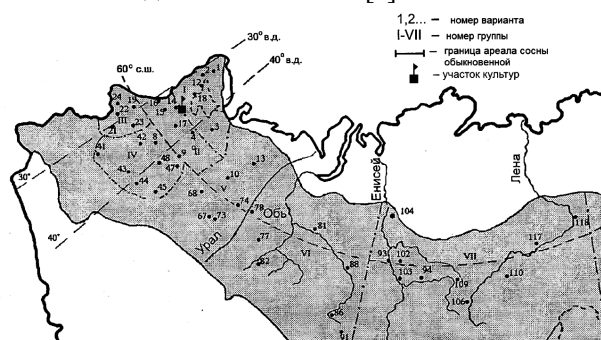


Рис. 1. Происхождения сосны обыкновенной, представленные в географических культурах (штрихпунктирными линиями показаны условные границы групп вариантов)

Во всех повторностях каждого варианта обследовались и пересчитывались все растения. Сохранность (%) определялась как отношение количества сохранившихся живых растений к общему числу высаженных. По жизнеспособности учетные деревья в зависимости от прироста, степени развития кроны, густоты охвоения, цвета и продолжительности жизни хвои разделялись на здоровые, ослабленные и усыхающие (1, 2, 3 балла соответственно). Отмечалось наличие / отсутствие свежих шишек текущего года (как альтернативный признак). Диаметр на уров-

не груди (с точностью до 1 мм) и высота (с точностью до 10 см) измерялись у 50 растений в каждой повторности каждого экотипа. Все учетные растения оценивались по стройности ствола: 1 – прямой, 2 – слабо искривленный, 3 – сильно искривленный, коленчато-вильчатый, 4 – кустовидный (основной ствол плохо выражен). Первичные данные обрабатывались общепринятыми методами биометрии [2], [7]. Определялись статистические показатели роста по происхождениям и группам происхождений и запас древесины на 1 га [4]. Сохранность, рост и развитие географических культур анализировались как отдельно по вариантам, так и путем объединения последних в группы. Сравнение отдельных происхождений проводилось по отношению к варианту 14 как к местному (Медвежьегорский район), а сравнение групп – по отношению к группе II, принятой в качестве контроля (табл. 1). Данная группа представляет среднюю подзону тайги Европейского Севера России, сам же участок культур заложен на границе северной и средней подзон тайги, проходящей в Карелии в районе г. Медвежьегорска. Последний раз сплошное обследование культур было осуществлено осенью 2007 года.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На вересково-паловых вырубках главными лесокультурными особенностями почв являются их бедность питательными веществами, слабая водоудерживающая способность, значительные суточные колебания температур на поверхности субстрата. Посаженные сеянцы оказываются в очень жестких экологических условиях.

Таблица 1

Группы происхождений в географических культурах сосны (Кумсинское лесничество)

№ группы, подвид	№ варианта (лесхоз)	Наименования зон	Географические координаты	
			с. ш.	в. д.
I <i>lapponica</i>	1 (Мончегорский), 2 (Кандалакшский), 3 (Пинежский), 12 (Чупинский), 18 (Кемский)	Северная подзона тайги севера европейской части России	67°51'– 64°45'	34°30'– 33°00'
II <i>sylvestris</i>	4 (Плесецкий), 9 (Тотемский), 14 (Медвежьегорский), 15 (Пряжинский), 16 (Сортавальский), 17 (Пудожский)	Средняя подзона тайги севера европейской части России	62°54'– 60°00'	43°00'– 30°28'
III <i>sylvestris</i>	19 (Лисинский), 21 (Великолукский), 22 (Псковский), 23 (Крестецкий), 24 (Эльвасский)	Южная подзона тайги Северо-Запада европейской части России	60°00'– 56°23'	32°28'– 26°28'
IV <i>sylvestris</i>	8 (Череповецкий), 41 (Рославльский), 42 (Бежецкий), 43 (Куровский), 44 (Ковровский), 45 (Городецкий), 47 (Мантуровский), 48 (Костромской)	Центральные области европейской части России	59°20'– 54°00'	44°28'– 33°00'

V <i>sylvestris</i>	10 (Корткеросский), 13 (Каджеромский), 67 (Воткинский), 68 (Слободской), 73 (Оханский), 74 (Красновишерский)	Северо-Восток европейской части России, Северный и Средний Урал	64°40'– 57°03'	57°00'– 50°06'
VI <i>sibirica</i>	77 (Тавдинский), 78 (Ивдельский), 81 (Сургутский), 82 (Заводоуковский), 86 (Сузунский), 88 (Колпашевский), 91 (Боровлянский)	Западная Сибирь	61°25'– 52°50'	84°27'– 60°24'
VII <i>sibirica</i>	93 (Красноярский), 94 (Богучанский), 102 (Северо-Енисейский), 103 (Енисейский), 104 (Туруханский), 109 (Катангский), 117 (Олекминский), 118 (Якутский)	Средняя и Восточная Сибирь	66°00'– 58°00'	130°00'– 88°00'

В год посадки средняя приживаемость по участку составила 70,1 %. Контрольная группа II занимала только пятое место (71,1 %), а местный вариант 14 – только двадцатое (74,4 %). Самые низкие показатели сохранности оказались у групп III и IV (южная подзона тайги Северо-Запада и Центра России). В числе лидеров были группы V, VII, I, VI, представляющие Северо-Восток европейской части России и Сибирь, то есть районы с континентальным климатом, где весной засушливый период достаточно ярко выражен (рис. 2).

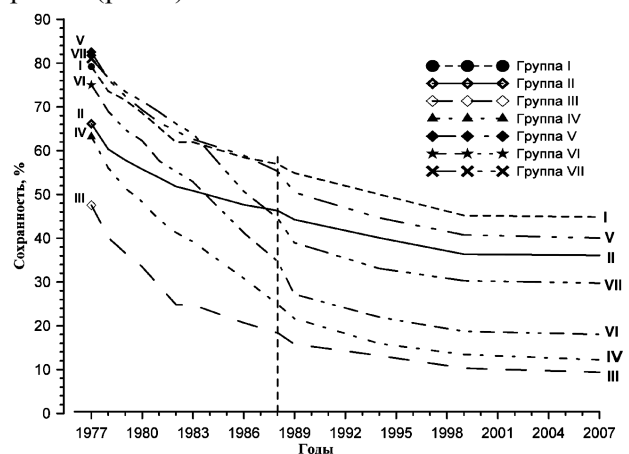


Рис. 2. Динамика сохранности географических культур сосны

По данным В. И. Крутова [1], в последующие три года одной из основных причин отпада во всех вариантах были насекомые, ответственные за 55 % всего отпада. Наибольшая гибель растений была вызвана восточным майским хрущом (*Melolontha hippocastani* Fabr.) и большим сосновым долгоносиком (*Hylobius abietis* L.) – 90–95 % всего отпада от насекомых. Определенное влияние имела и заболеваемость снежным шютте (*Phacidium infestans*) – 22 % всего отпада. Сильнее всего пострадали по данной причине группы III и IV – 27,7 и 29,3 % всего отпада соответственно.

Происхождения остальных групп были в 2–3 раза устойчивее. Прочие причины главным образом абиотического характера составили 23 % общего отпада. На пятый год участие всех видов насекомых и грибных болезней в отпаде культур существенно снизилось.

В первое пятилетие жизни культур значительной переранжировки климатипов по сохранности еще не наблюдалось, но определенные тенденции уже наметились (рис. 2). Отпад в культурах происходил в течение всего наблюдаемого периода у большинства происхождений – 2–3 %, а у некоторых – 5–7 % в год. Как показано на рис. 2 вертикальной пунктирной линией, наблюдаемое в настоящее время ранжирование по степени сохранности сложилось в 12-летнем возрасте и с того момента уже оставалось стабильным. К 31-летнему возрасту относительно хорошо сохранился контрольный вариант 14 из местных семян (40,9 %). Только 11 вариантов из 45 в той или иной мере превосходили его по этому показателю. Динамика сохранности варианта 14 выглядит следующим образом: 18 лет – 53,5 %, 23 года – 41,2 %, 31 год – 40,9 %. Контрольная группа II в 2007 году при сохранности 36,1 % уступала на 8,7 % группе I из северной подзоны тайги. Группа II в 18-летнем возрасте имела сохранность 40,1 %, в 23-летнем – 36,3 %, в 31-летнем – 36,1 %. Разница с группой I по указанным выше возрастам составила 9,9, 8,9 и 8,7 % соответственно. Обе эти группы постепенно заняли лидирующее положение. Особо следует отметить динамику показателя сохранности группы V, представляющей Северо-Восток европейской части России (рис. 2). В 10-летнем возрасте (1986 год) она была абсолютным лидером по сохранности и уступила первенство группе I только после особо холодного и дождливого вегетационного сезона 1987 года. В течение последних 20 лет роста культур эта группа стабильно занимает промежуточное положение между группами I и II. Самая низкая сохранность отмечена в группах III, IV и VI (южная подзона тайги Северо-Запада РФ, центральные области европейской части России и Западная Сибирь). Происхождения из Восточной и Средней Сибири (группа VI) занимают промежуточное положение (рис. 2). В целом по культурам сохранность в 18-, 23- и 31-летнем возрасте составила 31,3, 27,9 и 27,2 % соответственно. Поскольку приживаемость культур в 1977 году равнялась 70,7 %, это соответствует итоговому падению показателя сохранности за истекший период в 2,6 раза. В итоге группы I, II, V не потеряли ни одного варианта полностью. Группа III утратила целиком 3 варианта, группа IV – 2, группа VI – 4, группа VII – 3. Различия по сохранности, обусловленные фактором географического происхождения, очевидны. Как и следовало ожидать, в данных условиях провениенции из северной и средней подзон тайги Севера и Северо-Запада европей-

ской части России в итоге оказались наиболее адаптированными. В исследуемых культурах обнаружен ряд статистически достоверных (выделены жирным шрифтом) корреляций между географическими координатами места происхождения вариантов и показателями их роста и развития. В частности, была выявлена тесная связь между широтой происхождения семян и сохранностью вариантов (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты корреляции показателей культур с географической широтой и долготой мест происхождения вариантов

Параметры	Северная широта*	Восточная долгота*
Диаметр, см	<b>-0,49</b>	-0,27
Стройность ствола, балл	-0,09	<b>0,46</b>
Жизнеспособность, балл	<b>0,54</b>	<b>0,38</b>
Высота, м	<b>-0,49</b>	-0,27
Доля плодоносящих особей, %	<b>0,74</b>	0,09
Сохранность, %	<b>0,71</b>	0,17

Примечание. \* – P = 0,05, N = 33.

Согласно рассчитанной регрессионной зависимости ( $y = -0,291x^2 + 39,62x - 1297$ ;  $R^2 = 0,54$ ), при создании лесных культур в районе  $63^\circ$  с. ш., где расположен опыт, использование сосновых семян более северного происхождения ( $63^\circ$ – $66^\circ 40'$  с. ш.) способно увеличить их сохранность (максимум на 6,7 %), в то время как использование более южных семян ( $63^\circ$ – $60^\circ 40'$  с. ш.) может снизить этот показатель на 9,6 % (рис. 3). Таким образом, субмеридиональное перемещение семенного материала даже в пределах границ Республики Карелии ( $60^\circ 40'$ – $66^\circ 40'$  с. ш.) способно повлиять на показатель сохранности культур сосны.

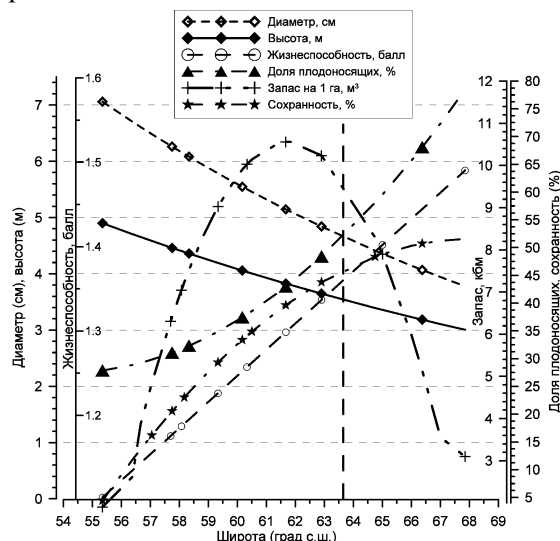


Рис. 3. Регрессия ряда показателей географических культур в градиенте широты

Анализ хода роста культур в высоту по группам провениенций (рис. 4) дает картину практически обратную динамике сохранности. Группы северного происхождения (I и V) оказываются в числе самых медленно растущих. Переранжировка климатипов (вертикальные пунктирные линии на рис. 4) по данному показателю происходила практически в течение всего периода роста культур, последняя отмечена в районе 25-летнего возраста.

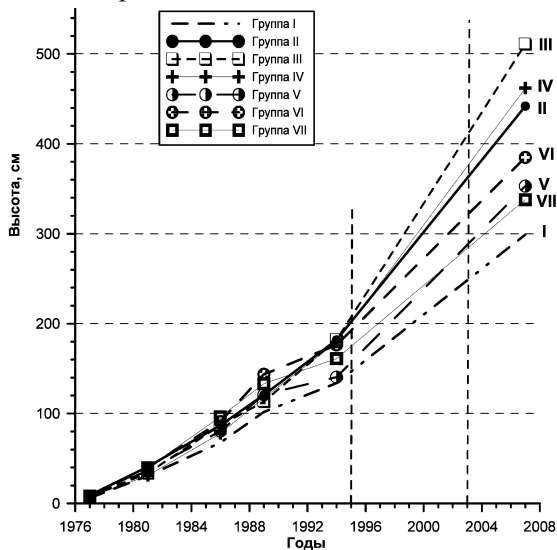


Рис. 4. Ход роста групп происхождения в высоту

Таким образом, определились две схожие по форме, но противоположные по содержанию тенденции в сохранности и росте провениенций сосны обыкновенной. В таежной зоне происхождения сосны из северной подзоны тайги при перемещении в южном направлении сохраняются лучше, но растут медленнее местных вариантов и при этом имеют более высокую долю плодоносящих особей. Для более южных по отношению к месту испытаний происхождений характерна обратная закономерность. Интегральным результатом сочетания этих противоречивых тенденций является параболическая форма кривой запаса варианта в пересчете на гектар (рис. 3). Что касается оценки жизнеспособности растущих особей, то своеобразие ситуации заключается в том, что у северных происхождений отмечается значительная доля живых, но в различной степени ослабленных особей, в то время как немногочисленные сохранившиеся растения более южных происхождений имеют более здоровый вид. В табл. 3 приведены данные по достоверности различий контрольной группы в сравнении с остальными. Как следует из табл. 3, группа II имела достоверное превосходство по диаметру, стройности ствола и жизнеспособности перед группами I, V, VI и VII. Самыми медленно растущими оказались происхождения из группы I, которые уступали контрольной группе II по диаметру на 40,4 %.

Таблица 3  
Достоверность различий групп происхождения по ряду параметров\*

№ группы	N	Диаметр, см	T-критерий	Стройность ствола, балл	T-критерий	Жизнеспособность, балл	T-критерий
I	674	3,1	12,40	1,7	-7,00	1,5	-8,70
II	850	<b>5,2</b>	—	<b>1,4</b>	—	<b>1,2</b>	—
III	132	6,3	-3,10	1,5	-2,25	1,1	2,30
IV	550	5,5	-1,80	1,6	-4,00	1,1	4,20
V	550	3,9	7,11	1,5	-3,56	1,3	-2,36
VI	350	4,4	3,74	1,7	-8,26	1,4	-4,27
VII	550	3,6	8,48	1,8	-10,20	1,5	-7,90
Общее среднее	<b>3656</b>	<b>4,4</b>	—	<b>1,6</b>	—	<b>1,3</b>	—

Примечание. \* – стандартные значения критерия Стьюдента (tst) при  $n > 176$  {1,96–2,58–3,29}

Данные табл. 4 свидетельствуют об очень значительном преимуществе, с которым, по результатам 30-летних испытаний, лидирует группа местных происхождений (II). Ее ближайшие географические соседи (группы III и V) имеют практически двукратное отставание по запасу, обусловленное либо низкой сохранностью, либо замедленным ростом.

Таблица 4  
Основные таксационные показатели групп происхождения сосны

№ группы	Диаметр, см	Высота, м	Сохранность, %	Запас, м <sup>3</sup> /га	Ранг по запасу
I	3,1	3,0	42,7	4,4	7
II	<b>5,2</b>	<b>4,40</b>	<b>36,7</b>	<b>12,2</b>	<b>1</b>
III	6,3	5,11	10,1	5,2	6
IV	5,5	4,60	14,2	5,5	5
V	3,9	3,50	39,1	6,6	2
VI	4,4	3,90	29,6	6,5	3
VII	3,6	3,40	39,6	5,9	4
Общее среднее	<b>4,4</b>	<b>3,90</b>	<b>32,1</b>	<b>7,2</b>	—

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Безусловно, стремясь к надежности и предсказуемости результатов при создании культур сосны, предпочтению следует отдавать семенному материалу местного происхождения, заготовленному в сходных с лесокультурной площадью условиях местопрорастания. Для центральнокарельского семенного подрайона карельского семенного района (64°30'–63°00' с. ш.), на южном пределе которого расположен наш участок, согласно действующему лесосеменному районированию [3], потенциальным поставщиком семян может быть вся территория Карелии в диапазоне 60°40'–66°40'. Однако ход кривой за-

паса варианта на рис. 5 показывает, что для достижения большей продуктивности культур полезно использовать семена более южного по отношению к месту закладки происхождения (не более чем на  $1,3^\circ$  по широте).

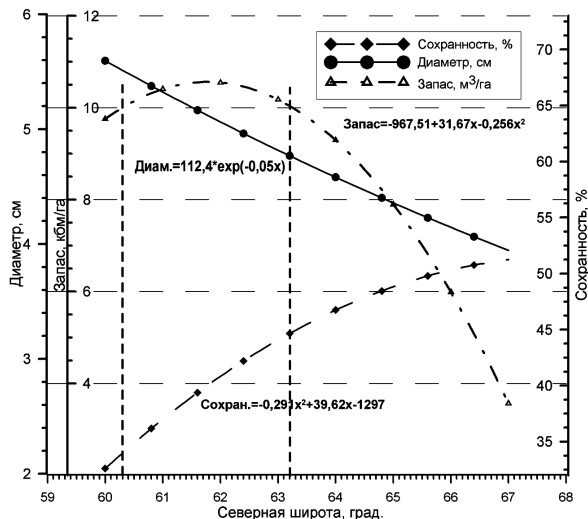


Рис. 5. Регрессия сохранности, среднего диаметра и запаса варианта в градиенте широты

Несомненно, следует признать возможным использование здесь семян более северного происхождения. Но, во-первых, как правило, вопрос так не ставится, поскольку урожай таких семян всегда меньше. Во-вторых, положительный эффект от повышенной сохранности культур все же не будет компенсировать их несколько замедленный рост, что в итоге скажется на накоплении запаса. В общем случае для Карелии может быть сформулировано следующее правило: в диапазоне с  $30^\circ 00'$  по  $38^\circ 00'$  в. д. происхождения семян для посева и посадки леса не должно отличаться более чем на  $1,3^\circ$  по широте от соответствующей координаты лесокультурной площади.

Характер выявленных зависимостей показывает, что лесосеменное районирование Карелии, по всей видимости, следует совершенствовать в направлении создания системы лесосеменных зон, ориентированных в субширотном направлении.

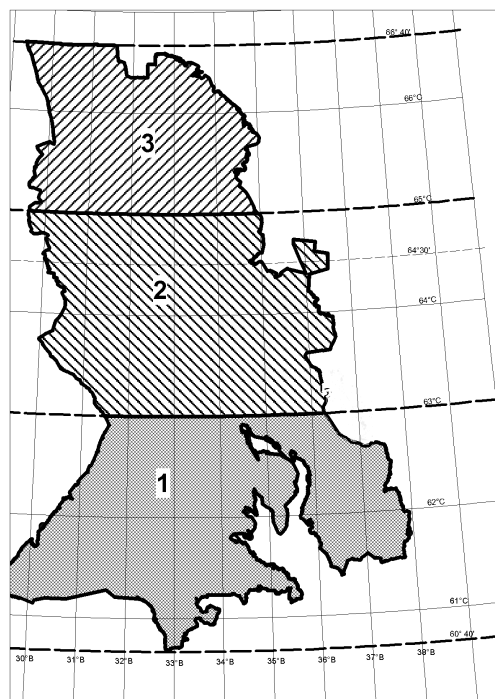


Рис. 6. Предлагаемые лесосеменные зоны для сосны обыкновенной

Южнокарельская зона (№ 1) должна располагаться между  $60^\circ 40' \dots 63^\circ$  с. ш., следующая (центральнокарельская, № 2) – между  $63^\circ \dots 65^\circ$  с. ш., а самая северная (северокарельская, № 3) – в районе  $65^\circ \dots 66^\circ 40'$  с. ш. Таким образом, ширина предлагаемых лесосеменных зон составила бы  $2^\circ 20'$ ,  $2^\circ 00'$  и  $1^\circ 40'$  соответственно. Следует отметить, что данных одного опытного участка, даже несмотря на его удачное расположение, в общем недостаточно, чтобы сделать окончательные выводы в отношении перемещения семенного материала сосны в масштабах всей Карелии, особенно для ее северной части. Однако других информативных участков географических культур сосны в настоящее время в республике нет, и создание такого рода новых опытов в обозримой перспективе не планируется.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крутов В. И. Влияние лесопатологических факторов на приживаемость и сохранность географических культур сосны в Карельской АССР // Адаптация древесных растений к экстремальным условиям среды: Тез. докл. Всесоюз. совещ. 13–15 августа 1981 г. Петрозаводск, 1981. С. 68–70.
2. Лакин Г. Ф. Биометрия: Учебник для вузов. М.: Высш. шк., 1973. 343 с.
3. Лесосеменное районирование основных лесобразующих пород в СССР. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 368 с.
4. Казимиров Н. И., Кабанов В. В. Лесотаксационные таблицы. Петрозаводск, 1976. 32 с.
5. Малышев И. И., Щербакова М. А. Сравнительная оценка экотипов сосны и ели разного происхождения и выделения из них наиболее перспективных для Карелии // Селекция и лесное семеноводство в Карелии: Сб. ст. Петрозаводск, 1993. С. 5–26.
6. Марьин Е. М. Географические культуры сосны обыкновенной в Карелии // Селекция и лесное семеноводство в Карелии: Сб. ст. Петрозаводск, 1979. С. 47–59.
7. Плохинский Н. А. Биометрия: Учебник для вузов. М.: Высш. шк., 1970. 343 с.
8. Проказин Е. П. Изучение имеющихся и создание новых географических культур. Пушкино, 1972. 52 с.
9. Shutayev A. M., Giertych M. Height growth variation in a comprehensive Eurasian provenance experiment of *Pinus sylvestris* L. // *Silvae Genetica*. 1997. Vol. 46(6). P. 332–348.

**ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ АФОНИЧЕВ**доктор технических наук, профессор кафедры транспорта леса и инженерной геодезии лесоинженерного факультета, Воронежская государственная лесотехническая академия  
*dmafonichev@yandex.ru***ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ ЛЮБАВСКИЙ**аспирант кафедры транспорта леса и инженерной геодезии лесоинженерного факультета, Воронежская государственная лесотехническая академия  
*dslubav@mail.ru***ВИКТОР ВАСИЛЬЕВИЧ БЕЛОЗОРОВ**кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности лесоинженерного факультета, Воронежская государственная лесотехническая академия  
*nis@vghta.vrn.ru*

### ИЗМЕНЕНИЕ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ КОНИКАМИ ЛЕСОВОЗНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ПОВОРОТЕ

Получена зависимость для определения расстояния между кониками лесовозного подвижного состава при движении на кривой в плане. Установлено, что величина смещения пачки относительно коников при движении на повороте очень мала и достигает 2...4 см при радиусе поворота 15 м, а при радиусе поворота 100 м данное смещение составляет не более 1 см.

Ключевые слова: коник, расстояние, автопоезд, прицеп-ропуск

Вывозка древесины из лесосек подвижным составом, оборудованным поворотными кониками (автомобиль + прицеп-ропуск, вагоны-сцепы), является наиболее экономичной [1], [3], [5]. Для рационального использования автомобильного подвижного состава и предотвращения перегруза колес устанавливается расстояние между кониками автомобиля и прицепа-ропуска  $l_{кон}$ , обеспечивающее их загрузку в соответствии с допустимыми нагрузками на коники по известной формуле [2], [3]:

$$l_{кон} = \frac{(q_1 + q_2)(\alpha L_{п} - l_{комл})}{q_2}, \quad (1)$$

где  $q_1, q_2$  – нагрузка на коники соответственно от комлевой и вершинной частей пачки, т;  $\alpha$  – коэффициент, определяющий положение центра тяжести пачки;  $L_{п}$  – длина пачки, м;  $l_{комл}$  – свес комлей за коник, м.

При движении подвижного состава на поворотах расстояние между кониками сокращается, так как звенья подвижного состава (автомобиль и прицеп-ропуск, полусцепы) поворачивают относительно буксирного прибора автопоезда или ударно-цепного прибора вагона-сцепы. Наглядно это демонстрирует рисунок.

На рисунке точки А и В – оси шкворней поворотных коников, установленных соответственно на автомобиле и прицепе-ропуске, точка С – буксирный прибор автомобиля – ось вращения элементов автопоезда относительно друг друга. Если принять допущения, использованные в работе [3], то продольная ось автомобиля 1 будет касательной к криволинейной траектории дви-

жения с радиусом  $R_T$ , а расстояние между задней осью автомобиля и буксирным прибором (расстояние между осью тележки и буксирным прибором)  $d$  совместно с радиусом  $R_T$  образует прямоугольный треугольник.

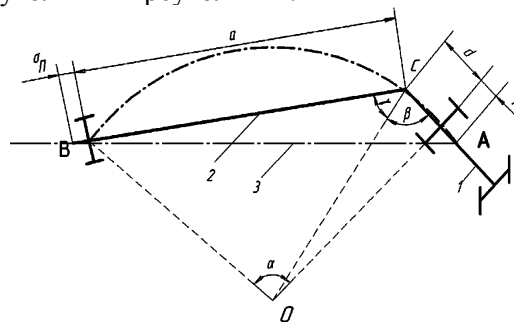


Схема автопоезда в составе автомобиль + прицеп-ропуск при движении на повороте: 1 – автомобиль; 2 – прицеп-ропуск; 3 – ось пачки лесоматериалов

Острый угол этого треугольника, лежащий против большего катета, обозначим  $\beta$ . Очевидно, что

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{R_T}{d}. \quad (2)$$

При наличии крестообразной сцепки между автомобилем и прицепом-ропуском обеспечивается движение колес прицепа-ропуска по следу колес автомобиля [1], [5], тогда расстояние  $a$  между буксирным прибором и осью шкворня коника, установленного на прицепе-ропуске, радиус кривизны траектории  $R_T$  и расстояние  $OC$  образуют треугольник, в котором известны все три стороны, причем  $OC$  равно

$$OC = \sqrt{R_T^2 + d^2}. \quad (3)$$

Угол  $\gamma$  между  $OC$  и продольной осью прицепа-ропуска определим, используя теорему косинусов:

$$R_T^2 = a^2 + R_T^2 + d^2 - 2a\sqrt{R_T^2 + d^2} \cos \gamma. \quad (4)$$

Алгебраическое преобразование уравнения (4) позволяет получить уравнение:

$$a^2 + d^2 = 2a\sqrt{R_T^2 + d^2} \cos \gamma. \quad (5)$$

Из уравнения (5) найдем

$$\cos \gamma = \frac{a^2 + d^2}{2a\sqrt{R_T^2 + d^2}}. \quad (6)$$

Согласно рисунку,  $AB$  – расстояние между кониками автомобиля и ропуска при движении на кривой, обозначим его  $l_{\text{кон}}(R_T)$ . Величина  $l_{\text{кон}}(R_T)$  может быть определена решением треугольника  $ABC$ , в котором сторона  $AC$  равна  $d + \delta_A$  ( $\delta_A$  – смещение шкворня коника вперед от оси колес автомобиля, м), сторона  $BC$  составляет  $a + \delta_{\text{П}}$  ( $\delta_{\text{П}}$  – смещение шкворня коника назад от оси колес прицепа-ропуска, м), а угол между сторонами  $AC$  и  $BC$  –  $\beta + \gamma$ . Запишем теорему косинусов для треугольника  $ABC$ :

$$l_{\text{кон}}^2(R_T) = (d + \delta_A)^2 + (a + \delta_{\text{П}})^2 - 2(d + \delta_A)(a + \delta_{\text{П}}) \cos(\beta + \gamma). \quad (7)$$

На прямом участке пути расстояние между кониками, согласно рисунку, будет равно:

$$l_{\text{кон}} = d + \delta_A + a + \delta_{\text{П}}. \quad (8)$$

Формула (8) является частным случаем уравнения (7) при  $\beta + \gamma = 180^\circ$ , так как  $\cos(\beta + \gamma) = \cos 180^\circ = -1$ .

В формуле (8) регулируемым параметром (переменной величиной) является  $a$ , значения  $d$ ,  $\delta_A$ ,  $\delta_{\text{П}}$  – константы. Значение  $a$  можно найти как разность:

$$a = l_{\text{кон}} - d - \delta_A - \delta_{\text{П}}. \quad (9)$$

В формуле (9) расстояние между кониками  $l_{\text{кон}}$  определяется по зависимости (1). Следует учесть, что для автомобильного подвижного состава следует обеспечить максимальную загрузку коника автомобиля, а поэтому формула (1) для состава автомобиль + прицеп-ропуск преобразуется к виду [2]

$$l_{\text{кон}} = \frac{M_{\Gamma}(\alpha L_{\text{П}} - l_{\text{комл}})}{M_{\Gamma} - q_A}, \quad (10)$$

где  $M_{\Gamma}$  – масса груза, размещаемого на автопоезде, т;  $q_A$  – нагрузка на коник автомобиля, т.

$$M_{\Gamma} = \gamma_{\text{ор}} k_{\text{кр}} Q_{\text{П}}, \quad (11)$$

где  $\gamma_{\text{ор}}$  – плотность древесины перевозимой пачки,  $\text{м}^3/\text{т}$ ;  $k_{\text{кр}}$  – коэффициент, учитывающий массу кроны;  $Q_{\text{П}}$  – полезная нагрузка на автопоезд,  $\text{м}^3$ .

По представленным зависимостям выполнен расчет расстояния между кониками для автопоезда в составе МА3-543403 + МА3-900800 при следующих параметрах:  $q_A = 7,13$  т,  $q_{\text{П}} = 3,5$  т,  $M_{\Gamma} = 20,63$  т,  $\alpha = 0,33$ ,  $l_{\text{накл}} = 1,25$  м,  $d = 1,57$  м,  $\delta_A = 0,34$  м,  $\delta_{\text{П}} = 0$  [4]. Результаты сведены в таблицу.

Расстояния между кониками автопоезда  
МА3-543403+МА3-900800

Радиус кривизны траектории	Расстояние между кониками при длине пачки								
	12	14	16	18	20	22	24	26	28
15	4,12	5,12	6,13	7,13	8,14	9,15	10,16	11,16	12,17
20	4,12	5,13	6,14	7,14	8,15	9,16	10,17	11,18	12,18
25	4,13	5,13	6,14	7,15	8,16	9,16	10,17	11,18	12,2
30	4,13	5,14	6,14	7,15	8,16	9,17	10,18	11,18	12,19
40	4,13	5,14	6,15	7,16	8,16	9,17	10,18	11,19	12,20
50	4,14	5,14	6,15	7,16	8,17	9,18	10,18	11,19	12,20
100	4,14	5,15	6,16	7,16	8,17	9,18	10,19	11,20	12,21
$\infty$	4,14	5,15	6,16	7,17	8,18	9,18	10,19	11,20	12,21

Примечание. Все параметры приведены в метрах.

Из таблицы видно, что величина смещения пачки относительно коников при движении на повороте очень мала и достигает 2...4 см при радиусе поворота 15 м, а при радиусе поворота 100 м данное смещение составляет не более 1 см. Таким образом, дополнительное сопротивление движению автопоезда на кривой, возникающее в результате смещения пачки, действует очень короткое время.

Если при повороте смещение пачки не может произойти, то колеса прицепа-ропуска будут иметь некоторый угол с траекторией движения и увеличится боковой увод колес прицепа-ропуска, который будет создавать сопротивление на протяжении всей кривой. В конструкции автопоезда должно быть предусмотрено устройство, которое обеспечит смещение пачки на необходимую величину для снижения сопротивления движению автопоезда, а так как эта величина очень мала, то указанное мероприятие вполне осуществимо.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автомобильный транспорт леса: Справочник / Под ред. В. А. Горбачевского. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 376 с.
2. Афоничев Д. Н. Расчет полезной нагрузки автомобильного подвижного состава на вывозке древесины с учетом вместимости устройств для размещения груза // Перспективные технологии, транспортные средства и оборудование при производстве, эксплуатации, сервисе и ремонте: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 3 / ВГЛТА. Воронеж, 2008. С. 61–65.
3. Кумицкий Б. М., Любавский Д. С., Афоничев Д. Н. Математическое моделирование движения лесовозного автопоезда на повороте // Моделирование систем и процессов. Вып. 1, 2 / ВГЛТА, ВГУ. Воронеж, 2009. С. 50–55.
4. Современные грузовые автотранспортные средства: Справочник / В. В. Пойченко, П. В. Кондрашов, С. В. Потемкин и др. М.: Агентство «Доринформсервис», 2004. 592 с.
5. Транспорт леса: В 2 т. Т. 1. Сухопутный транспорт / Под ред. Э. О. Салминена. М.: ИЦ «Академия», 2009. 368 с.

ВЛАДИМИР АНДРЕЕВИЧ БАБКИН

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры механики строительного факультета, Петрозаводский государственный университет  
babkin@karelia.ru

## ТЕПЛООБМЕН ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ СТЕНОК

На базе модели пристеночной анизотропной турбулентности рассмотрена задача о теплообмене при напорном установившемся турбулентном течении несжимаемой жидкости между параллельными плоскостями (плоский канал). Решение задачи о теплообмене при постоянной одинаковой температуре стенок найдено численно, методом Галёркина. Проведено сравнение решения с экспериментальными результатами.

Ключевые слова: пристеночная область, ядро течения, турбулентная вязкость, турбулентная теплопроводность

### ВВЕДЕНИЕ

Задача о теплообмене при турбулентном течении в плоском канале относится к числу классических задач гидродинамики. Ввиду отсутствия общепринятой теории турбулентности при аналитическом решении задачи прежде всего необходимо выбрать модели турбулентного течения и теплообмена. В данной работе используется модель пристеночной анизотропной турбулентности [1], [2]. В основу модели положены экспериментальные факты [13], [15], согласно которым в турбулентном потоке вблизи твердой стенки присутствуют когерентные вихревые структуры, существенным образом влияющие на характер течения. Вихревая структура образована плотной системой вихрей, вытянутых вдоль по потоку и наклоненных к нему. Их называют  $\Lambda$ -вихрями, или подковообразными вихрями. Каждый вихрь имеет две ветви – восходящую и нисходящую. При удалении от стенки углы наклона вихрей растут, достигая  $40\text{--}45^\circ$  в точке, в которой восходящая ветвь переходит в нисходящую. Система вихрей создает локальную анизотропию потока, характеризующую вектором, который называют директором. За пределами этого так называемого пристеночного слоя [1] вихревой характер течения сохраняется, но когерентность вихревой структуры отсутствует и поток является локально изотропным.

Принимая во внимание изложенные факты, при решении задачи плоский канал рассматривается как две бесконечные параллельные плоскости, область течения между которыми состоит из пристеночных слоев, прилегающих к плоскостям, и ядра течения. Для описания течения и теплопередачи в этих подобластях по необходимости используются разные модели.

### ПРОФИЛИ СКОРОСТЕЙ

Полагая, что характер течения жидкости не зависит от температуры, прежде всего найдем распределение скоростей в потоке. Поскольку

подробное решение задачи о профиле скоростей в канале можно найти в [1], [2], здесь приведено его краткое изложение.

Пусть ширина канала с горизонтальными плоскими стенками равна  $2H$  (рис. 1). Возьмем декартову систему координат  $x, y, z$  с осью  $x$ , лежащей в срединной плоскости канала и направленной по потоку, с осью  $y$ , направленной перпендикулярно плоскостям стенок, и с осью  $z$ , образующей с осями  $x$  и  $y$  правую систему. Таким образом, уравнения стенок  $y = \pm H$ . В пристеночных слоях течение рассматривается в рамках модели анизотропной турбулентности [1], [2]. Описание движения среды и теплопередачи в ней производится только на уровне осредненных величин, поэтому здесь и далее для параметров модели используются обычные обозначения без знака осреднения. Для несжимаемой жидкости общие уравнения модели (уравнения неразрывности, количества движения, динамики директора и определяющие уравнения среды) в декартовых координатах  $x_1, x_2, x_3$  имеют вид:

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

$$\rho \frac{du_i}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial(a_{i\alpha} + \tau_{i\alpha})}{\partial x_\alpha} + f_i, \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \left( I \frac{dn_i}{dt} \right) = \frac{\partial \beta_{i\alpha}}{\partial x_\alpha} + g_i + G_i, \quad (3)$$

$$a_{ij} = K \frac{\partial n_\alpha}{\partial x_i} \left( \frac{\partial n_j}{\partial x_\alpha} - \frac{\partial n_\alpha}{\partial x_j} + n_j n_\beta \frac{\partial n_\alpha}{\partial x_\beta} \right), \quad (4)$$

$$\tau_{ij} = \mu_1 n_\alpha n_\beta e_{\alpha\beta} n_i n_j + \mu_0 e_{ij}, \quad (5)$$

$$\beta_{ij} = \kappa_j n_i + K \left( \frac{\partial n_i}{\partial x_j} - \frac{\partial n_j}{\partial x_i} - n_j n_\alpha \frac{\partial n_i}{\partial x_\alpha} \right), \quad (6)$$

$$g_i = \chi n_i - \frac{\partial(\kappa_\beta n_i)}{\partial x_\beta} + K n_\alpha \frac{\partial n_\beta}{\partial x_\alpha} \frac{\partial n_\beta}{\partial x_i}, \quad (7)$$



$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $u_i$  – локальная скорость,  $n_i$  – директор,  $p$  – давление,  $a_{ij}$  – напряжения, обусловленные наличием в среде вихревой структуры,  $\tau_{ij}$  – вязкие напряжения,  $\beta_{ij}$  – обобщенные напряжения,  $e_{ij}$  – скорости деформаций,  $f_i, G_i$  – массовая и обобщенная массовая силы соответственно,  $g_i$  – обобщенная внутренняя массовая сила,  $I, K, \mu_0, \mu_1$  – определяющие коэффициенты модели,  $\kappa_i, \chi$  – произвольные векторная и скалярная функции. Здесь и далее по одинаковым индексам предполагается суммирование от 1 до 3.

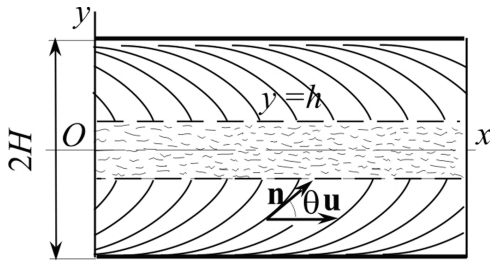


Рис. 1. Схема течения

Вернемся к рассматриваемому течению в канале в координатах  $x, y, z$ . Пусть вязкая несжимаемая жидкость в канале находится в режиме установившегося турбулентного течения. Длина канала бесконечная, стенки гладкие. Найдем вначале профили скоростей в пристеночных слоях. Воспользуемся уравнениями (1)–(7). Коэффициенты  $\mu_0, \mu_1, I, K$  приняты постоянными. Если пренебречь массовыми силами  $f_i$  и  $G_i$ , то течения в пристеночных слоях можно считать симметричными относительно срединной плоскости  $y = 0$ . Область течения  $|y| < H$  будем рассматривать как объединение трех подобластей: два пристеночных слоя  $h \leq |y| < H$  и ядро течения  $|y| \leq h$ , где  $h$  – полуширина ядра течения. Скорость  $u_i$ , директор  $n_i$  и давление  $p$  в пристеночных слоях отыскиваются в виде

$$\begin{aligned} u_x &= u(y), \quad u_y = u_z = 0, \quad n_x = \cos \theta(y), \\ n_y &= \sin \theta(y), \quad n_z = 0, \quad p = p_1(x) + p_2(y), \end{aligned} \quad (8)$$

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

Подстановка выражений (8) в уравнения (1)–(7) после несложных преобразований приводит к уравнениям для  $u(y)$  и  $\theta(y)$ :

$$\left( \mu_1 \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\mu_0}{2} \right) u' = -\tau_w \frac{y}{H}, \quad \tau_w = -\frac{\partial p}{\partial x} H, \quad (9)$$

$$\theta'' \sin \theta \cos \theta + \theta'^2 (1 - 3 \sin^2 \theta) = 0, \quad (10)$$

где  $(\partial p / \partial x)$  – постоянный вдоль потока градиент давления,  $\tau_w$  – модуль касательных напряжений на стенках канала, штрихами обозначены производные по  $y$ .

При условии, что стенки канала гладкие, граничные условия задаются равенствами [1], [2]:

$$\sin \theta(\pm H) = 0, \quad u(\pm H) = 0. \quad (11)$$

Интегрирование уравнений (9), (10) с граничными условиями (11) дает необходимые далее зависимости  $\theta(y), u(y)$  в виде [1], [2]

$$\cos \theta = [1 - 3bH(1 - |\xi|)]^{1/3}, \quad \xi = y/H, \quad (12)$$

$$u = Au_* [\Phi(\xi) - \Phi(1)], \quad \Phi(\xi) = F(t(\xi)),$$

$$t(\xi) = [1 - 3bH(1 - |\xi|)]^{1/3}, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} F(t) &= \frac{3bH - 1}{2\gamma^2 - 1} \left( \sqrt{\gamma^2 - 1} \arctg \frac{t}{\sqrt{\gamma^2 - 1}} + \frac{\gamma}{2} \ln \frac{\gamma - t}{\gamma + t} \right) + \\ &+ \frac{1 + 2\varepsilon}{4(2\gamma^2 - 1)} \ln \frac{\gamma^2 - t^2}{t^2 + \gamma^2 - 1} + \frac{1}{4} \ln |t^4 - t^2 - \varepsilon| + \frac{t^2}{2}, \end{aligned}$$

$$A = \frac{\rho u_*}{3\mu_1 b^2 R}, \quad \varepsilon = \frac{\mu_0}{2\mu_1}, \quad u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, \quad 2\gamma^2 = 1 + \sqrt{1 + 4\varepsilon},$$

где  $b$  – постоянная интегрирования.

Профиль скоростей (13) справедлив только в прилегающих к твердой стенке пристеночных слоях. Толщину слоев можно найти на основе анализа опытных данных. По данным [13], [15], в развитом турбулентном течении при наибольшем удалении вихревых линий от стенки их угол наклона к направлению течения близок к  $45^\circ$ . Будем считать, что границы пристеночных слоев  $y = \pm h$  определяются условием того, что на границе слоя  $\theta = 45^\circ$ . Тогда из формулы (12) следует

$$1 - \frac{h}{H} = \frac{4 - \sqrt{2}}{12bH}. \quad (14)$$

Толщина пристеночного слоя  $\Delta = H - h$ , очевидно, определяет размер ядра течения. Если вершины пристеночных вихревых линий в среднем достигают срединной плоскости, то ядро течения исчезает, то есть  $h = 0$ . В этом случае полуширину канала назовем  $H_{max}$ . Из (14) следует

$$H_{max} = \frac{4 - \sqrt{2}}{12b}. \quad (15)$$

Таким образом, если полуширина канала  $H \leq H_{max}$ , то использование рассматриваемой модели справедливо по всему сечению канала. Например, при сопоставлении с опытными данными для течений воздуха найдено, что в трубах и каналах  $b \approx 4,83 \text{ м}^{-1}$  [3] и, следовательно, в них  $H_{max} \approx 45 \text{ мм}$ .

Если  $H > H_{max}$ , то в ядре течения для отыскания поля скоростей необходимо использовать другую модель. При выборе модели воспользуемся свойствами турбулентной вязкости. Анализ экспериментальных результатов показал, что в ядре течения турбулентная вязкость изменяется слабо и приближенно ее можно считать посто-

янной [6], [10], [11], [16]. Кроме того, согласно [14], [17], максимальное значение турбулентной вязкости достигается вблизи границы пристеночного слоя и ядра течения.

Как следует из формулы (9), здесь турбулентная вязкость задается формулой

$$\mu_T = (\mu_0/2) + \mu_1 \sin^2 \theta \cos^2 \theta. \quad (16)$$

На границе пристеночного слоя и ядра течения ( $\theta = 45^\circ$ ) турбулентная вязкость (16), очевидно, принимает максимальное значение

$$\mu_{T0} = \frac{\mu_1}{4} + \frac{\mu_0}{2}. \quad (17)$$

Из сравнения с опытными данными при течении воздуха в трубах и каналах при нормальных условиях (температура 20 °С, давление 760 мм рт. ст.) для модельных констант были получены равенства [3]:

$$b = 4,83 \text{ м}^{-1}, \quad \mu_0 = 1,85 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с},$$

$$\mu_1 = 0,047 u_* \text{ Па} \cdot \text{с}. \quad (18)$$

Расчеты [4] показали, что при коэффициентах (18) вязкость  $\mu_{T0}$  имеет значения, весьма близкие к экспериментальным [14], [17], поэтому с учетом сказанного выше в ядре течения турбулентную вязкость примем постоянной и равной  $\mu_{T0}$ . Тогда уравнение (9) в ядре принимает вид

$$\mu_{T0} \frac{du}{d\xi} = -\tau_w \xi H, \quad \xi = \frac{y}{H}. \quad (19)$$

Интегрируя уравнение (19) при условии непрерывности скорости на границе пристеночного слоя и ядра  $\xi = \xi_0$ , получим, что при  $|y| \leq h$

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u_0}{u_*} + \frac{\rho u_* H}{2\mu_{T0}} (\xi_0^2 - \xi^2), \quad |\xi_0| = \frac{h}{H}, \quad (20)$$

где расстояние  $\xi_0$  и скорость  $u_0$  – величины, вытекающие из формул (13) и (14):

$$|\xi_0| = 1 - \frac{4 - \sqrt{2}}{12bH}, \quad u_0 = Au_* [\Phi(\xi_0) - \Phi(1)]. \quad (21)$$

Таким образом, формулами (13) и (20) профиль скоростей определен во всей области течения. На рис. 2 для примера приведены расчетные профили скоростей (13), (20) при течении воздуха в канале шириной  $2H$  при числах Рейнольдса  $Re = 480\,000$  и  $920\,000$ . Числа Рейнольдса определены формулой

$$Re = \frac{4wH}{\nu}, \quad (22)$$

где  $w$  – средняя скорость потока,  $\nu$  – молекулярная кинематическая вязкость. Для сравнения точками представлены результаты экспериментов Конт-Белло [5] при этих же числах Рейнольдса. Расчетные профили скоростей (сплошные кривые) вычислены в условиях эксперимента и при значениях для  $b$ ,  $\mu_0$  и  $\mu_1$ , заданных формулами (18). Согласие результатов достаточно удовлетворительное. Небольшое расхождение расчетных

и опытных данных у срединной плоскости потока вполне объяснимо приближенным характером предположения  $\mu_{T0} = const$  по всему ядру течения.

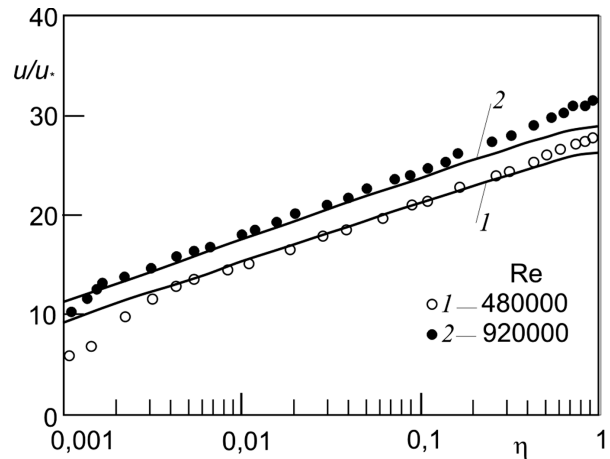


Рис. 2. Сравнение расчетных профилей с опытными данными: кривые – расчет по формулам (13), (20), точки – опытные данные [5]

## ТЕПЛООБМЕН

При решении задачи о теплообмене уравнения (1)–(3) необходимо дополнить уравнением притока тепла, которое в декартовых координатах  $x_i$  имеет вид [1], [4]

$$\rho \frac{dU}{dt} = (-p\delta_{ij} + a_{ij} + \tau_{ij})e_{ij} + \beta_{ij}N_{ij} - g_i N_i + Q - \frac{\partial q_i}{\partial x_i}, \quad (23)$$

где  $U$  – внутренняя энергия единицы массы,  $Q$  – интенсивность источника тепла,  $q_i$  – поток тепла,  $a_{ij}$ ,  $\tau_{ij}$ ,  $\beta_{ij}$  – напряжения,  $g_i$  – обобщенная сила, соответственно определенные формулами (4)–(7). Кинематические параметры  $N_i$ ,  $N_{ij}$  определяются формулами

$$N_i = \dot{n}_i - \omega_{ia} n_a, \quad N_{ij} = \frac{\partial \dot{n}_i}{\partial x_j} - \omega_{ia} \frac{\partial n_a}{\partial x_j}, \quad (24)$$

$$\dot{n}_i = \frac{dn_i}{dt}, \quad \omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right).$$

Конкретно задача о теплообмене в плоском канале формулируется следующим образом. Пусть в плоском канале, ограниченном гладкими параллельными стенками, в режиме установившегося турбулентного течения движется несжимаемая жидкость. Система координат и схема течения даны на рис. 1. Пусть во входном сечении  $x = 0$  температура  $T_0$  постоянна. Найдем распределение температуры  $T$  в полубесконечной по оси  $x$  области  $x \geq 0$  при условии, что температура  $T_w$  на стенках одинаковая и постоянная. Как и при определении профиля скоростей, задача о распределении температуры в пристеночном слое и ядре течения рассматривается отдельно.

С учетом симметрии явления в принятой выше системе координат  $x, y, z$  температуру  $T$  будем отыскивать в виде  $T = T(x, y)$ . Вследствие известной глубокой связи между процессами переноса импульса и тепла при турбулентном течении теплопроводности турбулентной жидкости в пристеночном слое, как и выше турбулентную вязкость, будем считать зависящей от локальной анизотропии потока, то есть от дивектора  $n_i$  ( $i = x, y, z$ ). Поскольку  $T = T(x, y)$ , закон Фурье принимает вид [1], [4]

$$\begin{aligned} q_x &= -(\lambda_0 + \lambda_1 n_x^2) \frac{\partial T}{\partial x} - \lambda_1 n_x n_y \frac{\partial T}{\partial y}, \\ q_y &= -\lambda_1 n_x n_y \frac{\partial T}{\partial x} - (\lambda_0 + \lambda_1 n_y^2) \frac{\partial T}{\partial y}, \end{aligned} \quad (25)$$

где  $\lambda_0$  и  $\lambda_1$  – определяющие коэффициенты модели, характеризующие турбулентную теплопроводность среды.

Как видно из (25), если пренебречь теплопроводностью в направлении течения, то коэффициент турбулентной теплопроводности  $\lambda_T$  в пристеночном слое определяется формулой

$$\lambda_T = \lambda_0 + \lambda_1 n_y^2 = \lambda_0 + \lambda_1 \sin^2 \theta. \quad (26)$$

Уравнение распространения тепла в потоке, необходимое для решения поставленной задачи теплообмена, следует из уравнения притока тепла (23) после некоторых преобразований. Подставим в уравнение (23) равенства (24), (25), заменяя попутно координаты скорости  $u_i$  и дивектора  $n_i$  их выражениями (8); выразим внутреннюю энергию  $U$  через энтальпию  $i = c_p T$  и проведем обычно принятую в подобных задачах оценку вклада различных членов уравнения в перенос тепла [9], [10]. Тогда, считая используемые коэффициенты  $\lambda_0$  и  $\lambda_1$  постоянными и пренебрегая производством тепла ( $Q = 0$ ), получим искомое уравнение распространения тепла в пристеночном слое в виде

$$(\lambda_0 + \lambda_1 \sin^2 \theta) \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_1 \theta' \sin 2\theta \frac{\partial T}{\partial y} = \rho c_p u(y) \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (27)$$

где  $c_p$  – теплоемкость при постоянном давлении,  $u(y)$  – профиль скоростей (13), штрихом обозначена производная по  $y$ .

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

$$2\lambda_{T0} = 2\lambda_0 + \lambda_1. \quad (28)$$

Тогда уравнение распространения тепла в ядре течения имеет вид

$$\lambda_{T0} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \rho c_p u(y) \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (29)$$

где  $u(y)$  – профиль скоростей (20).

При решении задачи удобно перейти к безразмерным величинам

$$\Theta = \frac{T - T_w}{T_0 - T_w}, \quad X = \frac{x}{H}, \quad \xi = \frac{y}{H}. \quad (30)$$

Уравнения (27) и (29) можно рассматривать как одно уравнение во всей области течения, которое после подстановки в него соответственно профилей скоростей (13) и (20) в безразмерных переменных (30) имеет вид

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} + \Psi_1(\xi) \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} = \Psi_2(\xi) \frac{\partial \Theta}{\partial X}, \quad (31)$$

$$\Psi_1(\xi) = \begin{cases} 0, & 0 < |\xi| < |\xi_0|, \\ -\frac{2\lambda_1 bH}{t(\xi)[\lambda_0 + \lambda_1(1-t^2(\xi))]}, & |\xi_0| < |\xi| < 1, \end{cases}$$

$$\Psi_2(\xi) = \begin{cases} \frac{\rho c_p u(\xi)H}{\lambda_{T0}}, & 0 < |\xi| < |\xi_0|, \\ \frac{\rho c_p u_* AH (\Phi(\xi) - \Phi(1))}{\lambda_0 + \lambda_1(1-t^2(\xi))}, & |\xi_0| < |\xi| < 1. \end{cases}$$

Уравнение (31) должно удовлетворять граничным условиям

$$\Theta(\xi, 0) = 1, \quad \Theta(\pm 1, X) = 0, \quad \frac{\partial \Theta(0, X)}{\partial \xi} = 0 \quad (32)$$

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

$$\Theta(\xi_0 \mp 0, X) = \Theta(\xi_0 \pm 0, X), \quad (33)$$

$$\frac{\partial \Theta(\xi_0 \mp 0, X)}{\partial \xi} = \frac{\partial \Theta(\xi_0 \pm 0, X)}{\partial \xi}.$$

Функции  $t(\xi)$ ,  $\Phi(\xi)$  и величины  $u_*$ ,  $A$  в уравнении (31) определены формулами (13).

Принимая во внимание симметрию процесса теплообмена относительно срединной плоскости  $\xi = 0$ , ограничимся решением в области  $0 \leq \xi \leq 1$ . Поскольку точное аналитическое решение найти не удастся, будем отыскивать его приближенно методом Галёркина в виде

$$\Theta(X, \xi) = \sum_{k=1}^n g_k(X) \varphi_k(\xi). \quad (34)$$

Базисные функции  $\varphi_k(\xi)$ , удовлетворяющие в области  $0 \leq \xi \leq 1$  второму и третьему граничным условиям (32) и первому условию непрерывности (33), определим формулами

$$\varphi_k(\xi) = \Phi_0(\xi) \cos(k-1)\pi\xi, \quad (35)$$

$$\Phi_0(\xi) = \begin{cases} F_0(t(\xi)) - F_0(1), & \xi_0 \leq \xi \leq 1, \\ \Phi_0(\xi_0) \left[ u(\xi_0) + \frac{\rho u_*^2 H}{2\mu_{T0}} (\xi_0^2 - \xi^2) \right], & 0 \leq \xi \leq \xi_0, \end{cases}$$

$$F_0(t) = 2(3bH-1) \ln \frac{\gamma-t}{\gamma+t} \ln \frac{\gamma-t^2}{t^2+\gamma^2-1} + \ln |t^4 - t^2 - \varepsilon| + 2t^2,$$

где  $u(\xi_0)$  – скорость на границе пристеночного слоя и ядра течения.

Функции  $g_k(X)$  определяются стандартной процедурой метода Галёркина [7] с учетом первого граничного условия (32).

При известных функциях  $g_k(X)$  формула (34) дает приближенное решение задачи. Местное число Нуссельта  $Nu = 4\alpha H/\lambda$  на одной стенке канала можно вычислить затем по формулам [9]

$$Nu(X) = -\frac{4\lambda_0}{\lambda\bar{\Theta}} \left( \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} \right)_{\xi=1}, \quad (36)$$

$$\bar{\Theta}(X) = \frac{1}{w} \int_0^1 \Theta(\xi, X) u(\xi) d\xi,$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\lambda$  – коэффициент молекулярной теплопроводности жидкости,  $\bar{\Theta}$  – средняя массовая температура по сечению,  $w$  – средняя скорость в канале

$$w = \int_0^1 u(\xi) d\xi.$$

Для сравнения с опытными данными решение (34) было реализовано при следующих конкретных условиях. Жидкость – воздух при нормальных условиях:  $\rho = 1,205 \text{ кг/м}^3$ ,  $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\lambda = 2,57 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ,  $c_p = 1002 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ , число Прандтля  $Pr = 0,705$ . Коэффициенты  $\mu_0$ ,  $\mu_1$  и константа  $b$  заданы формулами (18). Коэффициенты  $\lambda_0$  и  $\lambda_1$ , входящие в формулу (26) для турбулентной теплопроводности, определены формулами

$$\lambda_0 = 0,28 u_* H, \quad \lambda_1 = 46,5 u_* \quad (37)$$

В результате расчета получены значения предельного числа Нуссельта  $Re = 5 \cdot 10^5$  при течениях с числами Рейнольдса вплоть до  $Re = 5 \cdot 10^5$  в каналах шириной  $2H = 100; 200; 300 \text{ мм}$  (точки на рис. 3). Для сравнения на рис. 3 приведены также графики известных эмпирических формул.

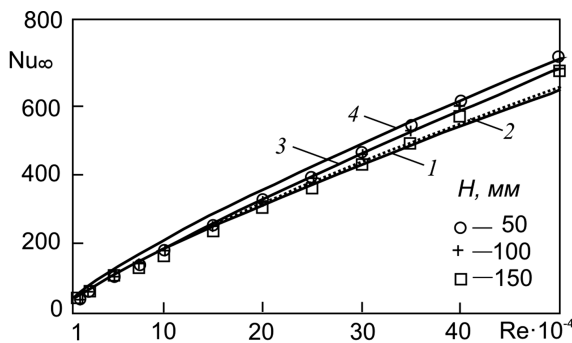


Рис. 3. Зависимость предельного числа Нуссельта  $Nu_\infty$  от числа Рейнольдса  $Re$  для каналов шириной  $2H$ .

Точки – результат расчета, кривые – графики эмпирических формул: 1 – [9], 2 – [8], 3 – [10], 4 – [12]

Кривая 1 [9]:

$$Nu_\infty = \frac{f Re Pr / 8}{1 + \frac{900}{Re} + 12,7 \sqrt{\frac{f}{8}} (Pr^{2/3} - 1)}; \quad (38)$$

кривая 2 [8]:

$$Nu_\infty = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43}; \quad (39)$$

кривая 3 [10]:

$$Nu_\infty = 7,6 - \frac{3,6}{\lg Re} + 0,0096 Re^{0,87} Pr^{0,605}; \quad (40)$$

кривая 4 [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  $Pr$  – число Прандтля,  $Re$  – число Рейнольдса,  $f$  – коэффициент сопротивления, определяемые формулами

$$Pr = \frac{\rho \nu c_p}{\lambda}, \quad Re = \frac{4wH}{\nu}, \quad f = \frac{1}{(1,82 \lg Re - 1,64)^2}.$$

Как видим, рис. 3 демонстрирует достаточно удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных результатов вплоть до  $Re = 500\,000$ . Некоторое расхождение результатов вполне объяснимо хотя бы тем, что сами эмпирические формулы не совпадают между собой.

Представляет интерес сравнение процесса теплообмена в плоской трубе с теплообменом в круглой трубе [1], [4]. Обычно эти процессы рассматриваются как аналогичные [9]. Проявлением аналогии является прежде всего общий вид формул (38)–(41) для обоих процессов теплообмена при соответствующем выборе параметров, через которые определяются безразмерные величины  $f$ ,  $Re$ ,  $Pr$ ,  $Nu$ . Если сравнить решения задач о теплообмене здесь и в [1], [4], то нетрудно убедиться, что аналогия проявляется на каждом шаге. В частности, в обоих случаях величины  $\mu_0$ ,  $\mu_1$  и  $b$  одинаково определены формулами (18), а уравнениям (37) при течении в канале соответствуют аналогичные уравнения

$$\lambda_0 = 0,28 u_* R, \quad \lambda_1 = 46,5 u_*$$

при течении в трубе, где  $R$  – радиус трубы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одна из основных трудностей при аналитическом или численном решении задачи, связанной с турбулентным течением жидкости, состоит в том, что в настоящее время неизвестна универсальная модель турбулентности. В связи с этим в последние десятилетия потребности практики стимулировали разработку довольно значительного числа моделей разной степени общности. В их число входит и использованная выше феноменологическая модель анизотропной пристеночной турбулентности. Она относится только к течениям, имеющим границу твердую стенку. Рассмотренная задача еще раз показала, что, как и при решении ряда задач ранее [1], [2], [3], [4], эта модель достаточно адекватно описывает класс пристеночных течений, позволяя аналитически определять как сопротивление, так и параметры теплопередачи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арсеньев С. А., Бабкин В. А., Губарь А. Ю., Николаевский В. Н. Теория мезомасштабной турбулентности. Вихри атмосферы и океана. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. 308 с.
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. Бабкин В. А. Профили скоростей и теплообмен при турбулентном течении несжимаемой жидкости в гладкой круглой трубе немалого диаметра // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2009. № 5. С. 91–97.
5. Конт-Белло Ж. Турбулентное течение с параллельными стенками: Пер. с франц. М.: Мир, 1968. 176 с.
6. Лапин Ю. В., Нехамкина О. А., Стрелец М. Х. Полуэмпирические модели турбулентности для пристенных течений. Установившееся течение в круглой трубе с гладкими стенками // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1990. № 2. С. 31–36.
7. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1977. 455 с.
8. Михеев М. А. Средняя теплоотдача при движении жидкости в трубах // Теплопередача и тепловое моделирование. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 122–137.
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. Хинце И. О. Турбулентность. Ее механизм и теория: Пер. с англ. М.: Физматгиз, 1963. 680 с.
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. Perry A. E., Chong M. S. On the mechanism of wall turbulence // J. Fluid Mech. 1982. Vol. 119. P. 173–217.
16. 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.
17. Reichardt H. Vollständige Darstellung der turbulenten Geschwindigkeitsverteilung in glatten Leitungen // Z. Angew. Math. Mech. 1951. Bd. 31. S. 208–219.

**АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ ВАСИЛЬЕВ**кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет  
*alvas@psu.karelia.ru***АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ ЕРШОВ**аспирант кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет  
*ferrouscastings@gmail.com*

## ОСОБЕННОСТИ ПАТЕНТНОГО ПОИСКА В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ ТРАНСПОРТНО-УПАКОВОЧНОГО КОМПЛЕКТА ДЛЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

В статье отражены особенности и результаты патентного поиска, выполненного в рамках работы над реализацией комплексного проекта по созданию высокотехнологичного ресурсосберегающего производства, обеспечивающего выпуск современных конкурентоспособных на отечественном и зарубежном рынке экологически безопасных транспортно-упаковочных комплектов для перевозки и хранения отработавшего ядерного топлива

Ключевые слова: отработавшее ядерное топливо, патентный поиск, транспортно-упаковочный комплект, транспортировка и хранение отработавшего ядерного топлива

В 2010 году Министерство образования и науки Российской Федерации проводило конкурс на реализацию комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по приоритетному направлению модернизации и технологического развития экономики России – ядерные технологии, по приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, рациональное природопользование. Победителем этого конкурса была признана заявка, предполагающая реализацию комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства «Создание ресурсосберегающего производства экологически безопасных транспортно-упаковочных комплектов для хранения и перевозки отработавшего ядерного топлива», подготовленная и поданная закрытым акционерным обществом «Петрозаводский завод бумагоделательного машиностроения» (ЗАО «Петрозаводскмаш»), входящим в состав холдинга промышленных компаний «Атомэнергомаш» совместно с государственным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Петрозаводский государственный университет».

Для реализации предлагаемого комплексного проекта с целью создания ресурсосберегающего производства, обеспечивающего выпуск современных конкурентоспособных на отечественном и зарубежном рынке экологически безопасных транспортно-упаковочных комплектов для перевозки и хранения отработавшего ядерного топлива, необходимо провести анализ существующих отечественных и зарубежных разработок конструкций транспортно-упаковочных комплектов. Для того чтобы провести такой анализ, необходимо было выполнить патентный поиск.

© Васильев А. С., Ершов А. В., 2011

Патентный поиск был начат с разработки технического задания, в котором было указано наименование темы патентного исследования – «Исследование технического уровня транспортно-упаковочных комплектов», определены задачи исследования – выявление основных технических решений конструкций транспортно-упаковочных комплектов, определение достигнутого технического уровня, и указаны сроки выполнения работы.

На следующем этапе в соответствии с ГОСТ 15.011 был составлен регламент патентного поиска, в котором указывались цель поиска информации – создание на базе российского машиностроительного предприятия ресурсосберегающего производства, обеспечивающего выпуск конкурентоспособных на отечественном и зарубежном рынке экологически безопасных транспортно-упаковочных комплектов для перевозки и хранения отработавшего ядерного топлива; предмет поиска (объект исследования, его составные части); источники информации, по которым следует вести поиск.

В качестве объекта исследования был определен транспортный упаковочный комплект для транспортировки и хранения отработанного ядерного топлива, а также его составная часть – контейнер.

Транспортно-упаковочный комплект предназначен для транспортировки и / или хранения отработавшего ядерного топлива; контейнер предназначен для размещения и удержания радиоактивного содержимого, находящегося в первичной таре или без нее.

Для начала патентного поиска нужно было определиться с общими данными об объекте ис-

следования – его назначении, основных выполняемых функциях, требованиях к его конструкции и функциональному назначению, экологических требованиях и т. п.

Было установлено, что объект исследования должен обладать высокими технико-экономическими показателями, обеспечивать высокие радиационно-защитные свойства, отвечающие современным экологическим требованиям, и при этом иметь высокую прочность для обеспечения безопасной эксплуатации, в том числе при аварийных ситуациях, возможных в процессе транспортировки и / или хранения отработавшего ядерного топлива.

Затем с использованием широкого круга доступных источников информации ([1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]) была проведена оценка технического уровня и выявлены тенденции развития объекта патентного исследования. Патентно-информационный поиск проводился с глубиной исследования в 30 лет. Были изучены не только заявки на изобретения, авторские свидетельства, патенты, полезные модели, касающиеся объекта исследования, выданные как в нашей стране, так и в зарубежных странах: Германии, Франции, США, Румынии, Китае, Японии, Корее, Тайване, Швеции и Великобритании. Кроме того, были изучены разного рода публикации, статьи в журналах, материалы конференций, проспекты фирм, отчеты НИР и ОКР, научные статьи, труды институтов, научно-техническая литература, интернет-источники и данные онлайн-библиотек.

В результате проведенного патентно-информационного поиска были отобраны правоохранные документы и проанализированы формулы изобретений: 71 документа, выданного в Российской Федерации, среди которых авторские свидетельства, заявки на изобретения, полезные модели, патенты на изобретения; 5 патентов, выданных Всемирной организацией интеллектуальной собственности; 9 европатентов; 35 зарубежных патентов. Также было отобрано и изучено более 70 разного рода публикаций.

Информация, собранная в ходе патентно-информационного исследования, позволила сделать вывод о перспективности использования в качестве материала для изготовления корпусов контейнеров, входящих в состав транспортных упаковочных комплектов, высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Преимуществами корпусов, изготовленных из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, по сравнению с металлобетонными корпусами являются: 1) возможность надежного неразрушающего ультразвукового контроля чугунного корпуса контейнера по всей его толщине, что исключено при использовании армированного бетона; 2) контейнеры с чугунными корпусами могут быть использованы для транспортировки и хра-

нения в одном контейнере большого числа отработавших тепловыделяющих сборок с высоким остаточным тепловыделением, что почти невозможно осуществить в контейнерах с металлобетонными корпусами из-за плохой теплопроводности бетона; 3) масса отливки из чугуна, изготавливаемой путем заливки в металлический кокиль, меньше массы отливок, необходимых для изготовления кованных стальных корпусов, а меньшие припуски на толщину стенок корпуса и его днища сокращают объем и время на механическую обработку; 4) литой корпус контейнера изготавливается сразу необходимой длины и совместно с днищем, что исключает необходимость проведения трудоемкой сварки корпуса из отдельных обечаек и приварки днища, а также операции по контролю состояния сварных швов. Кроме того, использование высокопрочного чугуна для изготовления корпусов контейнеров позволяет выполнить требования, предъявляемые к транспортным упаковочным комплектам для транспортировки и хранения отработавшего ядерного топлива в течение заданного срока службы, в отношении их радиационной безопасности и прочности. Для обеспечения необходимой прочности контейнера, предотвращения утечки радиации, при возникновении нестандартных (аварийных) ситуаций (например, падение и т. п.) на внешней поверхности корпуса контейнера монтируют демпфирующие устройства.

Транспортно-упаковочные комплекты в полной мере должны удовлетворять требованиям нормативных документов (ПНАЭ Г-14-41-97, ПНАЭ Г-14-029-91, ПБЯ-06-00-96, НП-053-04, РБ-003-98, НРБ-99, ОСПОРБ-99, ГОСТ Р 52761-2007) в отношении их безопасного использования, которое должно обеспечиваться их конструкцией.

Совершенствование конструкций транспортно-упаковочных комплектов направлено на поиск решений по увеличению срока их службы, увеличению полезного объема (вместительности отработавшего ядерного топлива) при ограничениях по габаритным размерам и массе, накладываемых условиями транспортировки, повышению прочностных показателей конструкции, ее надежности и эксплуатационной безопасности, а также поиск технических решений, дающих более выгодные технико-экономические показатели транспортировки и хранения отработавшего ядерного топлива.

В результате проведенного патентно-информационного поиска были отобраны авторские свидетельства, патенты, полезные модели, заявки на изобретения, выданные не только в Российской Федерации, но и за рубежом, а также отобрана научно-техническая литература.

Анализ отобранных материалов показал, что предлагаемые технические решения в отношении транспортных упаковочных комплектов для транспортировки и хранения отработанного

ядерного топлива направлены на: повышение радиационной безопасности; повышение надежности в эксплуатации и в аварийных ситуациях; снижение себестоимости; повышение прочности и упрощение обслуживания; упрощение конструкции, повышение технологичности; упрощение упаковки и разгрузки отработавшего ядерного топлива в контейнер; увеличение полезного объема контейнера; облегчение контроля за состоянием отработавшего ядерного топлива в течение всего срока хранения; повышение надежности хранения отработавшего ядерного топлива, повышение количества перевозимого отработанного ядерного топлива при уменьшении массы самого транспортно-упаковочного комплекта.

Проведенные патентные исследования позволили установить основные технические решения конструкций транспортно-упаковочных

комплектов и их составных частей и оценить достигнутый технический уровень конструкций транспортно-упаковочных комплектов для хранения и транспортировки отработавшего ядерного топлива. По результатам патентного поиска был оформлен отчет в соответствии с ГОСТ Р 15.011 «Патентные исследования. Содержание и порядок проведения» и ГОСТ Р 7.32 «Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления».

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по договору № 13. G25.31.0066 по реализации комплексного проекта «Создание ресурсосберегающего производства экологически безопасного транспортно-упаковочного комплекта для перевозки и хранения отработавшего ядерного топлива».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Н. Н., Бех Н. И., Радченко М. В. Высокопрочный чугу́н с шаровидным графитом – уникальный конструкционный материал XXI века // *Литейное производство*. 2009. № 6. С. 2–5.
2. Гатауллин Р. М., Давиденко Н. Н., Свиридов Н. В., Сорокин В. Т., Меделяев И. А., Калинин В. И., Перегудов Н. Н., Дёмин А. В. Контейнеры из композиционных материалов на основе бетона для радиоактивных отходов. М.: Энергоатомиздат, 2010. 176 с.
3. Долговечные контейнеры для РАО [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2008/11/19/614>
4. Зубков А. А., Петреня Ю. К., Фромзель В. Н., Сафутин В. Д., Токаренко А. И., Тихонов Н. С., Капилевич А. Н. О новом поколении отечественных контейнеров для отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов // *Сб. трудов ЦКТИ*. Вып. 282. СПб., 2002.
5. Зубков А. А., Фромзель В. Н., Безлепкин П. В. Обоснование возможности использования чугу́нных контейнеров для хранения и транспортирования отработавшего ядерного топлива АПЛ // *Сб. докладов III междунар. выставки и конф. «Радиоактивная безопасность: транспортирование радиоактивных материалов (АТОМТРАНС-2000)»*, г. Санкт-Петербург, 2000. СПб., 2000.
6. Зубков А. А., Фромзель В. Н., Васильев В. Ю., Данилин Б. К., Никитин В. А., Фромзель Л. В. Металло-бетонный контейнер для хранения и транспортирования отработавшего ядерного топлива реакторов РБМК // *Теплоэнергетика*. 1996. № 11.
7. Контейнеры для транспортирования ОЯТ и твердых радиоактивных отходов. Устройства для безопасной эксплуатации контейнеров [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ckti.ru/iss11.html>
8. Радченко М. В. Обоснование прочности контейнеров для транспортировки и хранения отработавшего ядерного топлива с корпусом из высокопрочного чугу́на с шаровидным графитом: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2007.
9. ФИПС – Федеральное государственное бюджетное учреждение Федеральный институт промышленной собственности [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content\\_ru/ru/inform\\_resources/](http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content_ru/ru/inform_resources/)
10. Фромзель В. Н., Зубков А. А., Фромзель Л. В. Обоснование возможности создания контейнера увеличенной вместимости для хранения и транспортирования отработавших сборок реактора РБМК (тепловые аспекты) // *Теплоэнергетика*. 1996. № 9. С. 49–54.
11. Espacenet – Home pages [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://worldwide.espacenet.com/>
12. Gotovskiy M., Fromzel V. Heat Transfer Problems during Transportation and Storage of Spent Nuclear Fuel // *Russian Journal of Engineering Thermophysics*. 1995. Vol. 5. № 3. P. 331–346.



**РЕНАТ ИСХАКОВИЧ АЮКАЕВ**

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

**ЕЛЕНА ОЛЕГОВНА ГРАФОВА**

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

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ БАЗ ОТДЫХА ЗАГОРОДНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ (на примере Республики Карелии)

Развитие строительства загородных баз отдыха и коттеджей обостряет санитарную обстановку рекреационных зон. В статье рассматриваются условия эксплуатации и оптимизация работы систем водоснабжения и водоотведения существующей несколько лет базы отдыха. Выводы статьи получены на основе реальных данных и внедрений авторов.

Ключевые слова: неравномерный режим водопотребления, особенности противопожарного водопотребления, оптимизация работы канализационных очистных сооружений

Особенности природно-климатических условий Карелии, колоссальное количество озер и ламбушек, нетронутые рукой человека лесные массивы, множество природных заповедников делают этот близкий к Санкт-Петербургу регион России весьма привлекательным для строительства баз отдыха, кемпингов, коттеджных поселков. Жители Москвы и Санкт-Петербурга скупают в карельских деревнях заброшенные дома, реконструируют их, доводя до уровня элитных строений. Жители Карелии переводят дачные домики в разряд круглогодичных, что требует соответствующего инженерного обустройства.

Эти тенденции особенно усилились в последние полтора десятка лет с переходом России от плановой экономики к рыночной, с появлением у населения свободных денег, доступа к приобретению строительных материалов и конструкций, к услугам квалифицированных строителей.

Загородное размещение таких объектов заметно влияет на их обустройство системами водоснабжения и водоотведения. В качестве примера рассмотрим ситуацию на базе отдыха, расположенной в Карелии, на границе с Финляндией.

### ХОЗЯЙСТВЕННО-ПИТЬЕВОЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ

Действующая система водоснабжения базы отдыха запроектирована и построена в соответствии со СНиП 2.04.02-82 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» и СНиП 2.04.01-85 «Внутренний водопровод и канализация». Основными водопотребителями являются:

1. Жилые корпуса гостиничного типа на 8, 14 и 48 чел. Норма водопотребления, согласно при-

ложению 3 СНиП 2.04.01-85\* «Внутренний водопровод и канализация зданий», принята равной 230 л/сут. на человека. Данная норма включает в себя расход воды обслуживающим персоналом (в том числе на прием душа), посетителями, на уборку помещений и пр. Общий расход воды, потребляемой жилыми корпусами, составляет 16,1 м<sup>3</sup>/сут. Режим водопотребления неравномерный.

2. Ресторан на 108 посадочных мест. На одно посадочное место в среднем приходится приготовление 4 блюд в сутки. Количество блюд, реализуемых в сутки, составит:  $U = 4 \text{ шт} = 4 \cdot 108 \times 1,5 = 648 \text{ блюд/сут.}$ , где  $m$  – количество посадок, принимаемое по СНиП 2.04.01-85\* «Внутренний водопровод и канализация зданий» равным 1,5. При норме водопотребления 12 л/сут. на одно блюдо расход воды рестораном составит:

$$Q = \frac{U \cdot 12}{1000} = \frac{648 \cdot 12}{1000} = 7,78 \text{ м}^3 / \text{сут.}$$

Режим водопотребления неравномерный.

3. Баня на 10 чел. Норма водопотребления – 180 л/сут. на чел. Расход воды составляет:

$$Q = \frac{N_{\text{пос}} \cdot q}{1000} = \frac{10 \cdot 180}{1000} = 1,8 \text{ м}^3 / \text{сут.}$$

Режим водопотребления равномерен в течение 10 вечерних и ночных часов.

4. Неучтенные расходы, а также расходы воды на нужды водопроводно-канализационного хозяйства приняты равными 10 % от основного водопотребления и составляют 2,79 м<sup>3</sup>/сут.

Общее водопотребление:  $Q = 16,10 + 7,78 + 1,80 + 2,79 = 28,47 \text{ м}^3 / \text{сут.}$

Такой расход может обеспечить имеющаяся скважина при сохранении дебита не ниже 1,2 м<sup>3</sup>/ч (1,22 м<sup>3</sup>/ч × 24 = 28,82 м<sup>3</sup>/сут.) при круглосуточной работе.

5. Полив зеленых насаждений обеспечивается из ручья, протекающего по территории базы отдыха, в безводный период – из прилегающего озера с помощью погружного насоса и переносных шлангов.

На основании почасового графика водопотребления для объекта с менее чем 200 сантехприборами, с расходом одного прибора 0,12 л/с был построен график работы скважинного насоса.

Для обеспечения проектного режима работы насоса требуется аккумулирующая емкость объемом 6 м<sup>3</sup> при дебите скважины 1,5 м<sup>3</sup>/ч.

В предположении некоторого снижения дебита скважины к установке были приняты 5 емкостей объемом по 1 м<sup>3</sup>, размерами 1,0 х 0,7 х 1,5 (h), общим объемом 5 м<sup>3</sup>, а также оставшиеся ранее 2 напорных бака по 350 л. В сумме аккумулирующие емкости составили около 20 % суточной производительности.

Учитывая сезонную неравномерность в загрузке базы отдыха, введено регулирование работы скважинного насоса по уровню воды в аккумулирующей емкости. Требуемый напор насоса с учетом геодезических разниц отметок насосно-фильтровальной станции и наиболее удаленных и высокорасположенных зданий, потеря напора в тупиковых сетях водопровода до расчетных точек составил для одноэтажной застройки 12,5 м, для двухэтажного гостиничного корпуса – 16,5 м.

Для подачи воды потребителям в здании насосно-фильтровальной станции установлена автоматическая насосная станция HYDROFRESH-100CL с двумя насосами (один рабочий, один резервный) марки JSWm3CL и двумя пневматическими емкостями общим объемом 700 л. Рабочие параметры насоса марки JSWm3CL мощностью двигателя 1,1 кВт представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Рабочие характеристики насоса марки JSWm3CL

Q, м <sup>3</sup> /ч	0,6	1,2	1,8	2,4	3,0	4,2	7,2	8,4
H, м	40	38	36	34	32	28	20	17

В двухэтажное гостиничное здание (H = 16,5 м) рабочий насос способен подавать до 7,2 м<sup>3</sup>/ч. Включение двух насосов (рабочего и резервного) увеличивает подачу воды в сеть до 10–12 м<sup>3</sup>/ч.

Годичные наблюдения за работой системы водоснабжения загородного объекта в обычных условиях показали ее высокую надежность. Нестандартная ситуация возникла в преддверии встречи нового, 2010 года.

В первую половину предновогоднего дня из Санкт-Петербурга на нескольких автобусах приехали отдыхающие и почти одновременно заполнили все жилые комнаты. Большая нагрузка легла на туалет, душ, ресторанный кухню, сау-

ну. Система водоснабжения стала давать сбои, резервуары чистой воды периодически оказывались пустыми, прямой подачи воды в сеть скважинным насосом оказывалось недостаточно. Ситуация была разрешена введением веерной подачи воды в отдельные корпуса при сохранении полноценного питания водой ресторанной кухни. Во избежание таких осечек были проанализированы причины сбоев в водоснабжении. Был рассчитан потенциально возможный расход при одновременно открытых водоразборных приборах (табл. 2). В табл. 3 показаны расчетные расходы воды при различных долях одновременно открытых водоразборных кранов.

Таблица 2  
Расчетный расход одновременно включенных приборов

Назначение здания	Водоразборный прибор	Количество, шт.	Расчетный расход, л/с	Общий расход, м <sup>3</sup> /ч
Гостиница	умывальники и души	78	0,12	33,70
	сmyвные бачки	38	0,1	13,68
Ресторан	раковины	3	0,15	1,62
	сmyвные бачки	7	0,1	2,52
	писсуары	2	0,035	0,25
Баня	банные краны	2	0,4	2,88
	сmyвные бачки	1	0,1	0,36
	умывальники и души	2	0,12	0,86
Всего		131	0,035–0,40	55,87

Таблица 3  
Расчетный расход воды при различной доле одновременно открытых водоразборных кранов

Доля включенных приборов	1,0	0,75	0,50	0,25	0,125
Расход воды, м <sup>3</sup> /ч	55,87	41,90	27,93	13,97	6,98

В целях сравнения нормативного и фактического водопотребления в преддверии 2011 года и сразу после новогодних праздников на базе отдыха ежесуточно фиксировались расходы воды, количество проживающих в гостиничных номерах и вечерних гостей ресторана.

В табл. 4 приведены расчетные (по нормам) и фактические расходы воды.

Проведен также выборочный хронометраж продолжительности пользования отдельными приборами: например, чистка зубов и умывание занимает 5–7 мин.; душем пользуются от 10 до 15, редко до 30 мин.; ресторанные мойки работают непрерывно (хотя это и не оправдано технологией кухни). Замечено, что категория гостей влияет на особенности водопользования: горожане это или охотники-рыболовы, соотечественники или иностранцы, взрослые или дети и т. д.

Таблица 4

Расчетные (по нормам) и фактические расходы воды в предновогодние и посленовогодние дни

№	Потрачено в сутки, м³	Количество					Расчетный расход, л/сут.											Итого	%
		гостей				персонал	проживание персонала	проживание гостей	ресторан						полив				
		проживание	ресторан	пансион	баня				завтрак	обед	ужин	банкет	персонал	баня		прачка			
1	5 000	16				22	264	3680		422				581		540	300	5787	14
2	6 000	12				22	264	2760		317				581		405	300	4627	23
3	7 000	11				24	288	2530		290				634		371	300	4413	37
4	13 000	10			12	23	276	2300		264				607	4320	338	300	8405	35
5	10 000	8			3	23	276	1840		211				607	1080	270	300	4584	54
6	17 000	8	47		4	23	276	1840		211		1241		607	1440	270	300	6185	64
7	12 000	10			4	26	312	2300		264				686	1440	338	300	5640	53
8	12 000	8	28		3	28	336	1840		211		739		739	1080	270	300	5516	54
9	12 000	7				26	312	1610		185				686		236	300	3329	72
10	17 000	5				28	336	1150		132				739		169	300	2826	83
11	18 000	66		66	10	35	420	15180	601,9	1742	950			924	3600	2228	300	25946	31
12	12 000	76	5	76	6	33	396	17480	693,1	2006	1094	132		871	2160	2565		27398	56
13	20 000	76	81	76	18	20	240	17480	693,1	2006	1094	2138		528	6480	2565		33225	40
14	21 000	78		78	10	25	300	17940	711,4	2059	1123			660	3600	2633		29026	28
15	22 000	89		89		33	396	20470	811,7	2350	1282			871		3004		29184	25
16	22 000	89		89	19	40	480	20470	811,7	2350	1282			1056	6840	3004		36293	39
17	24 000	89		89	15	35	420	20470	811,7	2350	1282			924	5400	3004		34661	31
18	21 000	89		89	19	35	420	20470	811,7	2350	1282			924	6840	3004		36101	42
19	28 000	89		89	12	35	420	20470	811,7	2350	1282			924	4320	3004		33581	17
20	26 000	12	60		7	20	240	2760	912,5	317		1584		528	2520	405		9266	64
21	15 000	9			6	25	300	2070		238				660	2160	304		5731	62
22	9 000	5				20	240	1150		132				528		169		2219	75
23	5 000	12			1	26	312	2760		317				686	360	405		4840	3
24	7 000	27				26	312	6210		713				686		911		8832	21
25	8 000	27	17		17	28	336	6210		713		449		739	6120	911		15478	48
26	12 000	25			3	24	288	5750		660				634	1080	844		9255	23
27	8 000	24			5	20	240	5520		634				528	1800	810		9532	16
28	8 000	16			10	17	204	3680		422				449	3600	540		8895	10
29	7 000	13				25	300	2990		343				660		439		4732	32
30	6 000	11			2	24	288	2530		290				634	720	371		4833	19
31	5 000	11			3	21	252	2530		290				554	1080	371		5078	2
32	6 000	8			10	23	276	1840		211				607	3600	270		6804	12
Σ	421 000	1036	238	741	199	835												432223	

Понятно, что проведенные наблюдения не дают исчерпывающего ответа о причинах сбоев в водоснабжении загородных объектов в неординарные периоды. Тем не менее они позволили сформулировать ряд конкретных рекомендаций

по совершенствованию системы водоснабжения базы отдыха и условий ее эксплуатации.

- Объем аккумулирующих емкостей необходимо увеличить до 50–60 % от суточной производительности системы водоснабжения, то есть

до 14,5–17,5 м<sup>3</sup> при нынешних 5,7 м<sup>3</sup>. Из российской практики известно, что объем аккумулирующих емкостей (башен или контррезервуаров) сельских населенных пунктов достигает 30–50 %. В Финляндии же аккумулируется до 100 % суточного расхода.

- Резервуары чистой воды должны быть секционированы с возможностью отключения части из них (по санитарным соображениям) в периоды малого водопотребления.

- Производительность насосов должна быть повышена с выделением групп насосов на обычные и неординарные ситуации водоразбора (с целью экономии электроэнергии).

- По возможности следует исключить единовременный прием и размещение гостей во все гостиничные номера. Известно, что даже крупные водоканалы (например, петрозаводский) в предновогодние дни просят жителей города «растянуть» по дням и часам суток стирку, уборку помещений и пользование душами и ваннами во избежание перебоев в городском водоснабжении.

- Желательно обеспечивать временной разрыв в размещении примерно каждые 30 % гостей продолжительностью не менее 4–5 ч.

По результатам работы базы отдыха в последующие неординарные периоды эти рекомендации могут быть откорректированы.

Особое внимание должно быть обращено на повышение ремонтпригодности оборудования; обслуживающий персонал следует обучить замене неожиданно вышедшего из строя скважинного насоса на запасной. Это одно из самых уязвимых мест в системе водоснабжения локального объекта: у необученного персонала на замену насоса могут уйти сутки, обученный специалист может выполнить эту работу за 4–5 ч.

## ПРОТИВОПОЖАРНОЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ

В зимнее время на соседней базе отдыха случился пожар. Анализ организации его тушения и последствий позволил выделить ряд особенностей, которые следует учитывать при проектировании, строительстве и эксплуатации противопожарного водопровода объектов загородного размещения.

1. Заказчик, как правило, готов выйти за пределы требований СНиПа 2.04.02-84 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» в части количества и расхода одновременно действующих пожаров в сторону их увеличения, сокращения максимального срока восстановления противопожарного запаса воды по причине снижения риска от возгорания и гибели недвижимости, имущества, человеческих жертв.

2. Чаще, чем в городских условиях, происходят аварийные отключения объекта от стационарного электроснабжения, колебания напряжения в сети, что может нарушить нормальную работу насосного оборудования.

3. Время приезда пожарных расчетов из ближайших населенных пунктов, располагающих противопожарными службами, чаще всего намного больше требуемого для локализации очага пожара. В зимнее время эта проблема оказывается чаще всего вообще нерешаема из-за снежных заносов автодорог.

4. Строительство собственной стационарной системы противопожарного водопровода (с водозабором, пирсом для пожарных машин, пожарными резервуарами, насосной станцией, системой трубопроводов с гидрантами) оказывается соизмеримой по стоимости или дороже самого загородного объекта, что останавливает потенциального инвестора.

5. Прилегающие к загородному объекту водоемы (озера, ламбушки, речки) отличает, как правило, большая нестационарность в уровнях воды; при пологих берегах понижение уровня воды влечет за собой значительное удаление береговой линии и создает ощутимые трудности в устройстве водозабора.

6. Аналогичные трудности в устройстве водозабора возникают в связи с большой толщиной льда, иногда полным промерзанием воды у береговой линии.

С учетом обозначенных особенностей для базы отдыха была запроектирована система противопожарного водопровода, которая включает в себя:

- низконапорный погружной насос расчетной производительности 1-го подъема; по пожарному рукаву вода подается к отапливаемому зданию прибрежной насосной станции; длина рукава обеспечивает размещение насоса (на поплавке или в проруби) с учетом изменений уровня воды в озере;

- стационарный высоконапорный центробежный насос 2-го подъема, смонтированный в здании насосной станции;

- резервную электростанцию с бензиновым (дизельным) двигателем мощностью, достаточной для работы пожарных насосов 1-го и 2-го подъемов;

- комплекты пожарных рукавов (на спецлежках) для подачи воды от насоса 2-го подъема к местам пожаротушения; каждое самое удаленное и самое высокое место базы отдыха обеспечивается подачей минимум двух струй с расходом 10 л/с.

Рекомендованная система пожарного водопровода существенно упростила и удешевила строительство, избавила от таких работ, как строительство противопожарных резервуаров, водозабора руслового типа, прокладка напорного водовода под автомобильной дорогой с интенсивным движением грузового транспорта, прокладка сетей пожарного водопровода ниже глубины промерзания, устройство многочисленных выпусков, вантузов и гидрантов.

## ВОДООТВЕДЕНИЕ

Особенности водопотребления базы отдыха, связанные с ее загородным размещением, влияют и на эксплуатационные показатели локальных очистных сооружений (ЛОС) хозяйственно-бытовой канализации.

Существующие ЛОС представлены двумя последовательно включенными в работу установками «Водолей». Дополнительно введена реагентная обработка стоков для интенсификации процесса водоочистки и удаления фосфатов. Разработчик и поставщик установок заводской готовности «Водолей» – старейшее и ведущее в прежнем СССР и в нынешней России центральное научно-проектно-экспериментальное предприятие – ЦНИИЭП инженерного оборудования (г. Москва). Установка сертифицирована, использует современные технологии, разошлась по стране начиная с 1970-х годов тысячами экземпляров и при нормальной эксплуатации не вызывает особых нареканий. Все, что сегодня предлагается на отечественном природоохранном рынке, так или иначе повторяет технологию установки «Водолей».

В рамках проверки условий эксплуатации базы отдыха весной 2010 года силами лицензированных химической и бактериологической лабораторий проведена ревизия эффективности работы ЛОС с отбором и анализом проб очищенных стоков по ряду нормативно тестируемых показателей. Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

- судя по показателю «взвешенные вещества», сооружения прекрасно справляются с механической очисткой стоков, обеспечивая ПДК на уровне водоемов рыбохозяйственного назначения (снижение с 402,8 до 3 мг/л);

- судя по показателю «аммоний-ион», идет интенсивное вторичное загрязнение очищаемых стоков гниющим осадком (повышение с 1,15 до 64,4 мг/л, то есть в 128,8 раза). Это типичный результат плохо эксплуатируемых сооружений.

На ЛОС базы отдыха сложилась следующая ситуация с эксплуатацией.

- Продолжительное время осадок из отстойной части установок «Водолей» не вывозился вообще, после очередной ревизии ЛОС в 2009 году осадок начал вывозиться, но от случая к случаю (не по регламенту).

- Осадок ни разу (а делать это надо каждый раз) не откачивался из сооружений полностью, короткой всасываемая вакуумная машина имеет короткий всасывающий шланг; до 30 % осадка из раза в раз остается нетронутым, гниющим и является источником вторичных загрязнений.

- Судя по показателю «железо», в донном, невывозимом слое осадка идет кислое брожение, что вызывает ускоренную коррозию металла. Этим объясняется прирост концентрации железа в очищенных стоках – с 0,26 до 1,73 мг/л, то есть в 17,3 раза. Сохранение такой ситуации ве-

дет к перфорации корпуса установки со всеми вытекающими отсюда последствиями.

- Показатель «нефтепродукты» при концентрации в исходном стоке 0,11 мг/л на выходе увеличивается до 1,06 мг/л. В технологии очистки нефтепродукты не используются. Идет десорбция из донного осадка накопившихся ранее нефтепродуктов, которые попали через разрушенные канализационные колодцы на ЛОС от разливов масел и дизтоплива из землеройной техники и грузового автотранспорта при проведении строительных работ на объекте.

- Судя по показателю «БПК<sub>5</sub>», процесс биохимического окисления органики не организован: происходит снижение с 383,2 до 141,6 мг/л при нормативных 3–5 мг/л.

«Рванный» режим функционирования водохозяйственного объекта загородного размещения (интенсивность стоков зависит от количества гостей) предполагает обязательную перенатройку работы ЛОС под изменяющиеся условия с постоянным контролем и регулированием иловой массы. Причем результаты такой перенатройки следует ожидать не ранее чем через 2–3 недели. Однако пребывание на базе организованных групп отдыхающих часто заканчивается раньше этого срока, и все начинается сначала уже с новым заездом гостей. Регулярная перенатройка работы ЛОС под силу только опытным операторам-специалистам в области водоочистки, чего не может себе позволить предприятие с неустойчивыми финансовыми показателями.

Для повышения надежности работы существующих ЛОС предложен ряд мероприятий.

- Донный осадок из обеих установок «Водолей» должен быть размыт и полностью вывезен на иловые площадки ближайших действующих поселковых или городских КОС.

- Струйная аэрация в аэрационной части установок подлежит замене на компрессорную.

- Должны быть построены малоинерционные в технологическом плане сооружения доочистки; с учетом территориальных возможностей базы отдыха в качестве таковых предлагаются медленные фильтры. Эти сооружения работают по технологии пленочного фильтрования, их отличает самая высокая степень очистки по сравнению с другими технологиями (за исключением мембранной); пленка, обеспечивающая механическую доочистку стоков от взвешенных веществ и активного ила, формируется на поверхности мелкозернистого песка за 3–5 ч. Пленка, обеспечивающая работу медленных фильтров в режиме биологической доочистки, формируется за 10–14 ч.; медленные фильтры относятся к сооружениям «редкого» обслуживания: при подготовке воды для хозяйственно-питьевых целей из речных или озерных водоемов регенерация проводится лишь через 3–6 месяцев, при доочистке хозяйственных стоков – через 2–3 недели.

## ВЫВОДЫ

1. Фактическое хозяйственно-питьевое водопотребление на базах отдыха загородного размещения ниже предусмотренного СНиП 2.04.02-84 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» и СНиП 2.04.01-85 «Внутренний водопровод и канализация зданий».

2. Крайне неравномерные режимы водопотребления в неординарные периоды (праздники, массовые корпоративные выезды) требуют устройства резервуаров чистой воды существенно больших объемов, чем рассчитанные по действующим нормативам.

3. Заказчики, как правило, готовы выйти за пределы требований СНиПа 2.04.02-84 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» в части количества и расхода воды на наружное пожаротушение в сторону их увеличения, сокращения максимального срока восстановления противопожарного запаса воды для снижения риска от возгорания и гибели недвижимости, имущества, человеческих жертв.

4. В составе противопожарного водопровода баз отдыха загородного размещения обязательно наличие резервной электростанции (с бензи-

новым или дизельным двигателем) мощностью, достаточной для работы противопожарных насосов и аварийного освещения объекта.

5. Вследствие чрезвычайно высокого коэффициента сезонной неравномерности водопотребления и водоотведения на базах отдыха загородного размещения оптимальным способом биологической очистки хозяйственно-бытовых стоков следует считать почвенный.

6. На этапе предочистки эффективно применение физико-химической обработки стоков.

7. Сооружения водопровода и канализации баз отдыха загородного размещения должны иметь сервисное обслуживание специализированной фирмой или как минимум консультативное обслуживание на основе договорных отношений с опытным технологом в ближайших успешно работающих поселковых или городских КОС.

8. Пребывание на базах отдыха загородного размещения детей диктует строгое соблюдение требований СНиП 2.04.02-84 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» и СНиП 2.04.03-85 «Канализация. Наружные сети и сооружения» в части ограждения водохозяйственных сооружений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аюкаев Р. И., Графова Е. О. Об особенностях водоснабжения и водоотведения автозаправочных комплексов // Вода-мэгэзин. 2011. № 1(41). С 50–53.
2. Аюкаев Р. Р. Технология медленного фильтрования на сооружениях малой и средней производительности: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2005. 22 с.
3. Графова Е. О. Повышение эффективности работы систем водоотведения загородных объектов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2008. 26 с.
4. СНиП 2.04.02-84 Водоснабжение. Наружные сети и сооружения.
5. СНиП 2.04.01-85 Внутренний водопровод и канализация зданий.
6. СНиП 2.04.03-85 Канализация. Наружные сети и сооружения.

**МИХАИЛ ДМИТРИЕВИЧ ШЛЕЙ**

программист Регионального центра новых информационных технологий, Петрозаводский государственный университет  
*shlei@psu.karelia.ru*

**АЛЕКСЕЙ ЮРЬЕВИЧ БОРИСОВ**

научный сотрудник НИИ историко-теоретических проблем народного зодчества, преподаватель кафедры архитектуры строительных конструкций и геотехники строительного факультета, Петрозаводский государственный университет  
*borisoff@psu.karelia.ru*

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ИНСОЛЯЦИИ ПОСТРОЕК И ЕЕ КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ**

Статья посвящена описанию разработанной модели, предназначенной для расчета продолжительности инсоляции помещений. Данная модель реализована в программной системе, предназначенной для проведения историко-архитектурного анализа объемно-планировочной структуры традиционных сельских поселений Русского Севера. Цель анализа – выявить тенденцию к южной ориентации застройки.

Ключевые слова: математическая модель, траектория Солнца, солнечная карта, инсоляция, продолжительность освещения, планировка поселения

Одной из особенностей традиционных сельских поселений Русского Севера является их «вписанность» в окружающее природное пространство, которая обеспечивается умелым использованием ландшафтных и климатических особенностей территории при формировании застройки для создания в поселении комфортной, по представлениям и требованиям народной культуры, среды проживания. Специфика таких представлений в культурах различных народов нашла отражение в структуре застройки их поселений, что позволило рассматривать особенности планировочной структуры в качестве этнической характеристики [1]. Выявление этих особенностей имеет большое значение в историко-архитектурных исследованиях и является одной из наиболее приоритетных задач. Для ее решения был предложен ряд методик, оперирующих количественными характеристиками и позволяющими проводить объективный анализ различных параметров объемно-планировочной структуры поселений [2], [3], [4]. Одним из направлений подобного рода исследований является выявление и анализ тенденции к южной ориентации застройки традиционных сельских поселений Русского Севера как этноархитектурной характеристики их планировочной структуры. В соответствии с предложенной методикой указанная тенденция может определяться через оценку ориентации жилых домов, обеспечивающей максимальную инсоляцию (солнечное освещение) помещений в лицевой части дома [5]. Для получения достоверных результатов при оценке планировки и застройки необходимо использование большой базы исследования, выполнение

трудоемкого процесса анализа плана поселения и расчета продолжительности инсоляции различных частей каждой жилой постройки, что требует оперативной сравнительной оценки большого количества планов поселений по разнообразным параметрам и показателям. Автоматизация данной работы существенно повышает ее скорость и обеспечивает более точные результаты.

Предметом описания данной статьи являются результаты разработки математической модели, позволяющей проводить расчет продолжительности освещения различных частей традиционного сельского жилища, имеющих как прагматическое, так и символическое значение, – внутреннее пространство избы, ее красный угол, входные стены и главный фасад дома.

Предлагаемая математическая модель построена на основе метода определения продолжительности инсоляции, предложенного Б. А. Дунаевым [4], сущность которого заключается в совмещении так называемой «солнечной карты» и светотени окна для подсчета количества часов, в течение которых солнечный свет сможет проникать в помещение.

Методика анализа объемно-планировочной структуры поселения по признаку инсоляции застройки основана на учете структуры жилища, включая расположение входа в дом, планировочный тип избы и ее оконность [5]. Схемы домов и изб на каждой территории традиционны, и количество их разновидностей ограничено, поэтому только постановкой дома на местности, той или иной направленностью главного фасада относительно сторон горизонта крестьянин мог влиять на параметры его освещения.

Это позволяет определенным образом унифицировать постройки по характеру режима освещенности, рассматривая для оценки освещения дома внутреннее пространство избы как главное, а во многих случаях и единственное жилое помещение дома. Проведенный анализ планировочных схем жилых частей дома и входящих в их состав изб на примере деревень обследованных территорий выявил три основных возможных планировочных типа избы исходя из условий ее освещения – с односторонним, двусторонним и трехсторонним освещением. Время инсоляции помещений зависит от геометрических размеров световых проемов: различное их количество и положение на фасаде здания не влияет на продолжительность освещения внутреннего пространства [6].

Рассматриваемая математическая модель может быть проиллюстрирована на примере избы с односторонним освещением (рис. 1). Внутреннее пространство избы ограничено стенами, на одной из которых расположено окно. Помещение освещается в том случае, если поток солнечного света находится в границах горизонтального инсоляционного угла окна, значение которого определяется геометрическими размерами оконного проема и толщиной стены. Аналогичным образом определяется вертикальный инсоляционный угол окна, величина которого также зависит от высоты окна и толщины стены. Данный угол в предложенной модели не учитывается, поскольку его значение для традиционных жилых построек достигает  $69^\circ$ , а на рассматриваемой территории (Русский Север – от  $55^\circ$  до  $65^\circ$  с. ш.) солнце не поднимается над горизонтом на угол выше  $50^\circ$ .

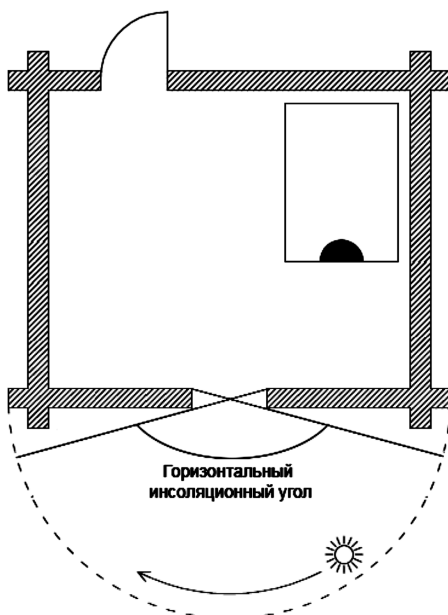


Рис. 1. Изба с односторонним освещением

Основными параметрами, влияющими на продолжительность освещения внутреннего пространства рассматриваемой избы, являются: широта местности, период наблюдения (месяц), азимут дома, определяемый через азимут перпендикуляра к стене главного фасада, и ширина оконного проема.

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Построим модель для определения времени инсоляции рассмотренной выше постройки. Основная задача, решаемая при помощи данной модели, – проведение расчета продолжительности освещения внутреннего пространства постройки на основе следующих входных параметров: широта местности, месяц наблюдения, азимут дома, ширина оконного проема.

##### Шаг 1. Построение солнечной карты

Для исследуемой постройки солнце описывает на небосводе дугу (рис. 2). При наивысшем положении проекция солнца на горизонтальной плоскости будет лежать на прямой, проходящей через точку О и указывающей направление север – юг. Таким образом, проекция траектории движения солнца в горизонтальной плоскости будет симметрична относительно линии север – юг, а указанное положение солнца соответствует астрономическому времени 12 ч. дня. Разбив траекторию на 24 равных сегмента начиная от наивысшей точки, мы сможем определить положение солнца в различное время суток. Точки, разграничивающие данные сегменты, будут указывать на положение солнца в определенные часы.

Угол между горизонтальной плоскостью и плоскостью, в которой лежит траектория движения солнца, рассчитывается по формуле  $\alpha = 90^\circ - \varphi$ , где  $\varphi$  – широта местности.

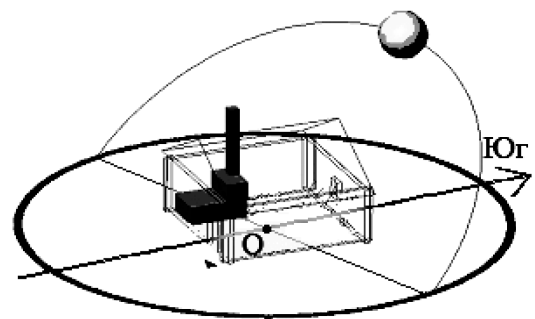


Рис. 2. Траектория движения солнца по небосводу

Для месяцев весеннего и осеннего равноденствия плоскость, содержащая траекторию солнца, будет проходить через точку О (рис. 2). Для других месяцев будет происходить смещение траектории на следующий угол [7] (рис. 3):

$$\delta = 23,5 * \cos\left(\pi * \left(1 - \frac{m}{6}\right)\right),$$

где  $m$  – месяц наблюдения.



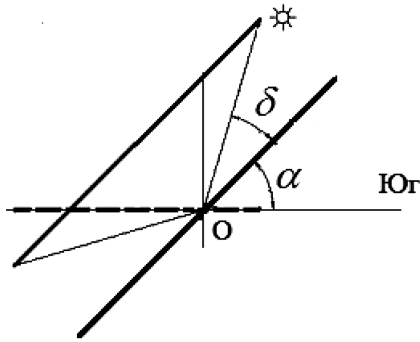


Рис. 3. Смещение траектории солнца

Таким образом, для определенной широты местности и времени наблюдения можно построить проекцию траектории движения солнца на горизонтальную плоскость. Результат построения данной проекции для широты местности 60° и месяца апреля представлен на рис. 4 в виде эллипса. Точками на эллипсе указано положение солнца в определенные часы суток. Обозначим данные точки как  $H_i$ , при этом номера точек будут соответствовать часам. Их координаты можно рассчитать при построении проекции траектории. Точки, в которых траектория солнца пересекает горизонтальную плоскость (точки восхода и заката солнца), обозначены как В и З. Данный график, описывающий движение солнца, называется солнечной картой. С ее помощью можно определить местоположение проекции солнца на горизонтальную плоскость для произвольного времени суток, и наоборот.

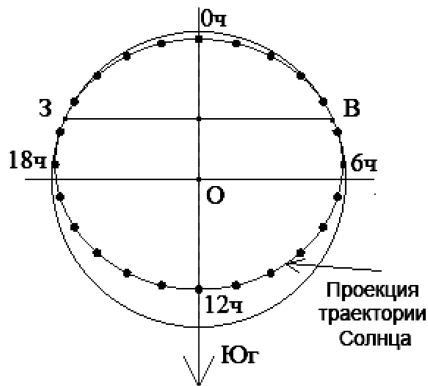


Рис. 4. Солнечная карта для северной широты 60° и месяца апреля

**Шаг 2. Построение светотени окна и совмещение ее с солнечной картой**

Зная толщину стен и ширину оконного проема, можно рассчитать горизонтальный инсоляционный угол окна.

Согласно методике Дунаева, данный угол необходимо совместить с построенной солнечной картой. Для этого надо поставить центр окна исследуемой постройки в центр солнечной карты так, чтобы центр инсоляционного угла был направлен на север. Далее необходимо повернуть

инсоляционный угол по часовой стрелке на значение азимута стены, на которой находится окно. На рис. 5 приведен пример данного совмещения для широты местности 60°, месяца апреля и постройки с азимутом направления окна 30°. Лучи ОЛ и ОП являются левой и правой границей светотени соответственно.

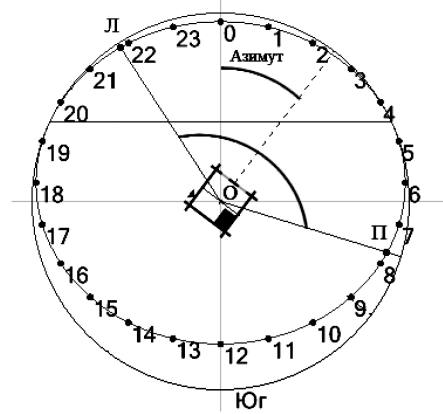


Рис. 5. Солнечная карта, совмещенная со светотенью окна, для широты местности 60° и месяца апреля

Зная угол луча ОЛ, можно найти точку пересечения границы светотени с проекцией траектории движения солнца – точку Л, аналогичным образом можно найти точку П.

**Шаг 3. Определение времени нахождения солнца в заданном положении**

Как уже было сказано выше, можно определить координаты точек, в которых солнце находится в определенные часы (точки  $H_i$  на проекции траектории). Исходя из этого можно определить время нахождения солнца в любой точке П траектории, зная ее координаты. Для этого необходимо выполнить следующий алгоритм.

1. Найти для точки П ближайшую точку из массива  $H_i$ . Обозначим номер данной точки К.
2. Найти для точки П точку из массива  $H_i$ , расстояние до которой будет больше, чем до точки К, но меньше, чем расстояние до других точек. Обозначим номер данной точки М. Таким образом, мы найдем две точки под номерами К и М, между которыми будет находиться точка П. Числа К и М обозначают целые часы суток, ограничивающие временной отрезок, на котором солнце находится в точке П.
3. Меньшее число из К и М будет указывать час, в который проекция солнца будет находиться в точке П.
4. Если  $K < M$ , то время, в которое солнце будет находиться в точке П, определяется следующим образом:  $Время = K + \frac{Расстояние(К, П)}{Расстояние(К, М)}$ .

Иначе:  $Время = M + \frac{Расстояние(М, П)}{Расстояние(К, М)}$ .

#### Шаг 4. Определение продолжительности инсоляции для угла

При построении проекции траектории можно определить координаты точек восхода и заката солнца – точки В и З. При построении светотени окна определяются точки пересечения границ светотени с проекцией траектории – точки Л и П. Для расчета продолжительности нахождения солнца в горизонтальном инсоляционном угле ЛОП (рис. 6) предназначен следующий алгоритм.

1. С помощью алгоритма, указанного в шаге 3, определим время нахождения солнца в точках восхода, заката и границ светотени (точки В, З, Л и П). Обозначим данные значения времени как  $t_B$ ,  $t_Z$ ,  $t_L$  и  $t_P$  соответственно.
2. Далее продолжительность инсоляции вычисляется по схеме, представленной на рис. 6. Результат подсчета обозначается  $t_O$ .

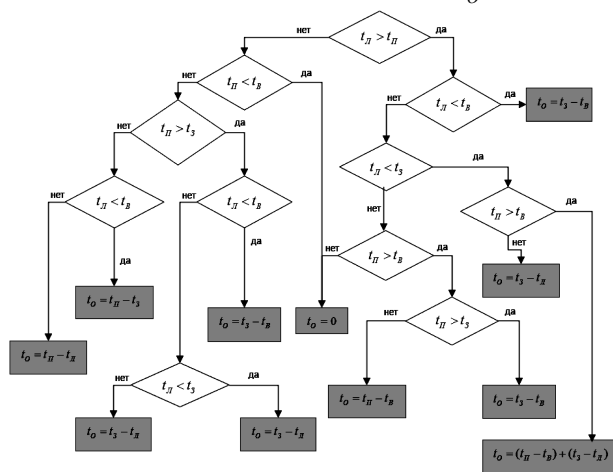


Рис. 6. Алгоритм подсчета продолжительности инсоляции

В результате на основе входных данных (ширина окна, толщина стен, месяц наблюдения, широта местности и азимут стены, на котором находится окно) произвели расчет продолжительности освещения внутреннего пространства избы.

Данную модель можно использовать для подсчета продолжительности инсоляции других типов постройки и их различных частей. Для этого необходимо определить соответствующие инсоляционные углы и при помощи модели подсчитать продолжительность освещения.

Предложенная в данной статье модель реализована в виде программной системы [8]. Данная программная реализация обеспечивает оперативность и точность проведения необходимых расчетов для определения продолжительности инсоляции исследуемых объектов и их частей, что позволяет использовать разработку для их историко-архитектурного анализа. На рис. 7 приведен пример работы программы по подсчету продолжительности инсоляции главного фасада, входной стены и красного угла для дома с трехсторонним расположением окон.

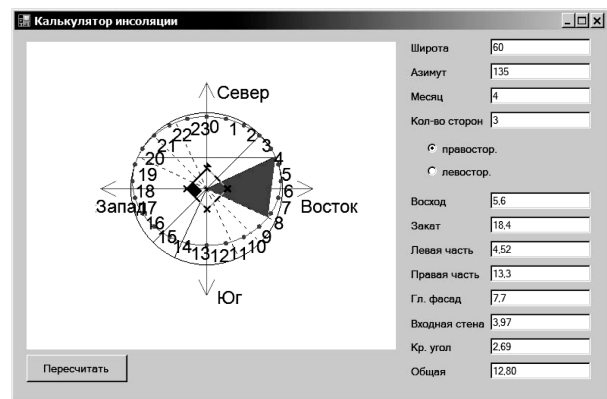


Рис. 7. Пример реализации предложенной модели в программной системе

Разработанная модель и ее реализация в программном модуле являются первым шагом создания системы автоматизированного анализа планировочной структуры традиционных сельских поселений на территории Русского Севера.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов А. Ю. Планировочные формы традиционных сельских поселений: опыт исследования этнических особенностей // Межкультурные взаимодействия в полиэтническом пространстве пограничного региона: Материалы междунар. науч. конф. Петрозаводск, 10–12 октября 2005 г. Петрозаводск, 2005. С. 249–254.
2. Воронцовка И. Ю., Реут О. Ч. Опыт анализа ветрового режима сельских поселений // Народное зодчество: Межвуз. сб. Петрозаводск, 1998. С. 195–201.
3. Гуляев В. Ф. Объемно-пространственная структура сельских поселений середины XIX – начала XX вв. и методика ее количественной оценки (на примере Русского Севера): Дис. ... канд. архитектуры. Петрозаводск, 1990.
4. Дунаев Б. А. Инсоляция жилых зданий. М.: Стройиздат, 1962. 79 с.
5. Орфинский В. П. Вековой спор. Типы планировки как этнический признак (на примере поселений Русского Севера) // Советская этнография. 1989. № 2. С. 55–62.
6. Хейфец А. Л. 3D-моделирование и расчет продолжительности инсоляции средствами пакета AutoCad [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.graphicon.ru/2004/Proceedings/Technical\\_ru/s2\[6\].pdf](http://www.graphicon.ru/2004/Proceedings/Technical_ru/s2[6].pdf)
7. Хрол Т. М. Определение количественных характеристик регулярности планировки и застройки сельских поселений (по материалам экспедиции Петрозаводского государственного университета 1982 г. по восточной части Ленинградской области) // Проблемы исследования, реставрации и использования архитектурного наследия Карелии и сопредельных областей: Межвуз. сб. Петрозаводск, 1985. С. 18–22.
8. Шлей М. Д., Борисов А. Ю. Информационная система комплексного историко-архитектурного анализа объемно-планировочной структуры традиционных сельских поселений Русского Севера // Университеты в образовательном пространстве региона: опыт, традиции и инновации. Ч. II. Петрозаводск, 2010. С. 312–316.

ВАДИМ ВАЛЬТЕРОВИЧ ПОЙКОЛАЙНЕН

аспирант кафедры информатики и математического обеспечения математического факультета, Петрозаводский государственный университет  
poikolainen@cs.karelia.ru

ГЕННАДИЙ СЕРГЕЕВИЧ СИГОВЦЕВ

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информатики и математического обеспечения математического факультета, Петрозаводский государственный университет  
sigovtsev@cs.karelia.ruДЕТАЛИЗИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ  
СТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОПУЛЯЦИИ

Предложены детализированная возрастная модель и строящаяся на ее основе стадийная модель популяции, а также численный алгоритм анализа их устойчивости. Показано их применение для задачи оборота стада сельскохозяйственных животных.

Ключевые слова: матричная модель структурированной популяции, проекционная матрица, задача оборота стада

## ВВЕДЕНИЕ

В агропромышленном секторе экономики одной из важных задач является планирование оборота стада сельскохозяйственных животных [10], [11]. Оборотом стада называется происходящая во времени совокупность процессов, включающая переход животных из одной стадии (категории) в другую, удаление животных разных стадий из стада и появление потомства.

В качестве основы для построения модели стада может быть использовано понятие структурированной популяции. В математической биологии под этим понимают множество проживающих в одной локации организмов одного вида, дискретно разбитых на некоторые классы по какому-либо признаку. Группы могут определяться полом, начальным и конечным возрастом и другими существенными для целей моделирования признаками. Поэтому в описании структурированных популяций используют понятие последовательных стадий жизни организма.

Состояние популяции, разделенной на некоторое число стадий, рассматривается в равноотстоящие дискретные моменты времени и описывается вектором-столбцом  $X(t) = (x_{t,1}, x_{t,2}, \dots, x_{t,n})^T$ , где  $x_{t,i}$  – численность организмов, отнесенных к стадий  $i$ ,  $n$  – количество стадий. Динамика популяции задается соотношением

$$X(t+1) = L_t \cdot X(t), \quad t = 0, 1, \dots, \quad (1)$$

определяющим состояние популяции в момент  $t+1$  по состоянию в момент  $t$  посредством матрицы  $L_t$ , которую называют проекционной. В общем случае элементы проекционной матрицы могут зависеть от времени.

РАЗВИТИЕ МОДЕЛЕЙ СТРУКТУРИРОВАННЫХ  
ПОПУЛЯЦИЙ

Простейшим вариантом модели (1) является модель Лесли [8], в которой стадиями являются

возрастные группы, а проекционная матрица имеет вид:

$$L = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & \dots & b_{n-1} & b_n \\ s_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & s_2 & \dots & 0 & 0 \\ & & \ddots & & \\ 0 & 0 & \dots & s_{n-1} & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$0 \leq b_i$  – коэффициент рождаемости для стадии  $i$ ,  $0 < s_i \leq 1$  – коэффициент дожития (перехода из стадии  $i$  в стадию  $i+1$ ).

Если для квадратной матрицы  $A$  порядка  $n$  и ориентированного графа  $G$  с  $n$  вершинами, пронумерованными числами от 1 до  $n$ , существует взаимно однозначное соответствие между ненулевыми элементами  $a_{i,j}$  и дугами  $(i, j)$ , то такой граф называется ассоциированным с матрицей и обозначается  $G(A)$ . Граф, ассоциированный с проекционной матрицей структурированной популяции, называют графом жизненного цикла (ГЖЦ) организмов данной популяции.

Для модели Лесли ГЖЦ изображен на рис. 1.

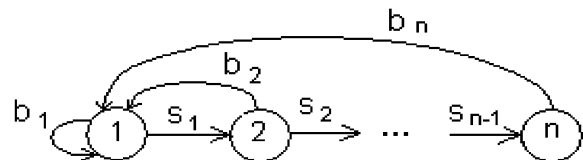


Рис. 1. ГЖЦ модели Лесли

В модели Лесли на каждом шаге происходит полное обновление состава каждой возрастной группы, что является достаточно жестким ограничением для практического использования этой модели. Более общей является модель Лефковича [8], в которой часть особей каждой стадии остается в той же стадии при переходе

к следующему моменту времени. Проекционная матрица модели Лефковича имеет вид:

$$L = \begin{bmatrix} b_1 + r_1 & b_2 & \dots & b_{n-1} & b_n \\ s_1 & r_2 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & s_2 & \dots & 0 & 0 \\ & & \ddots & & \\ 0 & 0 & \dots & s_{n-1} & r_n \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $r_i$  – коэффициент задержки,  $0 < s_i + r_i \leq 1$ .

ГЖЦ для модели Лефковича изображен на рис. 2.

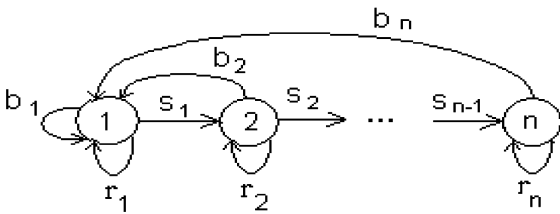


Рис. 2. ГЖЦ модели Лефковича

ГЖЦ на рис. 1 и 2 показаны для случая, когда все параметры проекционных матриц  $b_i, r_i > 0$ . Если какой-то из этих параметров равен нулю, то соответствующая дуга ГЖЦ отсутствует.

С математической точки зрения модели Лесли и Лефковича достаточно хорошо изучены [6], [8]. Основные их свойства связаны с теоремой Перрона – Фробениуса для матриц с неотрицательными элементами [2; 130]. В соответствии с этой теоремой спектральный радиус неотрицательной неразложимой матрицы равен максимальному положительному собственному числу. Это число имеет кратность 1, ему соответствует положительный собственный вектор, и оно возрастает при увеличении любого элемента матрицы.

Неразложимость матрицы эквивалентна тому, что ассоциированный с ней орграф сильно связан (для любой пары вершин существует ориентированный путь из одной вершины в другую). В частности, проекционные матрицы моделей Лесли и Лефковича неразложимы, если  $b_n > 0$  (последняя стадия популяции является репродуктивной).

Таким образом, спектральный радиус проекционной матрицы  $\rho(L) = \lambda_{\max}$  – положительное собственное число матрицы  $L$  кратности 1.

Асимптотика вектора  $X(t)$ , определяемого соотношением (1), при  $t \rightarrow \infty$  зависит от величины спектрального радиуса  $\rho(L)$  следующим образом:

$$\begin{aligned} \rho(L) > 1 \quad x_{i,t} &\rightarrow \infty, \\ \rho(L) < 1 \quad x_{i,t} &\rightarrow 0, \\ \rho(L) = 1 \quad x_{i,t} &\rightarrow x_i^*, \end{aligned} \quad (4)$$

для каждой стадии  $i = 1, \dots, n$ .

Последний случай означает устойчивость популяции: ее численность в каждой стадии стре-

мится к конечному пределу, не зависящему от начальной численности популяции. При этом из уравнений (1) для матрицы  $L$  вида (3) следует, что предельные численности стадий в модели Лефковича связаны следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} x_{i+1}^* &= \frac{s_i}{1-r_{i+1}} \cdot x_i^*, \quad i = 1, \dots, n-1, \\ x_1^* &= \frac{1}{1-b_1-r} \cdot \sum_{i=2}^n b_i x_i^*. \end{aligned} \quad (5)$$

Следствием соотношений (5) является условие:

$$b_1 + r_1 + \sum_{i=2}^n b_i \cdot q_i = 1, \quad \text{где } q_i = \prod_{j=1}^{i-1} \frac{s_j}{1-r_{j+1}}. \quad (6)$$

Так как вектор предельных численностей  $X^*$  является собственным вектором проекционной матрицы, соответствующим собственному числу  $\lambda_{\max} = 1$ , то условие (6) – это условие стабильности популяции. Условие (6) соответствует приведенному в [3] результату об индикаторе потенциального роста популяции в модели Лефковича.

Собственный вектор  $X^*$  при условии, что  $\sum_{i=1}^n x_i^* = 1$ , называется относительной стадийной структурой популяции [6].

Из соотношений (5) следует, что вектор относительной структуры популяции в модели Лефковича имеет вид:

$$\left( \frac{1}{1 + \sum_{i=2}^n q_i}, \frac{q_2}{1 + \sum_{i=2}^n q_i}, \dots, \frac{q_n}{1 + \sum_{i=2}^n q_i} \right)^T.$$

Условие  $b_n > 0$  не является принципиальным ограничением для применения описанных выше моделей [8; 58]. Наличие в модели популяции пострепродуктивных стадий не влияет на динамику стадий популяции с номерами от 1 до  $n$  (последняя репродуктивная стадия), которая по-прежнему определяется матрицей (3). Численность пострепродуктивных стадий определяется соотношением:

$$x_{n+i,t+1} = s_{n+i-1} \cdot x_{n+i-1,t} + r_{n+i} \cdot x_{n+i,t}, \quad i = 1, \dots, m, \quad (7)$$

где  $m$  – количество таких стадий.

ГЖЦ модели с пострепродуктивными стадиями показано на рис. 3.

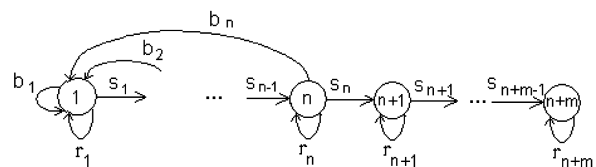


Рис. 3. ГЖЦ модели с пострепродуктивными стадиями

Данный граф не является сильно связным (отсутствуют пути из вершин  $n + 1, \dots, n + m$  в вершины  $1, \dots, n$ ); соответственно, проекционная матрица  $\bar{L}$  такой модели разложима. Она имеет вид:

$$\bar{L} = \begin{bmatrix} L & 0 \\ S & M \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где  $L$  – матрица (3),  $M$  –  $m \times n$  – матрица переходов для пострепродуктивных стадий

$$M = \begin{bmatrix} r_{n+1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ s_{n+1} & r_{n+2} & \dots & 0 & 0 \\ & & \ddots & & \\ & & & s_{n+m-1} & r_{n+m} \end{bmatrix}, \quad S - m \times n -$$

матрица с единственным ненулевым элементом  $s_n$  в правом верхнем углу, связывающим стадии  $n$  и  $n + 1$ .

Вектор состояния популяции  $X(t) = (x_{t,1}, x_{t,2}, \dots, x_{t,n})^T$  может быть разбит на два вектора  $X^I(t) = (x_{t,1}, x_{t,2}, \dots, x_{t,n})^T$  и  $X^{II}(t) = (x_{t,n+1}, x_{t,n+2}, \dots, x_{t,n+m})^T$ . Изменение численности популяции описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} X^I(t+1) = L \cdot X^I(t) \\ X^{II}(t+1) = S \cdot X^I(t) + M \cdot X^{II}(t) \end{cases} \quad (9)$$

Асимптотика вектора  $X^I(t)$ , определяемого соотношением (9), при  $t \rightarrow \infty$  по-прежнему зависит от величины спектрального радиуса  $\rho(L)$  так, как это указано в (4).

Характер асимптотики вектора  $X^{II}(t)$  однозначно определяется поведением вектора  $X^I(t)$  при  $t \rightarrow \infty$ . Если  $\lim_{t \rightarrow \infty} x_{t,i} = x_i^*, i = 1, \dots, n$ , то по индукции доказывается, что существуют пределы  $x_{t,n+i}$  для  $i = 1, \dots, m$  при  $t \rightarrow \infty$ .

Из (7) также следует, что если  $\lim_{t \rightarrow \infty} x_{t,i} = \infty, i = 1, \dots, n$ , то  $\lim_{t \rightarrow \infty} x_{t,n+i} = \infty$  для всех  $j = 1, \dots, m$ .

Вектор относительной структуры популяции имеет такой же вид, как и выше (с распространением суммирования по  $i$  от 2 до  $n + m$ ).

В работах Д. О. Логофета и других [5], [6], [7] рассмотрены некоторые обобщения моделей Лесли и Лефковича, связанные с необходимостью в некоторых случаях классифицировать особей популяции по нескольким признакам. Например, в [14] модель популяции северных оленей учитывает их возраст и статус («сильный», «средний», «слабый»).

Такого типа модель может быть записана в форме матричного уравнения (1), если матрицу двойной структуры популяции (строкам матрицы соответствует возраст, а столбцам – статус особи) представить в виде вектора, образованного конкатенацией строк [5]. Проекционная матрица такой модели, называемая обобщенной матрицей Лефковича или матрицей Логофета [4], в общем случае имеет вид:

$$L = \begin{bmatrix} b_1 + r_1 & b_2 & \dots & b_{n-1} & b_n \\ s_{21} & r_2 & \dots & 0 & 0 \\ s_{31} & s_{32} & \dots & 0 & 0 \\ & & \ddots & & \\ s_{n1} & s_{n2} & \dots & s_{nn-1} & r_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

при условии, что  $0 < r_j + \sum_{i=j+1}^n s_{ij} \leq 1$  для всех  $j = 1, \dots, n - 1$ .

Для матрицы (10) также существует выражаемый через элементы матрицы индикатор потенциального роста [6], обобщающий условие существования стабильной популяции (6).

В ряде работ указывается, что матричные модели не всегда удается должным образом применить для решения некоторых практических задач ввиду недостаточно явно представленной динамики популяции [3]. Например, в работах [13], [15] предлагается детализировать матричный подход к расчету динамики структурированной популяции, разложив его на «скрытые» субпроцессы. Из состояния популяции  $X_t$  в момент  $t$  рассчитывается численность выживших за шаг времени  $X_s(t)$ , затем взросление  $X_A(t)$  и получение потомства  $X_B(t)$ , таким образом получается численность популяции в момент  $t + 1$ :  $X(t) \rightarrow X_s(t) \rightarrow X_A(t) \rightarrow X_B(t) \equiv X(t + 1)$ . Такая детализация динамики в некоторой степени упрощает определение модельных параметров.

Дискретные модели широко применяются для описания эксплуатируемых популяций, когда производится регулируемое изъятие некоторой части особей, принадлежащих определенным стадиям, а также для постановки и решения оптимизационных задач [9], [11].

#### ДЕТАЛИЗИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ СТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОПУЛЯЦИИ

Популяции типа стада сельскохозяйственных животных относят к эксплуатируемым популяциям, хотя для них характерны не только процессы изъятия части особей, но и добавление извне новых особей, а также другие целенаправленные воздействия управляющего субъекта, влияющие на состав и численность популяции. В этом случае более адекватным будет термин «управляемая популяция».

Использование дискретной модели динамики управляемой популяции для задачи планирования оборота стада сельскохозяйственных животных и рассмотрения на этой основе оптимизационных задач планирования работы агрохозяйственного предприятия требует более детального анализа динамики численности. В задачах планирования, как правило, расчеты производятся на определенный временной промежуток, разделяемый на несколько равных периодов длиной  $T$ .

Особи стада могут находиться в одной из  $n$  стадий, принадлежность к которым определяется возрастом особи  $\tau_k$ , измеряемым в некоторых единицах дискретного модельного времени  $t = 0, 1 \dots, m$ . Каждой стадии  $i$  соответствует свой возрастной промежуток  $[\tau_{i-1}, \tau_{i-2}]$ ; промежутки разных стадий не пересекаются. Задан предельный возраст  $\tau_m = m$ , при достижении которого все особи из популяции изымаются.

Будем считать величину периода  $T$  равной некоторому количеству единиц модельного времени. Обозначим через  $T_i = \tau_{i-2} - \tau_{i-1}$  продолжительность стадии  $i$ . В задачах планирования оборота стада обычно  $T > \min T_i$  [10], [11], поэтому за один период особь может пройти несколько стадий. Такая же возможность существует и для особи, родившейся в течение этого периода.

Основа детализации модели – в рассмотрении изменений численности различных стадий популяции за единицу модельного времени за счет изменения возраста особей с учетом изъятия части особей и появления особей-потомков.

Пусть заданы функция  $h(\tau, t)$  – доля изымаемых в момент времени  $t$  особей возраста  $\tau$  в общей численности особей этого возраста, и функция  $g(\tau, t)$  – коэффициент репродуктивности особей возраста  $\tau$  на момент времени  $t$ . Если обозначить  $Y(t) = (y_{t,1}, y_{t,2}, \dots, y_{t,m})^T$  вектор, компонентами которого являются численности особей каждого возраста в момент времени  $t$ , то для него будет справедливо соотношение вида (1)  $Y(t+1) = \Lambda_t \cdot Y(t)$ , где  $\Lambda_t$  имеет вид матрицы Лесли:

$$\Lambda_t = \begin{bmatrix} 0 & \dots & \beta_q^t & \dots & \beta_m^t \\ \sigma_1^t & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ & & \ddots & & \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_{m-1}^t & 0 \end{bmatrix},$$

$\beta_k^t = g(\tau_k, t)$ ,  $\sigma_k^t = 1 - h(\tau_k, t)$ ,  $q$  – номер начального возраста первой репродуктивной популяции.

Для вектора  $X(t) = (x_{t,1}, x_{t,2}, \dots, x_{t,n})^T$  численностей стадий популяции соотношение (1) будет иметь место с проекционной матрицей  $L_t$ , имеющей вид матрицы Лефковича

$$L_t = \begin{bmatrix} r_1^t & \dots & b_p^t & \dots & b_n^t \\ s_1^t & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & r_p^t & \dots & 0 \\ & & \ddots & & \\ 0 & 0 & \dots & s_{n-1}^t & r_n^t \end{bmatrix}.$$

Элементы матрицы  $L_t$  определяются через элементы матрицы  $\Lambda_t$ ,  $p$  – номер первой репродуктивной популяции.

Обозначим через  $f_k^t = \frac{y_{t,k}}{\sum_{j=1}^m y_{t,j}}$  долю особей популяции

возраста  $\tau_k$  во всей численности популяции,

$\hat{f}_k^t = \frac{f_k^t}{\sum_{j \in K_i} f_j^t}$  – долю особей популяции

возраста  $\tau_k$ , принадлежащего  $i$ -й стадии в численности этой стадии популяции ( $K_i$  – множество индексов, принадлежащих диапазону возрастов особей стадии  $i$ ). Тогда для элементов матрицы  $L_t$  получаем:

$$s_i^t = \sigma_{i-2}^t \cdot \hat{f}_{i-2}^t, \quad b_i^t = \sum_{j \in K_i} \beta_j^t \cdot \hat{f}_j^t, \quad r_i^t = \sum_{j \in K_i \setminus \{i-2\}} \sigma_j^t \cdot \hat{f}_j^t.$$

Структурированная численность популяции через плановый период времени  $T$  будет определяться для возрастной модели соотношением:

$$Y(T) = \Lambda^{(T)} \cdot Y(0), \tag{11}$$

$\Lambda^{(T)} = \Lambda_1 \cdot \Lambda_2 \cdot \dots \cdot \Lambda_l$ , где  $l$  – количество единиц модельного времени в периоде.

В том частном случае, когда проекционные матрицы детализированной модели не зависят от времени ( $\Lambda_t = \Lambda$ ), имеем  $\Lambda^{(l)} = \Lambda^l$  и для спектрального радиуса  $\rho(\Lambda^{(l)}) = [\rho(\Lambda)]^l$ . В этом случае каждый из вариантов условий (4) для матриц детализированной и недетализированной моделей выполняется одновременно, и для выяснения устойчивости популяции достаточно проверки условия (6), которое для матрицы  $\Lambda$  имеет вид:

$$\sum_{i=q}^m \beta_i \cdot \left( \prod_{j=1}^{i-1} \sigma_j \right) = 1.$$

При моделировании популяции типа стада крупного рогатого скота более реалистичны нестационарные модели, когда зависимость параметров детализированной возрастной (а следовательно, и стадийной) модели от времени носит сезонно-циклический характер. Но если  $l$ кратно длине цикла изменения параметров, то матрица  $\Lambda^{(l)}$  от времени не зависит. При этом возможно выполнение условия устойчивости популяции  $\rho(\Lambda^{(l)}) = 1$  в ситуации, когда спектральные радиусы  $\Lambda_t$  в разные моменты модельного времени принимают значения как больше, так и меньше единицы.

Структура проекционной матрицы планового периода  $T$   $\Lambda^{(T)}$  при  $T < q$  показана на рис. 4.

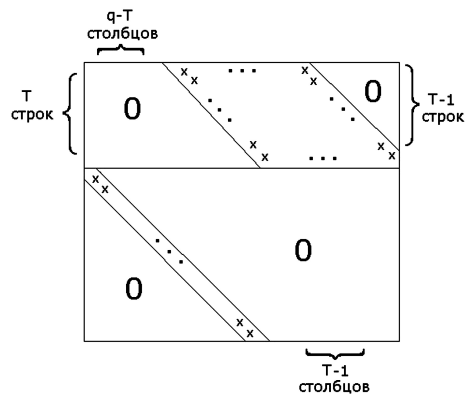


Рис. 4. Структура матрицы  $\Lambda^{(T)}$

Элементы, отмеченные значком  $x$ , выражаются через значения величин  $\beta, \sigma$  матриц-сомножителей; остальные элементы равны нулю.

Элементы поддиагонали с номером  $T$  имеют вид:

$$a_{i,j} = \prod_{r=j}^{j+T-1} \sigma_k^{k-j+1}, j=1, \dots, m-T, i=T+j, \quad (12)$$

а элементы параллелограмма в верхней части матрицы имеют вид:

$$a_{i,j} = \beta^{T-i+1} \left( \prod_{k=1}^{T-i} \sigma_k^k \right) \left( \prod_{k=1}^{i-1} \sigma_k^{k-i+T+1} \right),$$

$$i=1, \dots, T, j=q-T+i, \dots, m-T+i. \quad (13)$$

Если в (13) в одном из произведений верхняя граница индекса равна нулю, то произведение считается равным единице.

Для стадийной модели проекционная матрица планового периода  $L^{(T)}$  может быть получена путем агрегации элементов матрицы  $\Lambda^{(T)}$ , относящихся к одной стадии. Для этого на матрицу  $\Lambda^{(T)}$  накладывается прямоугольная сетка с ячейками  $K_{i,j}, i, j=1, \dots, n. K_{i,j}$  принадлежат элементы матрицы  $\Lambda^{(T)}$   $a_{u,v}$ , где  $u \in K_i$ . Ячейке  $K_{i,j}$  соответствует элемент  $d_{i,j}$  матрицы  $L^{(T)}$ .

Так как  $x_{T,i} = \sum_{l \in K_i} y_{T,l}$ , из (11) получаем:

$$x_{T,i} = \sum_{l \in K_i} \left( \sum_{u=1}^m a_{l,u} y_{0,u} \right) = \sum_{u=1}^m \left( \sum_{l \in K_i} a_{l,u} \right) y_{0,u} =$$

$$= \sum_{j=1}^n \left( \sum_{u \in K_j} \left( \sum_{l \in K_i} a_{l,u} \right) y_{0,u} \right).$$

Соотношение  $X(T) = L^{(T)}$  выполняется, если

$$\sum_{j=1}^n d_{i,j} x_{0,j} = \sum_{j=1}^n \left( \sum_{u \in K_j} \alpha_{i,u} y_{0,u} \right), \text{ где } \alpha_{i,u} = \sum_{l \in K_i} a_{l,u}.$$

Отсюда получаем: 
$$d_{i,j} = \frac{\sum_{u \in K_j} \alpha_{i,u} y_{0,u}}{\sum_{u \in K_j} y_{0,u}}.$$

Разделив числитель и знаменатель на начальную численность популяции, получаем формулу для вычисления элементов матрицы  $L^{(T)}$ :

$$d_{i,j} = \sum_{u \in K_j} \alpha_{i,u} \hat{f}_u. \quad (14)$$

В общем случае получение явных выражений для элементов матриц  $\Lambda^{(T)}$  и  $L^{(T)}$ , необходимых для проверки условий типа (6) или вычисления индикатора потенциального роста [6], весьма трудоемко. Эти проверки можно заменить вычислительной процедурой, результаты которой могут быть использованы как «эмпирический» индикатор потенциального роста. Процедура

основана на идее степенного метода нахождения наибольшего по модулю собственного числа матрицы [12].

Если квадратная матрица  $A$  порядка  $n$  – матрица простой структуры (то есть имеет  $n$  линейно независимых собственных векторов) и  $z_k = A^k \cdot z_0, k=1, 2, \dots$ , то для всех значений индекса  $i=1, \dots, n$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{(z_{k+1})_i}{(z_k)_i} = \lambda, \quad (15)$$

где  $\lambda$  – наибольшее по модулю простое собственное число матрицы  $A$ . (15) имеет место для произвольного вектора  $z_0$ , имеющего ненулевой коэффициент  $C$  при соответствующем  $\lambda$  собственном векторе  $x$  в разложении по базису из собственных векторов. При этом

$$z_k \rightarrow \lambda^k Cx \text{ при } k \rightarrow \infty. \quad (16)$$

В [1; 242] показано, что равенство (15) остается в силе и для матрицы, не обладающей простой структурой, при условии, что  $\lambda$  – единственное максимальное по модулю собственное значение единичной кратности. (Матрица, имеющая единственное собственное число с максимальным модулем, называется примитивной.)

Для проекционных матриц рассматриваемых моделей справедлива теорема Перрона – Фробениуса, по которой кратность максимального по модулю собственного числа равна единице. Как показано в [8; 64], матрицы  $\Lambda_i$  и  $L_i$  будут примитивными, если какие-то два соседних элемента их первых строк отличны от нуля. Для матрицы  $L_i$ , кроме того, для примитивности достаточно отличия от нуля хотя бы одного элемента  $r_i$  [2; 132]. Примитивность матриц  $\Lambda^{(T)}$  и  $L^{(T)}$  следует из того, что они являются произведениями примитивных матриц.

Таким образом, для получаемых с помощью проекционных матриц итерационных последовательностей векторов будут справедливы соотношения (15) и (16). Обозначим  $\frac{(z_{k+1})_i}{(z_k)_i}$  через  $w_i^k$ .

В соответствии с (15), если  $\lambda > 1$ , то для любой координаты  $i$  начиная с некоторой итерации  $w_i^k > 1$ , и наоборот, неравенство  $w_i^k > 1$  свидетельствует, что  $\lambda > 1$ . Аналогично, если начиная с некоторой итерации  $w_i^k < 1$ , то  $\lambda < 1$ . При этом из (16) следует, что  $|(z_k)_i| \rightarrow \infty$  или  $|(z_k)_i| \rightarrow 0$  соответственно.

Пусть теперь  $\lambda = 1$ . В этом случае  $w_i^k \rightarrow 1$  при  $k \rightarrow \infty$ . Характер стремления  $w_i^k$  к 1 может быть как монотонным, так и немонотонным.

О степени близости отношения  $w_i^k$  к величине  $\lambda$  на практике можно судить по совпадению (с некоторой точностью) значений этого отношения для разных значений индекса  $i$  [12; 331].

Таким образом, величина отношения  $w_i^k$ , полученная после некоторого количества итераций, может играть роль численного индикатора потенциального роста. Необходимое количество итераций определяется в каждом конкретном случае потребностью различить, какой именно из трех возможных вариантов для величины  $\lambda$  (больше, меньше, равно 1) имеет место.

В качестве примера рассмотрим упрощенный вариант детализированной модели, соответствующей модели оборота стада крупного рогатого скота, предложенной А. А. Трофимовым [11].

Исходные данные: предельный возраст особей  $m = 12$ , функции  $h, g$  зависят только от возраста особей и имеют вид:  $h(\tau) = \{0,2, 0,05, 0,05, 0,05, 0,03, 0,03, 0,03, 0,03, 0,04, 0,04, 1\}$ ,  $g(\tau) = \{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,3, 0,4, 0,6, 0,4, 0,2\}$ . Количество стадий  $n = 3$ , возрастные диапазоны стадий:  $K_1 = \{1, 2, 3\}$ ,  $K_2 = \{4, 5, 6, 7\}$ ,  $K_3 = \{8, 9, 10, 11, 12\}$ . Возрастная структура популяции  $f(\tau) = \{0,15, 0,12, 0,1, 0,08, 0,08, 0,06, 0,1, 0,08, 0,05, 0,05, 0,05\}$ ,  $T = 6$ .

В рассматриваемом примере матрица  $\Lambda$ , детализированной модели не зависит от времени,  $\Lambda^{(T)} = \Lambda^6$ . Вид этих матриц не приводится ввиду их громоздкости. Элементы проекционных матриц стадийной модели вычисляются по форму-

лам (11), (14), и эти матрицы имеют вид соответственно:

$$L = \begin{bmatrix} 0,63 & 0 & 0,37 \\ 0,26 & 0,78 & 0 \\ 0 & 0,19 & 0,82 \end{bmatrix}, L^{(T)} = \begin{bmatrix} 0,07 & 0,86 & 0,15 \\ 0,26 & 0,15 & 0,69 \\ 0,47 & 0,64 & 0 \end{bmatrix}.$$

Максимальные по модулю собственные числа:  $\lambda(\Lambda) = 1,010$ ,  $\lambda(\Lambda^{(T)}) = 1,064$ ,  $\lambda(L) = 1,014$ ,  $\lambda(L^{(T)}) = 1,097$ . Применение степенного метода дает следующие результаты: первые три значащие цифры отношения  $\frac{(z_{p+1})_i}{(z_p)_i}$  и максимального

по модулю собственного числа совпадают для  $\Lambda^{(T)}$  начиная с пятнадцатой итерации, а для  $L^{(T)}$  – начиная со второй. (Начальные вектора  $z_0$  имели единичные компоненты.)

Предложенные в данной статье матричные модели структурированных популяций применительно к задаче оборота стада сельскохозяйственных животных позволяют анализировать последствия управляющих воздействий на популяцию. Воздействия в виде изъятия части особей учитываются через изменение функции изъятия  $h(\tau, t)$ , а добавление особей в стадо учитывается через изменение функции  $f(\tau, k)$ , описывающей возрастную структуру популяции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березин И. С., Жидков Н. П. Методы вычислений. Т. 2. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1960. 620 с.
2. Воеводин В. В., Кузнецов Ю. А. Матрицы и вычисления. М.: Наука, 1984. 320 с.
3. Динамическая теория биологических популяций / Под ред. Р. А. Полуэктова. М.: Наука, 1974. 455 с.
4. Ключкова И. Н. Обобщение теоремы о репродуктивном потенциале для матриц Логофета // Вестник Московского университета. Сер. 1. Математика, механика. 2004. № 3. С. 45–48.
5. Логофет Д. О. Три источника и три составные части формализма популяции с дискретной стадийной и возрастной структурами // Математическое моделирование. 2002. Т. 14. № 12. С. 11–22.
6. Логофет Д. О., Белова И. Н. Неотрицательные матрицы как инструмент моделирования динамики популяций: классические модели и современные обобщения // Фундаментальная и прикладная математика. 2007. Т. 13. № 4. С. 145–164.
7. Логофет Д. О., Ключкова И. Н. Математика модели Лефковича: репродуктивный потенциал и асимптотические циклы // Математическое моделирование. 2002. Т. 14. № 10. С. 116–126.
8. Свирежев Ю. М., Логофет Д. О. Устойчивость биологических сообществ. М.: Наука, 1978. 352 с.
9. Скалецкая Е. И., Фрисман Е. Я., Шапиро А. П. Дискретные модели динамики численности популяций и оптимизация промысла. М.: Наука, 1979. 165 с.
10. Терновых К. С. Планирование на предприятии АПК. М.: Колос, 2006. 79 с.
11. Трофимов А. А., Чугин И. В. Моделирование оборота стада крупного рогатого скота и оптимальное планирование производства в агрохозяйстве // Проблемы информационной экономики. Вып. VI. Моделирование инновационных процессов и экономической динамики: Сб. науч. тр. / Под ред. Р. М. Нижегородцева. М.: Ленанд, 2006. С. 212–225 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.econ.asu.ru/lib/sborn/model2006/pdf/14.pdf>
12. Фаддеев Д. К., Фаддеева В. Н. Вычислительные методы линейной алгебры. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1960. 656 с.
13. Buckland S. T., Newman K. B., Thomas L., Koesters N. B. State-space models for the dynamics of wild animal populations // Ecological Modelling. 2004. Vol. 171. P. 157–175.
14. Csetenyi A. I., Logofet D. O. Leslie model revisited: some generalizations for block structures // Ecological Modelling. 1989. Vol. 48. P. 277–290.
15. Newman K. B., Buckland S. T., Lindley S. T., Thomas L., Fernandez C. Hidden process models for animal population dynamics // Invited Paper for Special Feature of Ecological Applications. 2006. Vol. 16. P. 74–86.



АРТЕМ МИХАЙЛОВИЧ КАРАВАЕВ

аспирант кафедры прикладной математики и кибернетики  
математического факультета, Петрозаводский государственный университет  
karavaev@flowproblem.ruПОДСЧЕТ ПРЕДГАМИЛЬТОНОВЫХ ЦИКЛОВ  
НА СЕМЕЙСТВАХ РЕШЕТОЧНЫХ ГРАФОВ

Приводятся несколько новых рекуррентных соотношений для количества простых циклов, имеющих длину на единицу меньше гамильтоновых в семействах графов  $P_{2m+1} \times P_{2n+1}$ . Показано, что асимптотика количества таких циклов отличается от асимптотики для гамильтоновых циклов на решетках  $P_{2m+1} \times P_{2n}$  для некоторых небольших  $m$  и  $n \rightarrow 0$ . Рассчитано количество предгамильтоновых циклов на решетках  $P_{2n+1} \times P_{2n+1}$  для  $n = 1, 2, \dots, 10$ .

Ключевые слова: гамильтоновы циклы, предгамильтоновы циклы, метод матрицы переноса, циклы на решетке

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе обсуждаются графы, называемые прямоугольными решетками  $P_m \times P_n$ . Прямоугольная решетка представляет собой целочисленные точки координатной плоскости, связанные по принципу ближайшего соседства. Обозначение  $P_m \times P_n$  связано с тем, что целочисленный прямоугольник суть прямое произведение двух цепей, первая из которых имеет  $m$  звеньев, а вторая —  $n$ . Число  $m$  — ширина решетки (протяженность слева направо), а  $n$  — ее длина (протяженность снизу вверх). Поскольку в работе рассматриваются лишь решетки с нечетными сторонами, будем обозначать их символом  $P_{2m+1} \times P_{2n+1}$ . Максимально возможная длина простого (без самопересечений) цикла в такой решетке на единицу меньше числа ее узлов и равна  $(2m+1)(2n+1) - 1$ . Такой цикл мы будем называть предгамильтоновым. Пример решетки и предгамильтонового цикла в ней показан на рис. 1.

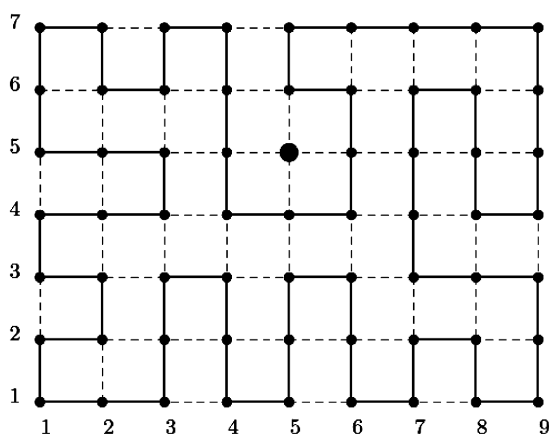


Рис. 1. Решетка  $P_9 \times P_7$  и предгамильтонов цикл в ней

Задача состоит в том, чтобы для заданных натуральных  $m$  и  $n$  отыскать количество предгамильтоновых циклов на решетке  $P_{2m+1} \times P_{2n+1}$ .

© Караваев А. М., 2011

Задача не сводится лишь к получению точного числа циклов, а требует изучения предельных свойств модели при неограниченном увеличении общего числа узлов  $(2m+1)(2n+1)$ .

Для изучения указанных свойств мы будем обращаться к известным результатам [1], связанным с подсчетом гамильтоновых циклов на решетках  $P_{2m+1} \times P_{2n}$ . Все необходимые выводы и факты работы [1] будут повторены здесь для удобства сравнения.

## ИЗВЕСТНЫЕ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проблема подсчета гамильтоновых циклов в рассматриваемых семействах графов тесно связана с решением одной из классических задач статистической механики полимеров — подсчетом количества трансформаций плотноупакованной макромолекулы [4]. Моделирование таких объектов циклами на решетках относится к классу традиционных методов, основанных на перечислении простых цепей [7].

Однако во всех работах, где плотноупакованная макромолекула моделируется гамильтоновой циклом на решетке, то есть циклом, проходящим по каждой вершине ровно один раз, рассмотрены только такие решетки, по крайней мере одна из сторон которых четна, то есть графы вида  $P_{2m} \times P_n$  и  $P_{2m+1} \times P_{2n}$ . Случаи же решеток с нечетными сторонами  $P_{2m+1} \times P_{2n+1}$  не рассматриваются, так как гамильтоновых циклов в них не существует [10]. Но моделирование плотноупакованной макромолекулы в этом случае все же возможно — если допустить, что цикл должен пройти по всем узлам решетки, кроме какого-либо одного. Такие циклы, как было сказано выше, мы будем называть предгамильтоновыми. Предгамильтоновы циклы могут также интерпретироваться как циклы на решетке с дефектами. В работе приведены результаты вычисления количества таких циклов на решетках с нечетной стороной, взятого в сумме по всем возможным положениям единственного дефекта.

Цель настоящей работы – заполнить пробел в научной литературе, посвященной вычислительным основам физики полимеров, показав, что вычисления на решетках с нечетными сторонами могут быть проведены немногим сложнее, чем вычисления для хорошо изученных решеток с четным числом узлов, а также расширить известные теоретические выводы в этом случае. Говоря о вычислительных особенностях метода решения задачи, мы постоянно будем ссылаться на авторскую работу [1], в которой дается полное описание алгоритма подсчета гамильтоновых циклов на решеточных графах шириной до 22, а в качестве доказательства того, что предгамильтоновы циклы подсчитываются немногим сложнее, приводим точные результаты расчетов для решеток шириной до 21. Правильность этих результатов не может быть доказана путем строгих математических выкладок, но их неявные подтверждения собраны в разделе «О правильности полученных данных». Отличительная особенность подсчета предгамильтоновых циклов, которую нужно учесть в описанном в [1] методе, будет обозначена в этой работе в разделе «Схема решения методом матрицы переноса».

Говоря о фактических данных (результатах вычислений) и о выведенных рекуррентных соотношениях, мы будем постоянно отсылать читателя на наш сайт [5], где все эти данные находятся в свободном доступе и никаким образом не могут быть приведены в тексте работы в силу их громоздкости, кроме небольших формул для решеток с небольшой шириной.

Интерпретация полученных результатов позволила сформулировать гипотезу о предельных свойствах модели плотноупакованных макромолекул. Эта гипотеза касается вида главного члена асимптотики и значения константы связности для предгамильтоновых циклов.

Известно [8], что для решеток  $P_{2m+1} \times P_{2n}$  с фиксированным параметром  $m$  количество гамильтоновых циклов  $h_m(n)$  асимптотически ведет себя следующим образом

$$h_m(n) \sim \mu_m \cdot \kappa_m^n, \quad n \rightarrow \infty,$$

где  $\mu_m$  – некоторая константа, зависящая от ширины решетки. Доказано, что существует предел  $\lim_{m \rightarrow \infty} \sqrt[2m+1]{\kappa_m} = \kappa$ . Величина  $\kappa$  называется константой связности, и ее вычисление представляет основной интерес, поскольку она непосредственно связана с энтропией, приходящейся на один узел решетки. Считается, но не доказано, что существует предел  $\lim_{m \rightarrow \infty} \sqrt[2m+1]{\mu_m} = \mu$ . Исходя из этого принято считать, что для достаточно больших решеток (как по ширине, так и по длине)

$$h_m(n) \approx \mu^{2m+1} \cdot \kappa^{(2m+1)(2n)}.$$

В настоящей работе показано, что условие гамильтоновости решетки оказывает сильное влияние на данные оценки. Когда прямоугольная решетка имеет вид  $P_{2m+1} \times P_{2n+1}$  (а параметр  $m$  фиксирован), асимптотика количества плотноупакованных трансформаций  $p_m(n)$  (о чем говорится в статье гипотеза) будет иметь вид

$$p_m(n) \sim v_m \cdot n \cdot \kappa_m^n, \quad n \rightarrow \infty,$$

где константа  $v_m$ , вообще говоря, может отличаться от константы  $\mu_m$ , а их расчет не является целью настоящей работы. Таким образом, сделав предположение, что появление дефекта на решетке добавляет полиномиальный множитель к главному члену асимптотики, но константа связности остается той же самой. Указанная формула строго доказана для  $m = 1, \dots, 5$ , а предположение о виде главного члена асимптотики для всех натуральных  $m$  сформулировано в виде гипотезы в конце статьи.

#### СХЕМА РЕШЕНИЯ МЕТОДОМ МАТРИЦЫ ПЕРЕНОСА

Наиболее распространенным способом подсчета циклов в сеточных графах является использование метода матрицы переноса [2]. Этот метод уже более полувека успешно применяется для решения различных перечислительных задач, в частности, основные результаты в задаче о подсчете циклов на решетках получены именно методом матрицы переноса (см. сравнение результатов в [1]). Его основное достоинство состоит в том, что он позволяет подсчитать количество циклов в графе без их фактического построения, что особенно важно для задач, принадлежащих классу сложности #P [11].

Логическая простота метода сводит проблему подсчета циклов к вычислению степени матрицы переноса, однако следствием ее вычислительной сложности становится экспоненциальный относительно  $m$  рост порядка матрицы. Таким образом, залогом успешного применения метода матрицы переноса является наличие эффективной схемы кодирования состояний и максимально возможное сжатие матрицы путем удаления недостижимых и отождествления идентичных состояний [1].

К сожалению, на сегодняшний день не существует ни одного подхода к решению поставленной задачи, в рамках которого можно было бы вычислить точный ответ для произвольных и достаточно больших значений  $m$  и  $n$ . Вместо этого решение задачи на решетках начинается с фиксирования одного из параметров. Этим параметром будет  $m$ . Таким образом, ширина решетки  $2m + 1$  фиксирована, а длина  $2n + 1$  будет меняться для  $n = 1, 2, \dots$ . В этом случае может быть применен метод матрицы переноса.

Проиллюстрировать схему метода матрицы переноса удобнее всего на примере решетки ши-

риной 3 (когда  $m = 1$ ). На рис. 2 слева изображена решетка  $P_3 \times P_7$  и предгамильтонов цикл в ней. Справа от решетки изображена последовательность так называемых состояний, через которые проходит цикл, если строить его последовательно снизу вверх, переходя от одного уровня решетки к следующему. Состояние представляет пару из множества дуг и символа «0» или «1». Положение концов дуг указывает на то, как еще не построенный на текущем уровне цикл проходит по вертикальным ребрам этого уровня; символ «0» означает, что до текущего уровня дефект решетки еще не встречался, а «1» – что дефект пройден. Более сложный пример для решетки шириной 5 (когда  $m = 2$ ) на рис. 2 справа показывает, что дуг в состоянии может быть несколько.

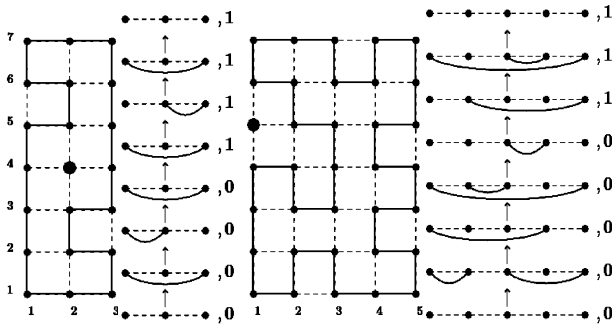


Рис. 2. Решетки  $P_3 \times P_7, P_5 \times P_7$  и образующие их состояния

Переход от одного состояния к другому осуществляется путем включения в недостроенный цикл горизонтальных ребер с последующим переходом к очередному уровню решетки вверх. Для решетки шириной  $2m = 1$  для каждого состояния нужно перебрать все  $2^{2m}$  способов установить горизонтальные ребра, чтобы перейти в другие состояния. Вся информация о том, из каких состояний в какие можно перейти, записывают в матрицу  $T(m)$ , которая называется матрицей переноса. В нашем примере для  $m = 1$  всего 8 возможных состояний, которые указаны на рис. 3. Пронумеровав их в указанном порядке, запишем возможные переходы между ними в матрицу переноса:

$$T(1) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, T^7(1) = \begin{pmatrix} 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 32 & 32 & 36 \\ 0 & 0 & 8 & 8 & 56 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 28 & 28 & 32 \\ 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 28 & 28 & 32 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 8 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

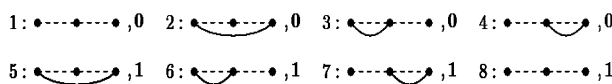


Рис. 3. Все возможные состояния для решетки шириной 3

Элемент  $T_{ij}(m) = 1$ , если можно перейти из состояния  $i$  в состояние  $j$  и  $T_{ij}(m) = 0$  в противном

случае. Например, для  $m = 1$  из состояния 2 можно перейти в состояние 5 (такой переход есть на рис. 2 слева), значит  $T_{25}(1) = 1$ . Число гамильтоновых циклов на решетке  $P_3 \times P_k$  (для любого натурального  $k$ ) равно числу способов перейти от начального состояния 1 (когда построение цикла еще не началось) в конечное состояние 8 (когда цикл замкнулся и дефект пройден) за  $k$  шагов. А это число определяется как элемент  $(1,8)$  матрицы  $T^k(1)$ . Например, на решетке  $P_3 \times P_7$  элемент  $(T^7(1))_{18} = 36$ , таково и количество предгамильтоновых циклов на ней.

В самой реализации алгоритма матрица  $T(m)$  явно не сохраняется, более того, все состояния особым образом кодируются и сжимаются, о чем подробнее написано в [1]. В табл. 1 указаны порядки сжатых матриц переноса для случаев  $m = 1, 2, \dots, 10$ . Например, в случае  $m = 1$  все 8 состояний можно сжать до 3. Это число 3 и указано в табл. 1 в строке  $m = 1$ .

Для подсчета предгамильтоновых циклов была написана компьютерная программа, реализующая метод из [1], модифицированный таким образом, чтобы учитывать положение дефекта на решетке. Модификация заключается лишь в том, что для каждого состояния необходимо хранить информацию о том, был ли пройден дефект на решетке или нет. Это немногим более чем вдвое увеличивает число состояний по сравнению с поиском гамильтоновых циклов.

Для сравнения в табл. 1 также выписано число состояний, возникающих в случае подсчета гамильтоновых циклов.

Таблица 1

Порядок сжатой матрицы переноса и рекуррентного соотношения для гамильтоновых циклов на решетках  $P_{2m+1} \times P_{2n}$  и предгамильтоновых циклов на решетках  $P_{2m+1} \times P_{2n+1}$

	Порядок матрицы переноса		Порядок соотношения	
	$P_{2m+1} \times P_{2n}$	$P_{2m+1} \times P_{2n+1}$	$h_m(n)$	$p_m(n)$
1	2	3	1	2
2	8	12	3	6
3	37	67	18	36
4	213	416	104	208
5	1332	2 752	671	1342
6	8 916	19 189		
7	62 121	138 205		
8	446 483	1 020 530		
9	3 284 418	7 678 732		
10	24 620 184	58 671 018		

**О ПРАВИЛЬНОСТИ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ**

Правильность метода матрицы переноса доказана в [2], а правильность работы нашего метода, описанного в [1], вытекает из самого построения матрицы переноса: программа перебирает абсолютно все возможные состояния и рас-

считывает все возможные переходы между ними посредством полного перебора. Число таких состояний, указанное в табл. 1, не слишком велико для современных вычислительных систем, однако оно существенно меньше, чем число всевозможных циклов (табл. 2), перечислить которые полным перебором, считая их по одному, невозможно.

Таблица 2

Количество предгамильтоновых циклов на квадратной решетке  $P_{2n+1} \times P_{2n+1}$

$n$	Количество предгамильтоновых циклов
1	5
2	226
3	255088
4	6663430912
5	3916162476483538
6	51249820944023435573470
7	14870957102232406137455708164254
8	95494789899510664733921727510895952184006
9	13559554600804304977439766815372028940021573343275526
10	425577772 \ 73614434293884765869188518513149602332875710275078966598

Правильность работы самой программы, реализующей метод, не может быть доказана строго, поскольку является объектом вольного творчества ее автора. Однако косвенные проверки показывают, что, по-видимому, программа работает правильно. Например, число циклов на решетках  $P_{2m+1} \times P_{2n+1}$  и  $P_{2n+1} \times P_{2m+1}$  должно быть одинаковым. Действительно, оно получилось одинаковым для тех решеток, на которых проводились расчеты, в чем можно убедиться, взяв фактические данные с нашего сайта [5]. Анализ результатов, проделанный ниже, дает вполне закономерный итог: если ширина решетки фиксирована, а длина неограниченно растет, то можно предположить, что число предгамильтоновых циклов на решетке  $P_{2m+1} \times P_{2n+1}$  с точностью до константы в  $n$  раз больше, чем число гамильтоновых циклов на решетке  $P_{2m+1} \times P_{2n}$ , так как дефект может занимать любой из  $(2m+1)(2n+1)$  узлов. Как мы увидим далее, именно это и подтвердилось для тех случаев, для которых удалось провести точные вычисления.

#### АНАЛИЗ РЕКУРРЕНТНЫХ СООТНОШЕНИЙ И ПРОИЗВОДЯЩИХ ФУНКЦИЙ

Несмотря на то что метод матрицы переноса является более эффективным способом подсчета циклов в сеточных графах, чем метод полного перебора, в силу самой природы рассматриваемой задачи он оказывается чрезвычайно ресурсоемким и не может быть использован при повседневных расчетах. Крайне желательно иметь более компактное представление для результатов, полученных этим методом.

К счастью, природа самого метода матрицы переноса такова, что полученные с его помощью числовые последовательности будут удовлетворять линейным рекуррентным соотношениям с постоянными коэффициентами. Наличие такой возможности, являющейся следствием теоремы Кели – Гамильтона, позволяет, в частности, оценить сверху порядок рекуррентного соотношения порядком матрицы переноса.

Обозначим число предгамильтоновых циклов на решетке  $P_{2m+1} \times P_{2n+1}$  символом  $p_m(n)$ . Последовательность чисел  $p_m(n)$  будет удовлетворять линейному однородному рекуррентному соотношению с постоянными коэффициентами

$$p_m(n) = \sum_{k=1}^{N_m} c_k \cdot p_m(n-k), \quad n > N_m,$$

причем порядок этого соотношения (который мы обозначили как  $N_m$ ) не будет превосходить порядок матрицы  $T(m)$ . Механизм восстановления рекуррентного соотношения по начальному отрезку последовательности сводится к методу неопределенных коэффициентов: зная числа  $p_m(n)$  в достаточном количестве, можно составить систему линейных уравнений относительно неизвестных  $c_k$  и решить ее. Система уравнений получается подстановкой чисел  $p_m(N_m+1)$ ,  $p_m(N_m+2)$ , ... в рекуррентное соотношение:

$$\begin{pmatrix} p_m(N_m) & p_m(N_m-1) & \cdots & p_m(1) \\ p_m(N_m+1) & p_m(N_m) & \cdots & p_m(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_m(2N_m-1) & p_m(2N_m-2) & \cdots & p_m(N_m) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_{N_m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_m(N_m+1) \\ p_m(N_m+2) \\ \vdots \\ p_m(2N_m) \end{pmatrix}.$$

Поскольку для восстановления коэффициентов  $c_1, c_2, c_{N_m}, \dots$ , требуется удвоенное количество членов последовательности, рекуррентное соотношение будет гарантированно правильным, если количество известных чисел  $p_m(n)$  не меньше удвоенного порядка матрицы переноса. Поэтому основной задачей здесь является получение достаточно длинной последовательности чисел (табл. 1). В настоящем исследовании были получены новые рекуррентные соотношения для случаев  $m = 1, \dots, 5$ . В силу громоздкости полученных выражений детально рассмотрены лишь примеры для  $m = 1, 2$ , в то время как остальные выведенные рекуррентные соотношения и начальные данные к ним свободно доступны для скачивания на авторском сайте [5].

В нашем примере для  $m = 1$  последовательность  $p_1(n)$  для  $n = 1, 2, 3, \dots$  имеет вид  $5, 14, 36, \dots$ , а рекуррентное соотношение имеет порядок 2 [5]:  $p_1(1) = 5, p_1(2) = 14, p_1(n) = 4p_1(n-1) - 4p_1(n-2), n > 2$ .

Любому линейному рекуррентному соотношению с постоянными коэффициентами соответствует рациональная производящая функция, которая генерирует точно такую же последовательность. Изучать предельные свойства последовательности удобнее именно через производящие функции. Если ввести обозначение  $G_m(z)$

для производящей функции, соответствующей рекуррентному соотношению для решеток  $P_{2m+1} \times P_{2n+1}$ , то, например, для  $m = 1$  она будет иметь вид

$$G_1(z) = 5z + 14z^2 + 36z^3 + \dots = \frac{z(5-6z)}{(1-2z)^2}.$$

Асимптотика количества предгамильтоновых циклов определяется поведением функции вблизи единственного полюса  $z = 1/2$ , который имеет кратность 2. Обратную величину к главному корню знаменателя производящей функции  $G_m(z)$  будем обозначать  $\kappa_m$ , то есть  $\kappa_1 = 2$ . Из этого следует, что  $p_1(n) \sim v_1 \cdot n \cdot 2^n$  при  $n \rightarrow \infty$ . То есть количество предгамильтоновых циклов растет экспоненциально с ростом длины решетки, но, помимо экспоненты, главный член асимптотики имеет полиномиальный множитель. Вычисление значения константы  $v_1$  в цели нашей работы не входит, но при необходимости его можно определить приближенно, рассчитав отношение  $p_1(n)/(n \cdot 2^n)$  для достаточно большого значения  $n$ . Так, для  $n = 500$  получим 1,003000...

Мы проиллюстрировали схему анализа полученных рекуррентных соотношений на примере решетки шириной 3, чтобы иллюстрация не оказалась слишком громоздкой. В этом случае решение может быть найдено в виде явной формулы. Разложение производящей функции  $G_1(z)$  в ряд по степеням  $z$  дает явное выражение для коэффициента при  $z^n$ :

$$p_1(n) = \left(n + \frac{3}{2}\right) \cdot 2^n,$$

из которого сразу видно, что  $v_1 = 1$  и что  $p_1(n) \sim n \cdot 2^n$  при  $n \rightarrow \infty$ . К сожалению, явные формулы для случаев  $m > 1$  не могут быть получены в столь компактной форме, но тогда вполне применим метод анализа, описанный выше.

Интересная особенность производящих функций для числа предгамильтоновых циклов на решетках  $P_{2m+1} \times P_{2n+1}$  проявляется в их сравнении с производящими функциями для числа гамильтоновых циклов на решетках  $P_{2m+1} \times P_{2n}$ , которые мы обозначим через  $H_m(z)$  (о поиске таких циклов подробно написано в [1]). Зная рекуррентные соотношения для числа гамильтоновых циклов на решетках с нечетной шириной до  $P_{13} \times P_{2n}$  [1], мы точно так же можем построить производящие функции  $H_m(z)$ . Указанная особенность состоит в том, что знаменатель производящей функции  $G_m(z)$  является квадратом знаменателя  $H_m(z)$  для всех рассмотренных случаев вплоть до  $m = 5$ , а главный (минимальный по модулю) корень знаменателя  $H_m(z)$  является простым. Например, в случае  $m = 1$ , то есть на решетке  $P_3 \times P_{2n}$ , рекуррентное соотношение для числа гамильтоновых циклов имеет вид [5]

$$h_1(1) = 1, \quad h_1(n) = 2h_1(n-1), \quad n > 1,$$

а производящая функция, соответственно,

$$H_1(z) = z + 2z^2 + 4z^3 + \dots = \frac{z}{1-2z}.$$

Как видно, знаменатель  $G_1(z)$  равен квадрату знаменателя  $H_1(z)$ .

Аналогичные результаты получаются для случаев  $m = 2, 3, 4, 5$ . В этом можно убедиться, взяв все фактические данные (рекуррентные соотношения и начальные данные для гамильтоновых и предгамильтоновых циклов) на нашем сайте [5]. Например, для  $m = 2$

$$H_2(z) = \frac{z \cdot (1+3z)}{1-11z-2z^3} \quad \text{и}$$

$$G_2(z) = \frac{2z \cdot (7-41z+9z^2+4z^3+6z^4-z^5)}{(1-11z-2z^3)^2}.$$

Асимптотика коэффициентов разложения рациональной производящей функции в ряд Маклорена определяется минимальным корнем знаменателя. Он может быть найден точно, но в целях экономии мы его округлим:  $z \approx 0,0907731$ . Обратная величина  $\kappa_2 \approx 11,01648$ . Для знаменателя  $H_2(z)$  корень является простым (оба других комплексные), что дает право записать

$$h_m(n) \sim \mu_2 \cdot 11,01648^n, \quad p_m(n) \sim v_2 \cdot n \cdot 11,01648^n$$

при  $n \rightarrow \infty$ .

Константы  $\mu_2 \approx 0,115149$  и  $v_2 \approx 0,605767$  также определяются приближенно, если это необходимо. Во всех остальных случаях ( $m = 3, 4, 5$ ) исследование также показало, что главный корень знаменателя  $H_m(z)$  является простым, а знаменатель  $G_m(z)$  является квадратом знаменателя  $H_m(z)$ . Вышесказанное позволяет сформулировать гипотезу о том, что данное наблюдение справедливо для всех натуральных  $m$ . Мы сформулируем ее в иной форме в заключении.

В табл. 1 указаны порядки рекуррентных соотношений (а значит, и степени знаменателей производящих функций) для гамильтоновых и предгамильтоновых циклов. Эти порядки отличаются в два раза.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Полученные результаты позволяют сформулировать следующую гипотезу. Если число гамильтоновых циклов  $h_m(n)$  на решетке  $P_{2m+1} \times P_{2n}$  имеет скорость роста  $h_m(n) \sim \mu_m \cdot \kappa_m^n$  при  $n \rightarrow \infty$ , то число предгамильтоновых циклов  $p_m(n)$  на решетке  $P_{2m+1} \times P_{2n+1}$  имеет скорость роста  $p_m(n) \sim v_m \cdot n \cdot \kappa_m^n$ . Основание показательной функции этих асимптотик одно и то же и зависит только от ширины решетки. Вид главного члена асимптотики получен точными методами для  $m = 1, \dots, 5$ ; гипотеза утверждает, что такой вид будет сохраняться для всех натуральных  $m$ .

Интересной представляется проверка гипотезы до  $m = 10$  с помощью методов аппроксимации числовых последовательностей [6], но это не входило в цели нашей работы. Однако наш метод позволяет получить последовательности чисел  $p_m(n)$  для решеток шириной до 21, что подтверждается результатами, приведенными в табл. 2.

В статистической механике полимеров [8] доказано существование предела  $\lim_{m \rightarrow \infty} \sqrt[2m+1]{\kappa_m} = \kappa^2$  для случая гамильтоновых циклов, следовательно, если гипотеза верна, то величина  $\kappa$  – универсальная константа связности – одна и та же для гамильтоновых и предгамильтоновых циклов.

Показано, что расчет асимптотических свойств плотноупакованных трансформаций полимеров должен проводиться с учетом характеристик среды: если среда моделируется решеткой с дефектами или не обладает свойством гамильтоновости, то это влияет на скорость роста возможных трансформаций и, следовательно, на термодинамические свойства модели.

В работе [1] заявлены точные значения числа гамильтоновых циклов для решеток размером

до  $P_{22} \times P_{100}$  и рекуррентные соотношения для решеток шириной до 14. В настоящем исследовании были получены точные значения количества предгамильтоновых циклов на квадратных решетках с нечетными сторонами до  $P_{21} \times P_{21}$ . Результаты указаны в табл. 2, а также зарегистрированы в энциклопедии целочисленных последовательностей [9] под номером A181584. Получены рекуррентные соотношения для решеток шириной до 11. Расчеты проводились на кластере Карельского научного центра [3]. Можно проверить справедливость наших выводов с помощью систем компьютерной алгебры, взяв все фактические данные с нашего сайта [5], а также перепроверить наши расчеты, реализовав самостоятельно алгоритм, подробно описанный в [1] с незначительными изменениями касательно положения дефекта, описанными в настоящей работе.

Далее планируется изучить свойства простых циклов максимальной длиной на решетках с более чем одним дефектом. Мы предполагаем, что главный член асимптотики для числа таких циклов будет содержать множителем полином той степени, каково количество дефектов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Караваев А. М. Усовершенствованный метод матрицы переноса для подсчета гамильтоновых циклов на прямоугольных решетках и цилиндрах // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2011. № 4(27). С. 16–24.
2. Стенли Р. Перечислительная комбинаторика: Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 440 с.
3. Центр высокопроизводительной обработки данных ЦКП КарНЦ РАН [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://cluster.krc.karelia.ru>
4. Cloizeaux J., Jannink G. Polymers in Solution: Their Modelling and Structure. Oxford: Clarendon Press, 1990. 928 p.
5. FlowProblem [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://flowproblem.ru>
6. Gaunt D. S., Guttmann A. J. Asymptotic Analysis of Coefficients // Phase Transitions and Critical Phenomena. London; N. Y.: Academic Press, 1974. Vol. 3. P. 181–243.
7. Madras N., Slade G. The Self-Avoiding Walk. Boston: Birkhauser, 1993.
8. Schmalz T. G., Hite G. E., Klein D. J. Compact self-avoiding circuits on two-dimensional // Journal of Physics A Mathematical General. 1984. Vol. 17. P. 445–453.
9. The On-Line Encyclopedia of Integer Sequences. The OEIS Foundation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://oeis.org>
10. Thompson G. L. Hamiltonian Tours and Paths in Rectangular Lattice Graphs // Mathematics Magazine. 1977. Vol. 50. № 3. P. 147–150.
11. Valiant L. G. The complexity of enumeration and reliability problems // SIAM Journal on Computing. 1979. Vol. 8. № 3. P. 410–421.

**АЛЕКСАНДР ЕВГЕНЬЕВИЧ ГОГОЛЕВ**  
преподаватель кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет  
[a.e.gogolev@gmail.com](mailto:a.e.gogolev@gmail.com)

**АНАТОЛИЙ ДИАМИДОВИЧ ХАХАЕВ**  
доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет  
[alim@karelia.ru](mailto:alim@karelia.ru)

**АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ ШТЫКОВ**  
директор Центра коллективного пользования научным оборудованием, Петрозаводский государственный университет  
[shtykoff@gmail.com](mailto:shtykoff@gmail.com)

## ЭФФЕКТЫ МОДУЛЯЦИИ ТОКА В КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА С УПОРЯДОЧЕННЫМИ СТРУКТУРАМИ

В данной статье рассматриваются эффекты, возникающие при модуляции продольного электрического поля в комплексной плазме тлеющего разряда путем наложения малых гармонических возмущений на разрядный ток в газовом промежутке. Проведен анализ возможности применения метода для управления плазменно-пылевыми структурами в плазме тлеющего разряда.

Ключевые слова: пылевая плазма, тлеющий разряд, плазменно-пылевые упорядоченные структуры, гармонические колебания

### ВВЕДЕНИЕ

В исследованиях комплексной низкотемпературной плазмы (КНТП) принято разделять диагностические подходы по использованию возмущающих воздействий. Такое разделение объясняется целями и задачами исследования: если невозмущающая диагностика дает информацию о поведении объекта в отсутствие внешних воздействий в его естественном состоянии, то возмущающие методы отслеживают реакции на внешние воздействия не только с точки зрения изучения структуры и поведения самого объекта, но зачастую и с точки зрения изучения возможности управления объектом, например, для задач плазмохимии или при обработке твердофазных частиц в плазме (подробнее см.: [4], [5], [6]).

Основную часть работ, опубликованных в области возмущающей диагностики плазмы, составляют работы, относящиеся к высокочастотному разряду, при этом в них параметрические воздействия на плазму тлеющего разряда постоянного тока изучены недостаточно. Тем не менее уже было обнаружено модулирующее воздействие кратковременных импульсов адиабатического магнитного поля на кристалл в тлеющем разряде, вызывающее его смещение и затухающие пылезвуковые волны [7]; также были изучены эффекты воздействия на кристалл и окружающую его плазму пучков заряженных частиц различной энергии [2]. Газодинамические воздействия, использование направленного лазерного излучения и воздействия градиентом температур в тлеющем разряде описаны в [6], [11], [12].

© Гоголев А. Е., Хахаев А. Д., Штыков А. С., 2011

Авторами вышеуказанных работ отмечается необходимость изучения новых методов параметрических воздействий на плазменно-пылевые структуры (ППС) с целью диагностики их параметров и управления такими их свойствами, как пространственное положение и форма структуры.

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Предшествующие исследования КНТП показали существование ранее не известных эффектов в поведении частиц конденсированной дисперсной фазы (КДФ) в плазме тлеющего разряда постоянного тока, модулируемой гармоническими колебаниями малой амплитуды, подробно описанными в [3], [10]. Эти эффекты, не отмеченные ранее ни в одной из работ и очевидно обусловленные коллективными процессами в комплексной плазме, мотивировали нас приступить к исследованиям механизмов упомянутых явлений на основе их экспериментальных и теоретических исследований. Для проведения исследований была создана установка, позволяющая индуктивно накладывать синусоидальное напряжение в катодную (низковольтную) ветвь цепи питания разряда.

Для задания сигналов различной формы использовались генераторы частот Г3-109 и Г3-112 с одновременным контролем формы и амплитуды задаваемого сигнала на выходах сопрягающего устройства и после прохождения через разряд на осциллографе через гальваническую развязку (более подробно см.: [3], [10]). Амплитуда

задаваемого возмущения менялась от 0,05 до 6 В при частотах сигнала от 10 Гц до 100 кГц, к этой же области частот принадлежат частоты предполагаемых пылезвуковых и ионных плазменных колебаний [1], [5], что и явилось основой для выбора диапазона возмущающих частот.

Для исследований в качестве рабочего газа был взят молекулярный азот при давлениях 0,2–0,6 мм рт. ст., падение напряжения на разряде составляло 450–1200 В, ток разряда – 0,5–1,4 мА (условия подбирались для получения максимально стабильных (0,4 и 0,6 мм рт. ст.) и нестабильных структур (0,2 мм рт. ст.)). В качестве кристаллообразующей пыли использовались полидисперсные порошки  $Al_2O_3$  и Zn с равномерным разбросом размеров фракции – 5–20 мкм. Для образования кристалла производилось в среднем 3 инъекции пыли в разряд, среднее количество частиц, инжектируемое за 1 раз, – в пределах 100. Регистрация изображений пылинки кристалла в лазерном ноже производилась скоростной CCD-камерой, подключенной к персональному компьютеру. По масштабированным изображениям структур вычислялась высота кристалла, ширина, расстояние от нижней границы структуры до сужающего конуса. Затем по полученным кадрам при помощи специализированного ПО вычислялись средние межчастичные расстояния в структуре.

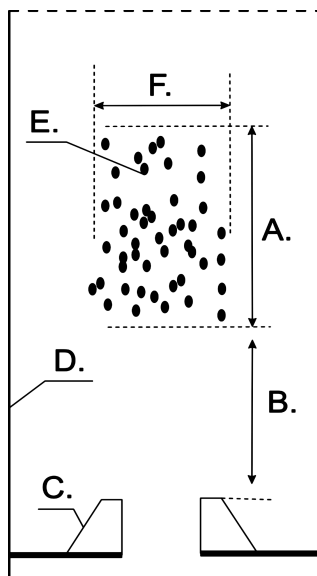


Рис. 1. Схема измерений:  
 А – вертикальный размер пылевой структуры,  
 В – расстояние от нижней границы структуры до сужающего конуса, С – сужающий конус, D – стенка разрядной трубки, E – пылевая структура,  
 F – горизонтальный размер пылевой структуры

Еще раз остановимся на том, что в исследовании регистрировались такие параметры, как пространственное положение элементов КДФ (в том числе их наличие / отсутствие), их вертикальное перемещение за время воздействия воз-

мущающим сигналом, размер пылевой структуры по вертикали и горизонтали и динамика изменения структур во времени (за временные промежутки от 0,04 до 5 мин.). Для расчетов принимались данные, усредненные минимум по трем измерениям.

Наблюдения проводились при последовательной смене давлений рабочего газа от 0,2 до 0,6 мм рт. ст. с шагом 0,1 мм рт. ст., при каждом заданном давлении задавалось три различных значения тока (0,7, 1,0, 1,3 мА) с соответствующими значениями падения напряжения на разряде, при каждом из значений разрядного тока проводились замеры наблюдаемых параметров при частотах возмущающего сигнала от 10 до 200 Гц с шагом 10 Гц, 200–1000 Гц с шагом 100 Гц и далее на частотах 1, 5, 10, 15, 20, 40, 60, 80, 100 кГц.

При фиксированной частоте возмущения амплитуда возмущающего сигнала повышалась до уровня, при котором начиналось разрушение кристалла, или до уровня, при котором кристалл смещался за границу области регистрации. Каждый эксперимент повторялся трижды с усреднением результатов и вычислением доверительного интервала погрешности.

Таким образом, в ходе обработки данных анализировались зависимости наблюдаемых параметров от амплитуды и частоты задаваемого возмущения при разных газах, материалах и размерах фракции используемых частиц, различных начальных значениях, токах разряда и давлениях.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

При работе с синусоидальным возмущающим сигналом, задаваемым извне, при амплитудных значениях сигнала, проходящего через разряд, порядка 1 % от падения напряжения на разряде наблюдались существенные (до нескольких раз) изменения размеров, формы кристалла и его положения в пространстве разряда.

Минимальная амплитуда вводимого возмущения, при которой было зарегистрировано воздействие на кристалл, зафиксирована при давлении 0,2 мм рт. ст., падении напряжения на разряде 550 В и составила 0,01 В. За минимальное воздействие было принято такое воздействие, при котором наблюдаемый параметр (например, смещение частиц пылевой структуры или амплитуда колебаний отдельных частиц) как минимум втрое превышал средние значения флуктуаций наблюдаемых параметров.

Было определено, что с ростом давления газа и падением напряжения на разряде минимальная возмущающая амплитуда растет нелинейно. Максимальное ее значение (6 В) было зафиксировано в молекулярном азоте при давлении 0,6 мм рт. ст. и падении напряжения 1300 В при токе 1,4 мА. Необходимо отметить, что максимальное значение амплитуды вводимого возму-



щения намеренно ограничивалось в первую очередь целью эксперимента – изучить влияние малых возмущений, и во вторую – техническими возможностями. Таким образом, максимальное амплитудное значение вводимого возмущения может достигать и больших величин.

Среди зарегистрированных эффектов есть требующие дополнительного изучения и описания. Так, при частотах 1–40 кГц при наращивании амплитуды внешнего возмущения наблюдалось смещение кристалла вниз, сопровождающееся «растяжением» самого кристалла и «разряжением» его структуры по вертикали (рис. 2) без сужения (в рамках погрешности измерения) в горизонтальной плоскости.

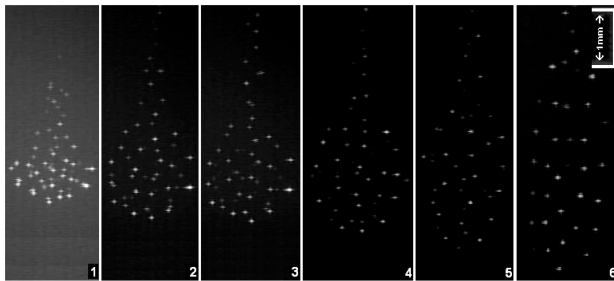


Рис. 2. Кристалл в  $N_2$  при 0,4 мм рт. ст., токе 0,9 мА, напряжении на разряде 950 В, синусоидальная модуляция – 15 кГц, амплитуда: 1 – 0,1 В, 2 – 0,2 В, 3 – 0,4 В, 4 – 0,6 В, 5 – 0,8 В, 6 – 1,0 В

Последнее явление вызывает особый интерес, поэтому рассмотрим эффект более тщательно. Подробные наблюдения показали, что структуры, состоящие из малого количества (10–20) частиц, более устойчивы к вводимым возмущениям и показывают крутую зависимость увеличения размеров от амплитуд вводимых сигналов (до 4 раз), без разрушения. Максимальное изменение вертикальных размеров кристалла при заданной амплитуде возмущения зарегистрировано в области 15–20 кГц вне зависимости от давления рабочего газа.

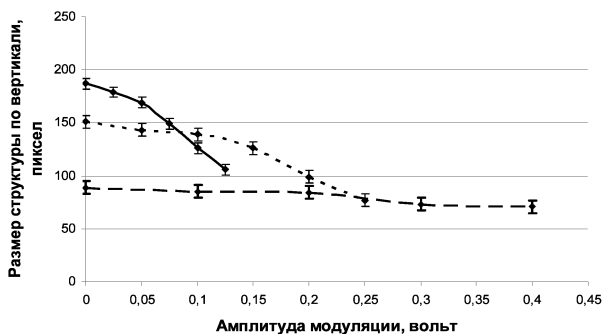


Рис. 3.  $N_2$ , изменение вертикальных размеров кристалла, синусоидальная модуляция – 60 кГц, амплитуда – 0–0,4 В, в 1 мм 70 пиксел., сплошная линия – ток 1 мА, падение напряжения – 1,3 кВ, пунктир – ток 1,3 мА, падение напряжения – 1,3 кВ, мелкий пунктир – ток 0,7 мА, падение напряжения – 1,3 кВ

С ростом частоты возмущения эффект растяжения кристалла постепенно уменьшается, практически исчезая к 30–47,5 кГц (зависит от давле-

ния газа), сменяясь эффектом сжатия кристалла с «уплотнением» его структуры по вертикали.

При постепенном наращивании амплитуды модуляции кристалл достигает максимального сжатия, после чего уплотнение прекращается при амплитудах сигнала, регистрируемого после прохождения через разряд, порядка 6 В (зависит от типа газа, давления и падения напряжения на разряде). Наблюдаемое сжатие прямо пропорционально исходным размерам кристалла.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Для дальнейшего анализа нам необходимо выявить действительно значимые факторы, влияющие на поведение ППС, и определить вид зависимостей параметров структур от этих факторов. Введем следующие обозначения:  $d$  – линейный размер структуры по горизонтали (рис. 1F),  $L$  – линейный размер структуры по вертикали (рис. 1A),  $k$  – коэффициент, определяющий скорость изменения линейных размеров плазменно-пылевой структуры,  $V$  – амплитуда возмущающего напряжения,  $\nu$  – частота возмущающего воздействия,  $I$  – ток разряда. Известно, что давление газа и напряжение на разряде связаны с током разряда и начальным размером ППС, поэтому указанные величины в расчет не принимались.

Напомним, что после запуска газа и зажигания разряда, формирования ППС производилась регистрация линейных размеров ППС, далее с помощью генератора колебаний в разряд вводилось возмущающее воздействие в виде тока переменной частоты  $\nu$  амплитудой колебаний  $V$ , вследствие чего линейные размеры ППС (рис. 1) изменялись и снова регистрировались. Эксперименты проводились при различных параметрах разряда – ток ( $I$ ) и давление рабочего газа ( $P$ ).

Диапазоны изменения параметров:  $V$  [0...6,2] В,  $\nu$  [10...100000] Гц,  $I$  [0,7...1,3] мА, таким образом, при установке значений  $I$  и  $\nu$  с малым шагом варьировалась величина  $V$ .

В ходе обработки данных были поставлены следующие задачи.

1. Проверка гипотезы о наличии зависимостей линейных размеров ППС от величин возмущающих параметров ( $V$  [В],  $\nu$  [Гц]) и параметра разряда ( $I$  [А]) с использованием корреляционного анализа.

2. Проверка гипотезы о влиянии возмущающих параметров ( $V$  [В],  $\nu$  [Гц]) и параметра разряда ( $I$  [А]) на линейные размеры ППС и по возможности оценка степени влияния с использованием дисперсионного анализа.

3. Определение зависимости между линейными размерами ППС и величинами возмущающих параметров ( $V$  [В],  $\nu$  [Гц]) и параметра разряда ( $I$  [А]) в случае принятия гипотезы (п. 1) и выражение в виде функции  $L = f(V, \nu, I)$ .

Введем дополнительный параметр  $k$ , который будет характеризовать скорость изменения

размеров структуры от изменения параметров: в данном случае мы имеем «мгновенное изменение» параметра  $k$ , для его вычисления для группы измерений при фиксированных  $P$ ,  $I$  и  $v$  необходимо построить графики зависимостей  $d(V)$  и  $L(V)$  (рис. 4).

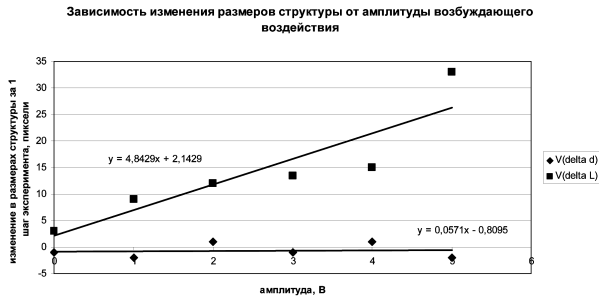


Рис. 4. Экспериментальные данные и коэффициент скорости изменения размеров

После этого, аппроксимировав точки прямой (в обработке мы намеренно упрощаем используемые модели с целью выявления имеющихся зависимостей: далее выявленные зависимости будут обработаны более тщательно), мы можем найти коэффициент  $k$ , характеризующий скорость изменения линейных размеров структуры при фиксированных  $P$ ,  $I$  и  $v$ . Иными словами,  $k = \text{tg}(\alpha)$  или  $k$  – это коэффициент в выражении  $y = kx + b$ .

Построив подобные графики для всех экспериментов, можно получить таблицу с данными и характеризующие ее графики зависимостей  $k_d(v)$  и  $k_L(v)$ , отражающие изменение скорости колебаний размеров ППС в двух направлениях ( $L$  и  $d$ ).



Рис. 5. Скорость изменения вертикального размера структуры

На рис. 5 показано, что при различных токах картина изменений скоростей (для направления  $L$ ) выглядит по-разному, при этом можно четко выделить 2 пика в областях:  $[15...20]$  Гц и  $> 40$  Гц, которые показывают, что при определенных частотах возбуждающего воздействия, возможно, наблюдаются эффекты коллективного воздействия на ППС или же явления резонансной частоты, когда совокупность факторов усиливает возбуждающее воздействие. Также видно, что при высоких токах разряда влияние на структуру меньше, чем при малых.

Зависимость же скорости изменения размера структуры по горизонтали носит сложный характер, возможно, имеющий флуктуационную природу. Этот вывод можно сделать из предположения, что из-за сил электростатического отталкивания при уменьшении размера структуры из заряженных частиц в одной плоскости она должна увеличиваться в размерах в другой плоскости, и наоборот, чего не наблюдается.

Также был проведен анализ изменения размеров структуры в пределах одного эксперимента: исходя из вышеизложенного можно определить только скорость изменения линейных размеров структуры, но в то же время важной является информация о том, как изменялись эти размеры – сжималась ППС или расширялась.

Эти данные необходимы для адекватного построения аналитического вида зависимости на различных интервалах частоты ( $v$ ). Для определения того, насколько изменились размеры ППС за один эксперимент для каждого эксперимента, введем параметр  $z$ , который будет равняться разности между размером структуры в начале эксперимента и в конце.

Построим графики зависимостей  $z_L(v)$  и  $z_d(v)$  при различных токах.

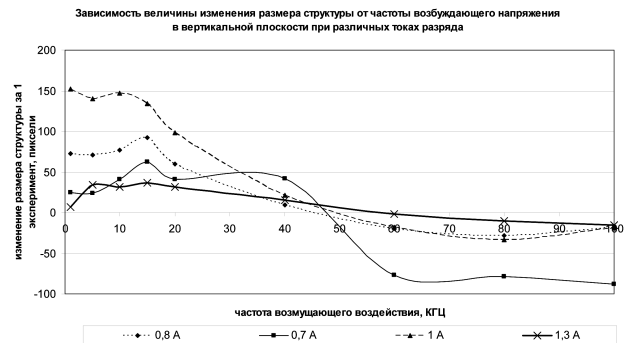


Рис. 6. Изменение вертикального размера структуры за 1 эксперимент

Из графика на рис. 6 видно, что ППС перестает растягиваться в вертикальном направлении при частотах возмущения от 40 до 60 кГц. Точки пересечения кривых с осью размеров структуры совпадают со значениями, подобранными экспериментально, – частотами, при которых вертикальный размер структуры не изменяется.

При этом в горизонтальном направлении не наблюдается картины, аналогичной вертикальному. Как было отмечено выше, при изменении одного из линейных параметров ППС, например  $L$ , должна меняться и  $d$ , то есть при сжатии ППС по вертикали она должна расширяться по горизонтали. Но на основании второго графика мы видим, что при росте длины кристалла ( $L$ ) его толщина флуктуирует при возмущениях с частотами, лежащими в промежутке от 1 до 50 кГц, а некоторые зависимости можно проследить лишь после возмущений частотами выше 50 кГц.

Для проверки гипотезы о том, что зависимости между линейными размерами ППС от величин возмущающих параметров ( $V, \nu$ ) и параметров разряда ( $I$ ) не существует, был использован корреляционный анализ.

Проанализировав наличие / отсутствие зависимостей и опуская расчеты, можно сделать следующие выводы.

1. Гипотеза об отсутствии зависимости между линейными размерами ППС по горизонтали ( $d$ ) от амплитуды проверена по  $t$ -критерию на уровне значимости 5 % и для интервала  $\nu = [1...40]$  кГц принята, а для интервала  $\nu = [60...100]$  кГц отвергнута.

2. Гипотеза об отсутствии зависимости между линейными размерами ППС по вертикали ( $L$ ) от амплитуды проверена по  $t$ -критерию на уровне значимости 5 % и отвергнута на всем интервале.

3. Гипотезу о зависимости между линейными размерами ППС ( $d$  и  $L$ ) от частоты и силы тока исходя из полученных данных проверить нельзя, так как исходные размеры структур различны. Изменение размера структуры в ходе эксперимента зависит от изначальных размеров ППС, то есть определить зависимость между изменением размеров ППС, частотой и током не представляется возможным, так как при проведении эксперимента с другой частотой / током ППС формировалась заново.

При этом можно оценить, как изменялись линейные размеры ППС, используя данные о том, насколько выросла / уменьшилась структура при различных параметрах ( $I, V, \nu$ ). Оценив наличие зависимости между  $I, \nu$  и  $z$  – коэффициентом, показывающим, как изменились линейные размеры структуры за один эксперимент, и рассчитав коэффициенты корреляции для направления  $d$  и  $L$ , можно сказать: гипотеза об отсутствии зависимости между изменением линейных размеров ППС ( $L$ ) от частоты проверена по  $t$ -критерию на уровне значимости 5 % и отвергнута; гипотеза об отсутствии зависимости между изменением линейных размеров ППС ( $d$ ) от частоты проверена по  $t$ -критерию на уровне значимости 5 % и принята.

4. Для проверки гипотезы о том, что возмущающие параметры ( $\nu$ ) и параметры разряда ( $I$ ) не влияют на изменение линейных размеров ППС, воспользуемся дисперсионным анализом и, опустив расчеты, отметим, что гипотеза о влиянии частоты возмущения ( $\nu$ ) на изменение вертикальных линейных размеров ППС ( $L$ ) проверена по  $F$ -критерию на уровне значимости 5 % и принята.

5. Гипотеза о влиянии тока разряда ( $I$ ) на изменение вертикальных линейных размеров ППС ( $L$ ) проверена по  $F$ -критерию на уровне значимости 5 % и отвергнута.

Влияния тока разряда на изменение размеров структур либо нет, либо оно незначительно относительно остальных факторов.

6. Повторив расчеты для горизонтальных размеров, выясним, что гипотеза о влиянии частоты возмущения на изменение горизонтальных линейных размеров ППС ( $d$ ) проверена по  $F$ -критерию на уровне значимости 5 % и принята.

7. Аналогично гипотезе о влиянии тока разряда ( $I$ ) на изменение горизонтальных линейных размеров ППС ( $d$ ) проверена по  $F$ -критерию на уровне значимости 5 % и отвергнута.

После выявления влияющих факторов необходимо определить зависимость между линейными размерами ППС и величинами возмущающих параметров ( $V, \nu$ ) и параметрами разряда ( $I$ ), в случае принятия гипотезы об их влиянии и выразить в виде функции  $L = f(V, \nu, I)$ .

Ранее было показано отсутствие влияния тока на размеры структуры и флуктуационный характер изменений размера ППС в направлении  $d$ . Таким образом, представляется возможным построить зависимость между размерами в направлении  $L$  от частоты ( $\nu$ ) и амплитуды ( $V$ )

Модель аналитической зависимости:

$$L_{I_i} = \sum_{i=-3, j=1}^{3,6} A_i * V^i + \sum_{i=-3, j=1}^{3,6} B_i * \nu^j + C. \quad (1)$$

Для подбора параметров  $A_{1..6}, B_{1..6}$  и  $C$  воспользуемся методом наименьших квадратов и методами оптимизации целевых функций.

Целевая функция:

$$W = \sum (L_{\text{нрэксп}} - L_{\text{теор}})^2 \rightarrow 0. \quad (2)$$

Использованные методы: «Поиск решения», метод случайных выбросов, метод Хука – Дживса.

Полученные модели зависимостей:

$$L_{I=0,8} = 3,14V^3 - 0,000\nu^3 - 33V^2 + 0,11\nu^2 + 116,7V - 11,24\nu + 6,57\frac{1}{V} - 0,44\frac{1}{V^2} - 1244\frac{1}{\nu} + 690,46\frac{1}{\nu^2} + 406. \quad (3)$$

Адекватность модели для тока  $I = 0,8$  мА: модель адекватна на уровне 10 %.

$$L_{I=0,7} = 2,49V^3 - 25,81V^2 + 83,46V - 0,18\nu + 3,52\frac{1}{V} - 0,07\frac{1}{V^2} - 25,698\frac{1}{\nu} + 182,61\frac{1}{\nu^2} + 139,50. \quad (4)$$

Адекватность модели для тока  $I = 0,7$  мА: модель адекватна на уровне 10 %.

$$L_{I=1} = 0,39V^3 - 9,66V^2 + 79,38V - 0,16\nu^2 - 10,54\nu + 2,23\frac{1}{V} - 0,17\frac{1}{V^2} - 1209\frac{1}{\nu} + 865,63\frac{1}{\nu^2} + 339,51. \quad (5)$$

Адекватность модели для тока  $I = 1$  мА: модель адекватна на уровне 10 %.

$$L_{I=1,3} = 0,88V^3 + 0,0004\nu^3 - 11,09V^2 + 42,60V - 0,07\nu^2 - 3,2\nu + 1,19\frac{1}{V} - 0,02\frac{1}{V^2} - 123,56\frac{1}{\nu} + 89,54\frac{1}{\nu^2} + 115,21. \quad (6)$$

Адекватность модели для тока  $I = 1,3$  мА: модель адекватна на уровне 10 %.

### ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Адекватность моделей на уровне 10 % объясняется введением в расчеты данных для различных начальных размеров ППС и при раздельной обработке экспериментальных данных, например, по начальному размеру ППС и выделении двух интервалов частот возмущений (для сжатия структур и их растяжения) возможно построение моделей, адекватных на уровне не менее 5 %.

Тем не менее подстановка новых экспериментальных данных в модели 6–9 дает среднее расхождение 6 и 9 пикселей при размере структуры соответственно 150 и 210 пикселей, полностью входя в доверительный интервал и позволяя говорить об адекватности полученных зависимостей.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описан новый метод воздействия на комплексную низкотемпературную плазму путем наложения гармонического сигнала на разрядный ток тлеющего разряда. Исследовано влияние слабых (порядка 1 % от падения напряжения на разряде) гармонических сигналов частоты 10–100000 Гц на электростатическое поле плазмы положительного столба тлеющего разряда с упорядоченными структурами.

Обнаружены и описаны эффекты изменения вертикальных размеров кристалла, его положения в пространстве разряда в зависимости от амплитуды и частоты возмущающего сигнала, механизмы которых подлежат определению. Зафиксированы вынужденные колебания частиц разряда и стабилизация пылевых структур, совершающих самостоятельные колебания, определяемые модуляцией электрического поля разряда, схожие с колебаниями, ранее зарегистрированными в ВЧ-разряде [1].

Обнаружена возможность плавно менять положение кристалла в разряде по высоте и изменять форму кристалла путем изменения амплитудного значения возмущающего сигнала.

Для наблюдавшихся эффектов построены графики, отражающие характер зависимостей от частот и амплитуд вводимых возмущений на частотах 1, 5, 10, 15, 20, 40, 60, 80, 100 кГц, при давлениях газа ( $N_2$ ) 0,2, 0,4, 0,6 мм рт. ст. и падениях напряжения 700, 1000 и 1300 В.

Полученные данные были обработаны с целью выявления влияющих параметров, после чего были построены аналитические зависимости, отражающие зависимость линейных размеров ППС от параметров вводимого возмущения. Модели проверены и являются достаточно адекватными для того, чтобы с их помощью осуществлять целевое управление параметрами ППС в тлеющем разряде соответствующих условий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василяк Л. М., Ветчинин С. П. и др. Динамика пылевых частиц в плазме при модуляции высокочастотного напряжения разряда // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 16. С. 14–21.
2. Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Ивлев А. В., Морфилл Г. Е., Поляков Д. Н., Пустыльник М. Ю., Томас Х. М., Фортов В. Е. Параметрическая неустойчивость плазменно-пылевого кластера // 36-я Междунар. конф. по физике плазмы и УТС (Тезисы докладов конференции), 9–13 февраля 2009 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXVI/Lt/ru/KU-Visilyak.doc](http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXVI/Lt/ru/KU-Visilyak.doc)
3. Гоголев А. Е. Эффекты модуляции тока в комплексной низкотемпературной плазме тлеющего разряда // Материалы Пятнадцатой всерос. науч. конф. студентов-физиков и молодых ученых (ВНКФС-15, Кемерово – Томск). Екатеринбург; Кемерово; Томск: Изд-во АСФ России, 2009. С. 274–275.
4. Гоголев А. Е., Мошевикин А. П. Изучение взаимодействия переменного напряжения и комплексной низкотемпературной плазмы тлеющего разряда // Четырнадцатая Всерос. науч. конф. студентов-физиков и молодых ученых (ВНКФС-14, Уфа). Екатеринбург; Уфа: Изд-во АСФ России, 2008. С. 545–546.
5. Луизова Л. А., Хахаев А. Д. Проблемы и перспективы исследования упорядоченных структур в плазме [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://plasma.karelia.ru/pub/arc/plasma\\_crystals.pdf](http://plasma.karelia.ru/pub/arc/plasma_crystals.pdf)
6. Молотков В. И., Пустыльник М. Ю., Торчинский В. М., Фортов В. Е. Плазма тлеющего разряда постоянного тока с пылевыми частицами: самоорганизация и особенности поведения // Тезисы докладов четвертого междунар. симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.isuct.ru/istapc2005/proc/p12.pdf](http://www.isuct.ru/istapc2005/proc/p12.pdf)
7. Молотков В. И., Неведов А. П., Петров О. Ф., Торчинский В. М., Фортов В. Е., Храпак А. Г., Храпак С. А. Неустойчивость пылевых колебаний в положительном столбе разряда постоянного тока // Научно-исследовательский центр теплофизики импульсных воздействий Российской академии наук, 127 412, Москва, Россия, журнал «Исследовано в России» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/1999/053.pdf>
8. Молотков М. Ю., Пустыльник В. М., Торчинский В. М., Фортов В. И. Плазменно-пылевые структуры при различных внешних воздействиях // Тез. докл. четвертого междунар. симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.isuct.ru/istapc2005/proc/5-11.pdf>
9. Balabanov V. V., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Nefedov A. P., Polyakov D. N., Fortov V. E. The Effect of the Gas Temperature Gradient on Dust Structures in a Glow-Discharge Plasma // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2001. Vol. 92. № 1. P. 86–92.
10. Gogolev A. E., Khakhaev A. D., Pergament A. L., Shtykov A. S. Effects of Harmonic Modulation of Current in Glow Discharge Dusty Plasma with Ordered Structures // Contributions to Plasma Physics. 2011. Vol. 51. Issue 6. P. 498–504.
11. Podryadchikov S. F., Khakhaev A. D. Influence of macroparticle matter on characteristics of ordered dusty plasma structures // Conference on Strongly Coupled Coulomb Systems, June 20–25, 2005, Moscow, Russia. Book of abstracts [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.ihed.ras.ru/scscs2005/abstracts/scscs05\\_abstracts.pdf](http://www.ihed.ras.ru/scscs2005/abstracts/scscs05_abstracts.pdf)
12. Silver J., Thomas E. Jr. Microparticle transport in an argon dc glow discharge dusty plasma due to an applied temperature gradient Patricia Engel (University of Notre Dame) [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://nam.physics.auburn.edu/conferences/aps04/engel\\_aps\\_2004.pdf](http://nam.physics.auburn.edu/conferences/aps04/engel_aps_2004.pdf)

СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ДАНИЛОВ

аспирант, инженер кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет

sdanilov@psu.karelia.ru

АНАТОЛИЙ ДМИТРИЕВИЧ ФОФАНОВ

доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет

afofanov@psu.karelia.ru

## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ОДНОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И РАСЧЕТ КООРДИНАТ АТОМОВ В НИХ

Углеродные нанотрубки – структуры, обладающие рядом уникальных физических свойств, определяемых внутренним строением. В зависимости от особенностей взаимного расположения атомов в нанотрубках выделяют несколько типов таких структур. Описана методика, на основании которой возможен расчет координат атомов и моделирование всего спектра однослойных углеродных нанотрубок. Использование данных моделей делает возможным идентификацию наличия нанотрубок в исследуемых образцах и расчет их физических свойств.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, алгоритм построения, структура, координаты атомов

### ВВЕДЕНИЕ

Углеродные нанотрубки сочетают в себе свойства молекул и твердого тела и могут рассматриваться как промежуточное состояние вещества. Эта особенность привлекает к себе внимание исследователей, изучающих фундаментальные особенности поведения данного объекта в различных условиях. Углеродные нанотрубки проявляют ряд уникальных свойств. Например, нанотрубки, имеющие различный угол ориентации графитовой плоскости относительно оси трубки, имеют различные электронные характеристики, что может быть использовано при создании электронных устройств следующего поколения. Указанные особенности, представляющие значительный научный интерес, могут быть положены в основу эффективного прикладного использования нанотрубок в различных областях науки и технологии. Несмотря на огромное число теоретических и экспериментальных работ по изучению углеродных кластерных наносистем, до сих пор нет единого подхода, позволяющего объяснить структуру и свойства новых форм углерода. В связи с этим приобретает особую актуальность развитие методов нахождения координат атомов в данных нанобъектах, которые необходимы для анализа структуры и теоретического расчета физических свойств.

Цель данной работы – разработка алгоритма формирования координат атомов в однослойных углеродных трубках любых типов.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ОДНОСЛОЙНЫХ НАНОТРУБОК

Модельно формирование однослойной углеродной нанотрубки можно рассмотреть как процесс сворачивания плоской графеновой сетки в

круговой цилиндр. Основными характеристиками структуры получаемых таким образом нанотрубок являются их длина, диаметр и такой параметр, как хиральность. Хиральность характеризуется двумя целыми числами ( $n, m$ ), которые указывают местонахождение того шестиугольника сетки, который в результате сворачивания должен совпасть с шестиугольником, находящимся в принятом начале координат. Эти числа называют индексами хиральности. Индексы однозначно задают размер слоя и направление сворачивания [1].

Согласно многим литературным источникам [3], [4], [5], [6], [7], [8], индексы хиральности задают трансляции вдоль осей  $x$  и  $y$  в кристаллографической гексагональной сетке с углом между векторами элементарных трансляций  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$ , равным  $60^\circ$ . Однако это не совсем верно, так как с точки зрения классической кристаллографии данный угол равен  $120^\circ$  и, соответственно, ячейка выглядит несколько иным образом (рис. 1).

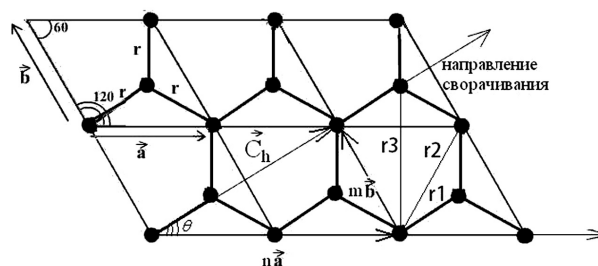


Рис. 1. Гексагональная сетка, при сворачивании которой образуется нанотрубка ( $r_1, r_2, r_3$  – межатомные расстояния в графитовом кольце)

Для указания направления сворачивания вводится вектор хиральности  $\vec{C}_h = n\vec{a} + m\vec{b}$ , где  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  – вектора элементарных трансляций вдоль двух направлений сетки, а  $n$  и  $m$  – количество трансляций вдоль соответствующих направлений, являющихся индексами хиральности. Также при этом следует иметь в виду, что в графите модули векторов элементарных трансляций ( $|\vec{a}|$ ,  $|\vec{b}|$ ) равны между собой и составляют величину 2,46 Å.

Направление, перпендикулярное вектору хиральности, – это ось формируемой нанотрубки. Таким образом, при сворачивании сетки вдоль данного вектора вокруг оси формируются «витки» нанотрубки. Модуль вектора хиральности определяет угол хиральности (угол сворачивания) нанотрубки (рис. 1):

$$\cos(\theta) = \frac{2n - m}{2\sqrt{n^2 - nm + m^2}}. \quad (1)$$

В зависимости от угла хиральности выделяют следующие типы нанотрубок:

1. Для нанотрубок с индексом  $m = 0$  угол хиральности равен 0°. Такие трубки принято называть трубками типа «зиг-заг» (рис. 2а), которые описываются набором индексов  $(n, 0)$ ;

2. В трубках с индексом  $n = 2m$  угол хиральности равен 30°. Такие трубки, также называемые трубками типа «кресло» (рис. 2б), описываются набором индексов  $(2m, m)$ ;

3. Указанные выше типы нанотрубок считаются идеальными, так как при сворачивании графенового слоя сохраняется идеальная структура (то есть не происходит искажения структуры гексагональной сетки). Данные идеальные трубки – предельные случаи. Все остальные нанотрубки – неидеальные, или хиральные, – имеют углы хиральности от 0 до 30° [1], [2], [3], [4], [6], [7]. При формировании хиральной нанотрубки получается своего рода «спираль» в расположении атомов углерода (рис. 2с).

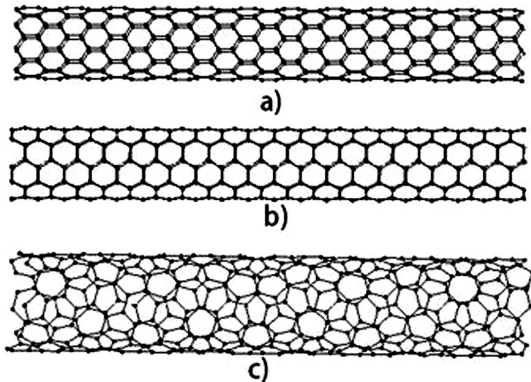


Рис. 2. Нанотрубки типа «зиг-заг» ( $n = 9, m = 0$ ) (а), «кресло» ( $n = 10, m = 5$ ) (б) и хиральные ( $n = 11, m = 3$ ) (в)

В случае когда строится идеальная нанотрубка, при «заворачивании» вектора  $\vec{C}_h$  его конец совмещается с началом и образуется один замкнутый круговой виток. Таким образом, данный вектор соединяет два эквивалентных узла в сетке. Если же нанотрубка является хиральной, то формируется не один замкнутый виток, а «спираль». Но при этом начало и конец данной спирали (вне зависимости от количества полученных витков) – это также эквивалентные положения узлов сетки.

Модуль вектора хиральности определяет длину одного такого витка:

$$L = |\vec{C}_h| = a\sqrt{(n^2 - nm + m^2)}. \quad (2)$$

Из известной формулы для длины окружности можно получить, что диаметр витка, равно как и диаметр получаемой нанотрубки, вычисляется как:

$$D = \sqrt{(n^2 - nm + m^2)} \frac{\sqrt{3}r}{\pi} = \sqrt{(n^2 - nm + m^2)} \frac{a}{\pi}. \quad (3)$$

Здесь  $r$  – межатомное расстояние в графите, равное 1,42 Å,  $a$  – параметр гексагональной ячейки, равный 2,46 Å [1], [5].

Для характеристики нанотрубки также вводится такой параметр, как степень хиральности [1], определяемый следующим образом:

$$K_{ch} = \frac{m}{n}. \quad (4)$$

Так как индексы хиральности – целые числа, то в нанотрубках одинаковой степени хиральности соответствующие индексы кратны между собой. В этой связи можно ввести такой параметр, как «номер нанотрубки», который будет определяться как наибольший общий делитель (НОД) индексов хиральности:

$$d = \text{НОД}(n, m). \quad (5)$$

Исходя из формулы (3) с учетом (5) можно сделать вывод, что для нанотрубок одинаковой степени хиральности (например, для трубок с индексами (2, 1) и (6, 3)) набор возможных диаметров дискретен, то есть нанотрубка не может иметь абсолютно произвольный диаметр, он определяется индексами хиральности.

Определенный таким образом параметр  $d$  – один из параметров симметрии, которые позволяют определить основные операции симметрии и принципы построения нанотрубок. Следующий параметр симметрии –  $d_r$ :

$$d_r = \text{НОД}(2n - m, 2m - n). \quad (6)$$

Как и диаметр, длина нанотрубки также не может быть абсолютно произвольной. Это связано с тем, что в направлении, перпендикулярном направлению сворачивания трубки, то есть вдоль оси нанотрубки (или по ее длине), также

имеется определенное количество ячеек графитовой сетки между двумя эквивалентными узлами, которое определяет «мотив», или уникальный, неповторимый характер расположения атомов вдоль оси нанотрубки. Так, вдоль оси нанотрубки состоит из целой последовательности таких «мотивов». Таким образом, длина также зависит от хиральности нанотрубки. Она определяется трансляционным вектором  $\vec{T} = t_1 \vec{a} + t_2 \vec{b}$ , перпендикулярным вектору хиральности (рис. 3), который характеризует минимальную длину (или шаг, трансляцию) вдоль направления оси нанотрубки.

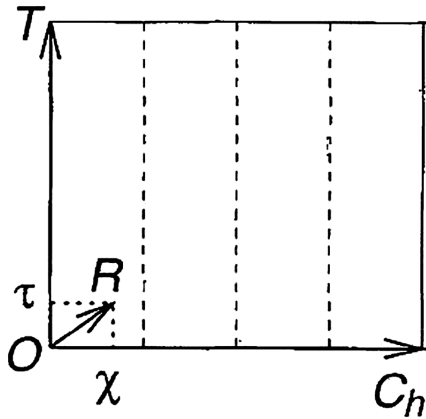


Рис. 3. Минимальная область «сетки», используемая для формирования нанотрубки

Данный вектор соединяет два эквивалентных положения узлов сетки вдоль оси получаемой нанотрубки. При этом коэффициенты  $t_1$ ,  $t_2$  и длина вектора  $\vec{T}$  определяются следующим образом:

$$t_1 = \frac{2m-n}{d_R}, \quad t_2 = -\frac{2n-m}{d_R}, \quad |\vec{T}| = \frac{\sqrt{3}L}{d_R}. \quad (7)$$

Таким образом, после того как определены вектор  $\vec{C}_h$ , соответствующий минимальным индексам трубки с данной степенью хиральности, и вектор трансляции, в гексагональной сетке можно выделить прямоугольную область, ограниченную данными векторами, – так называемую трансляционную ячейку (рис. 3). При транслировании данной ячейки вдоль направления вектора  $\vec{C}_h$  получается часть гексагональной сетки, при сворачивании которой можно сформировать нанотрубку большего радиуса. Для вариации радиуса следует использовать различные индексы хиральности. При транслировании данной ячейки вдоль направления вектора  $\vec{T}$  получается часть гексагональной сетки, при сворачивании которой можно сформировать нанотрубку большей длины. Для вариации длины следует использовать различное целое число трансляционных векторов  $\vec{T}$ .

Область, ограниченная векторами хиральности  $\vec{C}_h$  и вектором, характеризующим длину нанотрубки, содержит  $N$  гексагональных колец, где  $N$  находится из следующего соотношения:

$$N = \frac{2(n^2 - nm + m^2)}{d_R}. \quad (8)$$

Для расчета остальных параметров симметрии (которые будут определять процедуру сворачивания) необходимо найти вектор симметрии  $\vec{R} = p\vec{a} + q\vec{b}$  (рис. 3). Параметры  $p$  и  $q$  вычисляются из следующих соотношений:

$$d = nq - mp, \quad 0 \leq p \leq n/d, \quad 0 \leq q \leq m/d, \quad (9)$$

где  $d$  рассчитывается по формуле (5).

Иногда вместо вектора симметрии в качестве аналога выделяют базовые операции симметрии  $R = (\psi, \tau)$  (рис. 3), где

$$\tau = \frac{dT}{N}, \quad \psi = 2\pi \frac{M}{N}, \quad (\text{или же}) \quad \chi = \frac{\psi L}{2\pi}, \quad (10)$$

где  $\tau$  – смещение вдоль оси трубки,  $\psi$  – угол поворота вокруг оси трубки,  $\chi$  – смещение вдоль вектора хиральности, соответствующее углу поворота  $\psi$ ,  $M$  – число оборотов на  $360^\circ$  вокруг оси трубки, находящееся из соотношения:

$$M = [(2n - m)p + (2m - n)q] / d_R. \quad (11)$$

В случае если строится нанотрубка типа «зигзаг», то есть индексы хиральности  $(n, 0)$ , параметры  $p = 1$ ,  $q = 1$ , это приводит к значению  $M = 1$  [4], [7].

#### МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ КООРДИНАТ АТОМОВ В МОДЕЛЯХ ОДНОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Рассмотрим процесс формирования координат атомов на примере нанотрубки с индексами хиральности  $n = 6$ ,  $m = 2$  и одной трансляцией по длине трубки. Для этого вначале необходимо рассчитать параметры формируемой трубки по формулам (1–11) (табл. 1).

Таблица 1

Параметры нанотрубки с индексами хиральности  $n = 6$ ,  $m = 2$

Параметр	$\cos \theta$	$D, \text{ \AA}$	$K_{ch}$	$d$	$d_R$	$ \vec{T} , \text{ \AA}$
Значение	0,945	4,143	3	2	2	11,273
Параметр	$N$	$p, q$	$M$	$\tau$	$\psi$	$\chi$
Значение	28	2,1	9	0,805	2,020	4,184

На рис. 4 вектор хиральности обозначен как  $\vec{C}_{(6,2)}$ . Так как  $d = 2$ , то минимальная трубка той же степени хиральности – трубка с индексами хиральности  $n = 3$ ,  $m = 1$ . Поэтому очевидно, что трубка (6,2) получается из трубки (3,1) транслированием вдоль направления вектора хиральности  $\vec{C}_{(3,1)}$ . Можно сделать вывод, что узлы  $A$  и  $B$  – эквивалентные узлы.

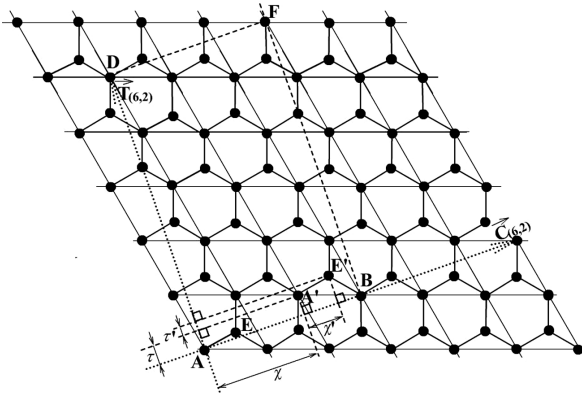


Рис. 4. Формирования координат атомов нанотрубки с индексами хиральности  $n = 6, m = 2$

Вектор трансляции, обозначенный как  $\vec{T}_{(6,2)}$  (по сути,  $T_{(6,2)} = T_{(3,1)}$ ) (рис. 4), также соединяет 2 эквивалентных узла –  $A$  и  $D$ . Таким образом, минимальная область сетки, из которой может быть образована нанотрубка с данной степенью хиральности, ограничена узлами  $A, B, F, D$  – это все эквивалентные узлы сетки. Для нанотрубки (6,2) данная область транслируется вдоль направления вектора хиральности.

В начале построения в минимальной области сетки, из которой формируется нанотрубка, выделяется двухатомная ячейка, которая содержит атомы, находящиеся в двух кристаллографически неэквивалентных позициях в гексагональной ячейке. В данном случае это узлы  $A$  и  $E$  (рис. 4).

При «сворачивании» сетки на каждом шаге для каждого атома двухатомной ячейки применяются операции симметрии  $R = (\psi, \tau)$ . Таким образом, узел  $A$  «переходит» в узел  $A', E$  – в  $E'$  (рис. 4). При этом следует отметить, что узел  $E$  дополнительно смещен относительно узла  $A$  (аналогично узел  $E'$  относительно узла  $A'$ ) как вдоль оси, так и вдоль вектора хиральности (рис. 4). Для нахождения этих дополнительных смещений следует воспользоваться следующими формулами:

$$\tau' = r \sin(30^\circ - \theta), \quad \psi' = \chi' / R_{nr}, \quad (12)$$

где  $\chi' = r \cos(30^\circ - \theta)$ ,  $30^\circ$  – максимальный угол хиральности (соответствует нанотрубке типа «кресло»),  $\theta$  – угол хиральности,  $R_{nr}$  – радиус формируемой нанотрубки.

Так как  $d \neq 1$ , на каждом шаге необходимо рассчитывать координаты эквивалентных узлов, возникающих при транслировании вдоль вектора хиральности (например, на рис. 4 при расчете координат узла  $A$  нужно рассчитывать координаты узла  $B$ ). Для этого необходимо знать дополнительные смещения вдоль оси и углы поворота вокруг оси трубки. Так, вдоль оси трубки узел, эквивалентный данному, располагается в том же положении, поэтому дополнительных смещений не будет. А вдоль вектора хиральности эквивалентный узел смещен относительно предыдущего

го эквивалентного узла (в нашем примере – узел  $B$  относительно узла  $A$ ) (рис. 4). Данное смещение аналогично дополнительному повороту вокруг оси нанотрубки на угол:

$$\Delta\psi = \frac{2\pi}{d}. \quad (13)$$

После расчета параметров  $\tau, \psi, \chi, \tau', \psi', \chi', \Delta\psi$  производится последовательное движение вдоль оси нанотрубки и расчет на каждом шаге необходимых координат атомов (в декартовой системе): координата  $x$  – положение вдоль оси трубки, а координаты  $y$  и  $z$  получаются при вращении вокруг оси:

$$\begin{cases} y = R_{nr} * \sin \varphi \\ z = R_{nr} * \cos \varphi \end{cases}, \quad (14)$$

где  $\varphi$  – текущий угол поворота вокруг оси нанотрубки.

Общее количество шагов при «расчете» нанотрубки вычисляется как:

$$count = \frac{L_{nr}}{\tau} = \frac{N_L * T}{\tau}, \quad (15)$$

где  $L_{nr}$  – длина нанотрубки,  $N_L$  – количество трансляций  $T$  по длине.

При моделировании нанотрубки следует обратить внимание на выбор индексов хиральности –  $n$  и  $m$  могут принимать ограниченное число значений. Так, индексы хиральности должны удовлетворять условиям:

$$n > 0, m \geq 0, n \geq 2m. \quad (16)$$

Также следует отметить, что если моделируются нанотрубки, индексы хиральности которых указаны с учетом распространенного в зарубежной литературе допущения, что угол между векторами элементарных трансляций в гексагональной ячейке равен  $60^\circ$ , то необходим пересчет указанных индексов хиральности в индексы, соответствующие классическому представлению (учитывающие, что угол равен  $120^\circ$ ). Тогда следует воспользоваться следующими формулами перехода:

$$n_2 = n_1 + m_1, \quad m_2 = m_1, \quad (17)$$

где  $n_1, m_1$  – индексы хиральности для ячейки с углом  $60^\circ$ ,  $n_2, m_2$  – индексы хиральности для ячейки с углом  $120^\circ$ .

#### NANOTUBE – ПРОГРАММА ГЕНЕРАЦИИ КООРДИНАТ АТОМОВ В МОДЕЛЯХ ОДНОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

На основе приведенных выше теоретических данных был разработан алгоритм формирования координат атомов в замкнутых однослойных углеродных нанотрубках любого типа. С использованием данного алгоритма на языке программирования Фортран была написана программа *NanoTube*.



При помощи полученной программы были смоделированы нанотрубки различного радиуса, длины, степени хиральности. При этом оказалось, что при малых значениях индексов хиральности радиус формируемой трубки получается настолько мал, что формируется некая структура, которую довольно трудно назвать нанотрубкой (рис. 5). Также следует отметить, что межатомные расстояния в таких структурах зачастую далеки от «нормальных» расстояний в графите (рис. 1, табл. 2).

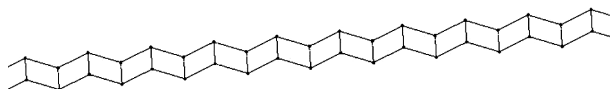


Рис. 5. Фрагмент нанотрубки с индексами хиральности  $n = 2, m = 1$  длиной 50 Å

При больших индексах хиральности происходит постепенное формирование структур, которые уже представляют замкнутые цилиндрические поверхности (рис. 2). При этом с увеличением радиуса нанотрубки межатомные расстояния выравниваются и приближаются к «графитовым» расстояниям (рис. 1, табл. 1).

Таблица 2

Сравнение межатомных расстояний в различных образцах

Расстояние (рис. 6)	Графит, $R = \infty$	Нанотрубка, $n = 2, m = 1, R = 0,67813 \text{ \AA}$	Нанотрубка, $n = 40, m = 20, R = 13,5627 \text{ \AA}$
$r_1$	1,4203 Å	1,1746 Å 1,4046 Å	1,4196 Å 1,4202 Å
$r_2$	2,4600 Å	1,8310 Å 2,4598 Å 2,4601 Å	2,4584 Å 2,4600 Å
$r_3$	2,8406 Å	2,7260 Å	2,8354 Å 2,8402 Å

#### АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ПРОГРАММ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОДНОСЛОЙНЫХ НАНОТРУБОК

В процессе работы также был произведен поиск в сети Интернет аналогичных программ. В частности, были выделены 2 программы – MCAD [3] и TubeVbs [8]. Общая черта обеих программ – использование гексагональной ячейки с углом 60°. Рассмотрим особенности алгоритмов данных программ.

**MCAD.** Формирование координат атомов в нанотрубке происходит в несколько этапов:

1. На основе параметров одной гексагональной ячейки формируются координаты всех узлов некоторой сетки максимально возможного размера;

2. На основании введенных пользователем параметров моделируемой нанотрубки (длины и индексов хиральности) в данной сетке выделяется область, из которой будет сформирована нанотрубка;

3. Для каждого узла сетки определяется, принадлежит ли он области, выделенной на втором шаге. Если принадлежит, то производится расчет декартовых координат на поверхности цилиндрически сформированной трубки;

4. Результат выводится на экран с возможностью сохранения файла координат.

Особенности данной программы:

1. Написана на языке JAVA, что дает возможность компилировать и запускать под различными операционными системами;

2. Медленная работа по причине множества расчетов;

3. Выделяется мало памяти, поэтому нельзя моделировать большие нанотрубки;

4. Выходной файл – файл формата \*.HIN (входной для программы HyperChem).

**TubeVbs.** Данный алгоритм схож с разработанным нами алгоритмом, так как основывался на тех же теоретических выкладках [5], [7]. Но в нем есть свои особенности:

1. Вектора хиральности и трансляции откладываются от центра гексагонального кольца, то есть в «начальном» положении отсчета нет атома;

2. Для моделирования трубки используются «винтовые» и «вращательные» операции симметрии:

а) «винтовой мотив» определяется как количество «двухатомных» ячеек, укладываемых вдоль вектора хиральности;

б) «вращательный мотив» определяется как количество «винтовых мотивов» вдоль оси трубки;

3. В программе учитывается возможность радиального искажения трубки: она может не являться идеальным цилиндром, у которого в основании – окружность.

Особенности данной программы:

1. Программа написана на языке Visual Basic Script, что позволяет запускать ее только в среде Windows;

2. Пользователь не может задать длину моделируемой трубки, лишь число трансляций вдоль оси, что не очень удобно;

3. Высокая скорость работы, малые объемы требуемой памяти;

4. Создается файл формата \*.XYZ, содержащий лишь координаты атомов, что затрудняет использование данных файлов в других используемых нами программах.

Особенности разработанной программы **NanoTube:**

1. Программа написана на языке программирования Фортран, что позволяет компилировать и запускать ее под разными операционными системами;

2. Высокая скорость работы и малые объемы требуемой памяти;

3. В процессе работы пользователю представляются именно физические параметры модели-

руемой трубки, которые он может откорректировать;

4. Выходной файл – файл формата \*.DXR, который необходим для программ, реализующих расчет теоретических картин рассеяния рентгеновских лучей полученными объектами. Эти картины необходимы для интерпретации данных рентгенографических экспериментов по изучению структуры углеродных материалов [2].

Для сравнения программы *NanoTube* с другими программами (*MCAD*, *TubeVbs*) в каждой из них были смоделированы одинаковые нанотрубки (радиуса  $R_{Ntr} = 3,856 \text{ \AA}$  и длины  $L_{Ntr} = 41,964 \text{ \AA}$ ) и рассчитаны дифракционные картины рассеяния (в качестве критерия сравнения была взята интерференционная функция рассеяния, условно обозначенная как  $H(S)$ ). Так, для программ *MCAD* и *TubeVbs* были приняты индексы хиральности  $n = 8$ ,  $m = 3$ , а для программы *NanoTube*, исходя из формул перехода (17), соответствующие индексы хиральности равнялись  $n = 11$ ,  $m = 3$ .

Результат сравнения представлен на рис. 6.

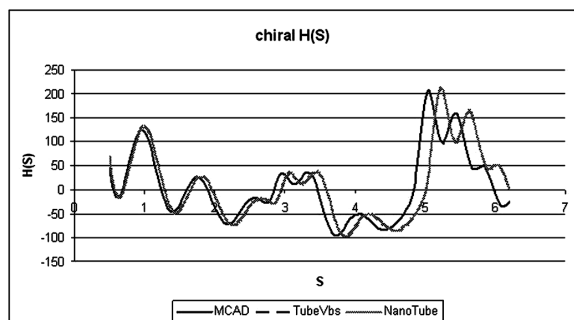


Рис. 6. Зависимости  $H(S)$  для хиральных образцов, полученных разными программами

На приведенном графике видно, что зависимости  $H(S)$ , рассчитанные на основе координат атомов в нанотрубке, сгенерированных программой *TubeVbs* и нашей программой *NanoTube*, практически полностью совпадают. А  $H(S)$ , рассчитанная на основе координат, сгенерированных *MCAD*, всегда смещена, и чем больше модуль дифракционного вектора  $S$ , тем больше смещение.

С чем связано такое смещение, остается лишь догадываться, так как исходного кода к программе *MCAD* нет. В связи с этим возникают вполне обоснованные сомнения в корректности работы данной программы и ее использовании.

## ВЫВОДЫ

Результатом данной работы является алгоритм, позволяющий получить координаты атомов в широком спектре однослойных углеродных цилиндрических нанотрубок различной длины, радиуса, степени хиральности. На основе генерируемых при помощи данной программы моделей нанотрубок возможен тщательный анализ получаемых таким образом структур с точки зрения особенностей внутреннего строения и их физических свойств. Кроме того, путем сопоставления теоретически рассчитанных дифракционных картин рассеяния, получаемых от сгенерированных моделей, и экспериментальных картин рассеяния рентгеновских лучей от реальных объектов возможна идентификация присутствия нанотрубок в исследуемых образцах.

Исследования проведены при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы № П801 от 24 мая 2010 года.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беленков Е. А. Закономерности структурного упорядочения многослойных углеродных нанотрубок // Известия Челябинского научного центра. 2001. Вып. 1. С. 25–30.
- Кучер Е. В., Фофанов А. Д., Никитина Е. А. Компьютерное моделирование атомной структуры углеродной составляющей шунгита различных месторождений // Исследовано в России. 2002. № 102. С. 1113–1121 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/102.pdf>
- Contreras M. L., Benitez E., Alvarez J., Rozas R. Algorithm for Nanotubes Computer Generation with Different Configuration // Algorithms. 2009. Vol. 2. P. 108–120 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mdpi.com/1999-4893/2/1/108/pdf>
- Dresselhaus M. S., Dresselhaus G., Saito R. Carbon fibers based on C60 and their symmetry // Phys. Rev. B. 1992. Vol. 45. № 11. P. 6234–6242.
- Dresselhaus M. S., Dresselhaus G., Saito R. Physics of carbon nanotubes // Carbon. 1995. Vol. 33. № 7. P. 883–891.
- Eklund P. C., Holden J. M., Jishi R. A. Vibrational modes of carbon nanotubes: spectroscopy and theory // Carbon. 1995. Vol. 33. № 7. P. 959–972.
- Jishi R. A., Dresselhaus M. S., Dresselhaus G. Symmetry properties of chiral carbon nanotubes // Phys. Rev. B. 1993. Vol. 47. № 24. P. 671–674.
- White C. T., Robertson D. H., Mintmire J. W. Helical and rotational symmetries of nanoscale graphitic tubules // Phys. Rev. B. 1993. Vol. 47. № 9. P. 5485–5488.

**АНАТОЛИЙ ФЕДОРОВИЧ УСОВ**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
начальник научно-организационного отдела, Кольский  
научный центр РАН (г. Апатиты)  
*usov@admksk.apatity.ru*

## ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

В статье представлены результаты разработки техники и технологии электроимпульсного бурения скважин, резания горных пород в технологических процессах проходки щелей в массиве, разрезания блоков камня, зачистки поверхности массива и блоков и др., дезинтеграции руд и технических материалов.

Ключевые слова: электроимпульсное разрушение, бурение скважин, резание горных пород, дезинтеграция руд

Процесс электроимпульсного (ЭИ) разрушения материалов положен в основу многих технологических приложений бурения и резания горных пород, дезинтеграции руд и различных материалов, разрушения композиционных изделий с металлической включающей (железобетонные изделия, изоляционные конструкции электрических сетей и аппаратов и т. п.). Созданные экспериментальные установки и стенды успешно опробованы в лабораторных и производственных условиях. На их основе разработаны технические задания на проектирование ряда установок различного технологического назначения.

### ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ БУРЕНИЕ СКВАЖИН

Электроимпульсное бурение скважин, особенно применительно к крепким горным породам, является весьма актуальным, так как на современном уровне развития горной техники и в ближайшие годы буровзрывной способ отбойки крепких пород от массива, по существу, будет основным. В шахтном строительстве одним из наиболее прогрессивных способов сооружения стволов и скважин большого диаметра является проведение их способом бурения, позволяющим комплексно механизировать работы по разрушению, выемке, транспортировке породы на поверхность, полностью исключить тяжелый и опасный подземный труд шахтопроходчиков. Но и новые оригинальные конструкции установок для бурения скважин большого диаметра, основанные на механических способах разрушения горных пород, не решают проблемы бурения таких скважин в крепких породах. Анализ современного состояния техники бурения скважин большого диаметра показывает, что для бурения таких скважин в крепких горных породах буровая техника разработана недостаточно.

Электроимпульсный способ может повысить скорость бурения скважин, снизить энергоемкость бурения, существенно упростить решение отдельных технологических задач в горном стро-

ительстве. Электроимпульсное бурение не ограничивается по диаметру скважины и ее глубине. Опытными работами показана возможность эффективного применения ЭИ для бурения скважин широкого спектра назначения. Опробовано бурение неглубоких взрывных скважин (5–10 м) для сооружения в скальных породах траншей и котлованов, отбойки от массива каменных монолитов. В подземных условиях на Кировском руднике ПО «Апатит» и руднике «Ена» ГОКа «Ковдорслюда» показана возможность осуществления электроимпульсного способа бурения кругового веера взрывных скважин в вертикальной плоскости с технологической глубиной до 50 м. В условиях полигона успешно опробованы технологии проходки колодцев и шахтных стволов диаметром до 1200 мм (Кольский научный центр (КНЦ) РАН, г. Апатиты, рис. 1). Опробовано бурение взрывных скважин для открытой добычи руд и бурения геологических скважин с отбором керна (в том числе для получения ориентированного керна). В производственных испытаниях бурения геологоразведочных скважин достигнута глубина 233 м. При бурении скважин метрового диаметра по мерзлым грунтам достигнута глубина 25 м и максимальная скорость бурения 2,0 м/ч (НИИ ВН, г. Томск).

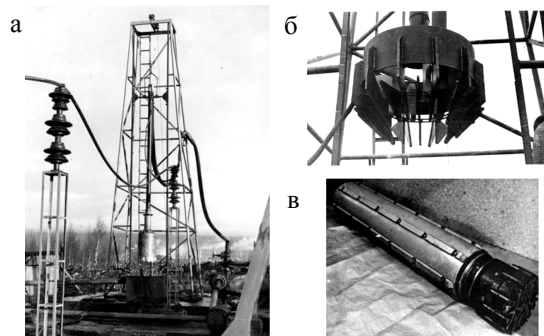


Рис. 1. Стенд электроимпульсного бурения (а); буровой наконечник для расширения скважин (б); буровой наконечник с погружным источником напряжения (в)

Электроимпульсное бурение осуществляется без вращения инструмента. Физический феномен автоматического распределения разрядов по площади забоя без вращения породоразрушающего устройства позволяет придавать скважине за счет соответствующей конструкции породоразрушающего инструмента любую произвольную форму сечения – круглую, прямоугольную, щелевую, кольцевую и т. д. – и любой профиль забоя – прямой, конический, ступенчатый, включая возможность их изменения по мере бурения скважины для расширения скважин и создания котлов (рис. 2).



Рис. 2. Устройства электроимпульсного бурения и вид пробуренных скважин

Электроимпульсному пробое и разрушению подвержена преобладающая масса горных пород и руд, за исключением лишь отличающихся сплошной металлической проводимостью (сплошные магнетитовые и полиметаллические руды). С ростом механической прочности (крепости) пород энергоёмкость ЭИ, как правило, растет, но существенно в меньшей степени, чем это имеет место при разрушении традиционными механическими способами, вследствие чего относительная эффективность ЭИ-способа в сравнении с механическими способами повышается. Поэтому, хотя ЭИ может быть применен для разрушения горных пород любой механической прочности, наибольший технико-экономический эффект его применения достигается на особо крепких горных породах и мерзлых грунтах.

Опытными работами доказана возможность достижения более высокой скорости ЭИ-бурения, чем на традиционно используемых установках (см. таблицу). Скорости ЭИ-бурения скважин большого диаметра в крепких горных породах, которые уже получены в испытаниях, соответствуют лучшим мировым показателям проходки. Для взрывных скважин это становится возможным при частоте следования импульсов не менее 15–20 в секунду, что технически реально и экспериментально подтверждено.

Электроимпульсное бурение отличается исключительно малым износом бурового инструмента и допускает его изготовление из обычных конструкционных сталей. В отличие от механических способов, не требуется прилагать к инструменту значительных усилий – достаточно лишь обеспечивать контакт инструмента с массивом. Так как рабочим инструментом, по существу, является искра, износ инструмента минимален, и проблема срока его службы не стоит.

Удельная (на 1 имп./с) скорость электроимпульсного бурения скважин, п.м/ч

Условия и место проведения испытаний	Порода	Удельная скорость бурения
Бурение взрывных скважин в подземной выработке: • диаметр 130 мм, глубина до 50 м, промывка водой, Кировский рудник АО «Апатит»;	апатитовая руда	0,35 ( <i>l</i> – 25 мм) 0,6 ( <i>l</i> – 30 мм)
• диаметр 150 мм, глубина до 50 м, промывка водой, рудник «Ена» ГОК «Ковдорслюда» (Мурманская обл.)	гнейс-слюда кварц-слюда плагиоклаз	0,25 0,3 0,35
Бурение взрывных скважин в карьере (Ленингорский ПМК): • диаметр 150 мм, диз. топливо	микрo-кварциты	1,5
Бурение разведочной скважины, в районе г. Томска: • без отбора керна, диаметр 160 мм, диз. топливо; • с отбором керна, диз. топливо; • с отбором керна, вода, нефтewодные растворы	песчаник песчаник сланец	0,5 0,6 0,8
Бурение скважин диаметром 800–1200 мм, г. Апатиты: • сплошным забоем, 800 мм, диз. топливо • кольцевым забоем, 700 мм, диз. топливо • расширение от 600 до 800 мм, диз. топливо • расширение от 800 до 1000 мм, диз. топливо	филлитовый сланец	0,05 0,15 0,3 0,7
Бурение скважин диаметром 1000–1200 мм, <i>l</i> – 300 мм, промывка дизельным топливом, район БАМ	вечномерзлый грунт	0,75–1,0

В дополнение к перечисленным выше апробированным применениям способа можно указать на возможность бурения горизонтальных опережающих скважин диаметром до 400 мм и глубиной до 15–20 м для создания врубовой полости при проходке горизонтальных выработок в крепких горных породах. Блочное исполнение элементов установки позволяет доставлять ее в труднодоступные места для выполнения незначительных по объему, но требующих специфичных технологических эффектов работ (например, бурение скважин под анкера крепления опор ЛЭП на скальном гористом массиве и т. п.). Раздельное размещение блоков энергетического и технологического обеспечения процесса допускает возможность создавать автономно работающие буровые комплексы на дне моря, в недрах Земли.

#### ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ РЕЗАНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Показана возможность ЭИ-резания горных пород в технологических процессах проходки щелей в массиве, резания блоков камня, зачистки поверхности массива и блоков [1], [5], [6]. Эффективность применения процесса повыша-

ется, если принципиально важным является требование исключить нарушение сплошности массива вне забоя. Это относится к таким процессам, как:

- добыча и обработка природного камня, в первую очередь уникального декоративного камня (в том числе вырезка заготовок архитектурных форм);
- зачистка скальных оснований под сооружения при строительстве объектов на суше и под водой (гидротехнические сооружения, дноуглубительные работы под газо- и нефтепроводы), в городской черте с ограничениями на проведение взрывных работ;
- отбор проб материала с геологических обнажений, поверхности горных выработок, с бетонных контейнеров захоронения радиоактивных и химических отходов;
- зачистка поверхностей массива и блоков от поверхностного радиоактивного и химического загрязнения;
- проходка отрезных щелей с целью ограничения воздействия на массив взрывной отбойки при сооружении выработок различного назначения.

Россия, обладая огромными запасами природных каменных материалов, имеет большие потенциальные возможности для дальнейшего наращивания мощностей камнедобывающей и камнеобрабатывающей промышленности. Однако имеющиеся потенциальные возможности используются недостаточно, причем не только из-за экономического спада и плохого инвестиционного климата. В контексте современных требований комплексного использования минерального сырья и снижения техногенного пресса на окружающую среду технологии камнедобычи и камнеобработки требуют существенного совершенствования. При камнедобыче теряется значительное количество блочного камня нестандартной формы, не позволяющей использовать его под распил; более половины всей массы добываемого природного камня уходит на крупнокусковой окол. Из-за несовершенства технологий производства тесаных изделий значительное количество ценного каменного материала уходит в окол, при этом не используются мелкие блоки камня и крупнокусковой окол. Не используется такой масштабный резерв сырья для получения блоков, как негабариты на вскрытии месторождений полезных ископаемых и на щебеночных карьерах, а также валуны, являющиеся побочным продуктом при добыче песка. В то же время известно, что себестоимость блока, полученного из валуна, в 3–4 раза меньше себестоимости блока камня, добытого на карьере.

Для эффективного использования негабаритов и валунов в качестве сырья для изготовления изделий необходимы специальные технологии пассировки блоков под распил и изготовление тесаных изделий из некондиционных (по существующим требованиям) блоков. Приме-

няемые технологии обработки негабаритов и валунов способом, включающим бурение шпуров и скол с помощью металлических клиньев, трудоемки, часто их невозможно использовать, когда плоскость скола располагается под углом к слоистости. Недостатком способов является их цикличность, трудоемкость и небольшая эффективность при сложности камня. Использование пневматических молотков и термоотбойников часто неэффективно, когда приходится скалывать слои толщиной 200 мм и более. Применение термогазоструйного способа пассировки ограничено терморазрушаемыми видами природного камня.

Тесаные изделия из гранита составляют до 35–40 % от общего объема облицовочной продукции камнеобрабатывающих предприятий и потребляют до половины всего добываемого сырья. Теска камня пневматическим ударным либо ручным термическим инструментом малопродуктивна, вредна для условий труда и окружающей среды. При наличии более совершенной технологии значительная часть этих отходов могла бы быть использована для изготовления бортового камня, ступеней, парапетов, накрывных плит и пр.

Развитию производства архитектурно-строительных изделий из крепкого камня мешает использование в большом объеме ручного труда из-за отсутствия специальных машин и оборудования для высокомеханизированных поточных технологических линий. Электроимпульсный способ разрушения материалов отвечает главным требованиям современности – энергетической эффективности, комплексному использованию минерального сырья, экологической чистоте. В опытном порядке испытаны технология поверхностной обработки негабаритного и нестандартного природного камня с целью получения заготовок для последующего распила на каменную плитку и технология изготовления изделий и черновых заготовок изделий из камня с помощью технических средств на основе ЭИ (рис. 3, 4).

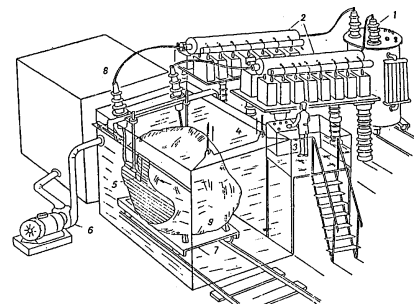


Рис. 3. Стендовая электроимпульсная установка (рисунок):

- 1 – зарядное устройство, 2 – генераторы импульсов,
- 3 – пульт управления установкой, 4 – ванна с водой,
- 5 – электродная конструкция, 6 – система циркуляции жидкости, 7 – транспортное устройство загрузки,
- 8 – буферная емкость жидкости, 9 – блок породы

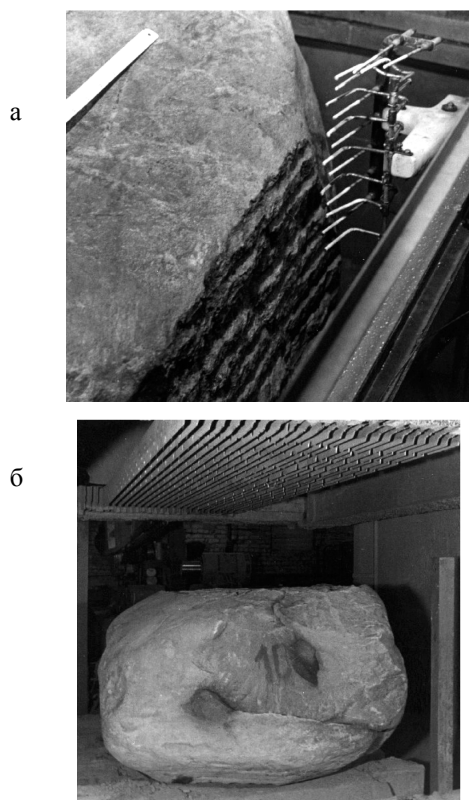


Рис. 4. Блок нестандартного валуна в процессе электроимпульсной пассивки (а) и после пассивки в распиловочном станке (б)

Удельные энергозатраты составили по граниту мелкозернистому  $4,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ , граниту крупнозернистому –  $3,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ , габбро –  $6,0 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ . Расчетная скорость обработки указанных пород соответственно оценивается в  $7,2$ ,  $9,6$  и  $5,4 \text{ м}^2/\text{ч}$ . В процессе ЭИ-обработки обеспечивается чистота поверхности блоков  $\pm 15 \text{ мм}$ . Создание такой поверхности на блоках перед их распиловкой на плиты способствует росту производительности распиловочных станков благодаря повышению устойчивости блока в станке и сокращению затрат времени на зашлифовку.

Утилизация отходов горного производства обеспечивает рациональное использование запасов природного камня, способствует более полному удовлетворению потребности строительной индустрии в тесаных и облицовочных изделиях.

#### ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНАЯ ДЕЗИНТЕГРАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ

В условиях все возрастающего объема добычи и переработки руд с ухудшением их исходного качества кардинальное решение проблем комплексного использования минерального сырья, повышения полноты извлечения полезных минералов может быть достигнуто на базе новых способов дробления и измельчения, отличающихся повышенной избирательностью разрушения, высокой селективностью раскрытия минералов.

Целесообразность применения ЭИ для дезинтеграции материалов связана главным образом с достижением исключительно значимого эффекта в улучшении качества дезинтеграции. Важнейшая особенность ЭИ-дезинтеграции – высокая селективность разрушения, обеспечиваемая благодаря ряду механизмов, свойственных многокомпонентным сред, высокую степень раскрытия зерен полезных минералов с минимальным их разрушением. Это создает реальные предпосылки для практического использования ЭИ-дезинтеграции в рудоподготовительных операциях [3].

Эффект избирательности в различной степени проявляется практически на всех типах руд, включая сильношламуемые и тонковкрапленные, и обусловлен следующими факторами.

- Избирательной направленностью канала разряда на включения полезных минералов. Включения, отличающиеся от вмещающей породы (матрицы) электропроводностью и диэлектрической проницаемостью, являются очагами локального усиления электрического поля в руде (до трехкратного по сравнению со средней напряженностью в разрядном промежутке).
- Избирательным электрическим пробоем и разрушением компоненты, имеющей более низкую электрическую прочность, которой чаще всего является вмещающая порода.
- Разупрочнением зерен минералов по границам их контакта друг с другом или с вмещающей породой при воздействии на систему высокоинтенсивной волны давления. Это особенно сильно выражено в случае, когда минералы различаются по деформационным и акустическим свойствам.

Эффект повышения селективности обеспечивает на последующих стадиях обогащения руд существенное повышение извлечения и улучшение качества концентратов.

Способ электроимпульсной дезинтеграции материалов с высокой технологической эффективностью апробирован на разных рудах с крупнокристаллическими включениями. Особенно перспективен способ для руд, при измельчении которых необходимо предохранить кристаллосырье от разрушения (драгоценные камни, пьезооптическое сырье, слюда). В традиционных производственных условиях выделение ограниченного кристаллосырья из коренных продуктивных пород чаще всего осуществляется вручную разделкой кусков руды, в которых визуальным выявлены кристаллы или которые выделены из породной массы по определенным признакам. Результаты исследований подтверждены опытно-промышленной переработкой партии сырья на комплексной установке (рис. 5), созданной совместно НИИ ВН (г. Томск), «Механообр» (г. Санкт-Петербург) и КНЦ РАН (г. Апатиты).



Рис. 5. Комплексная установка для дезинтеграции и выделения ограночного кристаллосырья (на испытательном стенде в КНЦ РАН)

При сопоставлении ЭИ-раскрытия пород с тщательной ручной разделкой, выполненной на различных рудах с кристаллами изумрудов, алмазов, рубинов, шпинели, гранатов, извлечение кристаллов при ЭИ-раскрытии оказывается в 1,5–2 раза выше с существенно лучшей их сохранностью от разрушения (рис. 6). Эффективность извлечения алмазов по ЭИ-схеме выше более чем в 2 раза (8,48 и 4,01 карат/т) по сравнению с эффективностью извлечения алмазов механическими способами. При этом извлечение крупных кристаллов (2–4 мм) также примерно в два раза выше (75 и 37 % соответственно).

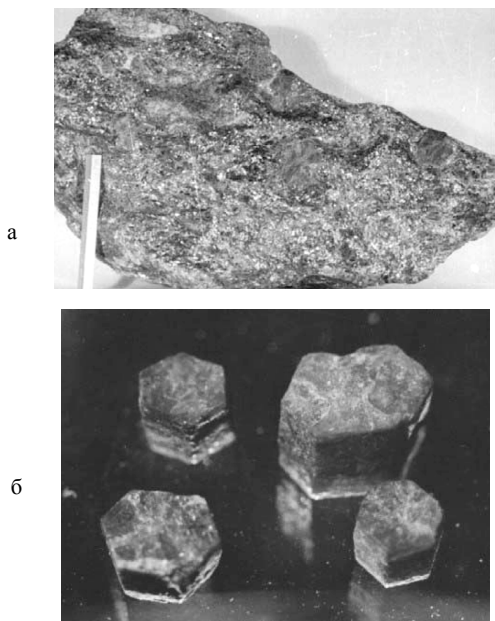


Рис. 6. Исходный образец рубиносодержащей породы (а) и кристаллы рубина, выделенные из породы электроимпульсной дезинтеграцией (б)

ЭИ-раскрытие слюдяных сростков (Мамско-Чуйское месторождение, Восточная Сибирь) в одну стадию от 250 до 50 мм по выходу забойного сырья практически соответствует тщательно-ручному раскрытию, в то время как существующая промышленная технология раскрытия сростков в механических дробилках в сравне-

нии с ручным раскрытием дает результаты хуже в 1,2–1,3 раза. Крупных кристаллов (площадь свыше 50 см<sup>2</sup>) сохраняется в 3–4 раза больше, чем при ручном раскрытии, что в стоимостном выражении соответствует повышению выхода слюды на 20–25 %. Выход мелкогабаритной слюды (+5 мм), составляющей основную массу выделенной слюды, повышается более чем в 2 раза. Изменений механических и электрических свойств мусковита под влиянием электрических разрядов не выявлено. При сравнительных испытаниях ЭИ-способа разделки слитков (диаметром 600–900 мм) искусственной слюды фтор-флогопита выход промышленного продукта (подборов слюды) при ЭИ-дезинтеграции слитков оказался в 1,3 раза выше в сравнении с технологией разделки, которая применяется на предприятии-производителе (ВНИИСИМС, г. Александров).

Способ эффективно может быть использован для получения продуктов, не загрязненных аппаратурным металлом, заданного узкого класса крупности, с минимальной окатанностью граней кристаллических частиц. Так как рабочим инструментом при электроимпульсном разрушении является искра, не возникает проблем с загрязнением продукта измельчения аппаратурным металлом, материалом мелющих тел, что свойственно механическим способам измельчения материалов. Поэтому электроимпульсное измельчение высокоабразивных материалов, особо чистых материалов предпочтительнее механического. Возможность ЭИ-способа просто и в широких пределах изменять характер динамического нагружения позволяет регулировать гранулометрический состав продукта измельчения, получать более узкий класс крупности продукта, чем это возможно при механическом измельчении. Например, это представляет интерес в технологии получения кварцевого стекла. Продукту электроимпульсного измельчения свойственна меньшая окатанность, большая удельная поверхность зерен, большее соответствие вскрытых частиц минеральных включений их исходному природному состоянию в породе (морфологии). Продукт электроимпульсного измельчения лучше передает минералогические и петрографические особенности породы, поэтому достоверность интерпретации геологической информации выше. Эти уникальные особенности процесса обуславливают целесообразность применения ЭИ в различных специальных целях с ограниченными объемами работ.

Возможности ЭИ для уменьшения энергетических затрат на дезинтеграцию материалов имеются, но они существенно ограничены по чисто физическим причинам, исключающим возможность внедрения разряда в частицы малых размеров. Однако проблема энергоемкости не является тупиковой для использования эффектов электрофизического воздействия на материалы

в процессах переработки минерального сырья. В этом отношении имеют перспективы различные варианты электроразрядного разупрочнения материала [4]. В этих процессах ставится задача избирательного разупрочнения структуры материала. В ряде случаев это является конечной целью, и технологический эффект реализуется на последующей стадии переработки минерального сырья, например в гидрометаллургическом процессе извлечения полезных компонентов. В других случаях это является подготовительным процессом для последующего механического доизмельчения материала, эффективность которого резко улучшается. В процессе рудоподготовки предварительное разупрочнение материала перед его механическим измельчением позволяет добиться значимого технологического эффекта (избирательного разрушения) при существенном ограничении энергетических затрат на обработку, составляющие не более 10–15 % от всех затрат на измельчение, позволяют добиться существенного повышения эффективности раскрытия зерен минералов почти в такой же мере, как это имеет место при электроимпульсной дезинтеграции.

Совершенствование техники формирования высоковольтных импульсов, получающей в последнее время интенсивное развитие в различных направлениях электрофизики, открывает большие возможности для электроразрядного разупрочнения материалов. Укажем на весьма впечатляющие результаты работ по подготовке к выщелачиванию пиритовых отходов и золотосодержащих концентратов с использованием техники генерирования импульсов напряжения наносекундной длительности [2], [7]. В случае обработки пиритовых отходов крупностью менее

100 мкм электрическими разрядами в жидкости импульсами напряжения наносекундной длительности электрогидроимпульсное разупрочнение позволяет переводить многие металлы (медь, цинк, железо) в растворимое состояние в воде, повышать показатели гидрометаллургического процесса. Так, извлечение золота в процессе цианирования повышается в несколько раз и достигает уровня 87 %. Существенным прорывом в данных работах явилось использование нового типа генераторов импульсов наносекундного диапазона с обрывом тока полупроводниковыми диодами. В случае обработки золото-серебросодержащего концентрата электромагнитным облучением СВЧ-диапазона импульсами наносекундного диапазона разупрочнение материала каналами незавершенного пробоя обеспечило повышение извлечения золота и серебра на десятки процентов, доведя его до уровня 70–80 % при крупности частиц 50–500 мкм. Очень важно, что режим разупрочнения с использованием многоволновых СВЧ-генераторов может быть реализован и в воздушной среде.

Комбинированное использование электроимпульсного разрушения, электроразрядного разупрочнения и традиционных механических способов разрушения расширяет варианты технологии переработки минерального сырья, открывает дополнительные возможности для повышения технологических показателей при одновременном снижении энергоемкости процессов.

Научные разработки по электроимпульсным технологиям защищены авторскими свидетельствами на изобретения и патентами (только в КНЦ РАН их более 40). Интерес к работам проявляют зарубежные организации, предложения о сотрудничестве переходят в стадию практической реализации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блазнин Б. С., Щеголев И. А., Лозин Л. И. и др. Обработка природного камня электрическими разрядами // *Электронная обработка материалов*. 1983. № 1. С. 5–7.
2. Котов Ю. А., Месяц Г. А., Филатов А. Л. и др. Комплексная переработка пиритовых отходов горно-обогаительных комбинатов наносекундными импульсными воздействиями // *ДАН*. 2000. Т. 372. № 5. С. 654–656.
3. Курец В. И., Усов А. Ф., Цукерман В. А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 324 с.
4. Усов А. Ф. Перспективы технологий электроимпульсного разрушения горных пород и руд // *Известия РАН, энергетика*. 2001. № 1. С. 54–62.
5. Усов А. Ф., Щеголев И. А., Адам В. М. Перспективные процессы для камнедобычи и камнепереработки на основе электроимпульсного способа разрушения материалов // *Добыча, обработка и применение природного камня*. Магнитогорск: МГТУ, 2002. С. 129–149.
6. Усов А. Ф., Щеголев И. А., Адам В. М. Резание и обработка поверхности блочного камня электроимпульсным способом // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. М.: МГТУ, 2002. № 11. С. 120–124.
7. Чантурия В. А., Гуляев Ю. В., Лунин В. Д. и др. Вскрытие упорных золотосодержащих руд при воздействии мощных электромагнитных импульсов // *ДАН*. 1999. Т. 366. № 5. С. 680–683.





3 августа 2011 года исполнилось 60 лет доктору медицинских наук, профессору кафедры госпитальной хирургии, заведующему курсом онкологии медицинского факультета Петрозаводского государственного университета *Ивану Егоровичу Бахлаеву*.

### **ИВАН ЕГОРОВИЧ БАХЛАЕВ К 60-летию со дня рождения**

Иван Егорович Бахлаев после окончания Ленинградского медицинского института, получив направление в Карелию, работал хирургом в Кондопожской центральной районной больнице. С 1985 года он хирург-онколог Карельского республиканского онкологического диспансера. В 1987 году прошел специализацию по торакальной хирургии на базе Ленинградского ГИДУВа, в последующем работал торакальным хирургом онкологического диспансера. В 1991 году И. Е. Бахлаев становится ассистентом кафедры хирургических болезней № 2 по курсу онкологии Петрозаводского университета. В 1993 году в Московском НИИ онкологии им. П. А. Герцена защитил кандидатскую диссертацию. С 2005 года руководит курсом онкологии медицинского факультета ПетрГУ. В 2006 году И. Е. Бахлаев защитил докторскую диссертацию в Санкт-Петербурге. В 2007 году был избран на должность профессора кафедры госпитальной хирургии по курсу онкологии. Член диссертационного совета университета по медицинским наукам.

Научным направлением исследований, проводимых И. Е. Бахлаевым, является изучение эпидемиологических, клинических и иммунологических аспектов онкологических заболеваний, разработка методов ранней диагностики злокачественных опухолей.

Иван Егорович – автор более 200 научных работ по различным вопросам онкологии, иммунологии, хирургии, организации противораковой борьбы, а также 9 учебных пособий и руководства для врачей. В течение многих лет он руководит научной работой студентов и врачей онкодиспансера, проводит подготовку врачей-хирургов по онкологии, читает лекции и проводит практические занятия на высоком теоретическом и научном уровне.

И. Е. Бахлаев является инициатором внедрения методов иммунодиагностики онкологических заболеваний в Карелии. Он один из разработчиков программы онкологического скрининга с применением маркеров опухолевого роста, что дает возможность диагностировать ранние формы опухолевого роста. Им был получен патент Российской Федерации на изобретение по диагностике злокачественных опухолей.

***Поздравляем Ивана Егоровича с юбилеем и желаем здоровья, удачи и успехов во всех начинаниях!***

## CONTENTS

## BIOLOGY

Andreev V. P., Sobolev P. S., Zaitzev D. O., Galibina N. A., Zikina N. S., Plyasunova L. Yu., Romanova M. I.

### INTERACTION OF ZN-TETRAPHENYLPORPHIN, PROPARGYL RROMIDE AND HORSERADISH PEROXIDASE WITH ANILINES

*Summary:* The article presents data on the performance of linear correlations between kinetic parameters of Zn-tetraphenylporphin process in chloroform and reactions of nucleophilic substitutions both in water and in organic solvents with anilines. Linear correlations are calculated for the reactions of anilines', oxidation caused by horseradish peroxidase in water solution. Reactions of enzymatic interaction of sterile derivatives from N-oxide pyridines and quinolines with horseradish peroxidase are described.

*Key words:* Porphyrins, coordination, nucleophilic substitution, horseradish peroxidase, heteroaromatic N-oxides . . . . . 7

Barishev I. A., Kukharev V. I.

### INFLUENCE OF DRAINAGE LAKE ON ZOOBENTHOS STRUCTURE IN RIVERS WITH FAST CURRENT (CASE STUDY OF RIVER LIZHMA, ONEGO LAKE BASIN)

*Summary:* The influence of the drainage lake on the structure and abundance of the river zoobenthos is studied. Formation of zoobenthos communities with large biomass and high quantity of filter-feeders is observed in low lake waters, which is typical for potamal. Evident consistent changes in the structure of the zoobenthos occur when the distance from the lake lengthens – the biomass and quantity of the filter-feeding species increase.

*Key words:* Zoobenthos, drainage lake, benthic communities, biomass . . . . . 16

Erokhina I. S., Elkina N. A., Markovskaja E. F.

### ENVIRONMENTAL PALINOINDICATION OF KOSTOMUKSHA

*Summary:* The level of pollution in Kostomuksha was estimated with the help of the palinoindication method. Based on the results of the analysis four zones of pollution were identified: relatively clean, moderately polluted, strongly polluted, and severely polluted zones.

*Key words:* Palinoindication, Scotch pine, Kostomukshsky mining plant, Kostomuksha, Karelia . . . . . 20

Mironov V. L., Kuznetsov O. L.

### GRASS ASSOCIATIONS ON LIMNOGENIC MIRES OF SOUTH KARELIA

*Summary:* The research results of the mesotrophic and eutrophic vegetation on limnogenic mires in South Karelia are presented in the article. 130 geobotanical descriptions were used in the data processing. 9 associations were distinguished by means of ecological and phytocoenotic methods with the use of ecological and coenotic groups.

*Key words:* Associations, ecological and coenotic groups, limnogenic mires, mesotrophic, eutrophic . . . . . 24

Ryzhkov L. P., Artem'eva N. V., Kanskaya M. A.

### TOXICITY OF CHROMIUM THREE-VALENCE FOR *DAPHNIA MAGNA* STRAUS

*Summary:* The article provides data on the effect of the three-valence chromium on *Daphnia magna*. The data are viewed as an indicator of the environmental pollution caused by heavy metals. It was established that chromium affects reproduction, growth and other functions of crustaceans. Maximum permissible level of chromium concentration for *Daphnia magna* was defined.

*Key words:* Heavy metals, three-valence chromium, concentration, toxicity, reproduction, functional load . . . . . 28

Nuzhnova O. K.

### GROWTH PECULIARITIES OF GREEN-VEINED WHITE *PIERIS NAPI* (LEPIDOPTERA, PIERIDAE) IN CONDITIONS OF NEMORAL ZONE OF RUSSIA

*Summary:* Peculiarities of the larval growth of the green-veined white *Pieris napi* (Linnaeus, 1758) in the conditions of nemoral zone of Russia are considered. The regression equations for the dynamics of the growth of the male and female larvae are submitted. Distinctions in larval growth rate of males and females are revealed. It is shown, that the weight of the males is significantly higher than that of the females at different stages of their life cycle. During the metamorphosis a decrease in the body weight of the species occurs.

*Key words:* *Pieris napi*, immature stages, growth, nemoral zone . . . . . 32

## MEDICAL SCIENCE

Abbakumova L. N., Varlamova T. V., Kuznetsova L. V.

### UNDIFFERENTIATED DYSPLASIA OF CONNECTIVE TISSUES IN CHILDREN WITH DIABETES MELLITUS

*Summary:* In the course of the 12 year-long observation period of 33 children with type 1 diabetes, moderately expressed dysplasia of connective tissues was revealed in 54,4 % of the children, and expressed dysplasia – in 39,4 % of the children. Collagen pathology is a contributing factor in diabetes development. However, there are no distinctive correlations between severity of diabetes and manifestation degree of connective tissue dysplasia .

*Key words:* Connective tissue dysplasia, type 1 diabetes, hypermobility of joints . . . . . 37

Belousova G. P., Pashkova I. G., Kolupaeva T. A., Kudryashova S. A.

### COMPONENT CHARACTERISTICS OF BODY COMPOSITION IN FEMALE STUDENTS WITH ALEXITHYMIA RADICAL IN CONDITIONS OF NORTHERN REGION

*Summary:* The focus of the research is the comparative study of the physical status and particular features of the osseous, muscular, and adipose body components' development in female students with alexithymia radical in northern region.

*Key words:* Alexithymia, anthropometry, physical status, the northern region, youthful age . . . . . 41

Gaydin I. V., Baranova J. P., Vinogradova I. A.

#### INFLUENCE OF DAYLIGHT DURATION ON INDICATORS OF ESTRAL CYCLE IN FEMALE RATS

*Summary:* The influence of the natural daylight duration in Karelia on the age dynamics indicators of the estral cycle in the rats was studied. The study lasted for two years. It was stated that the alteration of the daylight length, irrespective of the birth season of the female-rats, leads to deviations within the puberty process and to the earlier age irregularities within the estral cycle, as compared with the likewise indicators in the rats living in the standard light regime.

*Key words:* Daylight, puberty, estral cycle, rats, ontogenesis, seasonal cycle dynamics. . . . . 45

Ivshin A. A., Gumeniyk Ye. G., Shifman E. M., Yakovleva Ye. N.

#### ROLL-OVER TEST IN DIAGNOSTICS OF SEVERE PREECLAMPSIA

*Summary:* The purpose of the study is to estimate autoregulatory vascular reactions of the cerebral blood flow during the roll-over test in pregnant women with severe preeclampsia. 73 women were surveyed. Depression of the linear indicators of the doppler spectrum and changes in the values reflecting cerebral perfusion pressure and intracranial pressure, hydrodynamic resistance and cerebrovascular reactance was revealed. The data received during roll over test indicate the cerebral perfusion disturbance in pregnant women with severe preeclampsia.

*Key words:* Roll-over test, gestosis, preeclampsia, eclampsia, cerebral flow, transcranial dopplerometry. . . . . 50

Mironova Zh. A.

#### ALLELE VARIANTS OF R130Q INTERLEUKIN 13 GENE, C590T INTERLEUKIN 4 GENE, C3435T MULTIDRUG RESISTANCE GENE – MARKERS OF DEVELOPMENT RISK AND SEVERITY OF BRONCHIAL ASTHMA

*Summary:* Pathogenesis of bronchial asthma involves different functionally interrelated genes. Complex genetic testing of these genes allows evaluation of the asthma phenotype and helps to reveal important prognostic markers suggesting a severe course of the disease. Genes of interleukins 4 and 13 responsible for IgE synthesis induction and a multidrug resistance gene associated with the drug transfer seem to be the most interesting targets for such research.

*Key words:* Bronchial asthma, polymorphism, gene, interleukin 4, interleukin 13. . . . . 54

### GEOSCIENCES

Burlakov P. S.

#### THE INFLUENCE OF TECTONIC STRUCTURES OF ONEGA GRABEN ON SEVERODVINSKAYA LOWLAND LANDSCAPES

*Summary:* The paper describes features of the geomorphological structures and hydrographic network of Severodvinskaya lowland and their relation to the tectonic structure of the Onega graben. The research results indicate the high intensity in the slope and erosion processes in the areas characterized by geodynamic influence of the tectonic structures. This research work verifies the interaction processes between tectonic and geomorphological structures.

*Key words:* Structural geomorphology, tectonics, Onega graben, Severodvinskaya lowland. . . . . 58

### AGRICULTURAL SCIENCE

Moshnikov S. A., Krutov V. I.

#### ON CONDITIONS OF FORESTS IN NATURAL RESERVE “PASVIK”

*Summary:* The reconnaissance dendrological study of the forests in the State natural reserve “Pasvik” was carried out. The dominant tree diseases were revealed on the key plots of the natural reserve. The systemic condition of the stands was estimated. The dynamics of the natural reforestation within burning forest land was studied.

*Key words:* Reserve, forests, state, diseases, fire-sites. . . . . 61

Raevsky B. V.

#### PINUS SYLVESTRIS PROVENANCE TRIAL IN KARELIA

*Summary:* Data over the 30-year time span concerning growth and survival of 45 Scotch pine provenances were analyzed and generalized with the use of the standard statistical procedures. It was found that if being southward transferred, pine provenances survive better and have a higher share of specimens with cones, but grow slower when compared to the indigenous ones. The opposite pattern was revealed for the provenances originated southward of the trial location. Thus, it is worth to use seeds originated slightly southward (up to 1.3° degree in latitude) of the planting site in case we want to increase productivity of our plantation.

*Key words:* Provenance trial, Scotch pine, provenances, growth, survival. . . . . 65

### ENGINEERING SCIENCE

Afonichev D. N., Lyubavsky D. S., Belozorov V. V.

#### DISTANCE CHANGING BETWEEN ACCUMULATORS OF TIMBER CARRYING HAUL RIG ON TURNS

*Summary:* Dependence for distance definition between accumulators of the cornering timber carrying haul rig is determined. It is defined that the displacement of the bundles against accumulators when cornering is very small and reaches 2...4 cm. at the turning radius of 15 m, at the turning radius of 100 m, this shift is less than 1 cm.

*Key words:* Accumulator, distance, train, timber drag. . . . . 70

Babkin V. A.

#### HEAT EXCHANGE IN TURBULENT FLOW OF INCOMPRESSIBLE FLUID IN PLANE CHANNEL WITH CONSTANT WALL TEMPERATURE

*Summary:* The heat exchange in the head steady turbulent flow between parallel planes (plane channel) is considered based on the wall anisotropic turbulence model. The equal wall temperature problem was solved numerically by the Galerkin's method. The solution of the problem is compared with experimental data.

*Key words:* Near wall flow, core flow, turbulent viscosity, turbulent heat conductivity, Galerkin's method. . . . . 72

Vasiliev A. S., Yershov A. V.

## FEATURES OF PATENT SEARCH FOR TRANSPORTATION AND STORAGE CONTAINERS WITH NUCLEAR WASTES

*Summary:* The article presents the results and peculiarities of the patent search strategies, accomplished within the frames of the multipurpose project, aimed to create hi-tech resource-saving industry. Such industry should allow production of the modern, competitive, and environmentally safe nuclear wastes transportation and storage containers for domestic and foreign markets.

*Key words:* Nuclear wastes, patent search, transportation and storage set, transportation and storage containers for spent nuclear fuel. . . . . 78

Ajukaev R. I., Grafova E. O.

## ABOUT WATER SUPPLY AND WATER REMOVAL FEATURES OF COUNTRY LEISURE CAMPS (CASE STUDY ON THE REPUBLIC OF KARELIA)

*Summary:* The development of the country leisure camps and cottage buildings' construction aggravate sanitary conditions of the recreational zones. The article is concerned with the conditions of the operation and optimization of the water supply and water removal systems at the country leisure camp functioning for a few years. The conclusions presented in the article were drawn based on the real data and implementations of the authors

*Key words:* Irregular mode of the water consumption, features of the fire-prevention water consumption, optimization of the sewer treatment facilities . . . . . 81

Shley M. D., Borisov A. Yu.

## DEVELOPMENT AND COMPUTER IMPLEMENTATION OF MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATION OF INSOLATION DURATION IN BUILDINGS

*Summary:* The article contains a description of the model for computing insolation duration of the lodging structures. This model is implemented as a software system which is aimed to conduct historical and architectural analysis of the planning structure of the traditional rural settlements in the Russian North. The goal of the analysis is to reveal tendency to south facing housing.

*Key words:* Mathematical model, sun trajectory, sun graph, insolation, lighting duration, settlement planning. . . . . 87

### PHYSICS AND MATHEMATICS

Poikolainen V. V., Sigovtsev G. S.

## DETAILED MODEL OF STRUCTURED POPULATION DYNAMICS

*Summary:* The detailed age model of the population is offered, and a model of the stage population on its basis is developed. The algorithm of numerical analysis of the population stability is offered. The application of the models for the problem of the herd circulation in agricultural animals is shown.

*Key words:* Matrix model of structured population, projective matrix, problem of herd circulation . . . . . 91

Karavaev A. M.

## THE NUMBER OF PREHAMILTON CYCLES IN PRODUCT LATTICES

*Summary:* New recurrences are obtained for the number of simple cycles of the length which is less than that of Hamilton cycles by one (so-called "prehamilton" cycles) in product graphs  $P_{2m+1} \times P_{2n+1}$ . It is shown that asymptotics for the number of such cycles and Hamilton cycles in  $P_{2m+1} \times P_{2n}$  are different. The numbers of maximum length cycles on square grids  $P_{2n+1} \times P_{2n+1}$  are calculated for each  $n = 1, 2, \dots, 10$ .

*Key words:* Transfer matrix method, cycles in lattice . . . . . 97

Gogolev A. E., [Khakhaev A. D.], Shtikov A. S.

## CURRENT MODULATION EFFECTS IN GLOW DISCHARGE COMPLEX PLASMA WITH ORDERED DUSTY STRUCTURES

*Summary:* The article deals with the effects resulting from the longitudinal electric field modulation in glow discharge complex plasma by means of adding minor harmonic oscillations on the breakdown current in the gas gap. The possibility of applying this method with the purpose of managing plasma dusty structures in glow discharge plasma was researched.

*Key words:* Dusty plasma, glow discharge, dusty ordered structures, harmonic oscillations . . . . . 103

Danilov S. V., Fofanov A. D.

## SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBES MODELS' CONSTRUCTION AND THEIR ATOM COORDINATES' CALCULATION

*Summary:* Carbon nanotubes are structures characterized by unique physical properties determined by their internal constitution. Depending on the relative position of the atoms in nanotubes, different types of such structures can be defined. Methods, according to which we can calculate atom coordinates and build all kinds of single-walled carbon nanotubes, are given in this article. By using these models, researchers can identify nanotube existence in test specimens and calculate their physical properties.

*Key words:* Carbon nanotubes, construction algorithm, structure, atom coordinates . . . . . 109

### All-Russian seminar for young Russian scientists "Problems of Electrodischarge Processing Application in the Industry of Nonesystems and Nanomaterials"

Usov A. F.

## EXPERIENCE IN DEVELOPING TECHNIQUES AND TECHNOLOGIES OF ELECTRIC PULSE DESTRUCTION OF MATERIALS

*Summary:* The results of the development of the technique and technology of electric-drilling, cutting of rocks during technological processes of tunneling cracks in blocks, cutting of stone blocks, surface cleaning of massif and stone blocks disintegration of ores, and technical materials are presented in the article.

*Key words:* Electric pulse destruction, drilling of boreholes, cutting of rocks, the disintegration of ores. . . . . 115

### JUBILATION

To the 50<sup>th</sup> anniversary of I. Ye. Bakhlaev . . . . . 121